

**Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e
Infraestrutura**

Marinês Silvani Novello

**Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na
determinação das pressões externas locais nas paredes e
coberturas de um pavilhão industrial**

Porto Alegre
2020

MARINÊS SILVANI NOVELLO

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO DOS
EFEITOS DE ESCALA NA DETERMINAÇÃO DAS PRESSÕES
EXTERNAS LOCAIS NAS PAREDES E COBERTURAS DE
UM PAVILHÃO INDUSTRIAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de
Doutor em Engenharia

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

Prof. Zacarias M. Chamberlain Pravia
Dr. Engenharia Civil Universidade Federal
Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil
Coorientador

Porto Alegre
2020

MARINÊS SILVANI NOVELLO

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO DOS
EFEITOS DE ESCALA NA DETERMINAÇÃO DAS PRESSÕES
EXTERNAS LOCAIS NAS PAREDES E COBERTURAS DE
UM PAVILHÃO INDUSTRIAL**

Esta Tese de doutorado foi julgada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL, área de pesquisa Construção, e aprovada em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 2020.

Prof. Acir Mércio Loredou-Souza
Orientador

Ph.D. University Western Ontario, Canadá

Orientador

Prof. Zacarias M. Chamberlain Pravia

Dr. Engenharia Civil Universidade Federal do
Rio de Janeiro UFRJ, Brasil

Coorientador

Prof. Angela Borges Masuero

Coordenadora do PPGCI/UFRGS, Doutora pela UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Jose Luis Vital de Brito (UnB)

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Adrián Roberto Wittwer (UNNE)

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Gustavo Javier Zani Núñez (UFRGS)

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Angela Borges Masuero (UFRGS)

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dr. Mario Gustavo Klaus Oliveira (Vento-S)

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Ao meu esposo Idalgo “maninho” pelo apoio, paciência e carinho;
E a Deus pelo dom da vida, saúde e perseverança,
dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Orientador e Amigo, Prof. Acir Mércio Loredou-Souza, de uma forma maneira muito especial, pela sábia colaboração, amizade de mais de 15 anos, confiança, apoio, aprendizado e paciência em esclarecer minhas dúvidas e me acalmar durante a realização deste trabalho.

Ao meu Coorientador e Amigo Prof. Zacarias Chamberlain Pravia, pelo apoio, aprendizado, amizade de mais de 20 anos, confiança, prestatividade e incentivo para buscar esse objetivo.

À Equipe do Laboratório de Aerodinâmica das Construções – LAC, Paulo Francisco Bueno, e Roges de Mari Leopoldo, pelo suporte na montagem e instrumentação dos modelos reduzidos e na realização dos ensaios experimentais em túnel de vento deste trabalho.

Ao meu esposo, Idalgo Mário Novello, pela paciência, apoio e confiança durante o desenvolvimento deste trabalho e pelas viagens para Porto Alegre até a UFRGS (túnel de vento). O meu pedido de desculpas pela ausência constante para conciliar trabalho e estudos.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGCI, pelo conhecimento transmitido. E, a Prof^{ra}. Ângela Masuero, Coordenadora do PPGCI, Prof. Carlos Formoso e a Secretária Karolline Silveira, pela prestatividade e esclarecimento dos procedimentos envolvidos para Pré-Qualificação, Qualificação e Defesa desta Tese.

À Banca Examinadora de Pré-Qualificação, Qualificação e Defesa desta Tese: Prof. Gustavo Núñez, Prof. Adrián Wittwer, Prof^{ra}. Ângela Masuero, Prof. Mauro Real, Dr Mário Oliveira e Prof. Jose Luis Vital de Brito.

Aos Bolsistas Voluntários da IMED, Eng^a Camila Berta e Eng^o William Pol, por todo o trabalho realizado, pela amizade e apoio em momentos de muito cansaço e estresse;

À Equipe da Faculdade Meridional IMED: Direção por conciliar programação de carga horária com o Dinter; Prof^{ra}. Caroline Silva e Prof^{ra}. Elvira Lantelme pela organização do Dinter e por disponibilizar Bolsistas Voluntários para auxiliar na execução da pesquisa; Rafael Kaiser e Prof. Evandro Soffiatti do Laboratório de Engenharia e Arquitetura da Imed pela execução dos modelos reduzidos dos pavilhões em MDF para execução dos ensaios.

Aos meus familiares, amigos, colegas do Dinter e todos aqueles que de forma direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

“Toda mente é um cofre, não tente arrombá-la. Use a ferramenta correta. Exercite a sua inteligência. Faça escolhas, e saiba que todas as escolhas têm perdas. Ao esconder, não tenha medo de falhar. Ao falhar, não tenha medo de chorar. Ao chorar, repense sua vida, mas não desista. Dê sempre uma nova chance para si mesmo. Se a sociedade o abandona, a solidão é suportável! Mas, se você mesmo se abandona, ela é intolerável! Gerencie seu estresse, proteja sua emoção. Saiba que: Drama e comédia, risos e lágrimas fazem parte da vida. Não tenha medo: quem vence sem riscos, vence sem glória. Jamais abra mão de ser o autor da sua própria história. A vida é um contrato de risco. Os frágeis o lamentam, os fortes começam tudo de novo.”

(Augusto Cury)

RESUMO

NOVELLO, M. S. **Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial.** 2020. Defesa de Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

Os pavilhões industriais sendo construídos atualmente possuem dimensões muito maiores daquelas previstas nos ensaios da norma brasileira ABNT NBR 6123 vigente. Embora apresentem proporções de geometria dentro das especificadas pelo método normativo, a relação entre escala geométrica de uma determinada edificação e escala de turbulência é distinta. Existe então, uma necessidade de atualizar os parâmetros aerodinâmicos para o cálculo de pressões, de forma a adequar as escalas de turbulência para as configurações de galpões atualmente projetados. Dentro deste contexto, com referências às normas ABNT NBR 6123:1988, ASCE/SEI 7-16:2016, EN-1991-1-4:2010, AS/NZS 1170.2:2011 e NBCC:2015, este trabalho avalia, por meio de ensaios experimentais em túnel de vento, o comportamento aerodinâmico de três modelos reduzidos de um mesmo pavilhão, o qual possui cobertura em duas águas com grandes dimensões, de baixa altura e baixa inclinação do telhado, ensaiados nas escalas geométricas 1:400, 1:200 e 1:100. Baseado nos resultados, concluiu-se que a escala da turbulência tem grande influência nos resultados das pressões, sendo o detalhamento da análise apresentado no corpo do trabalho. É apresentada uma proposta para aprimorar o procedimento da NBR 6123:1988 quanto à determinação dos coeficientes de pressão externa locais devidos ao vento, podendo assim contribuir para um melhor desempenho da vida útil de componentes estruturais e revestimentos.

Palavras-chave: Túnel de Vento; Coeficientes de pressão; Vento; Escala da turbulência; Pavilhões industriais.

ABSTRACT

NOVELLO, M. S. **Experimental wind tunnel investigation on the scale effects over local external pressures on the walls and roofs of an industrial building**. 2020. Thesis Defense (Doctoral Science in Civil Engineering) - Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, Engineering School, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

Industrial buildings currently being built have dimensions much larger than those considered in the current Brazilian standard ABNT NBR 6123. Although their geometry proportions are within those specified by the normative method, the relationship between the geometric scale of a given building and the turbulence scale is distinct. There is, therefore, a need to update the aerodynamic parameters for the calculation of pressures for the currently designed building configurations. Within this context, with references to ABNT 6123:1988, ASCE/SEI 7-16:2016, EN-1991-1-4:2010, AS/NZS 1170.2:2011 and NBCC:2015 standards, this work evaluates, by experimental wind tunnel tests, the aerodynamic behavior of three building models of the same building, having a gable roof with large dimensions, low height and low roof pitch, tested in geometric scales 1:400, 1:200 e 1:100. Based on the results, it was concluded that the turbulence has a great influence on the pressure determination, being the analysis detailing presented in the text. A proposal is presented with the aim to improve the NBR 6123:1988 procedure regarding local external pressure coefficients determination, contributing for a better performance of the service life of structural components and claddings.

Keywords: Wind Tunnel; Pressure Coefficients; Wind; Turbulence Scale; Industrial Buildings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pavilhão industrial (a) e Cobertura de posto de gasolina (b) em Torres – RS	32
Figura 2 - Percentual de produção de estruturas de aço por região do Brasil	33
Figura 3 – Acidentes com galpões industriais devido ao vento: Galpão Indaiatuba de São Paulo - 2005 (a), Galpões para armazenamento de grãos - 2005 (b), Cobertura metálica de Tramandaí no Rio Grande do Sul – 2009- (c), Galpão Cajamar de São Paulo – 2014 (d).....	33
Figura 4 – Cobertura de centro automotivo de São José dos Pinhais.....	34
Figura 5 – Ginásios e galpões em Tubarão-SC	34
Figura 6 – Destelamento e queda de galpões em Tubarão – SC (a, b, c)	34
Figura 7 – Galpão de reciclagem de Aparecida de Goiânia - GO	35
Figura 8 – Propriedades às margens da RS-463 em Coxilha - RS	35
Figura 9 – Pressões em modelos de galpões a duas águas planas	40
Figura 10 – Pressões em pressão ao longo do eixo longitudinal de uma das águas em telhados de duas águas (ensaio do LAC)	44
Figura 11 – Coeficientes de pressão locais em telhados a duas águas – Ensaio no LAC	45
Figura 12 – Dimensões dos modelos e coeficientes de pressão de pico negativos em relação a escala e exposição	47
Figura 13 – Modelo com parapeitos nos cantos e na cumeeira em túnel de vento...54	
Figura 14 – Valores máximos de coeficientes de pressão externa globais e locais para sete diferentes direções de incidência do vento.....	55
Figura 15 – Distribuição dos coeficientes de pressão negativa de pico obtidos através de ensaios em túnel de vento no contorno do telhado incluindo pressões dos beirais para vento na direção de 45 graus.....	56
Figura 16 - Modelos em túnel de vento: A= Galpão com cobertura plana, B = Galpão com ângulo de inclinação do telhado de 18,4 graus, C = Galpão com ângulo de inclinação de 45 graus, D = Alturas testadas	57
Figura 17 - Comparação de valores experimentais com normas para coeficientes de pressão do vento para revestimentos	59
Figura 18 – (a) Modelo de galpão de baixa altura e grandes comprimentos, (b) Modelo típicos da edificação com escala reduzida em túnel de vento: 60m, 120m e 180 metros e (c) Relações de geometria para determinação dos coeficientes de pressão.	61
Figura 19 - Zonas de probabilidades de falhas no contorno da cobertura	62
Figura 20 – Determinação do comprimento de rugosidade z_0	69
Figura 21 – Ilustração interpretativa da interação entre turbilhões de grandes dimensões e uma edificação: (a) Vista transversal; (b) Vista longitudinal.....	71

Figura 22 – Ilustração interpretativa da interação entre turbilhões de pequenas dimensões e uma edificação: (a) Vista transversal; (b) Vista longitudinal.....	72
Figura 23 – Densidades espectrais da variância (espectros de potência)	73
Figura 24 – escoamento do vento em edificações de baixa altura	75
Figura 25 – Separação do escoamento em edificações com arestas vivas	75
Figura 26 – Distribuição das pressões médias em telhados inclinados	77
Figura 27 – Vórtices cônicos para vento com incidência oblíqua.....	78
Figura 28 - Curvas isobáricas com vento oblíquo (ensaios em lowa por Chien et al; 1951).....	79
Figura 29 – Influência da forma do escoamento nas pressões	79
Figura 30 - Forças tangenciais em pavilhões profundos	80
Figura 31 – Formato do escoamento – telhado 30°, 45° e 60° (ensaios de Irminger e Nökkentved).....	80
Figura 32 – Classificação da construção de acordo com a sua proporção: profunda e alargada	81
Figura 33 – Perfis de pressão nas paredes e coberturas (ensaio de lowa, 1951).....	82
Figura 34 - Representação da localização das zonas de atuação dos coeficientes de pressão e de forma externos para paredes de edificações de planta retangular	92
Figura 35 - Representação da localização das zonas de atuação dos coeficientes de pressão e de forma externos para telhados com duas águas simétricos em edificações de planta retangular	94
Figura 36 – Coeficientes de pressão externos com pico de rajada, $C_{gC_{pe}}$, em paredes individuais para o projeto de elementos estruturais secundários e de revestimento – edificações com cobertura em duas águas	100
Figura 37 - Coeficientes de pressão externos com pico de rajada, $C_{gC_{pe}}$, em telhados com uma inclinação de 7° ou menos para o projeto de componentes estruturais e revestimento de cobertura duas águas	101
Figura 38 - Coeficientes de pressão externa para componentes e revestimentos de paredes de edificações fechadas e parcialmente fechadas com ($h \leq 18,3m$) - $C_{gC_{pe}}$	107
Figura 39 - Coeficientes de pressão externa para componentes e revestimentos de coberturas em duas águas com e sem beiral para edificações fechadas e parcialmente fechadas para $\theta \leq 7^\circ$ com ($h \leq 18,3m$) - $C_{gC_{pe}}$	108
Figura 40 - Representação da localização das zonas para coeficientes de pressão externa $C_{pe,1}$ e $C_{pe,10}$ em paredes verticais.....	115
Figura 41 - Representação da localização das zonas para coeficientes de pressão externa de coberturas de edificações em duas águas	116
Figura 42 – parâmetros de edificações retangulares fechadas.....	123
Figura 43 - Fatores de pressão local k_1	127
Figura 44 - Semelhanças	131

Figura 45 – Estudos em modelos.....	132
Figura 46 – Vista externa da câmara de ensaios do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul	136
Figura 47 – Esquema do circuito aerodinâmico do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul	138
Figura 48 – Mesa giratória II do Túnel de Vento do Prof. Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.....	138
Figura 49 – Dispositivos de geração das diferentes camadas limites do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann: (a) grelha; (b) $p = 0,11$; (c) $p = 0,23$; (d) $p = 0,34$	140
Figura 50 – Perfis de velocidade média, intensidade e escala da componente longitudinal da turbulência, para o eixo vertical de duas seções de ensaio do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann	140
Figura 51 – Tomadas de pressão: (a) Furações para passagem das tomadas de pressão; (b) Instalação de tomadas de pressão.....	142
Figura 52 – Gaveta de teste de sucção.....	142
Figura 53 – Registro instantâneo da pressão devida ao vento: valor médio, rms e extremos.....	143
Figura 54 – Instrumentos de aquisição de dados do Túnel de Vento Prof Joaquim Blessmann: (a) Transdutores de pressão; b: Manômetro diferencial digital <i>Manoair</i> ; c: Termômetro digital; d: Barômetro.....	145
Figura 55 - Esquema da geometria dos pavilhões - Dimensões em metros	145
Figura 56 – Modelos de galpões reduzidos para ensaios nas escalas 1:400, 1:200 e 1:100	147
Figura 57 – Posição e numeração das tomadas de pressão no quadrante do modelo reduzido na escala 1:400. Dimensões em centímetros.....	149
Figura 58 – Posição e numeração das tomadas de pressão no quadrante do modelo reduzido na escala 1:200. Dimensões em centímetros.....	150
Figura 59 – Posição e numeração das tomadas de pressão no quadrante do modelo reduzido na escala 1:100. Dimensões em centímetros.....	151
Figura 60 – Inserção das tomadas nas furações de cada superfície	152
Figura 61 – Fixação do modelo a mesa de ensaio II (a) e representação do perfil de velocidade de expoente $p = 0,23$ (b)	152
Figura 62 – Modelos reduzidos no túnel de ensaio Prof. Joaquim Blessmann nas escalas 1:400 (a), 1:200 (b) e 1:100 (c)	153
Figura 63 – Ângulos de incidência dos ventos sobre os modelos reduzidos de ensaio	154
Figura 64 – Pressões dinâmicas (kN/m^2) sobre velocidades médias máximas.....	161
Figura 65 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepção e Sucção] nas paredes e telhado - NBR 6123:1988. Dimensões em metros	164
Figura 66– Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepção e Sucção] nas paredes e telhado - NBCC:2015. Dimensões em metros.....	165

Figura 67 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepessão e Sucção] nas paredes e telhado – ASCE/SEI 7-16:2016. Dimensões em metros	166
Figura 68 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepessão e Sucção] nas paredes e telhado - EN 1991-1-4:2010 (Maior Valor). Dimensões em metros	167
Figura 69 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepessão e Sucção] nas paredes e telhado - EN 1991-1-4:2010 (0° e 90°). Dimensões em metros	168
Figura 70 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepessão e Sucção] nas paredes e telhado - AS/NZS 1170.2:2011. Dimensões em metros	169
Figura 71 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 0° - Escala geométrica 1:400	180
Figura 72 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 15° - Escala geométrica 1:400	181
Figura 73 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 30° - Escala geométrica 1:400	182
Figura 74 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 45° - Escala geométrica 1:400	183
Figura 75 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 60° - Escala geométrica 1:400	184
Figura 76 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 75° - Escala geométrica 1:400	185
Figura 77 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 90° - Escala geométrica 1:400	186
Figura 78 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 0° - Escala geométrica 1:200	187
Figura 79 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 15° - Escala geométrica 1:200	188
Figura 80 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 30° - Escala geométrica 1:200	189
Figura 81 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 45° - Escala geométrica 1:200	190
Figura 82 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 60° - Escala geométrica 1:200	191
Figura 83 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 75° - Escala geométrica 1:200	192
Figura 84 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 90° - Escala geométrica 1:200	193
Figura 85 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 0° - Escala geométrica 1:100	194
Figura 86 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 15° - Escala geométrica 1:100	195
Figura 87 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 30° - Escala geométrica 1:100	196

Figura 88 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 45° - Escala geométrica 1:100	197
Figura 89 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 60° - Escala geométrica 1:100	198
Figura 90 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 75° - Escala geométrica 1:100	199
Figura 91 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 90° - Escala geométrica 1:100	200
Figura 92 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios] para ângulo 0°	201
Figura 93 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios] para ângulo 15°	202
Figura 94 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios] para ângulo 30°	203
Figura 95 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios] para ângulo 45°	204
Figura 96 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios] para ângulo 60°	205
Figura 97 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios] para ângulo 75°	206
Figura 98 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios] para ângulo 90°	207
Figura 99 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios + 3,5RMS] para ângulo 0°	208
Figura 100 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios + 3,5RMS] para ângulo 15°	209
Figura 101 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios + 3,5RMS] para ângulo 30°	210
Figura 102 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios + 3,5RMS] para ângulo 45°	211
Figura 103 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios + 3,5RMS] para ângulo 60°	212
Figura 104 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios + 3,5RMS] para ângulo 75°	213
Figura 105 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios + 3,5RMS] para ângulo 90°	214
Figura 106 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Mínimo] para ângulo 0°	215
Figura 107 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Mínimo] para ângulo 15°	216
Figura 108 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Mínimo] para ângulo 30°	217

Figura 109 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Mínimo] para ângulo 45°	218
Figura 110 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Mínimo] para ângulo 60°	219
Figura 111 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Mínimo] para ângulo 75°	220
Figura 112 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Mínimo] para ângulo 90°	221
Figura 113 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Máximo] para ângulo 0°	222
Figura 114 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Máximo] para ângulo 15°	223
Figura 115 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Máximo] para ângulo 30°	224
Figura 116 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Máximo] para ângulo 45°	225
Figura 117 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Máximo] para ângulo 60°	226
Figura 118 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Máximo] para ângulo 75°	227
Figura 119 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Máximo] para ângulo 90°	228
Figura 120 – Legenda de representação da pressão externa local.....	233
Figura 121 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES] nas paredes e telhado – NBR 6123:1988 e Túnel de Vento. Dimensões em metros.....	234
Figura 122 – Pressões externas locais [SUCÇÕES] nas paredes e telhado – NBR 6123:1988 e Túnel de Vento. Dimensões em metros	235
Figura 123 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES] nas paredes e telhado – NBCC:2015 e Túnel de Vento. Dimensões em metros	236
Figura 124 – Pressões externas locais [SUCÇÕES] nas paredes e telhado – NBCC:2015 e Túnel de Vento. Dimensões em metros	237
Figura 125 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES] nas paredes e telhado – ASCE/SEI 7-16:2016 e Túnel de Vento. Dimensões em metros.....	238
Figura 126 – Pressões externas locais [SUCÇÕES] nas paredes e telhado – ASCE/SEI 7-16:2016 e Túnel de Vento. Dimensões em metros.....	239
Figura 127 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES] nas paredes e telhado – EN 1991-1-4:2010 (Maior Valor) e Túnel de Vento. Dimensões em metros	240
Figura 128 – Pressões externas locais [SUCÇÕES] nas paredes e telhado – EN 1991-1-4:2010 (Maior Valor) e Túnel de Vento. Dimensões em metros.....	241
Figura 129 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES] nas paredes e telhado – EN 1991-1-4:2010 (0° e 90°) e Túnel de Vento. Dimensões em metros	242

Figura 130 – Pressões externas locais [SUCÇÕES] nas paredes e telhado – EN 1991-1-4:2010 (0° e 90°) e Túnel de Vento. Dimensões em metros	243
Figura 131 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES] nas paredes e telhado – AS/NZS 1170.2:2011 e Túnel de Vento. Dimensões em metros.....	244
Figura 132 – Pressões externas locais [SUCÇÕES] nas paredes e telhado – AS/NZS 1170.2:2011 e Túnel de Vento. Dimensões em metros	245
Figura 133 – Diagrama de distribuição das zonas de pressões externas locais de parede e telhado	250
Figura 134 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCÇÕES] nas paredes laterais (kN/m ²).....	252
Figura 135 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCÇÕES] nas paredes laterais (kN/m ²).....	253
Figura 136 - Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCÇÕES] nas paredes laterais (kN/m ²).....	254
Figura 137 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCÇÕES] nas paredes laterais (kN/m ²).....	255
Figura 138 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCÇÕES] nas paredes laterais (kN/m ²).....	256
Figura 139 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCÇÕES] nas paredes laterais (kN/m ²).....	257
Figura 140 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCÇÕES] no telhado (kN/m ²)	258
Figura 141 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCÇÕES] no telhado (kN/m ²)	259
Figura 142 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCÇÕES] no telhado (kN/m ²)	260
Figura 143 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCÇÕES] no telhado (kN/m ²)	261
Figura 144 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCÇÕES] no telhado (kN/m ²)	262
Figura 145 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCÇÕES] no telhado (kN/m ²)	263
Figura 146 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCÇÕES] no telhado (kN/m ²)	264
Figura 147 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCÇÕES] no telhado (kN/m ²)	265
Figura 148 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCÇÕES] no telhado (kN/m ²)	266
Figura 149 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCÇÕES] no telhado (kN/m ²)	267
Figura 150 – Dimensão das zonas das paredes por norma	272

Figura 151 – Dimensão das zonas do telhado por norma	273
Figura 152 – Dimensão das zonas do telhado por norma	274
Figura 153 – Representação da distribuição das zonas de pressões externas locais e critérios de determinação das respectivas dimensões em metros no formato de perspectiva (a) e no formato planificado (b). Proposta para a NBR-6123.....	278

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Dimensões dos galpões de baixa altura projetados por Indústrias de construção metálica – Região Sul do Brasil	38
Tabela 02 – Coeficientes de pressão externa locais mínimos.....	41
Tabela 03 – Coeficientes de pressão externa locais na água de barlavento	41
Tabela 04 – Parâmetros meteorológicos b, p e $F_{r,II}$	87
Tabela 05 - Coeficientes de pressão e de forma externos para paredes de edificações de planta retangular	91
Tabela 06 - Coeficientes de pressão e de forma externos para telhados com duas águas simétricos em edificações de planta retangular.....	93
Tabela 7 – Fator de importância da carga de vento, I_w	96
Tabela 8 – Categoria de risco	103
Tabela 9 - Categorias e Parâmetros do terreno	112
Tabela 10 - Valores recomendados para coeficientes e pressão externa para paredes verticais de plantas de edificações retangulares.....	114
Tabela 11 - Valores recomendados para coeficientes de pressão externa de telhados planos.....	116
Tabela 12 – Definição do nível de importância.....	119
Tabela 13 – Multiplicador do terreno/altura para rajadas de vento em terrenos completamente desenvolvidos – estados limites últimos de projeto – Regiões A/B/W, C/D	120
Tabela 14 – Paredes: Coeficientes de pressão externa ($C_{p,e}$) para edificações retangulares fechadas - parede de barlavento (W)	124
Tabela 15 - Paredes: Coeficientes de pressão externa ($C_{p,e}$) para edificações retangulares fechadas - parede de sotavento (L).....	124
Tabela 16 – Paredes: Coeficientes de pressão externa ($C_{p,e}$) para edificações retangulares fechadas - paredes laterais (S).....	125
Tabela 17 – Cobertura: Coeficientes de pressão externa ($C_{p,e}$) para edificações retangulares fechadas – Lateral inclinada barlavento (U), e lateral inclinada a sotavento (D) e (R) para cobertura duas águas, para $\alpha < 10^\circ$	125
Tabela 18 - Fator de pressão local K_f	126
Tabela 19 – Classificação dos perfis potenciais de velocidade média pela NBR 6123:1988	141
Tabela 20 – Dimensões dos galpões industriais, em metros	146
Tabela 21 – Dimensões em escala real e reduzida do pavilhão industrial modelo (60x100) metros	146
Tabela 22 – Parâmetros da máxima velocidade média (velocidade básica do vento V_0)	157

Tabela 23 – Parâmetros para determinação das pressões: NBR 6123:1988, NBCC:2015 e ASCE:2016	159
Tabela 24 – Parâmetros para determinação das pressões: EN 1191-1-4:2010 (Maior Valor, 0° e 90°) e AS/NZS 1170.2:2011	160
Tabela 25 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepessão] das paredes .	170
Tabela 26 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepessão] do telhado	170
Tabela 27 – Coeficientes de pressão externa locais [Sucção] das paredes	171
Tabela 28 – Coeficientes de pressão externa locais [Sucção] do telhado	171
Tabela 29 – Altura do modelo reduzido por escala geométrica para expoente $p = 0,23$	176
Tabela 30 – Equações de determinação da pressão devidas ao vento	232
Tabela 31 – Escalas geométricas mais comuns por tipo de pressão:sucção ou sobrepressão em paredes e telhado	247
Tabela 32 – Dimensões de zonas de borda e cantos por norma do pavilhão de estudo em metros	277
Tabela 33 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepessão e Sucção] obtidos em túnel de vento em paredes de edificações de planta retangular com $h \leq 20$ metros	280
Tabela 34 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepessão e Sucção] obtidos em túnel de vento em telhados com duas águas, simétricos com $\theta \leq 3^\circ$ em edificações de planta retangular e $h \leq 20$ metros.....	281
Tabela 35 – Pressões externas locais [Sobrepessão e Sucção] obtidas em túnel de vento nas paredes de edificações de planta retangular com $h \leq 20$ metros: kN/m^2	282
Tabela 36 – Pressões locais externas [Sobrepessão e Sucção] obtidas pelo túnel de vento em telhados com duas águas, simétricos com $\theta \leq 3^\circ$ em edificações de planta retangular e $h \leq 20$ metros: kN/m^2	283
Tabela 37 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepessão e Sucção] para paredes de edificações de planta retangular com $h \leq 20$ metros determinadas pela NBR 6123:1988	284
Tabela 38 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepessão e Sucção] para telhados com duas águas, simétricos com $\theta \leq 3^\circ$ em edificações de planta retangular e $h \leq 20$ metros determinadas pela NBR 6123:1988.....	284
Tabela 39 – Pressões externas locais [Sobrepessão e Sucção] para paredes de edificações de planta retangular com $h \leq 20$ metros, determinadas pela NBR 6123:1988: kN/m^2	285
Tabela 40 – Pressões externas locais [Sobrepessão e Sucção] para telhados com duas águas, simétricos com $\theta \leq 3^\circ$ em edificações de planta retangular e $h \leq 20$ metros determinadas pela NBR 6123:1988: kN/m^2	285
Tabela 41 – Coeficientes de pressões externas locais [Sobrepessão e Sucção] para paredes de edificações de planta retangular com $h \leq 20$ metros	286

Tabela 42 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepessão e Sucção] para telhados com duas águas, simétricos com $\theta \leq 3^\circ$ em edificações de planta retangular e $h \leq 20$ metros	286
---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT NBR 6123:1988: Forças devidas ao vento em edificações

ASCE/SEI 7-16:2016: *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Building and other structures*

AS/NZS 1170.2:2011: *Standard New Zealand / Australia: Structural Design Actions Part 2 – Wind Actions*

a: lado maior: a maior dimensão horizontal de uma edificação. Para ASCE/SEI 7-16:2016, “a” corresponde a largura da zona de pressão local das paredes da edificação

A: área da superfície

b: lado menor: a menor dimensão horizontal de uma edificação. Para a EN 1991-1-4:2010 e AS/NZS 1170.2:2011, b corresponde a maior dimensão horizontal em planta da edificação. Para NBR 6123:1988, b = parâmetro meteorológico usado na determinação do S_2 dependendo das categorias e classe de rugosidade da superfície do terreno

\bar{c} : coeficiente de pressão externa médio local

$\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS}$: coeficiente de pressão externa local: médio + 3,5 RMS

\hat{c} : coeficiente de pressão externa local de pico máximo

\check{c} : coeficiente de pressão externa local de pico mínimo

C_e : para a NBCC:2015 e EN 1991-1-4:2010, C_e = fator de exposição que reflete as mudanças na velocidade do vento devido à altura h, bem como, os efeitos de construções adjacente e da topografia da região. Para a NBR 6123:1988, C_e = coeficiente de forma externo: $C_e = F_e/qA$

c_{dir} : fator direcional

c_{dyn} : fator de resposta dinâmica

CFD: *Computational Fluid Dynamic*

c_{fig} : fator de forma aerodinâmico do vento, obtido pela combinação de pressões internas e externas nas edificações fechadas = $(c_{fig,e} - c_{fig,i})$

c_g : fator de efeito de rajada externo que reflete a intensidade da turbulência do vento para o lugar como uma função de altura e da rugosidade da superfície em torno do terreno e das propriedades do prédio, como a altura, largura, frequência natural de vibração e amortecimento

$c_g c_{pe}$: coeficiente de pressão externa com o fator de pico de rajada incorporado

$c_g c_{pi}$: coeficiente de pressão interna com o fator de pico de rajada incorporado

c_{gi} : fator de efeito de rajada interno

c_o : fator orográfico

c_p : coeficiente de pressão: $c_p = c_{pe} - c_{pi}$

$c_{pe} = \bar{c}$: coeficiente de pressão externa médio

c_{pe} : coeficiente de pressão externa: $c_{pe} = \Delta p_e / q$

c_{pi} : coeficiente de pressão interna: $c_{pi} = \Delta p_i / q$

c_{pe} médio: coeficiente de pressão local pela NBR 6123:1988

$c_{pe,1}$: coeficiente de pressão externo local

$c_{pe,10}$: coeficientes de forma externo (global)

c_{pm} : coeficiente de pressão no ponto n do modelo

$c_{r(z)}$: fator de rugosidade que estabelece a variabilidade da velocidade média na estrutura

c_{scd} : fator estrutural: produto do fator de tamanho pelo fator dinâmico respectivamente

c_{season} : fator da estação

c_t : fator topográfico

D: diâmetro do protótipo e do modelo

d: profundidade da edificação (comprimento) na direção paralelo ao vento. Para a EN 1991-1-4:2010 e AS/NZS 1170.2:2011, d = a menor dimensão horizontal em planta da edificação

E: elevação do local acima do nível médio do mar

e: parâmetro para determinar as dimensões das zonas de atuação da pressão local e de forma (global) em parede e telhado através da EN 1991-1-4:2010

EN 1991-1-4:2010: *European Standard Norme Euroéenne Europaiche Norm*

F: força estática do vento em uma superfície plana de área A, perpendicular à respectiva superfície

f: frequência adimensional

F_e : força externa à edificação, agindo em uma superfície plana da área A, perpendicularmente à respectiva superfície

f_{pico} = pico do espectro normalizado da componente de turbulência

F_r : fator de rajada sempre correspondente a categoria II na NBR 6123:1988

g: fator de rajada

h e H: altura da edificação acima do terreno, medida até o nível do beiral, ou centro de um dos caimentos do telhado ou até a cumeeira. A referência desta altura depende do critério específico de cada norma técnica e maiores informações são apresentados no capítulo 03 desta tese

$h(z)$: altura de observação (medição) do espectro

i = componente V_i do vetor rajada na posição do ponto (r)

k: constante de von kármán = 0,4 ou razão entre pressão efetiva da edificação e pressão efetiva do modelo

k_a : fator de redução da área

k_c : fator de combinação de ações devido à pressão do vento agindo na combinação de uma superfície de uma edificação fechada

$k_{c,e}$: fator de combinação aplicado para pressões externas

$k_{c,i}$: fator de combinação aplicado para pressões internas

k_d : fator de direcionalidade do vento que depende do tipo e formato das construções

k_e : fator de elevação do solo para ajuste da densidade do ar

k_l : fator de pressão local

k_p : fator de redução para revestimento poroso

k_r : fator do terreno, conforme comprimento da rugosidade

k_{zt} : fator topográfico que leva em conta o efeito da aceleração do vento, oriunda do relevo, no cálculo da carga de vento.

k_z ou k_h : fator de exposição da pressão dinâmica para classificação de exposição (A, B, C, D e exceções) baseado na rugosidade da superfície do solo que é determinada a partir da topografia natural, vegetação e instalações construídas

$k_{(z_{ref})}$: parâmetro obtido da correlação para a cota em escala correspondente a altura em metros do modelo reduzido Z_{ref} (adimensional)

k_1 : fator de turbulência

k_1 , k_2 e k_3 : fatores topográficos de multiplicação da exposição tipo “C” para obter o fator k_{zt} , fatores que levam em conta: a forma das características topográficas e o efeito da pressão dinâmica máxima, a redução da velocidade com a distância contra o vento e da redução da velocidade com a altura acima do terreno local.

KHz: quilo-hertz

l : dimensão característica do modelo

$l_i(r) = I_u$: intensidade local da turbulência

$l_{io}(r)$: intensidade normalizada da turbulência

L : para a NBR 6123, L é a altura ou largura (dimensão horizontal perpendicular à direção do vento) da superfície frontal de uma edificação para a determinação do intervalo de tempo t . Para resultados desta tese, L corresponde a dimensão da zona de pressão externa local em parede e telhado

L_m : comprimento do modelo

L_p : comprimento do protótipo

L_u : macroescala da componente longitudinal da turbulência

$l_{v(z)}$: a intensidade de turbulência à altura z

l_w : fator de importância da carga do vento para estados limites últimos (ELU) ou de serviço (ELS)

$L_{1,1}$: escala longitudinal de turbulência: dimensão característica da turbulência na direção 1,1

m : vida útil da edificação, em anos

M_d : multiplicador da direção do vento para 8 direções cardinais (β)

M_h : multiplicador da forma da colina, para cada direção cardinal, considerando a seção topográfica mais adversa que ocorre em uma faixa de $22,5^\circ$ de cada lado da direção cardinal considerada

M_{lee} : multiplicador de efeitos da topografia

M_s : multiplicador de proteção/blindagem (obstáculos)

M_t : multiplicador topográfico

$M_{z,cat}$: multiplicador de altura do terreno

NBCC:2015: *National Building Code of Canada*

p : pressão obtida com velocidades sobre determinado intervalo de tempo. Para a NBR 6123:1988, $p =$ expoente da lei potencial de variação do S_2 , ou seja, parâmetro meteorológico

usado na determinação do S_2 dependendo das categorias e classe de rugosidade da superfície do terreno. Para NBCC:2015 e AS/NZS 1170.2:2011, p = a pressão externa, considerada positiva quando a pressão atua em direção a superfície e negativa quando esta atua sentido contrário a superfície

\bar{p} : pressão obtida com velocidades médias do vento de 1 hora para o período de amostragem t

\hat{P} : pressão devida ao vento

p_d : pé direito livre da edificação

p_{atm} : pressão atmosférica no momento do ensaio (mm Hg)

P_m : probabilidade de uma certa velocidade do vento ser excedida pelo menos uma vez em um período de m anos

p_{max} : pressão obtida pela soma da velocidade média com o produto entre o fator de rajada e o desvio padrão de 1 hora para o período de amostragem t

p_{ref} : pressão estática de referência experimental

\hat{p}_{RMS} : média quadrática das flutuações em torno da pressão média = pressão obtida com velocidades de pico RMS (*root mean square*) de 1 hora para o período de amostragem t

p^t : pressão total no ponto de verificação (ponto de ensaio)

p_0 : pressão na condição normal = 760mmHg = 1013,25 mm.c.c = 101325 Pa

q : pressão dinâmica do vento

q_b : pressão dinâmica de referência do vento

$q_h = q_z$: pressão de dinâmica avaliada na altura média do telhado e na altura z respectivamente

q_p : pressão dinâmica de pico: pressão dinâmica média somado a contribuições de pressões flutuantes de curta duração

q_r : pressão dinâmica da edificação real

q_m : pressão dinâmica do modelo

$q(z_{ref})$: pressão dinâmica no ponto da altura z de referência experimental

\hat{q}_{3s} : pressão dinâmica de pico com medições da máxima velocidade média sobre 3s

\bar{q}_{600s} : pressão dinâmica com medições da máxima velocidade média sobre 600s

\bar{q}_{3600s} : pressão dinâmica com medições da máxima velocidade média sobre 3600s (1 hora)

$\hat{q}_{3s} \bar{c}$: coeficiente médio e pressão dinâmica de pico para máxima velocidade média sobre 3s

$\hat{q}_{600s} \bar{c}$: coeficiente médio e pressão dinâmica de pico para máxima velocidade média sobre 600s (10 minutos)

$\bar{q}_{3600s}(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$: coeficiente médio + 3,5 coeficiente RMS (*root mean square*) e pressão dinâmica média para máxima velocidade média sobre 1 hora (3600s)

$\bar{q}_{3600s}\hat{c}$: coeficiente de pico máximo e pressão dinâmica média para máxima velocidade média sobre 1 hora (3600s)

$\bar{q}_{3600s}\check{c}$: coeficiente de pico mínimo e pressão dinâmica média para máxima velocidade média sobre 1 hora (3600s)

r : relação de aspecto da edificação: altura média do telhado (h) dividido pela menor das dimensões entre b , d .

R: intervalo de recorrência média = inverso da probabilidade anual de excedência da velocidade do vento para estados limites últimos ou de serviço que é maior ou menor de 50 anos

Re: número de Reynolds

RMS (*root mean square*): média quadrática: valor positivo da raiz quadrada do valor quadrado médio. Em Engenharia do Vento, é usualmente considerado como equivalente ao desvio padrão (média zero)

S₁: fator topográfico

S₂: fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação ou parte da edificação em estudo, e de sua altura sobre o terreno

S₃: fator baseado em conceito probabilístico: fator estatístico devido ao uso da construção

S_i(f): densidade espectral da velocidade do vento

S_j: área sob a respectiva curva de correlação cruzada normalizada: dimensões entre os pontos na direção (longitudinal, lateral e ou vertical) de uma escala espacial de turbulência da componente V_i na direção j

t: instante de tempo ou intervalo de tempo e a ser usado na obtenção da velocidade média do vento que incide em uma edificação

T_e: temperatura na câmara no momento do ensaio: $T_e = 273,2 + t$ (°C)

t_m e t_p: tempo de medição das velocidades do modelo e do protótipo respectivamente

TV: túnel de vento

T₀: temperatura na condição normal = 15°C = 288,2K

U, D, R: superfície a barlavento, sotavento e (cumeeiras e beiral) do telhado respectivamente pela AS/NZS 1170.2:2011

V: velocidade do ar no ponto em estudo (média do vento)

V_b: valor de referência da velocidade básica do vento, definida como uma função da direção do vento, a uma vez ao ano, a 10 metros acima do nível do terreno correspondente a categoria II para a EN 1991-1-4:2010

V_{b,0}: valor característico fundamental da velocidade média do vento referida a períodos de 10 minutos para a EN 1991-1-4:2010

V_{des,0}: velocidade de projeto do vento ortogonal à edificação, a um ângulo de 0°, 90°, 180°, 270° determinada em função da altura (z)

V_i: componente do vetor rajada

V_k: velocidade característica do vento: $V_k = V_0 S_1 S_2 S_3$

V_m: velocidade média do vento. Para estudos em túnel e vento V_m = velocidade do modelo

V_R: pressão dinâmica regional para 3s de rajada, em m/s, para uma probabilidade anual de excedência de 1/R para a AS/NZS 1170.2:2011

V_p: velocidade do protótipo

$\bar{V}(r)$: velocidade local de referência

V_r: Velocidade de referência da edificação real

V_{ref}: velocidade normalizada de referência. Velocidade média do vento no ponto de referência experimental

$V_{sit,B}$: velocidade regional para todas as direções cardinais que é baseada na rajada de 3 segundos, para a probabilidade anual de exceder de $1/R$

$V_{t(h)}$: velocidade média do vento sobre t segundos em uma altura h acima do terreno

\bar{V}_Z : perfil de velocidades média em lei de potência e em lei logarítmica na altura z a 10 metros para campo aberto e 30 metros para centros urbanos sendo a medição em relação ao nível do solo

$\bar{V}(z)/f$: comprimento de onda: metros por ciclo

\bar{V}_{Zref} : perfil de velocidades média em lei de potência e em lei logarítmica na altura z de referência sendo a medição em relação ao nível do solo

V_0 : velocidade básica do vento: velocidade de uma rajada de 3s, excedida na média uma vez em 50 anos, a 10 metros acima do terreno, em campo aberto e plano para a NBR 6123:1988

y : largura das zonas do c_{pe} médio (coeficientes de pressão local) de acordo com a NBR 6123:1988

z : cota acima do terreno. Para NBCC:2015, “ z ” corresponde a largura da zona de pressão local das paredes e do telhado.

z_d : espessura da subcamada interfacial ou microcamada da camada limite atmosférica chamada de deslocamento do plano zero que corresponde à altura média dos edifícios.

z_g : altura da camada limite acima do terreno

z_{min} : altura mínima

z_{max} : altura máxima

z_{ref} : altura de referência da rugosidade do terreno em relação ao nível do solo

z_o : altura média da rugosidade do terreno ou rugosidade aerodinâmica. Para a EN 1991-1-4:2010, z_o = comprimento de rugosidade

$z_{0,II}$: comprimento da rugosidade = 0,05, conforme a categoria II do terreno para a EN 1991-1-4:2010

W, L, S: superfície a barlavento, sotavento e laterais de paredes respectivamente pela AS/NZS 1170.2:2011

λ_f : fator de escala de frequência

λ_L : fator de escala de comprimento ou escala geométrica

λ_T : fator de escala de tempo

λ_v : fator de escala de velocidade

μ : viscosidade dinâmica do fluido

u^* : velocidade de corte = medida da declividade do perfil logarítmico na parede pois depende de τ_0

$\sigma_i(r)$: desvio padrão local das flutuações da velocidade

ρ, ρ_{ar}, ρ_0 : massa específica do ar admitido com valor constante em condições normais de pressão (ρ_0) e temperatura (T_0) = 1,2249 kg/m³

σ_y : desvio padrão do período de amostragem t

σ_v : desvio padrão da turbulência do vento

Δp : pressão efetiva em um ponto na superfície de uma edificação: $\Delta p = \Delta p_e - \Delta p_i$

Δp_a : pressão diferencial registrada entre os anéis piezométricos durante os ensaios

Δp_e : pressão efetiva externa: diferença entre a pressão atmosférica em um ponto na superfície externa da edificação e a pressão atmosférica do vento incidente, a barlavento da edificação, na corrente de ar não perturbada pela presença de obstáculos

Δp_i : pressão efetiva interna: diferença entre a pressão atmosférica em um ponto na superfície interna da edificação e a pressão atmosférica do vento incidente, a barlavento da edificação, na corrente de ar não perturbada pela presença de obstáculos

Δp_r : pressão efetiva no ponto n da edificação real

Δp_m : pressão efetiva no ponto n do modelo

θ : ângulo de inclinação do telhado em graus, medido no plano horizontal, a partir do eixo 0x e no sentido horário. Exceto para norma EN 1991-1-4:2010 onde Θ = ângulo de incidência do vento

α : ângulo de incidência do vento, medido entre a direção do vento e o lado maior da edificação. Para a NBCC:2015, α = ângulo de inclinação do terreno (colinas e escarpas). Exceto para a EN 1991-1-4:2010 onde α = ângulo de inclinação do telhado

ν : viscosidade cinemática do ar

$\overline{\Delta p_e}$, $3,5 \widehat{\Delta p_e (RMS)}$, $\widehat{\Delta p_e}$, $\widetilde{\Delta p_e}$: pressão estática efetiva externa local (média, média +3,5RMS, pico máximo e pico mínimo) no ponto em estudo no instante t respectivamente, dada pela diferença entre a pressão estática medida no ponto em estudo (p) e a pressão estática de referência experimental (p_{ref})

ν : viscosidade cinemática do ar na temperatura média do ensaio

$\Delta S_{m\acute{a}x}$: parâmetro para velocidades máximas que dependem da forma e inclinação da colina ou escarpa respectivamente

1, 2, 3 = eixos de direções; x, y, z: coordenadas.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVA	31
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	39
1.3	OBJETIVOS.....	64
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	65
2	AÇÃO DO VENTO EM PAVILHÕES INDUSTRIAIS	68
2.1	CARACTERÍSTICAS DO VENTO NATURAL.....	68
2.1.1	Perfil vertical de velocidades médias	68
2.1.2	Intensidade da turbulência	70
2.1.3	Escala da turbulência	71
2.1.4	Espectro da turbulência	72
2.2	VENTO EM EDIFICAÇÕES BAIXAS	73
2.2.1	Coefficiente de pressão.....	73
2.2.2	Ações locais	74
2.2.3	Proporções e formas.....	81
2.2.4	Pressões internas	83
3	PRESCRIÇÕES NORMATIVAS	84
3.1	ABNT NBR 6123:1988 – FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES	84
3.1.1	Velocidade básica do vento (V_0).....	85
3.1.2	Fator topográfico (S_1)	85
3.1.3	Fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (S_2)	85
3.1.3.1	Quanto a rugosidade	86
3.1.3.2	Quanto as dimensões da edificação	86
3.1.4	Fator estatístico (S_3)	88
3.1.5	Velocidade característica do vento (V_k).....	89
3.1.6	Pressão dinâmica (q).....	89
3.1.7	Pressões internas	89
3.1.8	Pressões externas.....	90
3.1.8.1	Coefficientes de pressão externa para paredes de planta retangular	90

3.1.8.2	Coeficientes de pressão e de forma externos para telhados com duas águas simétricos em edificações de planta retangular	90
3.2	NBCC:2015 NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA	94
3.2.1	Velocidade do vento e pressão dinâmica	95
3.2.2	Pressão resultante (p).....	95
3.2.3	Fator de rajada externo c_g e fator de rajada interno c_{gi}	97
3.2.4	Coeficiente de pressão interna (c_{pi}).....	98
3.2.5	Coeficiente de pressão externa (c_{pe}).....	99
3.3	ASCE/SEI 7-16:2016 – MINIMUM DESIGN LOADS AND ASSOCIATED CRITERIA FOR BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES ..	
	102
3.3.1	Velocidade básica do vento.....	102
3.3.2	Pressão dinâmica (q_z).....	103
3.3.3	Pressão resultante do vento para edifícios baixos (p)	104
3.3.4	Coeficiente de pressão interna ($c_g c_{pi}$)	104
3.3.5	Coeficiente de pressão externa ($c_g c_{pe}$).....	105
3.3.5.1	Coeficientes de pressão para estrutura secundária e revestimentos.....	106
3.4	EUROPEAN STANDARD NORME EUROÉENNE EUROPAISCHE NORM - EN 1991-1-4:2010+A1	109
3.4.1	Velocidade e pressão dinâmica do vento.....	109
3.4.2	Pressão resultante do vento (p)	113
3.4.3	Coeficiente de pressão interna (c_{pi}).....	113
3.4.4	Coeficiente de pressão externa (c_{pe}).....	113
3.4.4.1	Paredes	113
3.4.4.2	Telhado	114
3.5	STANDARD NEW ZEALAND / AUSTRALIA: STRUCTURAL DESIGN ACTIONS PART 2 - WIND ACTIONS: AZ/NZS 1170.2:2011	117
3.5.1	Velocidade básica e pressão dinâmica do vento	117
3.5.1.1	Multiplicador Direcional do Vento (M_d)	119
3.5.1.2	Multiplicador de Terreno/Altura ($M_{z,cat}$).....	119
3.5.1.3	Multiplicador de Proteção (M_s)	120
3.5.1.4	Multiplicador Topográfico (M_t).....	121
3.5.2	Fator de forma aerodinâmica (c_{fig}).....	121
3.5.3	Coeficientes e pressão interna para edificações retangulares	122
3.5.4	Coeficientes e pressão externa para edificações retangulares.....	123

3.5.5 Fator de pressão local (k_l) para revestimentos	125
3.5.6 Fator de redução de área (k_a) para telhados e paredes	127
3.5.7 Fator de redução da permeabilidade do revestimento (k_p).....	127
3.5.8 Fator de combinação de ação (k_c).....	127
4 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO	129
4.1 INTRODUÇÃO	129
4.2 TEORIA DA SEMELHANÇA.....	129
4.3 TÚNEIS DE VENTO.....	134
4.3.1 Tipos de túneis.....	135
4.3.2 Túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.....	136
4.3.2.1 Características do túnel de vento	136
4.3.2.2 Dispositivos de simulação do vento natural	138
4.3.2.3 Sistema de aquisição de dados	141
4.4 DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE ESTUDO	145
4.4.1 Geometria do modelo.....	145
4.4.2 Características de ensaio em túnel de vento	146
5 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	155
5.1 RESULTADOS NORMATIVOS.....	155
5.1.1 Características e processamento de resultados analíticos	155
5.1.2 Pressões dinâmicas	158
5.1.3 Coeficientes de pressão local	162
5.1.2.1 Análise dos resultados para o exemplo de estudo da tabela 20	171
5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO TÚNEL DE VENTO.....	174
5.2.1 Processamento dos dados de ensaio.....	174
5.2.2 Linhas isobáricas de coeficientes de pressões externas locais	178
5.2.2.1 Grupo A: Conjunto de coeficientes de pressão externa locais para mesma escala geométrica.....	179
5.2.2.2 Grupo B – Conjunto de coeficientes de pressão externa locais para diferentes escalas geométricas.....	179
5.2.3 Análise dos resultados.....	229
5.3 COMPARATIVO: RESULTADOS NORMATIVOS E EXPERIMENTAIS	231
5.3.1 Processamento e resultados das pressões.....	231
5.3.2 Análise dos resultados.....	246

5.4	DIAGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DAS PRESSÕES.....	249
5.4.1	Discretização das zonas	249
5.4.2	Pressões externas locais de paredes e telhados – normas e túnel de vento	251
5.4.3	Análise dos resultados.....	268
5.4.4	Dimensões das zonas para paredes e telhado	270
5.4.5	Proposta para determinação de coeficientes de pressão por zona.....	275
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	288
	REFERÊNCIAS	291

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o contexto e a justificativa da escolha do tema desta pesquisa.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

Na engenharia civil busca-se projetar edificações com menor consumo de materiais e adaptadas para maior rapidez de execução. Diante disso, a procura por soluções de sistemas estruturais e de revestimentos que apresentem maior eficiência na indústria da construção tem aumentado muito.

As normas e manuais técnicos necessitam acompanhar essa evolução de mudança na construção civil para produzir estruturas seguras e econômicas. A NBR 6123:1988 passa por um processo de revisão após 30 anos de sua publicação, embora seja considerada uma das mais completas do mundo (LOREDO-SOUZA, 2016).

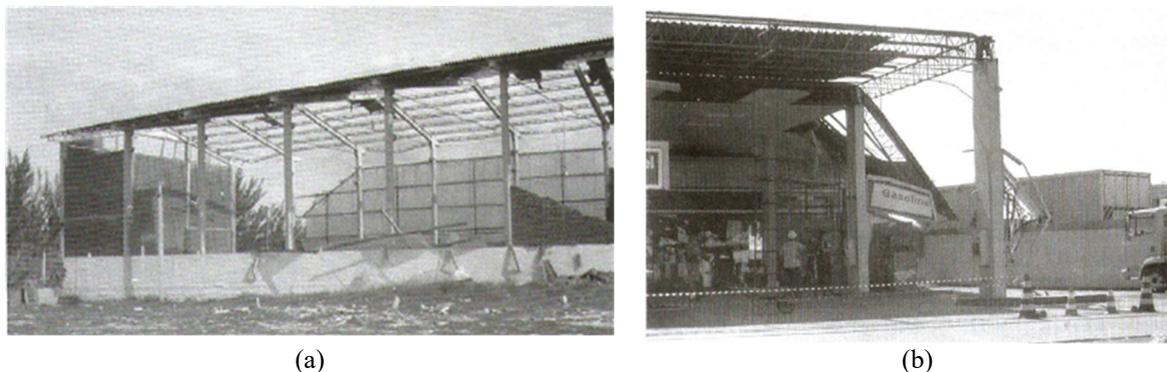
O aumento da qualidade e da resistência de materiais tradicionais como o aço e o concreto, o surgimento de materiais mais leves, novas técnicas construtivas, novos modelos estruturais e novas formas geométricas, possibilitam executar construções mais arrojadas e eficientes (Pitta, 2014). Entretanto, o mesmo autor menciona a ocorrência de diversos acidentes devidos ao vento em edificações por estas apresentarem menor qualidade e menor resistência. Também menciona que alguns projetistas e construtoras, em projetos de edifícios de pequeno porte, na maioria das vezes não consideram os efeitos aerodinâmicos.

Gonçalves, Sales, Malite e Neto (2004), indicam que a causa dos acidentes decorrentes da ação do vento nas edificações se dá por constantes erros, que partem do projeto até a execução, iniciando desde a determinação dos coeficientes de pressão e da pressão de obstrução, assim como na concepção estrutural, dimensionamento dos elementos, compreendendo em casos de estruturas leves de aço e ou madeira, a execução incorreta da ligação das terças com a estrutura principal e ou com as telhas. Pitta (2014) também enquadra as causas patológicas estruturais geradoras de acidentes na presença de vento como erros de projeto, fabricação e montagem sendo a manifestação destas patologias evidenciadas por meio do arrancamento de telhas, terças

arremessadas com as telhas, rompimento de ancoragem de tesouras ocasionando o arrancamento de todo o telhado, dentre outros.

Acidentes graves ocorreram em pavilhões industriais na cidade de Torres, no Rio Grande do Sul, em 2004, com ventos oriundos de ciclones extratropicais (Blessmann, 2013a), os quais provocaram o arrancamento de telhas da cobertura e das fachadas e colapso de alguns elementos estruturais (figura 1).

Figura 1 – Pavilhão industrial (a) e Cobertura de posto de gasolina (b) em Torres – RS

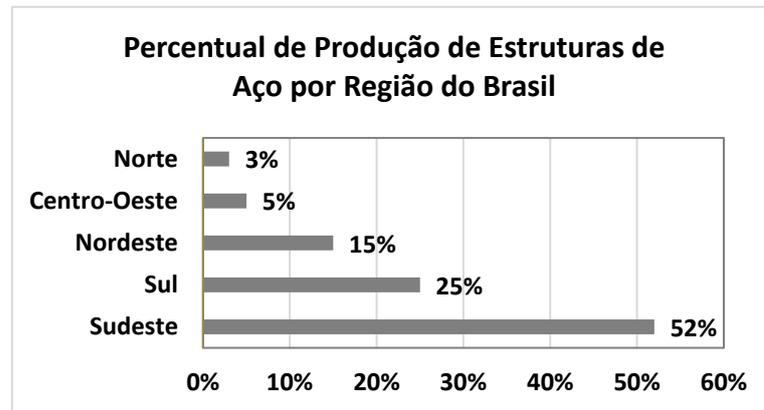


Fonte: Blessmann (2013a).

Makowski (2004) reforça que grande parte dos acidentes causados pela ação do vento em edificações são verificados em edificações leves com grandes vãos livres, como pavilhões de feiras de exposições, pavilhões industriais, depósitos de cereais, armazéns para portos, galpões para uso agrícolas, etc.

Pitta (2014) afirma que as construções mais usadas e mais vulneráveis aos acidentes devidos ao vento são os pavilhões compostos por pórticos estruturais metálicos de baixo consumo de aço, com telhado em forma de arco ou em duas águas pelo fato de possuírem menor resistência ao esforço de cargas de vento, mesmo estando o carregamento do vento desconsiderado ou considerado de forma inadequada. A figura 2 mostra os percentuais da produção de estruturas de aço por região do Brasil, onde dentre os elementos estruturais produzidos são incluídos pórticos para projetos de pavilhões industriais.

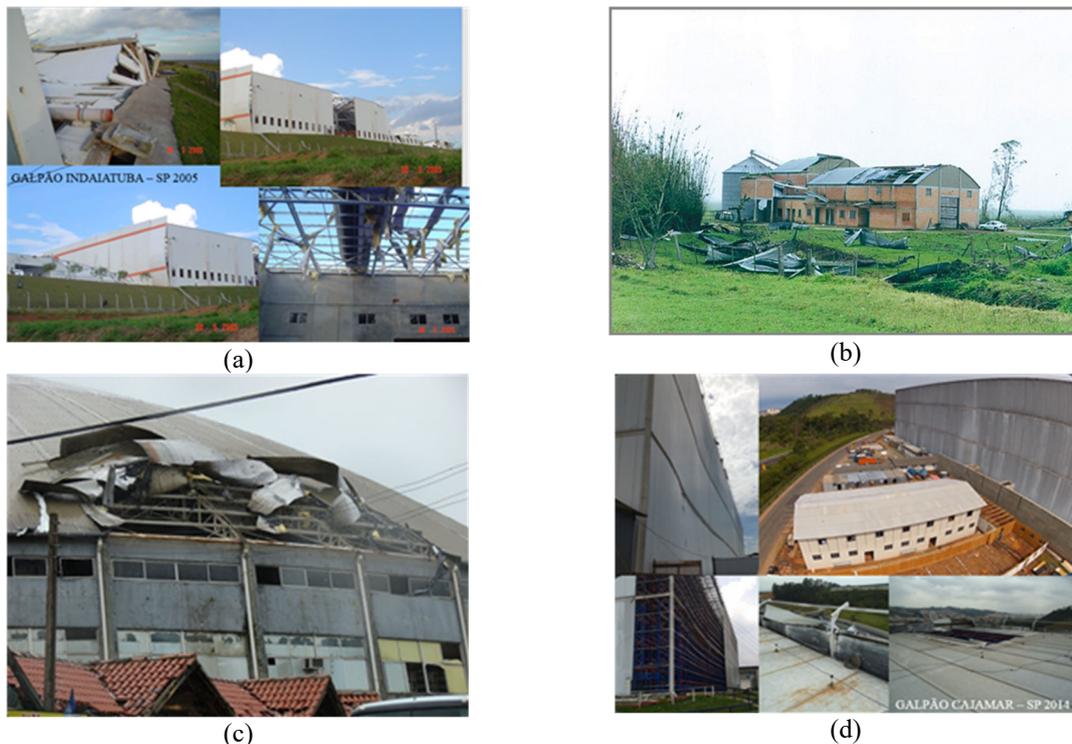
Figura 2 - Percentual de produção de estruturas de aço por região do Brasil



Fonte: ABCEM e CBCA (2017).

As figuras 3 (a, b, c, d), 4, 5, 6 (a, b, c), 7 e 8, mostram exemplos de acidentes em galpões industriais por destelhamentos e colapsos estruturais de pavilhões em situações de exposição ao vento.

Figura 3 – Acidentes com galpões industriais devido ao vento: Galpão Indaiatuba de São Paulo - 2005 (a), Galpões para armazenamento de grãos - 2005 (b), Cobertura metálica de Tramandaí no Rio Grande do Sul – 2009- (c), Galpão Cajamar de São Paulo – 2014 (d)



Fonte: LAC – Laboratório de Aerodinâmica das Construções (2019).

Figura 4 – Cobertura de centro automotivo de São José dos Pinhais



Fonte: Gazeta do povo (2016).

Figura 5 – Ginásios e galpões em Tubarão-SC



Fonte: G1 (2016).

Figura 6 – Destelamento e queda de galpões em Tubarão – SC (a, b, c)



(a)



(b)



Fonte: Rocha e Botega (2017).

Figura 7 – Galpão de reciclagem de Aparecida de Goiânia - GO



Fonte: G1 (2017).

Figura 8 – Propriedades às margens da RS-463 em Coxilha - RS



Fonte: GaúchaZH (2018).

Vendavais com origem em núcleos convectivos intensos acontecem em todo o Brasil e em especial na região sul (MARCELINO, 2003). De todos os 2.757 registros oficiais de vendavais no país, entre os anos de 1991 e 2012, 2.133 ocorreram no sul do país representando 77% de ocorrências de desastres no Brasil (ATLAS BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS: 1991 A 2012, 2013).

Blessmann (2013a) relata que devido ao ciclone Catarina foram danificadas cerca de 25 mil casas, várias com destruição total, telhado arrancados, árvores quebradas e tombadas, vidraças rompidas, esquadrias lançadas para dentro de construções, queda de torres de transmissão de energia elétrica, arrancamento de telhado e bombas de combustível de postos de gasolina, plantações totalmente afetadas, contabilizaram-se ainda, 74 pessoas levemente feridas e uma morte, embarcações naufragadas e ou outras danificadas, ocasionando prejuízos com valores

avaliados em aproximadamente 16 milhões de reais no Rio Grande do Sul e de 1 bilhão de reais em Santa Catarina.

De acordo com as figuras mostradas, inúmeros acidentes têm acontecido em razão dos efeitos do vento, inclusive levando ao colapso elementos estruturais e revestimentos de construções. Como diz Blessmann (2009), o colapso em geral, inicia-se por uma falha local. Como forma de precaução contra estes danos, o Brasil dispõe da norma ABNT NBR 6123:1988 que fixa as condições exigíveis na consideração das forças estáticas e dinâmicas do vento, para efeitos de cálculo de edificações. Entretanto, é importante avaliar as causas dos acidentes em relação aos critérios de projetos estabelecidos nos códigos normativos de engenharia do vento para indicar a necessidade de alterações.

Nas últimas duas décadas foram construídos pavilhões industriais com cobertura em duas águas de baixa altura com dimensões muito maiores que as usuais. Como exemplo disso, Ginger e Holmes (2003) dizem que os pavilhões construídos com sistemas de pórticos estruturais, paredes leves de concreto e coberturas revestidas com telhas metálicas, para armazenamento de materiais e processos industriais, geralmente são longos com larguras maiores de 30 metros e comprimentos excedendo 100 metros.

A norma brasileira admite, em seu Anexo A, especificações de projeto referentes às pressões devidas ao vento para toda a edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 80 metros, porém somente em relação aos turbilhões. Não há menção específica em relação aos coeficientes aerodinâmicos para pavilhões de grandes dimensões.

Um outro levantamento quanto à geometria foi realizado com empresas do ramo da construção metálica, fabricantes de pavilhões industriais em estruturas de aço mostrado na tabela 01. Nesta tabela são apresentadas as configurações de pavilhões industriais baixos mais usadas por seis empresas da construção metálica que fazem parte dos 25% dos fabricantes da região Sul do Brasil, consideradas dentre as de maior porte da região por ABCEM e CBCA (2017) na figura 02.

Observa-se, pelas informações da tabela 01, que as dimensões mínimas de largura geralmente adotadas estão entre 30 a 50 metros e que para o comprimento, a dimensão mais comumente usada é de 100 a 150 metros, todos de baixa altura e com inclinações de telhado menores de 3°.

Desta forma, dependendo das dimensões de largura e comprimento utilizadas no projeto, podem ser obtidos valores de relações de comprimento/largura que se enquadram e outras que estão acima das proporções previstas na norma brasileira vigente.

Para Blessmann (2009) determinadas formas e proporções dimensionais conduzem a sucções muito altas tanto em telhados como em paredes quando o vento incide paralelamente à cumeeira. Complementa ainda dizendo que, sendo o pavilhão profundo, com uma razão de comprimento/largura maior que 4, ocorre um recolamento do escoamento que se separou nas arestas da fachada de barlavento e foi lançado para as laterais provocando uma redução das sucções ao longo das paredes e da cobertura, podendo surgir pequenas sobrepressões.

Percebe-se a necessidade de estudos adicionais que contemplem a incorporação, na norma brasileira NBR 6123:1988, de geometrias de uso mais atual, reproduzindo o comportamento aerodinâmico do vento para as configurações de galpões industriais de grandes dimensões e baixas inclinações de telhado.

Existem alternativas técnicas de projeto como as normas internacionais ASCE/SEI 7-16:2016, EN-1991-1-4:2010, AS/NZS 1170.2:2011 e NBCC:2015, que são referências mundiais para determinação de esforços de vento, além de ensaios em túnel de vento com modelos reduzidos. Os dois métodos podem mostrar os valores das sucções e sobrepressões locais que estão submetidos os elementos estruturais e revestimentos. Todavia, não são todas as normas que estipulam critérios específicos para prédios baixos de grandes dimensões e algumas determinam coeficientes de pressão externa locais através de ábacos sem levar em conta razões entre comprimento e largura, fatores estes que podem ter influência no resultado das pressões em função do vento.

Tabela 01 – Dimensões dos galpões de baixa altura projetados por Indústrias de construção metálica – Região Sul do Brasil

Dimensões dos pavilhões industriais de baixa altura						
Empresa	Largura b (m)	Comprimento a (m)	Pé-direito livre (m)	Forma do telhado	Inclinação do telhado (%)	Ângulo de inclinação do telhado θ
A	80 a 150	150 a 400	11 a 12	2 águas	2,5% a 3%	1,43° a 1,72°
B	100	100 a 400	12	2 e 1 água	3%	1,72°
C	46; 50 e 90	150; 200 e 240	4; 9 e 16	2 águas e arco	3% a 10% (2 águas) e arco (flecha de 25m)	1,72° a 5,7°
D	50; 75; 100 e 150	50; 100; 150 e 250	12	2 e 1 água	3%	1,72°
E	72% até 20m 22% entre 20 e 50m 5% entre 50 e 100m 1% acima de 100m	33% até 20m 30% entre 20 e 50m 33% entre 50 e 100m 4% acima de 100m	36% até 6m 47% entre 6 e 8m 17% acima de 8m	47% em 2 águas 20% em 1 água 33% em (shed, arco, 4 águas, etc.)	2% a 10%, sendo maior parte até 4% Poucos pavilhões com inclinação entre 18 a 20% Raros pavilhões entre 20% e 30%	1,15° a 5,7° sendo maior parte 2,3° Poucos pavilhões com 10,2° a 11,3° Raros pavilhões com 11,3° a 16,7°
F	92; 51; 25; 60 e 85	150; 110; 100; 225 e 230	6,5; 15,5; 5; 7,4; 9	Maior % em 2 águas e restante em 1 água, etc.	3%; 3,5%; 7% e 35%	1,72°; 2°; 4°; 19,3°

Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Ensaaios em túnel de vento constituem, portanto, a melhor alternativa para a determinação da ação e dos efeitos do vento sobre estas edificações. Entretanto, existem diversas dificuldades encontradas nesta modelagem, especialmente relacionados à pequena escala dos modelos, dificultando sua construção, simulação de detalhes significativos e instrumentação. O relaxamento do requisito referente à escala geométrica pode resultar em um grande benefício potencial para a realização dos ensaios, mas ainda existem dúvidas sobre a magnitude possível desta distorção de modo a não prejudicar a qualidade das medições de pressão e, conseqüentemente, a precisão dos coeficientes aerodinâmicos daí derivados para uso no projeto das edificações. A busca por este entendimento, especialmente em relação a pressões locais, é de fundamental importância.

A seguir é apresentado um resumo dos principais trabalhos de pesquisa relacionados a este tema, os quais subsidiam a conseqüente especificação dos objetivos deste trabalho.

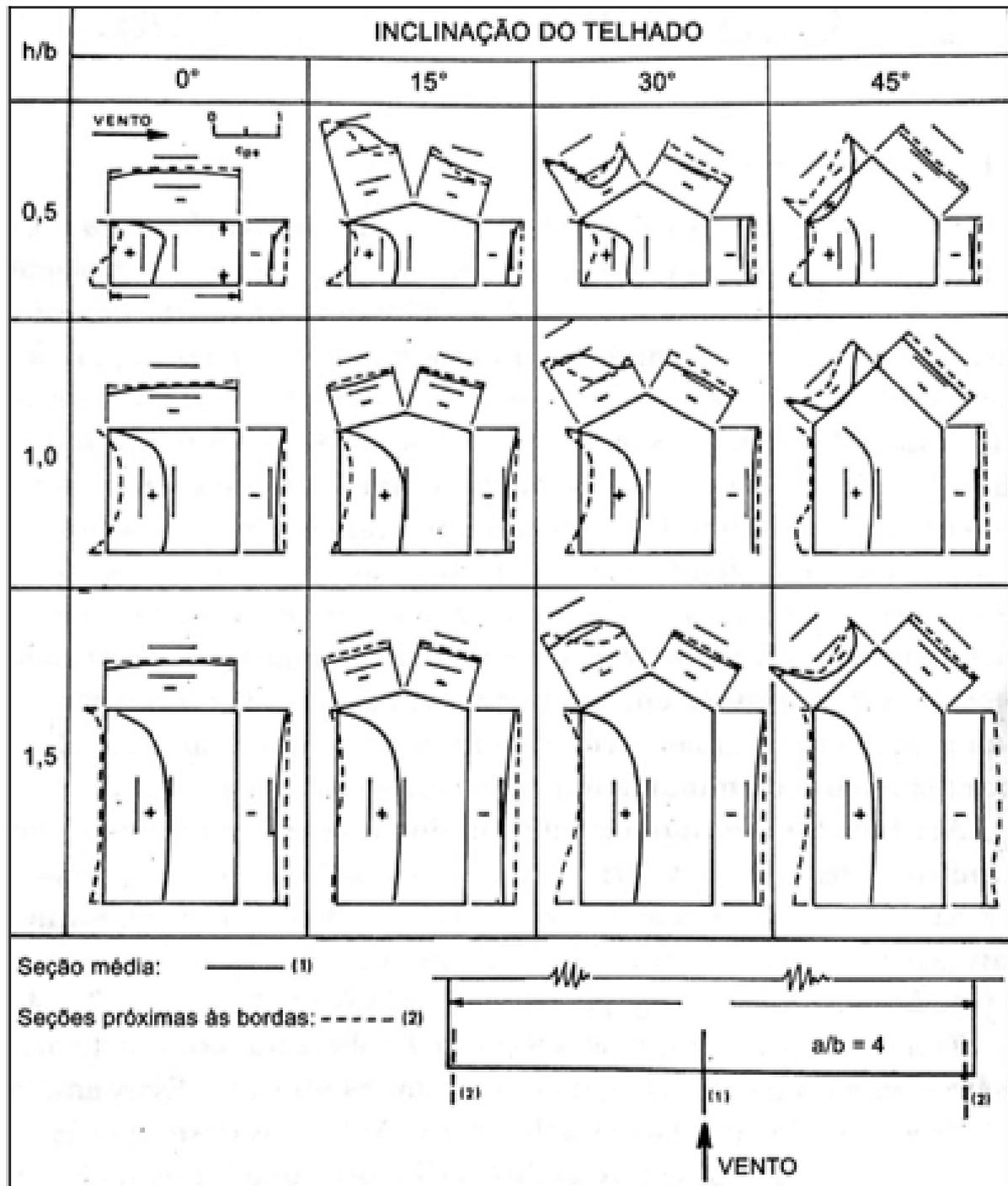
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados de forma contextualizada e por ordem cronológica, os principais trabalhos de pesquisa desenvolvidos sobre o tema relacionado a coeficientes e pressões externas locais. Inclui-se uma síntese de estudos relevantes feitos por simulação numérica, por ensaios em túnel de vento e em escala real de modo a mostrar o que foi pesquisado acerca do tema, bem como subsidiar o desenvolvimento desta pesquisa.

Pelos ensaios do Instituto em Iowa Institute of Hydraulic Research, realizados por Chien et al. (1951 apud Blessmann, 2009), representados na figura 9, foram obtidos perfis de pressão externo para relações de $h/b = (0,5; 1,0 \text{ e } 1,5)$ com $a/b = 4$, sendo as sucções na cobertura para ângulo do telhado com inclinação de 15° e 30° maiores do que a 0° . Relações de $a/b = 2$ e $a/b = 1$ também foram analisadas experimentalmente obtendo sucções máximas de $-1,7$ e de $-1,4$ respectivamente, levando e conta para ambos telhados inclinados a 15° e razão de $h/b = 0,5$.

Além disso, nestes ensaios realizados em Iowa foram determinados os coeficientes de pressão local para uma largura unitária da cobertura que apresentaram resultado maior à medida que aumentava a largura e a altura do modelo. Como resultados são mostrados os valores mínimos dos coeficientes de pressão externa locais ocorridos a 0° e 15° e os na água de barlavento para ângulo de 0° , 15° , 30° e 45° para diferentes relações de $(a \times b \times h)$ na tabela 02 e 03.

Figura 9 – Pressões em modelos de galpões a duas águas planas



Fonte: Adaptado de Chien et al. (1951 apud Blessmann, 2009).

Tabela 02 – Coeficientes de pressão externa locais mínimos

a x b x h	Coeficientes de pressão externa local mínimos	
	0°	15°
4 x 1 x 1,5	-2,36	-2,60
4 x 1 x 1	-2,02	-1,76
4 x 1 x 0,5	-1,95	-1,71
1 x 1 x 1,5	-1,56	-2,06
1 x 1 x 1	-1,58	-1,70
1 x 1 x 0,5	-1,55	-1,40

Fonte: Adaptado de Chien et al. (1951 apud Blessmann, 2009).

Tabela 03 – Coeficientes de pressão externa locais na água de barlavento

a x b h	Coeficientes de pressão externa locais na água de barlavento			
	0°	15°	30°	45°
4 x 1 x 1,5	-0,57	-0,81	-1,10	-0,35
4 x 1 x 1	-0,62	-0,62	-0,84	-0,18
4 x 1 x 0,5	-0,70	-1,30	-0,48	+0,08
2 x 1 x 1,5	-0,68	-0,68	-0,96	-0,11
2 x 1 x 1	-0,72	-0,70	-0,79	+0,05
2 x 1 x 0,5	-0,80	-1,35	-0,30	+0,13
1 x 1 x 1,5	-0,82	-1,08	-0,62	-0,04
1 x 1 x 1	-0,73	-0,94	-0,54	+0,04
1 x 1 x 0,5	-0,77	-1,05	-0,22	+0,20

Fonte: Adaptado de Blessmann (2009).

Outros ensaios em coberturas de duas águas na escala 1/250, com dimensões em planta de 38,1 x 24,4 metros com alturas de paredes de (4,9; 7,3; 9,8) metros, inclinações de 4,8°, 18,4°, 45° e proporções de $a/b = 1,56$ e com $h/b = (0,2; 0,3 \text{ e } 0,4)$ respectivamente, foram realizados por Davenport, Surry e Sthathopoulos no Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory da University of Western Ontario na década de 70 e 80 citados por Blessmann (2009) e concluíram que:

- os vórtices de topo com vento oblíquo às fachadas causadores das sucções mais altas e a variação das pressões flutuantes do vento com a superfície tributária, isto é, superfície sujeita às ações do vento, são fatores importantes. Evidenciaram reduções significativas

das pressões com o aumento da superfície, obtendo ações muito menores que as altas sucções instantâneas medidas em pontos de certas zonas de cobertura. Esta redução das pressões ocorre por não serem simultâneas as pontas de sucção e pelo fato de se encontrarem em pontos muito localizados, com pouca extensão sobre a superfície, principalmente próximo as arestas.

- a inclinação da cobertura tem uma grande influência nas pressões, sendo os picos de sucção bem maiores com terreno de subúrbio do que de campo aberto;
- os coeficientes de pressão local sofreram pouca mudança com a alteração da rugosidade;
- cobertura com inclinação de $18,4^\circ$, mostrou valores médios e de picos de sucção bem maiores com respeito a outras inclinações, principalmente nos cantos da zona próximos à cumeeira;
- telhado com inclinação de $4,8^\circ$, os picos de sucção surgiram ao longo da aresta horizontal de barlavento e para inclinação de 45° , no canto de barlavento desta aresta, com picos um pouco menores próximo à cumeeira.
- quanto à escala, os ensaios mais detalhados foram feitos na escala 1/250 e outros complementares foram realizados na escala 1/100 e 1/500. Nestes ensaios evidenciaram que (para mesma rugosidade do terreno) para um desvio da escala por um fator 2 se pode ainda permitir o uso dos mesmos coeficientes aerodinâmicos.

De um modo geral, os ensaios feitos a partir de 1974 no Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, da University of Western Ontario citados por Blessmann (2009) destacaram a importância das pressões flutuantes e da variação da ação devida ao vento com a superfície tributária.

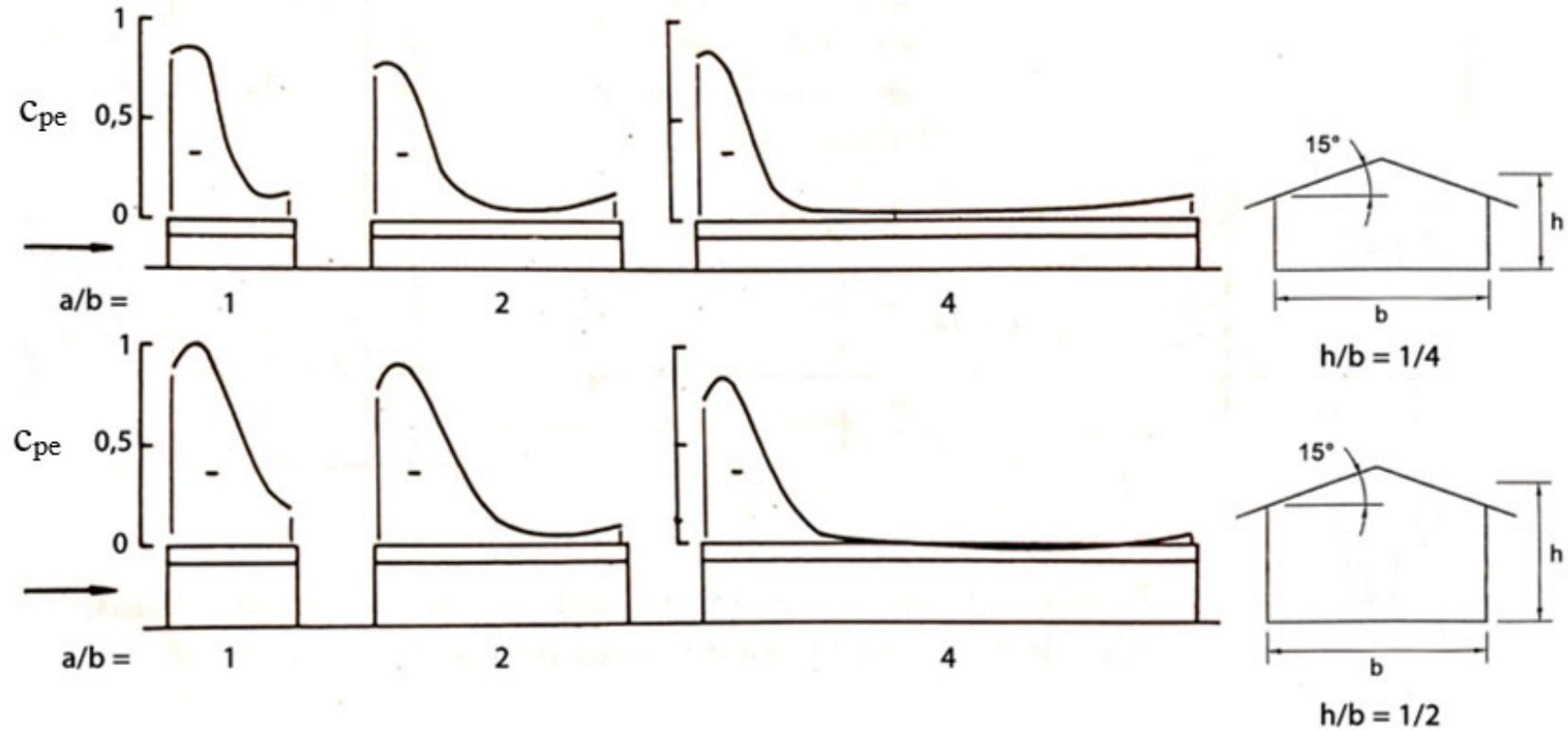
No LAC – Laboratório de Aerodinâmica das Construções da UFRGS, foram ensaiados por Blessmann os modelos de edificações baixas em duas águas que serviram de base para a atual norma NBR 6123:1988. Segundo Blessmann (2009), nestes ensaios foram reproduzidos turbilhões com dimensões próximas às dimensões da seção transversal dos modelos que são os de maior importância para definição das pressões estáticas médias. Com resultados de ensaios para relações de $a/b = (1; 2 \text{ e } 4)$ e ângulo de inclinação de 15° , foram elaborados os perfis longitudinais dos coeficientes de pressão médios externos ao longo do eixo de uma das águas com vento paralelo às cumeeiras dos modelos (figura 10) e obtido os coeficientes de pressões médios locais (figura 11). Baseado nestes ensaios Blessmann (2009) concluiu que: forma-se um bulbo de altas sucções à barlavento das paredes e do telhado com coeficiente de pressão

externas de -1,0; as sucções decaem rapidamente e se estabilizam em valores pequenos na zona de sotavento; este bulbo de pressões é independente da inclinação da cobertura; os maiores valores dos coeficientes locais apareceram nos modelos com inclinações de cobertura de 8° e 12° para determinadas proporções e direções de ataque do vento.

Para Surry (1982) apud Stathopoulos e Surry (1983) através de estudos de distorção do escoamento do vento, a escala do modelo pode desempenhar um papel mais importante para estruturas baixas, onde destacam o estudo de Vickery (1981). Estudo este que, utilizando uma grande quantidade de simulações experimentais com casas obtiveram evidências de que a manutenção das intensidades da turbulência não é o suficiente para reproduzir corretamente as pressões locais e avaliar a sensibilidade das cargas de vento a diferentes campos de simulações em razão da influência do entorno nos resultados das medições.

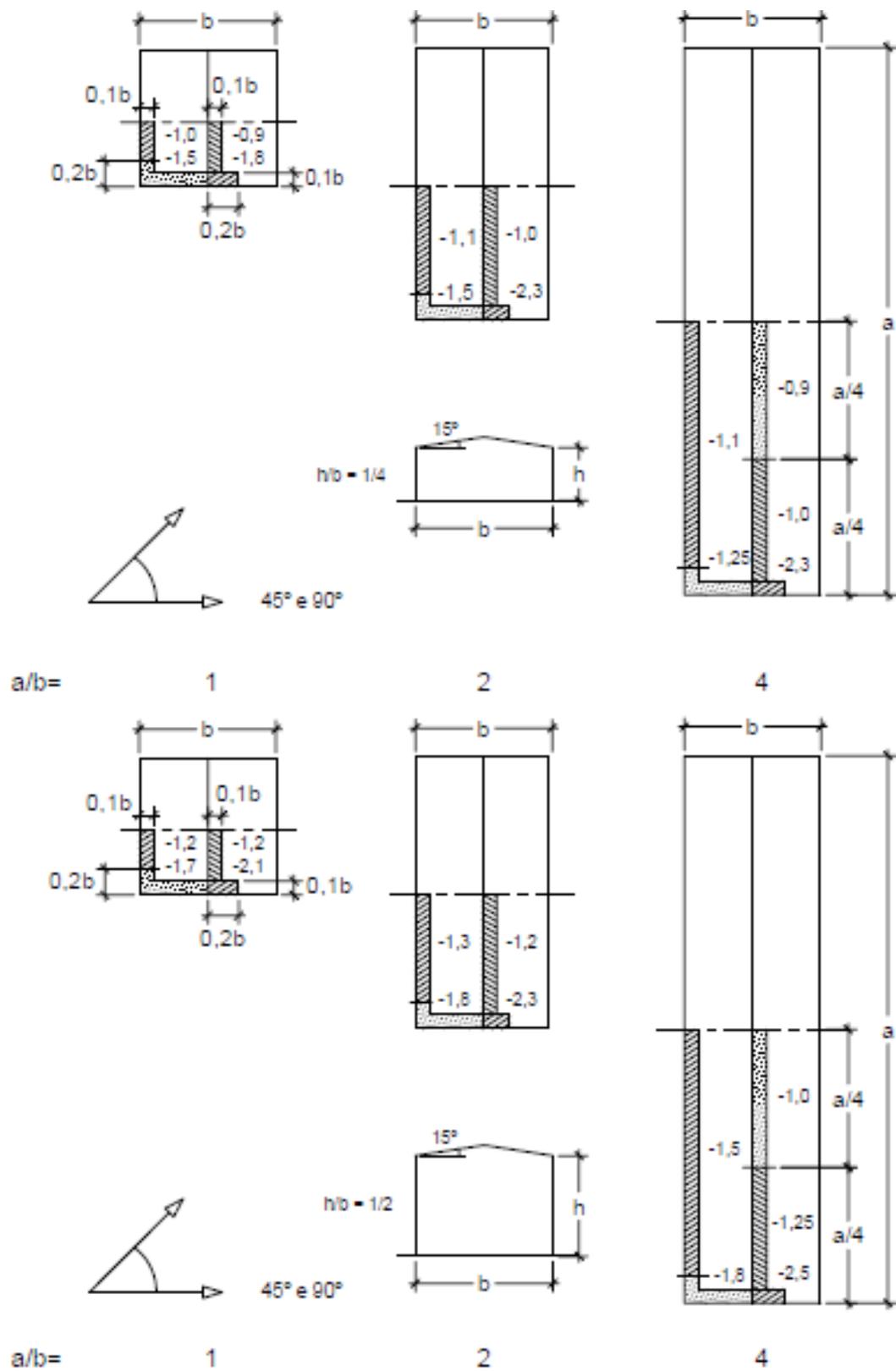
Davenport (1983) fez um estudo para avaliação de um procedimento de definição de novos coeficientes de pressão do vento utilizando como exemplo o padrão da norma NBCC. Foram avaliados resultados de ensaios obtidos com modelos reduzidos com telhado em duas águas, com diferentes alturas, comprimentos e inclinações de telhado e diferentes escalas geométricas, levando-se em conta rugosidade para campo aberto e áreas urbanas. Dentre os dados existiam medições de coeficientes de pressão (pico máximo, pico mínimo, médios e *root mean square* – RMS) para diversas direções de incidência do vento. Foram verificados (i) a redução das cargas instantâneas com o aumento da área tributária e (ii) apresentados os fatores combinados dos coeficientes de pressão com o fator de rajada c_{pg} baseados nos coeficientes de pico e distribuídos por zona. Identificaram que aproximadamente 20% dos valores dos coeficientes de pressão obtidos no túnel de vento excediam os valores dos coeficientes especificados para a zona na norma NBCC, mas não em mais de 25%. Inversamente, o coeficiente especificado excede os valores observados em cerca de 80% da área e, principalmente, por uma grande margem. Através desta análise concluíram que, apesar de magnitude reduzida, os coeficientes de pressão do vento apresentados pela NBCC ainda representavam segurança adequada para uso em projetos.

Figura 10 – Pressões em pressão ao longo do eixo longitudinal de uma das águas em telhados de duas águas (ensaio do LAC)



Fonte: Adaptado de Blessmann (2009).

Figura 11 – Coeficientes de pressão locais em telhados a duas águas – Ensaio no LAC



Fonte: Adaptado de Blessmann (2009).

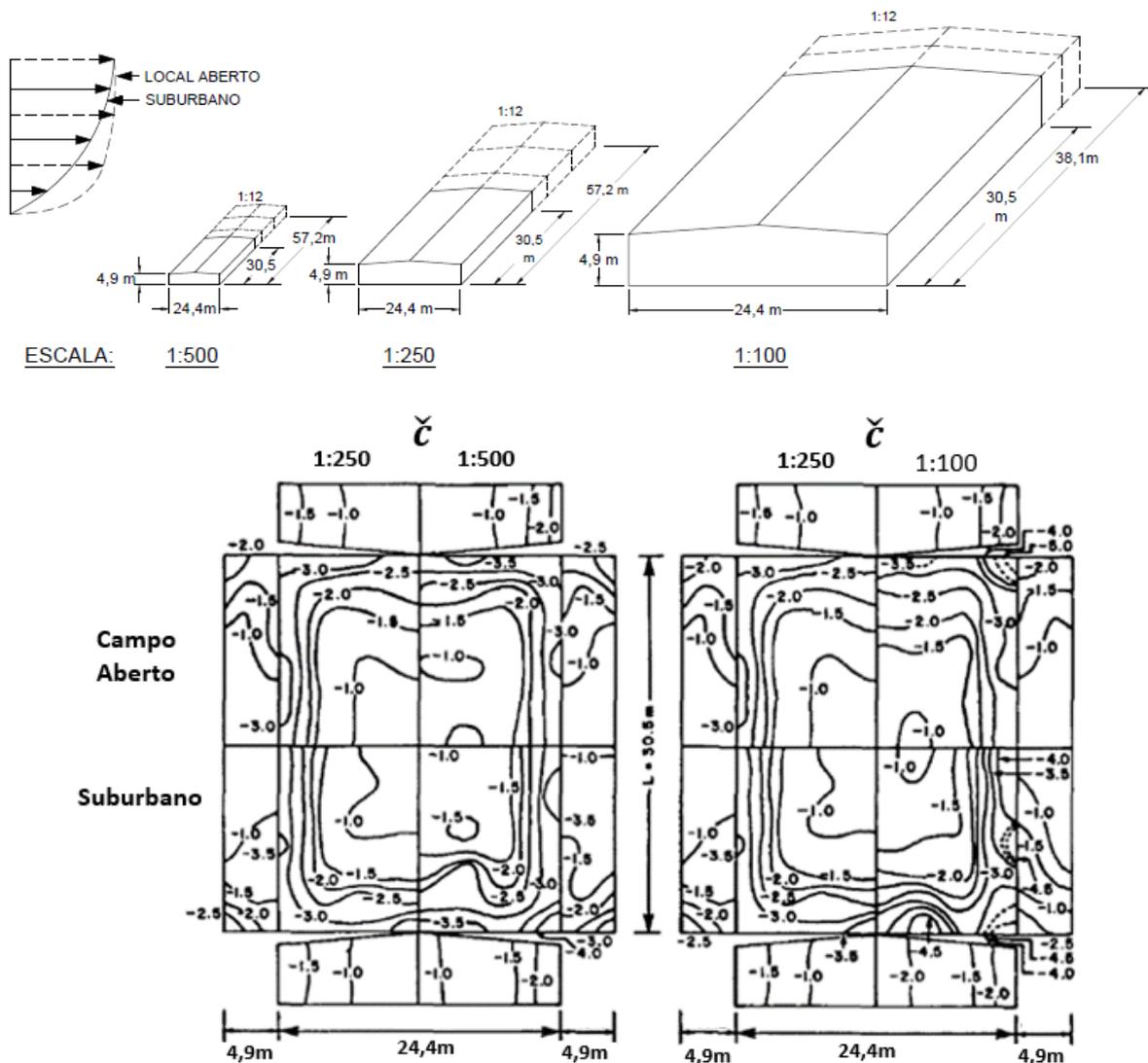
Foi realizada por Stathopoulos (1983) uma avaliação analítica de sucções de pico instantâneas agindo em telhados baixos a partir de coeficientes de pressão médios e da intensidade de turbulência do escoamento do vento. Relata que a instabilidade dos carregamentos de vento neste tipo de cobertura se originam da turbulência no escoamento que se aproxima, no escoamento na esteira da própria estrutura e nos movimentos do próprio edifício. Concluiu através do estudo que os coeficientes médios medidos em túnel de vento podem ser usados para prever coeficientes de pressão do vento RMS (*root mean square*), os quais por sua vez podem levar a previsão de valores de pico necessários para realizar os projetos se uma distribuição de probabilidades de carga apropriada for assumida. O estudo foi válido para bordas de telhados planos ou de baixa inclinação com ângulos menores de 10° , em cumeeiras mais íngremes com vento incidindo na direção normal a cumeeira e para direções de vento oblíquas em bordas de telhado exceto cantos.

Stathopoulos e Surry (1983) realizaram ensaios em túnel de vento de camada limite para prédios baixos para avaliação das cargas de vento em função das escalas. Foram ensaiados modelos reduzidos em três escalas geométricas 1:500, 1:250 e 1:100, para exposição de terrenos de campo aberto e suburbano e feitas medições de coeficientes de pressão média e de pico para o local e área estudadas. A figura 12 mostra as dimensões dos modelos e os resultados de coeficientes de pico mínimo obtidos nos ensaios.

Foram discutidos por Stathopoulos e Surry (1983) os erros pelo uso de grandes modelos e concluíram que é permitido a utilização de uma escala geométrica até um fator de 2 podendo levar a erros da ordem de 10% ou menos para todos os casos avaliados. Exceto, para o caso particular de coeficientes de pressão locais atuando em paredes que podem estar sujeitos a erros não conservadores da ordem de 20% a 30%. No entanto, citam que uma subestimação significativa dos coeficientes de pressão de pico pode ocorrer em caso de uma grande violação da escala. Ressaltam que, além do fator de escala, o tamanho da área, sua localização em relação ao escoamento incidente e a localização das tomadas de pressão dentro da área considerada no estudo para uma determinada região são fatores que contribuem para a sensibilidade das cargas à escala. Mesmo que tivessem mais dados experimentais particularmente para as áreas menores, seria difícil apresentar uma análise para o comportamento das escalas de um modo geral para o modelo. Mas, ao comparar os casos estudados quanto aos coeficientes de pressões de pico para diferentes zonas de telhado evidenciaram que os modelos da escala 1:250 subestimam

levemente os valores de pico medidos na escala 1:500, enquanto os modelos da escala 1:100 superestimam os valores de pico de 1:500. Em contrapartida, os modelos da escala 1:250 e 1:100 subestimam os coeficientes de pressão da escala 1:500 de forma aproximadamente igual. Para ambas exposições de rugosidade estudadas, ocorreu uma pequena redução nas pressões da escala 1:500 em relação a 1:250, mas um aumento significativo foi mostrado para escala 1:100 principalmente em áreas localizadas próximas dos cantos. Esse aumento das pressões na escala 1:100 pode ser devido ao acréscimo de tomadas instaladas nas regiões dos cantos.

Figura 12 – Dimensões dos modelos e coeficientes de pressão de pico negativos em relação a escala e exposição



Fonte: Adaptado de Stathopoulos e Surry (1983).

Um dos problemas encontrados por Stathopoulos (1984) durante ensaios em túnel de vento de prédios baixos foi a determinação da escala geométrica. Este problema surgiu pelo fato da “escala ideal”, ou seja, a escala em que a estrutura do vento no túnel de vento pode ser mais semelhante com a escala real varia entre 1:200 e 1:2000 em túneis de vento de camada limite. Desta forma podem ser construídos modelos de tamanhos muito pequenos. Isto, por sua vez, gera problemas de instrumentação e torna impossível a modelagem de detalhes arquitetônicos que desempenham papel importante no carregamento do vento. Diante disso, através de ensaios foram propostos coeficientes de pressão e indicado que, para edifícios baixos com pequenas proporções altura-largura, o efeito comprimento é insignificante, mas para todas as proporções de comprimento/largura de 1,0 a 3,0, o efeito é alto.

Embora as cargas de vento aumentem com a altura do edifício, segundo Stathopoulos (1984) os coeficientes em prédios baixos podem ser reduzidos consideravelmente na altura do beiral, o que mostra uma fraca dependência das pressões em relação à altura. Já a inclinação do telhado, se mostrou como um fator muito significativo na magnitude e distribuição das cargas do vento. A área tributária apresentou efeito representativo sobre o valor da pressão de vento, sendo mais significativo nos cantos e direções mais críticas do vento. Para telhados íngremes, a redução de carga por área torna-se mais significativo nas bordas do que no canto do telhado. E, através deste estudo foram indicadas as áreas em que há mais necessidade de investigação dos efeitos do vento em edifícios baixos. Foi destacado também que edificações baixas geralmente não são afetadas por rajadas de alta frequência, mas podem em algumas circunstâncias ocorrer aumento da magnitude dos picos de rajadas de pequena duração tornando-se estes significativos.

Ainda por meio dos estudos de Stathopoulos (1984) foi evidenciado que para edifícios baixos com pequenas proporções de altura/largura e comprimento/largura de 1,0 a 3,0, as cargas do vento não dependem significativamente do comprimento, porém aumentam com a altura do edifício. Com isso, a dependência dos coeficientes de pressão na altura é reduzida e a referência passa a ser em relação à pressão para uma velocidade na altura média do telhado, tornando assim, a inclinação do telhado um parâmetro importante.

Stathopoulos e Mohammadian (1986) através de dados experimentais decorrentes de ensaios em túnel de vento indicam que as pressões médias e instantâneas dos picos de vento em coberturas de uma água são superiores às para edifícios com telhados de duas águas. Isso pode

ser uma das razões do maior uso de pavilhões industriais com telhados no formato de duas águas mostrado no decorrer deste trabalho.

Kind (1986) em seus resultados experimentais para projeto de revestimentos de telhado, indicou que as piores sucções em edifícios baixos com telhado plano são apenas levemente sensíveis às características do escoamento. Com parapeitos baixos e um ângulo de vento próximo de 45° , ocorrem picos de sucção nas proximidades das bordas a barlavento do telhado e as piores sucções diminuem com o aumento da altura do parapeito. Desta forma é sugerida uma fórmula experimental para estimar os coeficientes de pico de sucção quando os coeficientes médios de sucção e a intensidade ou rajada local de turbulência e a velocidade no nível do telhado é conhecida.

Ho, Surry e Davenport (1991) analisaram o efeito do entorno nas cargas do vento em edificações baixas em função da falta de estudos experimentais sobre o comportamento aerodinâmico neste tipo de construção. Determinaram a importância de alguns parâmetros básicos como efeito do terreno simulado a barlavento da construção em relação a variação imposta pelos efeitos locais de diferentes regiões. Todos estes fatores reforçam a importância de simulações “Monte Carlo” que devem ser usadas para gerar grande quantidade de dados de representação das cargas reais de vento e o uso de uma abordagem de confiabilidade para determinar as especificações de cargas de vento para as normas.

Stathopoulos e Saathoff (1991), por meio de testes em túnel de vento de pavilhões em duas águas, mostraram que os valores de coeficientes de pressão estabelecidos pela norma National Building Code de 1985, na sua grande maioria, se apresentaram próximos aos experimentais, mas ainda com algumas discrepâncias. Desta forma, sugeriram uma atualização da norma estudada.

Meecham, Surry e Davenport (1991) identificaram que a presença de altas sucções nos testes experimentais para telhados de duas águas é maior do que no Código de Construção do Canadá SNBCC:1985 apontando como possíveis razões dessa diferença, a escala e a intensidade de turbulência. As escalas de comprimento de turbulência eram pequenas demais e as intensidades de turbulência eram cerca de 30% menores na altura média do telhado do que nos experimentos de Stathopoulos de 1979 onde o autor explorou o efeito de escala e constatou que nos modelos 1:100 foi observado um significativo aumento nas pressões negativas comparado com a escala 1:250. As altas sucções foram localizadas em arestas da extremidade da fachada de oitão à

barlavento onde são gerados vórtices cônicos. O efeito destes vórtices explica a falta de desempenho dos elementos de revestimento, como as telhas dispostas nas bordas de oitão que geralmente falham com maior frequência ao passo que telhas em proximidade podem permanecer intactas.

Stathopoulos e Saathoff (1994) analisaram pavilhões de duas águas com modelos simples e múltiplos com inclinação de $18,4^\circ$ e 45° , dimensões de 39,2 metros de largura, 60,8 metros de comprimento e 12 metros de altura e apontaram discrepâncias entre as pressões locais obtidas experimentalmente por ensaios em túnel de vento na escala 1:400, com valores de sucção no telhado de 20% a 50% maiores em relação ao estabelecido nas normas National Building Code of Canada (1990) e ANSI/ASCE 7-88. Para pressões locais positivas na cobertura as diferenças não foram significativas sendo que as de maior valor ocorrem ao longo das bordas mais baixas do telhado a barlavento. Mas, para pequenas áreas de telhado menores de 1m^2 , os coeficientes de pressão c_{pg} de sucção obtidos nos ensaios experimentais excedem os valores dos padrões das normas de vento National Building Code of Canada (1990) e ANSI/ASCE 7-1988 por um fator de 2 em todas as regiões do telhado, tendo valores de 10% a 50% acima da norma dependendo da região.

Lin, Surry e Tieleman (1995) investigaram a distribuição da pressão no telhado sob os vórtices dos cantos e sua variação com o ângulo de incidência do vento, dimensões da construção e características do escoamento incidente. Na avaliação identificaram sucções muito altas próximas aos cantos com redução rápida conforme vai aumentando a distância em relação a estes cantos, mas nenhuma limitação pode ser definida ainda para a extrema sucção no canto. Pressões extremamente altas foram localizadas na região de borda sendo que estes coeficientes de pressão mudam com a altura do edifício, mas, não dependem muito das dimensões de altura/largura. Para relações de altura/largura de 0,1 a 0,45 pode ocorrer um recoloamento do escoamento. As piores magnitudes do coeficiente de pressão dependem principalmente das características do escoamento e ângulo de incidência do vento.

Kasperski (1996) fez uma revisão crítica de resultados de ensaios de túnel de vento para edificações baixas com telhados planos e baseado nisso para a norma Eurocode 1 (1992) foi introduzido uma nova alternativa de distribuição das pressões do vento com pressões positivas no telhado. Em muitos casos práticos de projetos analisados, mais de um dos códigos

normativos estudados não foram o suficiente para cobrir a ação do vento e seus efeitos, levando para um possível subdimensionamento das cargas de até 35%.

Case e Isyumov (1998), testaram em túnel de vento, pavilhões baixos em duas águas na escala 1:100, com larguras de 9,75 metros, comprimentos de (9,75; 19,5 e 29,3) metros, altura de 4,88 metros e inclinação de 18,4°, adotando exposição para campo aberto e suburbano. Considerando uma edificação isolada observaram, pelos resultados de ensaio, uma redução das ações de pico do vento de 15% a 20% para exposição suburbana em relação a campo aberto tanto para cargas locais como para cargas gerais sobre as superfícies, sendo maior a redução nas paredes do que no telhado. ASCE/SEI-7:1995 adota uma redução das cargas de 15%, o que pelos ensaios se mostrou adequado. Concluíram que as ações de picos de sucção de vento em exposições aberto para suburbana podem ser reduzidas em até 30% em algumas regiões e pressões positivas de pico locais aumentam com exposição mais severa devido acréscimo da turbulência. Mencionam em suas análises que as variações das pressões aerodinâmicas encontradas nos ensaios deveriam estar previstas nos padrões normativos para uso em projetos.

Kumar e Stathopoulos (1998), realizaram medições de pressões em túnel de vento utilizando modelos reduzidos de pavilhões em duas águas com altura de 12 e 15 metros na escala geométrica 1:400 para incidência do vento em vários ângulos considerando exposição de campo aberto e suburbano. Foram medidas também as pressões de pico do telhado. Baseado nos dados das medições e por meio de investigações estatísticas concluíram que os espectros de energia de pressões induzidas pelo vento atuando sobre telhados baixos de edifícios registraram sua variação com relação à localização, direção do vento, geometria do telhado e condições do terreno. No entanto, as semelhanças entre espectros normalizados observados em muitos casos sugeriram uma forma empírica apropriada para a geração sintética de espectros normalizados. Depois disso, os espectros normalizados foram categorizados e as formas espectrais padrão associadas a várias zonas de cada telhado e seus parâmetros estabelecidos, e fornecidos para o caso de telhados baixos. Por fim, declararam que as formas espectrais fornecidas podem ser adotadas em previsões de pressões de pico em telhados, sendo estas necessárias para o projeto de telhados contra pressões extremas do vento e fadiga.

Nos estudos de vento para prédios baixos, Uematsu e Isyumov (1999) utilizaram dados experimentais de laboratório em escala reduzida e de campo em escala real. Foram feitas comparações de pressões médias e de pico do vento e os resultados indicaram que as pressões

de pico nas bordas e cantos do telhado podem ser previstas quase constantes considerando o fator de pico que foi encontrado para uma avaliação de desempenho adequado das cargas do vento agindo em revestimentos. No entanto, os coeficientes de pressão de RMS (*root mean square*) que é usado com o fator de pico também pode ser avaliado sob uma abordagem quase constante onde se atribui nas flutuações das pressões, as flutuações das velocidades para aplicações em projetos de cargas de vento. Todos os códigos normativos são geralmente baseados em uma abordagem quase estável, em que a especificação da carga do vento é determinada a partir da distribuição da pressão média. Mas, apesar disso, dizem que as informações disponíveis não são muito abrangentes o suficiente para cobrir as variáveis envolvidas e atualizar códigos. Portanto, é preciso desenvolver outros estudos sobre coeficientes de pressão médios, uma vez que as experiências são relativamente fáceis em comparação com as pressões flutuantes e fatores de pico.

Considerando ainda as investigações de Uematsu e Isyumov (1999) os autores destacaram que um dos problemas em ensaios em túnel de vento com edificações baixas é a determinação da escala geométrica. As escalas geométricas geralmente aplicadas em ensaios de túnel de vento de camada limite é 1:200 a 1:500. Modelos feitos com esta escala geométrica podem resultar em problemas de instrumentação e tornar impossível modelar os detalhes arquitetônicos como beirais e parapeitos, que as vezes desempenham um papel importante.

Kumar e Stathopoulos (2000) por estudos experimentais indicaram que as flutuações de pressões locais do vento em telhados de edifícios baixos dependem da localização das tomadas de pressões, geometria do telhado e da direção do vento. Dizem ainda que pressões com distribuições não gaussianas são geralmente encontradas nas zonas de separação do escoamento e zonas com pressões com distribuições gaussianas e não-gaussianas são encontradas em telhados a duas águas, tanto com baixas quanto com elevadas inclinações. Para as bordas de telhado a barlavento, os autores identificaram que são propensas as flutuações de pressões induzidas pelo vento não gaussianas. Foi dado destaque à importância das zonas de telhado com características estocásticas relevantes das flutuações das pressão do vento no tempo, frequência e amplitude, sendo do tipo gaussianas e não-gaussianas. Zonas de distribuição de flutuações de pressão não gaussianas devido presença de picos de alta amplitude são como os locais sujeitos a flutuações extremas de pressão local e importantes para o projeto de revestimentos.

Stathopoulos, Wang e Wu (2000) através de ensaios em túnel de vento na escala 1:400 realizaram medições de pressões médias, RMS (*root mean square*) e de pico. Por meio destes resultados, sugeriram alterações na norma *Canadian Commission on Building and Fire Codes National Research Council of Canada – NBCC:1995*, quanto às pressões médias e locais, dimensões das regiões de atuação de cada coeficiente para construções baixas e telhados com inclinações variando de 10° a 30°, válido para terreno tipo campo aberto.

Ginger e Holmes (2003) realizaram estudos com modelos em túnel de vento de galpões para armazenamento com telhado em duas águas, baixos, com comprimento de (96; 160 e 240) metros, com largura de 40 metros, inclinação íngreme e proporções de comprimento/largura de (2,4; 4 e 6). Dentre os resultados foram alcançados altos coeficientes de pressão média e picos negativos no telhado e na parede à sotavento com um aumento para ventos oblíquos. Ocorreram também aumentos na magnitude das pressões de sucção próximo da cumeeira a barlavento para ventos à 45° com o aumento da proporção. Nas verificações da AS/NZS1170.2:1989 foi constatado que a mesma subestimava muito as cargas de pico positivas de vento na região da cumeeira à barlavento em pavilhões com relação superior a 3 quando comparado aos resultados de ensaios em túnel de vento, fator esse retificado na edição revisada da AS/NZS1170.2:2002.

Zisis e Stathopoulos (2009) realizaram estudos experimentais de edificações em duas águas com dimensões de 8,6 m de largura, 16,8m de comprimento e 3 m de altura, em escala real e com modelos reduzidos em túnel de vento. Destes ensaios concluíram que a comparação da distribuição de pressões obtidas através de túnel de vento e os resultados em escala real mostram um bom alinhamento entre os dados. Porém, apareceram discrepâncias pela existência de flutuações na direção do vento nos registros em escala real. Quando comparados coeficientes de pressão de pico, foram identificadas diferenças, sendo as pressões experimentais de sucções locais críticas tendendo para valores superiores comparadas as disposições da norma ASCE/SEI-7:2005. Logo, as pressões de sucções com coeficientes médios apresentaram maior concordância com o estabelecido na ASCE/SEI-7:2005.

No estudo de coberturas feito por meio de experimento em túnel de vento por Moriyama, Sase, Uematsu e Yamaguchi (2010), foram analisadas as distribuições de pressões do vento em construções baixas dispostas paralelamente uma em relação a outra. Constataram que a variação dos coeficientes de pressão na direção paralela ao vento foi significativa no telhado, especialmente na cobertura a barlavento dos modelos ensaiados. Observaram altas pressões de

suções no telhado a sotavento próximo da região da cumeeira de dois dos modelos, atribuindo esse fato à separação do escoamento na cumeeira do modelo a sotavento. Desta forma concluíram que a posição das edificações influencia na distribuição das pressões.

Para melhorar a eficácia das construções baixas em duas águas em função da ação do vento, Suaris e Irwin (2010), por meio de testes em túnel constataram que os coeficientes de pressão de pico na zona de canto foram reduzidos com a colocação de parapeitos sólidos e perfurados ao longo do perímetro, nos cantos e na cumeeira, mostrados na figura 13, podem proporcionar economias significativas quanto a resistência de materiais e elementos de ancoragens.

Figura 13 – Modelo com parapeitos nos cantos e na cumeeira em túnel de vento

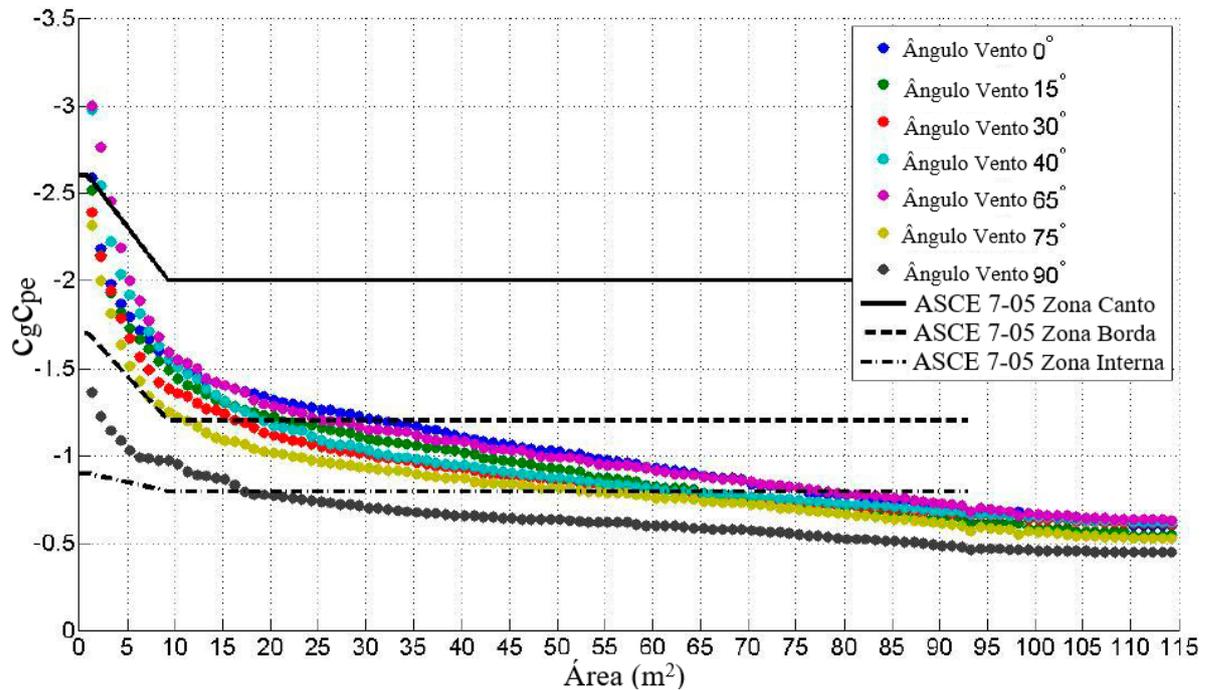


Fonte: Suaris e Irwin (2010).

Morrison (2010) realizou ensaios em escala real e ensaios em túnel de vento com construções de baixa altura expostas a flutuações da velocidade do vento. Através de ensaios em escala real constatou que os fixadores dos revestimentos se desprendem quando submetidos a cargas de pico de vento, ocorrendo as falhas com os valores das cargas de capacidade previstas para os fixadores. No entanto, nos ensaios de túnel de vento com modelos reduzidos, os coeficientes de pressão externa apresentaram grande variação quando comparados aos especificados pela norma ASCE/SEI-7:2005, conforme ilustrados na figura 14.

Desta forma identificaram a necessidade de aumentar a rigidez e reforçar conexões de telhado nas zonas de pressão local crítica, de modo a não ocasionar danos em todo o telhado.

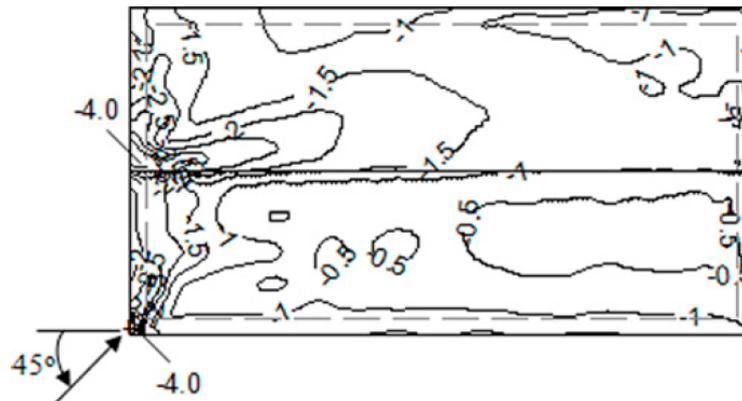
Figura 14 – Valores máximos de coeficientes de pressão externa globais e locais para sete diferentes direções de incidência do vento



Fonte: Adaptado de Morisson (2010).

Nos estudos de Mensah, Datin, Prevatt, Gupta e Lindt (2011) para um galpão de duas águas com dimensões de 9,2 metros de largura e 12,2 metros de comprimento e altura de 4,2 metros em modelo reduzido na escala 1:50, utilizando testes de túnel de vento demonstraram que a distribuição das pressões devidas ao vento sobre o telhado da edificação foi geralmente caracterizada por sucções de pico especialmente para as direções do vento a 0° e 45° . As altas sucções foram registradas ao longo da borda do oitão do telhado à barlavento, conforme mostrado na figura 15, enquanto sucções relativamente baixas foram encontradas nas áreas inferiores do telhado para direção de 45° e sucções baixas na zona dos beirais para vento incidindo a 90° .

Figura 15 – Distribuição dos coeficientes de pressão negativa de pico obtidos através de ensaios em túnel de vento no contorno do telhado incluindo pressões dos beirais para vento na direção de 45 graus



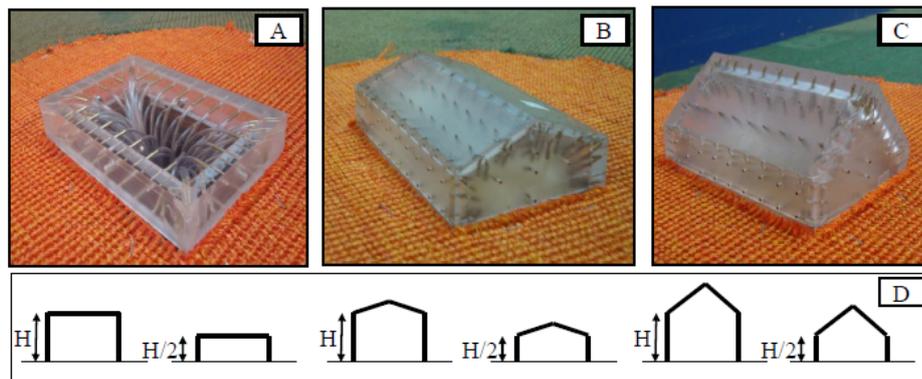
Fonte: Mensah, Datin, Prevatt, Gupta e Lindt (2011).

Janajreh e Simiu (2012) apresentaram resultados de coeficientes de pressão obtidos por meio de ensaios em túnel de vento com modelos reduzidos de telhados em duas águas de pavilhões na escala 1:200, com dimensões de 60,96 metros de comprimento, 30,48 m de largura e 6,10 metros de altura, com declividade de 2,4°. Além disso, através do CFD (*Computational Fluid Dynamic*) foram realizadas simulações de grandes turbilhões para simular históricos de pressão ao longo do tempo e comparados com os obtidos por medições em túnel de vento. Pelas análises verificaram que as pressões médias determinadas pelo uso do CFD são razoavelmente próximas em relação as obtidas pelos ensaios em túnel de vento de camada limite. Todavia, pressões de pico foram subestimadas significativamente. Destacaram a necessidade de um tempo maior com simulações no CFD para representar as mesmas condições de projeto de um ensaio em túnel de vento.

Elsharawy, Stathopoulos e Galal (2012) estudaram em túnel de vento três pavilhões baixos de cobertura em duas águas com ângulos de inclinação de 0°; 18,4° e 45° mostrados na figura 16 e duas alturas em terrenos de campo aberto e urbano para diferentes ângulos de ataque do vento de (0° a 180° variando de 15° em 15°). Os resultados dos ensaios foram comparados as prescrições da norma ASCE SEI-7:2010, NBCC:2010 e EN 1991-1-4:2005. As disposições da ASCE SEI-7:2010 se comparam bem aos resultados experimentais para força de cisalhamento e momentos de torção. Entretanto, a NBCC:2010 e EN 1991-1-4:2005 subestimam a torção induzida pelo vento em edifícios baixos. As pressões instantâneas do vento em construções baixas variam continuamente nas dimensões temporais e espaciais e isso pode levar a momentos de torção significativos no sistema de resistência lateral do edifício. Desta forma, pelos

resultados experimentais foi notado o efeito significativo da geometria do edifício e da exposição do terreno nas forças de cisalhamento e nos momentos de torção gerados.

Figura 16 - Modelos em túnel de vento: A= Galpão com cobertura plana, B = Galpão com ângulo de inclinação do telhado de 18,4 graus, C = Galpão com ângulo de inclinação de 45 graus, D = Alturas testadas



Fonte: Adaptado de Elsharawy, Stathopoulos e Galal (2012).

Através das simulações no Software ANSYS com modelo numérico de 22,86 metros de comprimento, 22,86 metros de largura e 2,74 metros de altura de parede, Kumar, Dyal e Sarkar (2012) utilizando dados experimentais de túnel de vento verificaram que as concentrações de tensões máximas devidas ao vento ocorrem nas junções entre parede e telhado (beirais), nas bordas do telhado e bordas da cumeeira. Falhas ocorreram em coberturas de maior altura com aproximadamente 25,5° a 35,1° e também nos cantos e quando essas partes da cobertura falham juntamente com o restante do telhado, as paredes a barlavento e a sotavento começam a se desintegrar do conjunto, acarretando o rompimento dos elementos.

Geurts, Kopp e Morrison (2013) executaram ensaios em túnel de vento com edificação baixa, com largura de 30 metros, comprimento de 45 metros e altura de 10 metros considerando terreno aberto e urbano. Compararam os valores dos coeficientes de pressões obtidos por meio dos ensaios em túnel de vento com os coeficientes correspondentes as áreas das zonas especificados na norma EN 1991-1-4:2005, ASCE SEI-7:2010 e ISO 4354. Pela avaliação tanto a ASCE SEI-7:2010 quanto a ISO 4354 subestimam os coeficientes de pressão de pico na zona de canto do telhado especialmente para pequenas áreas. O grau de subestimação é reduzido conforme aumentam as áreas das zonas. Contudo, os critérios estabelecidos pela EN 1991-1-4:2005 para a determinação dos tamanhos para zonas de telhado planos conduzem a bordas e zonas de canto com zonas / áreas menores nos telhados em comparação com outros códigos

normativos. Especialmente para edifícios baixos com grandes dimensões, essas zonas menores levam a uma subestimação das cargas nesta região. Por isso, estudos por intermédio de testes de túnel de vento identificaram que o parâmetro que determina o tamanho das zonas de borda e cantos pode estar relacionado ao tamanho dos vórtices ou bolhas de separação do escoamento. Através deste parâmetro entendem chegar a uma definição uniforme das dimensões de zonas de canto e borda para telhados planos que proporcionem um projeto seguro de coberturas de telhado baseado em dados de túnel de vento.

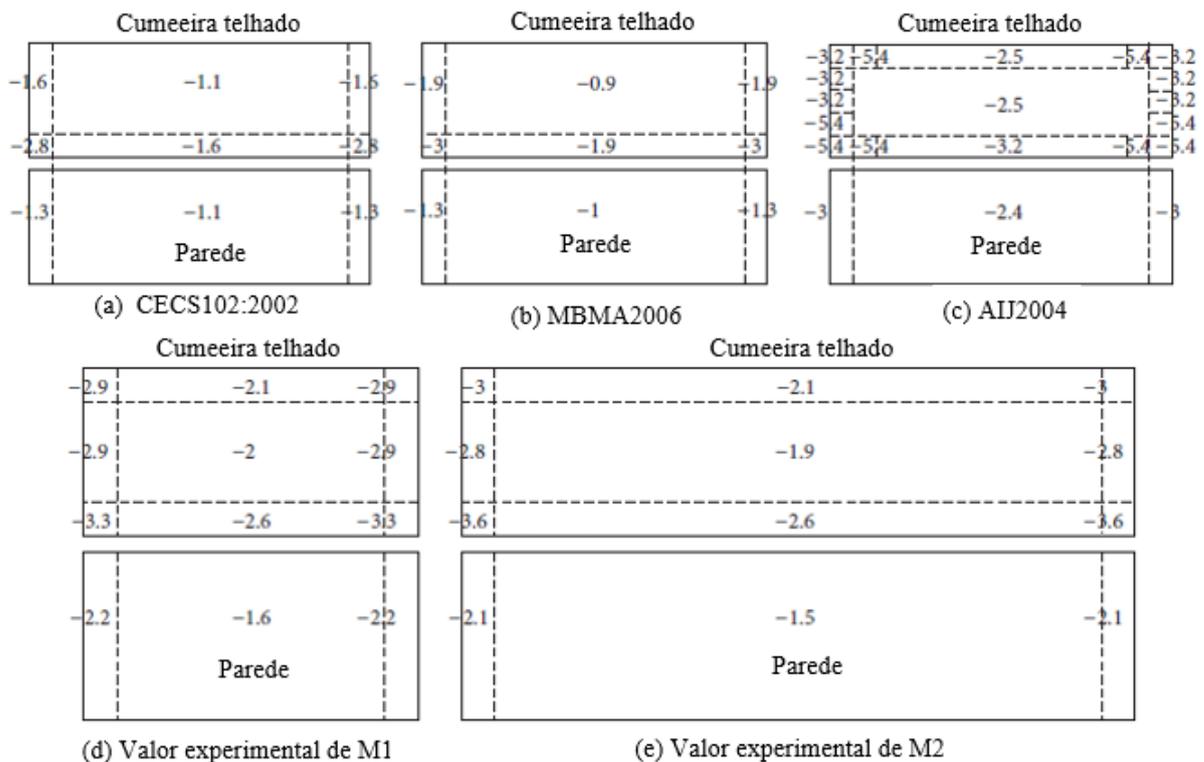
Modelos de galpão industrial com cobertura de duas águas foram testados por Jing e Li (2013) em túnel de vento para medição simultânea das distribuições das pressões. O modelo ensaiado M1 possuía dimensões de 18 metros de largura, 18 metros de comprimento e 9 metros de altura e o modelo M2 correspondia a 18 metros de largura, 36 metros de comprimento e 9 metros de altura, obtendo-se relações de comprimento/largura de 1 e 2 respectivamente. Os resultados encontrados no estudo são de extrema importância para estimar a distribuição de cargas do vento em edificações de duas águas. Outro fator importante que foi identificado é o aspecto de proporção do edifício e do ângulo de ataque do vento que tem um efeito significativo nos coeficientes de pressão. Ao se realizar um comparativo, observaram valores de coeficientes de pressão experimentais diferentes em algumas normas, mostrados na figura 17 para revestimentos em regiões de cumeeira de telhados.

Em relação aos coeficientes de pressão médios de sucção no telhado, Jing e Li (2013) mostraram pelos ensaios em túnel de vento que as pressões do vento de pico de maior magnitude estão associadas com a maior magnitude das pressões médias que atuam nas regiões de separação e descolamento do escoamento do vento em relação à edificação.

Gavanski e Uematsu (2014) utilizaram dados de ensaios de túnel de vento para três modelos na escala 1:100 com cobertura em duas águas. Em escala real possuíam largura de (12,2, 24,4 e 48,8) metros e comprimento de (19,1, 38,1 e 76,1) com altura de (7,3, 4,9 e 7,3) metros respectivamente. Baseado nestes dados, após analisarem estatisticamente, concluíram que: a magnitude das pressões positivas em paredes diminui a medida que a área média da zona aumenta; as maiores pressões de pico de sucção são observadas nas bordas laterais de paredes sendo o aumento da largura de borda da parede em função da inclinação do telhado e altura do beiral; regiões de bordas com pressões negativas críticas em telhado com inclinação de 14° são resultantes dos vórtices em bordas de telhado e parede para vento atuando na direção oblíqua;

as pressões de pico do vento que incidem sobre paredes de edificações baixas em túnel de vento obtiveram valores baixos de pressões positivas e elevados de sucções nas bordas sendo o aumento de sua magnitude na mesma proporção de aumento de área.

Figura 17 - Comparação de valores experimentais com normas para coeficientes de pressão do vento para revestimentos



Fonte: Adaptado de Jing e Li (2013).

Durante uma pesquisa, Li, Chowdhury, Bitsuamlak e Gurley (2014) avaliaram através de ensaios em túnel de vento e por meio do CFD (*Computational Fluid Dynamics*) resultados de medições de pressões em revestimentos para cobertura de edificações baixas em uma água, duas águas e quatro águas. Mostraram que a configuração geométrica dos materiais da cobertura, incluindo detalhes arquitetônicos pode afetar as pressões externas de pico, reduzir a resistência dos revestimentos contra ventos fortes e aumentar os danos. Destacaram também que a pressão interna influencia no aumento das cargas de vento e que se for negligenciada pode subestimar em 60% as cargas de pico do vento.

Ginger, Henderson, Humphreys, Konthesinghe, Stewart (2015) realizaram uma análise crítica de resultados de pressões obtidas em túnel de vento para galpões industriais de duas águas em

estrutura de aço com dimensões de 36,6 metros de largura por 54 metros de comprimento com inclinação de telhado de 5°. Verificaram que pela norma AS/NZS 1170.2 (2011) pode-se atingir efeitos de carga de vento para projeto não conservadores com pressões externas subestimadas em cerca de 20% a 30% para exposições suburbanas principalmente com vento agindo na direção paralela a cumeeira. Apontaram também que na existência de aberturas dominantes à barlavento, as pressões do vento podem aumentar em até 50% resultando em falhas estruturais à velocidade do vento em 80% acima do valor de projeto.

Alrawasdeh e Stathopoulos (2015) através de suas pesquisas verificaram que a grande maioria dos códigos e padrões normativos de determinação das pressões devido ao vento, para edificações baixas, dispõem de critérios de projeto para comprimentos menores que 100 metros e de configurações comuns. Porém, atualmente em função do crescimento de atividades do meio urbano e industrial, são construídos galpões de baixa altura com grandes comprimentos como mostra a figura 18 (a), para usos comerciais e industriais e inclusive para shopping centers. Por essa razão, realizaram avaliações analíticas dos critérios de projeto especificados entre diferentes normas e comparados com dados experimentais obtidos por meio de ensaios em túnel de vento. Foram ensaiados nove grandes galpões de alturas consideradas baixas com 5; 7,5 e 10 metros para ventos na direção 0° e 90° com incrementos de 15° em 15°, com geometria quadrada em planta com 60, 120 e 180 metros representados pela figura 18 (b) e estudadas as relações de geometria utilizadas para determinação dos coeficientes de pressão estabelecido pelas normas ASCE SEI-7:2010 e NBCC:2010, EN 1991-1-4:2005 e AS/NZS 1170.2:2011 mostrado na figura 18 (c).

Baseado nas avaliações teóricas e experimentais, Alrawasdeh e Stathopoulos (2015), constataram que:

- os valores de pressões do vento da ASCE SEI-7:2010 são maiores do que aqueles recomendados pela NBCC:2010 para algumas zonas sendo em parte devido ao fator de direcionalidade da ASCE SEI-7:2010, e parte pelo fator de rajada c_g incorporado ao coeficiente de pressão c_p utilizado pela NBCC:2010;
- as pressões induzidas pelo vento nos telhados de construções isoladas dependem da geometria e das dimensões do telhado, da altura do edifício e das características do escoamento;

- as dimensões da edificação em planta, inclinação do telhado e a altura do pavilhão afetam os padrões de escoamento do vento, podendo ocorrer recolamentos em paredes e telhados de grandes dimensões. Isso implica na distribuição das pressões e em magnitudes de pressões mais baixas na maioria das partes do telhado, em comparação com telhados menores;
- as dimensões das larguras de borda e de canto de edificações de grandes coberturas e baixas alturas com maiores pressões obtidas no túnel são notavelmente menores que os tamanhos especificados pela ASCE SEI-7:2010 e NBCC:2010. Sendo assim, projetos determinados pela ASCE SEI-7:2010 e NBC:2010 podem resultar tamanhos de bordas e regiões de canto superdimensionadas para esse tipo de construção;
- e em relação as regiões onde atuam cargas locais em paredes e telhado, recomendaram uma nova forma de calcular a largura das zonas de borda e de canto para edifícios horizontais com dimensões maiores de 90 metros e de altura menor de 8 metros.

Figura 18 – (a) Modelo de galpão de baixa altura e grandes comprimentos, (b) Modelo típicos da edificação com escala reduzida em túnel de vento: 60m, 120m e 180 metros e (c) Relações de geometria para determinação dos coeficientes de pressão.



(a)

(b)

NBCC:2010

 $H < 10\text{m}$, ou $h < 20\text{m}$ com $h < B$ $0^\circ \leq \alpha \leq 7^\circ$

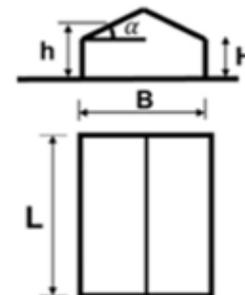
EN 1991-1-4:2005

 $h < 15\text{m}$ $-5^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$

ASCE/SEI 7-10:2010

 $H < 18\text{m}$, e $h < B$ $0^\circ \leq \alpha \leq 7^\circ$

AS/NZS 1170.2:2011

 $h < 25\text{m}$ $0^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$ 

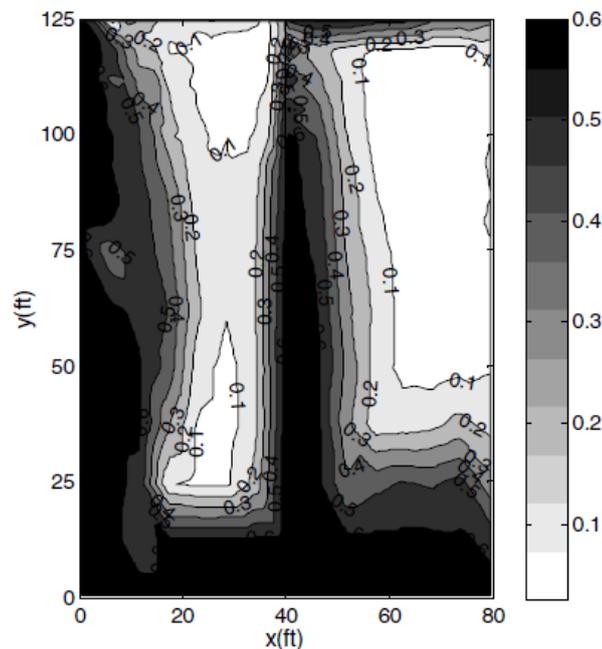
Nota: a simbologia mostrada nesta figura se refere somente ao estudo de Alrawasdeh e Stathopoulos (2015).

(c)

Fonte: Alrawasdeh e Stathopoulos (2015).

Huang, He, Mehta e Liu (2015) utilizando resultados de testes em túnel de vento avaliaram danos e riscos induzidos pelo efeito do vento em coberturas de prédios baixos revestidas com telha (*shingle*). Identificaram que as zonas de contorno do telhado e cumeeira são as mais propensas a ocorrer falhas nas telhas conforme mostram a figura 19. Atribuíram aos fatores como a velocidade e ângulo de ataque do vento, tamanhos dos edifícios, inclinação do telhado e rugosidade do terreno, os responsáveis pelo desprendimento e danos ocasionados aos revestimentos.

Figura 19 - Zonas de probabilidades de falhas no contorno da cobertura



Fonte: Huang, He, Mehta e Liu (2015).

Gierson, Phillips, Duthinh e Ayyub (2017), propuseram um método para calcular coeficientes de pressões externas para galpão de duas águas usando base de dados de túneis de vento e diagramas de Voronoi que são adequados para calcular áreas tributárias de tomadas de pressão espaçadas irregularmente de modo a definir as pressões médias de cada tomada. O método foi aplicado aos resultados de pressões de ensaios de túnel de vento obtidos para três pavilhões em duas águas. E ao comparar estas pressões com resultados determinados pela norma ASCE SEI-7:2010, concluíram que pela ASCE SEI-7:2010 pode-se subestimar severamente os coeficientes de pressão para componentes e revestimentos de todas as zonas em prédios baixos.

Testes em túnel de vento foram executados por Hong (2017) para edificação quadrada com proporções diferentes de relação altura/largura em prédios baixos e altos para determinar os coeficientes de pressão do vento e suas respectivas áreas de atuação. Os resultados dos ensaios foram comparados com a ASCE SEI-7:2010 e constataram para os prédios baixos que: muitas das sucções extremas resultaram das separações de escoamento para vento nas direções entre 90° e 120°; as menores magnitudes de coeficientes de pressão positiva foram encontrados no topo da construção; as pressões nas zonas são diferentes sendo que as larguras de cada zona diferem dependendo da relação com a altura; coeficientes de pressão de sucção tem variado de forma contínua com magnitudes menores para configurações de menor altura. Além disso, os coeficientes de sucção são bem diferentes conforme aumenta a distância de afastamento da região de borda.

Jendzelovsky, Antal e Konecná (2017) realizaram uma investigação através de testes em túnel de vento e por meio de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), e constataram que os resultados das pressões entre ambos estão relativamente próximos com uma diferença no geral de 6%. Os autores destacaram que a simulação conjunta com testes em túnel de vento e com simulação CFD é a melhor maneira de analisar efeitos do vento em edificações para estruturas incomuns.

Flaga, Klaput e Kocon (2018) fizeram medições de pressões por meio de ensaios em túnel de vento de edificações baixas em duas águas com diferentes dimensões. Obtiveram valores de coeficientes médios e de pico. As variáveis avaliadas foram, o ângulo de ataque do vento, rugosidade do terreno, forma do telhado e a geometria da construção. Como resultados, constataram que: o formato da construção tem uma influência significativa na ação do vento sobre as superfícies analisadas; os valores mais elevados de pressão externa negativa devida ao vento foram observados na borda da seção transversal do telhado, para um ângulo de ataque do vento a 45°, e as maiores magnitudes de pressão positiva do vento foram identificadas nas paredes laterais longitudinais para vento agindo em um ângulo de 90°. As maiores diferenças constatadas pelos autores foram devido a geometria, onde quanto menor for o comprimento, maior o valor do coeficiente de pressão externa.

A síntese dos estudos realizados sobre pressões locais devidas ao vento sobre construções ao longo das últimas quatro décadas resulta em contribuições importantes para o aprimoramento das especificações de cálculo e projeto estabelecidos atualmente nos padrões normativos

nacionais e internacionais. Entretanto, observam-se várias lacunas que podem contribuir para melhorar a qualidade do projeto para resistir à ação do vento.

Dentre estas lacunas pode-se identificar a influência das escalas geométricas adotadas nos modelos reduzidos ensaiados em túnel de vento sobre as pressões devidas ao vento em fachadas e coberturas e, principalmente, sobre as regiões de borda, revestimentos e estruturas secundárias de pavilhões. A maioria dos estudos apontam as regiões de borda e canto como sendo as mais propensas ao rompimento das fixações e desprendimento dos elementos. Além disso, a grande maioria das pesquisas não contempla edificações baixas de grandes dimensões, como as que estão sendo construídas atualmente.

1.3 OBJETIVOS

Em relação ao que foi exposto anteriormente, este trabalho tem como objetivo geral apresentar um estudo detalhado que visa melhorar o conhecimento quanto a magnitude e distribuição das pressões locais sobre modelos de um mesmo pavilhão industrial de grandes dimensões com cobertura em duas águas. Portanto, para atendimento do objetivo geral têm-se os seguintes objetivos específicos:

- determinar coeficientes de pressão externa, através de ensaios em túnel de vento, considerando distintas relações entre escala geométrica e escala da turbulência em três modelos reduzidos de um mesmo pavilhão industrial;
- avaliar as prescrições analíticas e verificar a adequação dos processos normativos estabelecidos na ABNT NBR 6123:1988, ASCE/SEI 7-16:2016, EN-1991-1-4:2010, AS/NZS 1170.2:2011 e NBCC:2015 a esta nova família de coeficientes aerodinâmicos gerados neste trabalho;
- apresentar maior detalhamento da distribuição e dimensões das zonas de atuação das pressões locais para telhados e paredes para os modelos estudados;
- propor uma nova configuração de apresentação por zona, para a norma NBR 6123, dos coeficientes de pressão.

Importante mencionar que não são consideradas as pressões internas nesta pesquisa, mesmo que sejam fundamentais para a determinação das forças resultantes devidas ao vento. Somente são abordadas as pressões externas locais.

Para atender os objetivos acima listados é considerada uma edificação horizontal baixa utilizada como pavilhão industrial, com telhado em duas águas, com dimensões de 60 metros de largura (dimensão “b”), 100 metros de comprimento (dimensão “a”), 9,8 metros de altura (dimensão “h”) e 10,70 metros de altura total (dimensão “H”), com inclinação de $1,72^\circ$. Para este pavilhão são determinadas pressões dinâmicas, coeficientes e pressões externas locais aplicando os padrões normativos mencionados e ensaios realizados em túnel de vento.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta tese de doutorado estrutura-se em seis capítulos, além das referências bibliográficas:

Capítulo 01 – INTRODUÇÃO, aborda o contexto e justificativa sobre a abrangência e relevância do tema proposto, problema investigado, objetivos da pesquisa e estrutura para desenvolvimento do trabalho. Trata também do referencial bibliográfico considerando o estado da arte para ação do vento em pavilhões industriais através do histórico e estudos disponíveis em publicações e referências clássicas desenvolvidos a cerca da determinação de coeficientes de pressão externa local. Essa abordagem tem o intuito de conhecer as pesquisas realizadas bem como, mostrar áreas de conhecimento acerca do tema abordado que necessitem de estudos mais aprofundados para esclarecer resultados contraditórios e apresentar um resultado conclusivo. Faz-se uma explanação resumida dos resultados relevantes inseridos em publicações quanto à coeficientes e pressões em consequência do vento obtidos por simulação numérica e através de ensaios em túnel de vento.

Capítulo 02 – AÇÃO DO VENTO EM PAVILHÕES INDUSTRIAIS: trata sobre conceitos gerais do vento, características do vento relacionadas a velocidades médias, rajadas, critérios de camada limite e características do vento natural. Quanto ao vento natural são apresentadas considerações de comportamento físico, matemático e experimental relacionadas ao perfil de velocidades médias, intensidade e macroescala da componente longitudinal da turbulência e espectro de potência das rajadas. São apresentados os dispositivos para simulação experimental do vento natural em túnel de vento utilizando modelos em escala reduzida. Aborda-se também

os estudos acerca do efeito do vento em edificações baixas associado as formas de medição, obtenção e determinação da pressão estática, coeficientes de pressão locais externos, ações locais sobre superfícies, bem como a influência das proporções e formas na distribuição das pressões e breve síntese de conceitos básicos sobre pressão interna.

Capítulo 3 – PRESCRIÇÕES NORMATIVAS: apresenta os procedimentos e critérios de cálculo para determinações de pressões dinâmicas e coeficientes aerodinâmicos de pressão externa locais de forma devido à ação do vento estabelecidas em cada uma das norma avaliadas neste estudo (ABNT NBR 6123:1988, ASCE/SEI 7-16:2016, EN-1991-1-4:2010, AS/NZS 1170.2:2011 e NBCC:2015). Os métodos de cálculo avaliados foram focados para determinar coeficientes de pressões de revestimentos e elementos para uso estrutural secundário de paredes e telhado.

Capítulo 04 – ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO: apresenta os critérios da teoria de semelhança para modelos reduzidos ensaiados em túnel de vento em relação a escala real. Estão descritas as características do túnel de vento e os instrumentos de medição das pressões utilizados em ensaio experimental. Apresenta também a geometria dos modelos de estudo desta pesquisa, incluindo as premissas consideradas para aplicação dos procedimentos analíticos e características dos ensaios em túnel de vento.

Capítulo 05 – PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS: Esse capítulo é subdividido em 04 partes incluindo suas respectivas análises dos resultados:

- 5.1 resultados normativos: apresenta resultados das pressões dinâmicas, coeficientes de pressões locais em acordo com os critérios estabelecidos por cada norma aplicado ao modelo do pavilhão industrial considerado para esta pesquisa e citado no capítulo 04;
- 5.2 resultados experimentais: aponta os resultados de coeficientes de pressão local para o modelo do pavilhão industrial mostrado no capítulo 04 em três escalas geométricas (1:400, 1:200 e 1:100) obtidos através de medições no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.
- 5.3 comparativos dos resultados normativos e experimentais: são indicadas para o modelo analisado em paredes e telhado na forma planificada, as pressões utilizando

coeficientes obtidos por norma e de ensaios em túnel de vento nas diferentes escalas geométricas ensaiadas;

- 5.4 Diagrama de distribuição de pressões: apresentado através de um diagrama com disposição de zonas para o pavilhão de estudo e apresentado os comparativos das pressões e larguras de zonas entre as normas avaliadas e ensaios em túnel de vento. Este item inclui também uma proposta para uma futura revisão da norma brasileira NBR 6123, através de um novo diagrama de distribuição e dimensões das zonas de atuação das pressões de sucção e sobrepressão bem como valores de coeficientes de pressão externa local, para edificações com cobertura em duas águas, de baixa altura, pequena inclinação de telhado e grandes dimensões em planta.

Capítulo 06 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES: descreve as conclusões da pesquisa respondendo aos objetivos propostos, incluindo sugestões como propostas para continuidade dos estudos para uma possível revisão da atual versão da norma brasileira NBR 6123:1988.

2 AÇÃO DO VENTO EM PAVILHÕES INDUSTRIAIS

Esse capítulo faz uma abordagem dos conceitos gerais sobre as principais características do vento natural, bem como sua interação com edificações baixas. São apresentadas considerações técnicas sobre formas e proporções de maior impacto nas pressões locais em razão do vento para projeto e dimensionamento de revestimentos, fixadores e elementos secundários para uso estrutural.

2.1 CARACTERÍSTICAS DO VENTO NATURAL

As características do vento natural podem variar conforme as condições climatológicas e as características do terreno. A seguir são apresentadas considerações sobre as principais características dos ventos sinóticos considerados na Engenharia do Vento.

2.1.1 Perfil vertical de velocidades médias

Os modelos mais aplicados nos estudos de engenharia do vento segundo Loredou-Souza, Schettini e Paluch (2004) são:

- Perfil em lei de potência: descrito pela equação 01, descreve a camada limite atmosférica na maior parte da camada limite atmosférica, exceto zonas localizadas próximo à superfície. A caracterização do expoente p é pelo tipo de terreno, com variação de 0,11 para superfícies com rugosidade baixa como mar e lagos, a 0,34 para centros urbanos com grande predominância de prédios altos.

$$\frac{\bar{V}_z}{\bar{V}_{z_{ref}}} = \left(\frac{z - z_d}{z_{ref}} \right)^p \quad \text{Equação 01}$$

Onde:

\bar{V}_z = velocidade média do vento na altura de interesse z ;

$\bar{V}_{z_{ref}}$ = velocidade média do vento na altura de referência;

z = altura de interesse acima da superfície terrestre;

z_d = altura do plano zero;

z_{ref} = altura de referência;

p = expoente da lei de potência.

- Perfil em lei logarítmica: descrito pela equação 02. A velocidade de fricção μ^* e a rugosidade aerodinâmica z_o , dependem das características físicas do terreno e do vento. A rugosidade aerodinâmica define a intersecção do perfil de velocidades médias com o plano de deslocamento zero. Para o caso de campos abertos, o valor de z_o é da ordem de 0,03 metros e para cidades com edifícios baixos, $z_o = 0,3$ metros, através de:

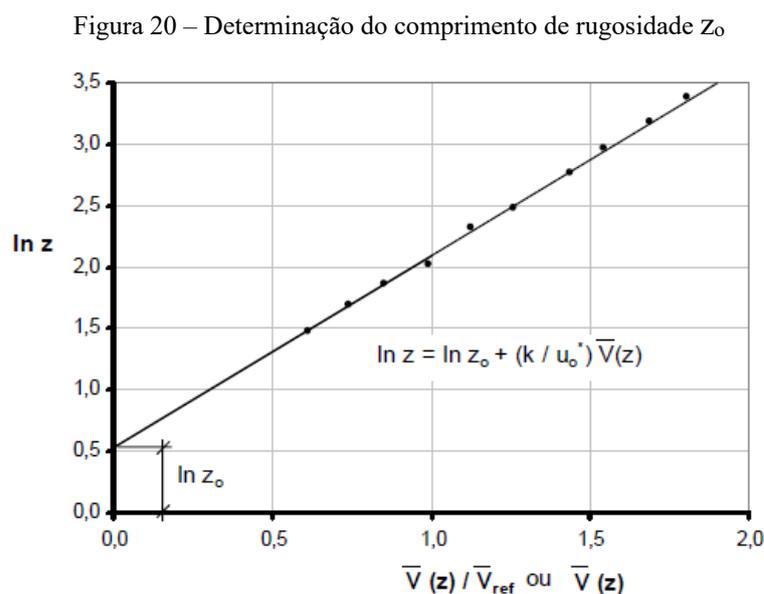
$$\frac{\bar{V}_z}{\mu^*} = \frac{1}{K} \ln \left(\frac{z - z_d}{z_o} \right) \quad \text{Equação 02}$$

Onde:

z_o = representa a altura média da rugosidade do terreno ou rugosidade aerodinâmica (figura 20);

k = constante de von Kármán, cujo valor é 0,40;

μ^* = velocidade de fricção;



Fonte: Loredou-Souza, Schettini e Paluch (2004).

O perfil em lei de potência não reconhece o topo da camada limite atmosférica permitindo aumentar indefinidamente e além disso é considerado um modelo que não possui justificativa teórica. Já o perfil em lei logarítmica possibilita um bom ajuste na camada limite próximo ao solo, mas tem problemas na representação em zona superior à camada limite atmosférica (LOREDO-SOUZA, SCHETTINI e PALUCH; 2004).

2.1.2 Intensidade da turbulência

A intensidade da turbulência é definida pela relação entre o desvio padrão das flutuações da velocidade do vento e uma velocidade de referência, sendo (BLESSMANN; 2013a):

Intensidade local da turbulência (longitudinal, transversal/lateral, vertical) através da equação 03:

$$l_i(r) = \frac{\sigma_i(r)}{\bar{V}(r)}; i = 1, 2, 3 \quad \text{Equação 03}$$

Intensidade normalizada da turbulência (longitudinal, transversal/lateral, vertical) pela equação 04:

$$l_{io}(r) = \frac{\sigma_i(r)}{(V_{ref})}; i = 1, 2, 3 \quad \text{Equação 04}$$

Onde:

l_i = intensidade local da turbulência;

l_{io} = intensidade normalizada da turbulência;

σ_i = desvio padrão das flutuações da velocidade do vento;

\bar{V}_r = velocidade de referência para intensidade local da turbulência;

\bar{V}_{ref} = velocidade de referência para intensidade normalizada da turbulência;

i = componente V_i do vetor rajada na posição do ponto (r);

1, 2, 3 = eixos de direções; x, y, z: coordenadas.

2.1.3 Escala da turbulência

As características espaciais da turbulência podem ser quantitativamente definidas a partir das funções de correlação. Na prática isto é feito através das “escalas da turbulência”, que são parâmetros que servem para avaliar as dimensões dos maiores turbilhões (Blessmann, 2013a). São também denominadas escalas integrais da turbulência ou macroescalas da turbulência.

ESDU (1974) adota a equação 05 devida à von Kármán (para a componente longitudinal da turbulência):

$$L_{11}(z) = 25 z^{0,35} z_0^{-0,063} \quad \text{Equação 05}$$

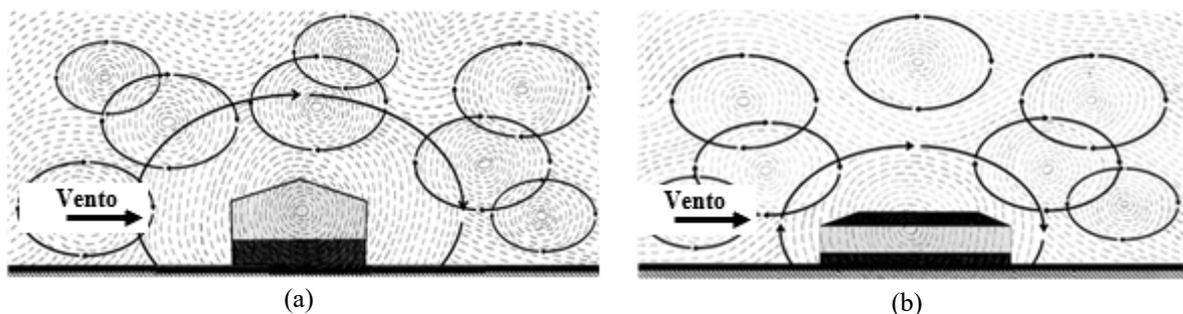
Também é possível estimar as escalas da turbulência a partir do comprimento de onda correspondente ao pico do espectro da turbulência através da equação 06:

$$L_{11}(z) = (1/2\pi)(V/f_{\text{pico}}) \quad \text{Equação 06}$$

Avaliado no pico do espectro normalizado da respectiva componente.

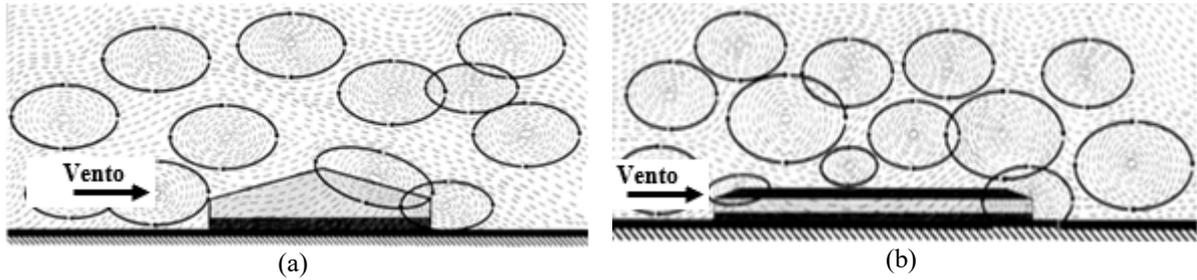
Uma ilustração interpretativa da interação entre os turbilhões e uma edificação é apresentada nas figuras 21 e 22. Turbilhões menores têm pouca influência sobre a estrutura global, mas exercem forte influência em pequenas construções, elementos de estrutura secundária e revestimentos, principalmente em zonas de bordas, cantos e adornos em geral das fachadas. São rajadas de pequena duração.

Figura 21 – Ilustração interpretativa da interação entre turbilhões de grandes dimensões e uma edificação: (a) Vista transversal; (b) Vista longitudinal



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 22 – Ilustração interpretativa da interação entre turbilhões de pequenas dimensões e uma edificação: (a) Vista transversal; (b) Vista longitudinal



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

2.1.4 Espectro da turbulência

O espectro de potência (ou a densidades espectral da variância), de acordo com Blessmann (2013a), indica a distribuição, em frequência, da energia cinética contida nas rajadas sendo representado matematicamente pelas equações mostradas a seguir.

A densidade espectral da velocidade do vento, $S_i(f)$, tem por unidade (velocidade)² / Hz. Ao multiplicar pela frequência, $f S_i(f)$ será dado em (velocidade)² ou, mais precisamente, com as unidades em (m/s)². Adotando-se a variância como elemento de normalização pela equação 07:

$$\frac{f S_i(z, f)}{\sigma_i^2(z)} \quad \text{Equação 07}$$

A área do espectro fornece a variância (equação 08):

$$\sigma_i^2 = \int_0^{\infty} S_i(f) df \quad \text{Equação 08}$$

Podendo ser escrita pela equação 09:

$$\sigma_i^2 = \int_0^{\infty} f S_i(f) d(\ln f) \quad \text{Equação 09}$$

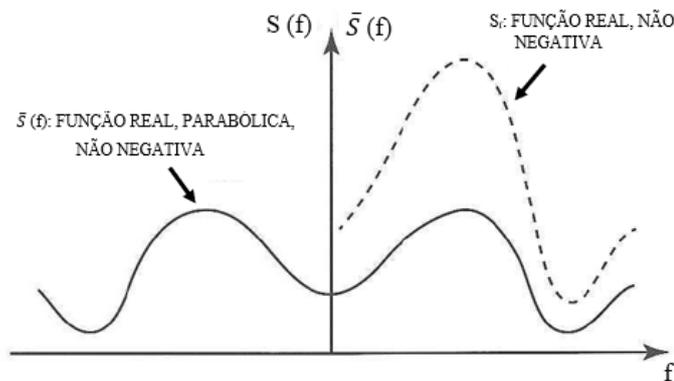
Onde:

$z =$ cota acima do terreno;

$$d(\ln f) = df / f.$$

Apresentando em forma gráfica a função $fS_i(f)$ versus o logaritmo da frequência mostrado na figura 23, a área sob a curva entre duas frequências será proporcional à energia total, isto é, à variância. Mas, considerando para ordenada $fS_i(f)/\sigma_i^2$, ainda se têm as áreas proporcionais à energia nos respectivos intervalos de frequência, embora não seja mais possível comparar a energia de espectros com variâncias diferentes diretamente pela área. A cota z deve ser a mesma em todos os espectros.

Figura 23 – Densidades espectrais da variância (espectros de potência)



Fonte: Adaptado de Blessmann (2013a).

2.2 VENTO EM EDIFICAÇÕES BAIXAS

2.2.1 Coeficiente de pressão

Os coeficientes aerodinâmicos de pressão são valores adimensionais determinados pela razão entre a pressão efetiva, Δp , devida ao vento, e a pressão dinâmica do vento, q , conforme equações 10 e 11 (ABNT, NBR 6123, 1988).

$$c_p = \frac{\Delta p}{q} \quad \text{Equação 10}$$

$$q = \frac{1}{2} \rho_{ar} V^2 \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

c_p = coeficiente de pressão.

q = pressão dinâmica do vento (N/m^2) correspondente à velocidade média;

V = velocidade média do vento (m/s);

ρ_{ar} = massa específica do ar em kg/m^3 .

O valor de c_p refere-se a um “ponto” (área muito pequena) m em que se mede a pressão, mas se em um modelo for instalado uma grande quantidade de tomadas de pressão em uma determinada região, é possível conhecer a distribuição de pressões correspondentes e conseqüentemente os coeficientes de pressão externa naqueles pontos (BLESSMANN, 2011). Os coeficientes de pressão são obtidos normalizando as pressões medidas no túnel de vento pela pressão dinâmica média coletada em uma altura de referência, mais comumente localizada acima da camada limite ou na altura do telhado do edifício que está sendo ensaiado. O coeficiente de pressão em geral varia no tempo para edifícios expostos a tempestades com ventos estacionários ou sinópticos.

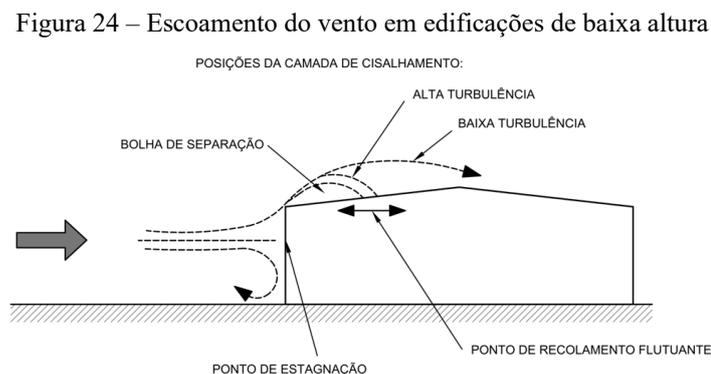
2.2.2 Ações locais

Ações locais são provenientes de pressões elevadas atuantes em regiões específicas das construções como arestas de paredes e telhados, beirais, cumeeiras, dispositivos salientes como torres, chaminés, volumes arquitetônicos, revestimentos em geral, lanternins, elementos de fixação e ancoragens (BLESSMANN, 2009). A magnitude das pressões locais depende de características como formato e dimensões da construção, altura de paredes e inclinação do telhado.

Pitta (2014) lembra que as pressões locais mais elevadas são provocadas na grande maioria das vezes por vórtices de base e de topo com ventos atuando na direção da diagonal a aproximadamente 45° , geralmente incidindo nas quinas a barlavento, podendo gerar grandes arrancamentos de coberturas e suas ancoragens, podendo até levar ao colapso da edificação.

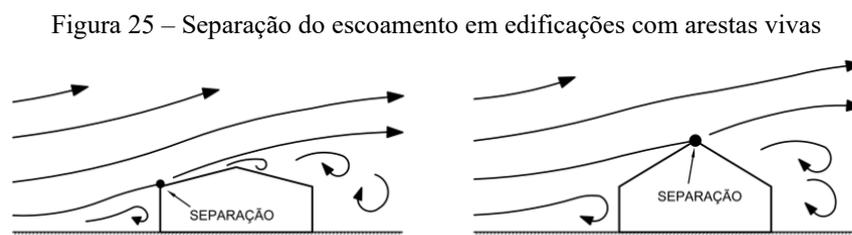
Pressões externas flutuantes e de pico em edifícios baixos são altamente dependentes das propriedades de turbulência do escoamento (HOLMES, 2004).

Através da figura 24 Holmes (2004) ilustra algumas características do escoamento sobre uma edificação com um telhado inclinado. O escoamento se separa na aresta viva do topo da parede de barlavento e recola em alguma zona específica dependendo da turbulência do escoamento incidente, formando uma zona de separação identificada por “bolha”. No entanto, esta bolha existe apenas por um determinado tempo. A zona de separação é delimitada por uma camada livre de cisalhamento de alta velocidade e alta turbulência. Essa camada se enrola intermitentemente para formar vórtices podendo produzir altos picos de pressão negativa na superfície do telhado.



Fonte: Adaptado de Holmes (2004).

Blessmann (2009) afirma que, para edificações com arestas vivas, a separação do escoamento acontece sempre em arestas, independentemente da velocidade do vento (figura 25). Entretanto, o autor menciona que a separação do escoamento em superfícies curvas depende não somente dos fatores que formam o número de Reynolds e da turbulência do vento, mas também das características de rugosidade superficial do sólido.



Fonte: Blessmann (2009).

Holmes (2004) cita as seguintes características aplicáveis a edifícios baixos com proporções de altura/profundidade inferiores de 0,5, onde à medida que essa proporção aumenta, as pressões na cobertura geralmente se tornam mais negativas:

- para ventos normais à linha de cumeeira e inclinação do telhado entre 10° e 20° graus, ocorre uma segunda separação de escoamento na cumeeira, produzindo regiões de altas pressões negativas em ambos os lados da cumeeira.
- nas inclinações do telhado superiores de 20°, ocorrem pressões médias positivas na face do telhado a barlavento, e escoamentos totalmente separados sem recoloamento ocorrem a sotavento da cumeeira gerando pressões médias negativas relativamente uniformes na água de sotavento.

As características acima descritas são representadas na figura 26 onde são mostradas as distribuições das pressões médias ao longo da linha central dos prédios baixos para vários ângulos do telhado e proporções de h/d correspondente a altura/profundidade.

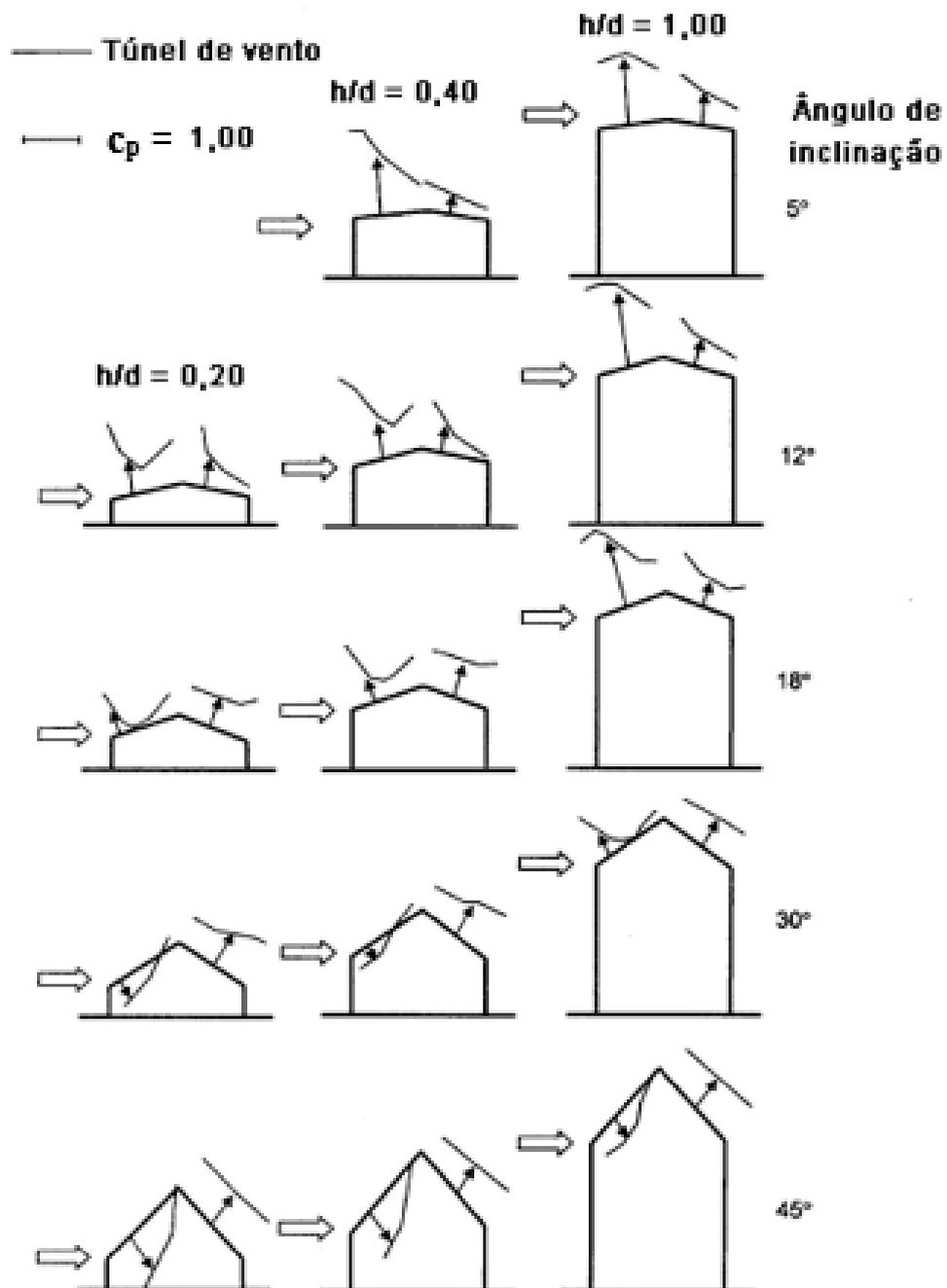
A dimensão horizontal perpendicular ao vento (fachada lateral) é aproximadamente o dobro da dimensão paralela ao vento (fachada de oitão). Para edifícios mais altos com razões h/d de 3 ou mais, a pressão do telhado é negativa em ambas as faces, mesmo para as inclinações do telhado maior que 20° (HOLMES, 2004).

Separação e recoloamento de escoamento semelhante ao estudo em telhados mostrado por Holmes (2004), ocorrem também em paredes de edifícios baixos, embora a magnitude dos coeficientes de pressão médios seja geralmente mais baixa. As pressões médias nas paredes de barlavento são positivas e as paredes de sotavento geralmente apresentam pressões negativas de menor magnitude. Entretanto, os valores dependem das dimensões do edifício, incluindo o ângulo de inclinação do telhado.

Quando o vento incide obliquamente no canto de um telhado, um padrão de escoamento mais complexo surge: os vórtices cônicos mostrados na figura 27. As pressões associadas a estes vórtices são as maiores que ocorrem nos telhados baixos, quadrados ou retangulares em planta, embora as áreas em que atuam sejam geralmente muito pequenas, sendo mais significativas as pressões em pequenas áreas de revestimento do que para cargas nos principais componentes estruturais (HOLMES, 2004).

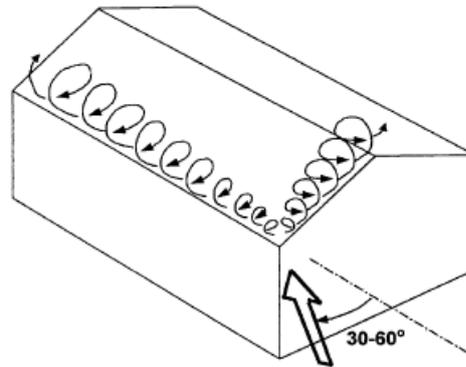
Um exemplo típico de distribuição das pressões locais para vento agindo obliquamente em edificação de duas águas, representado por meio de curvas isóbaras obtidas através de ensaio em túnel de vento são apresentados por Blessmann (2009) na figura 28. Pelas linhas isobáricas na água de barlavento podem ser identificados os vórtices de topo em razão do vento oblíquo.

Figura 26 – Distribuição das pressões médias em telhados inclinados



Fonte: Adaptado de Holmes (2004).

Figura 27 – Vórtices cônicos para vento com incidência oblíqua

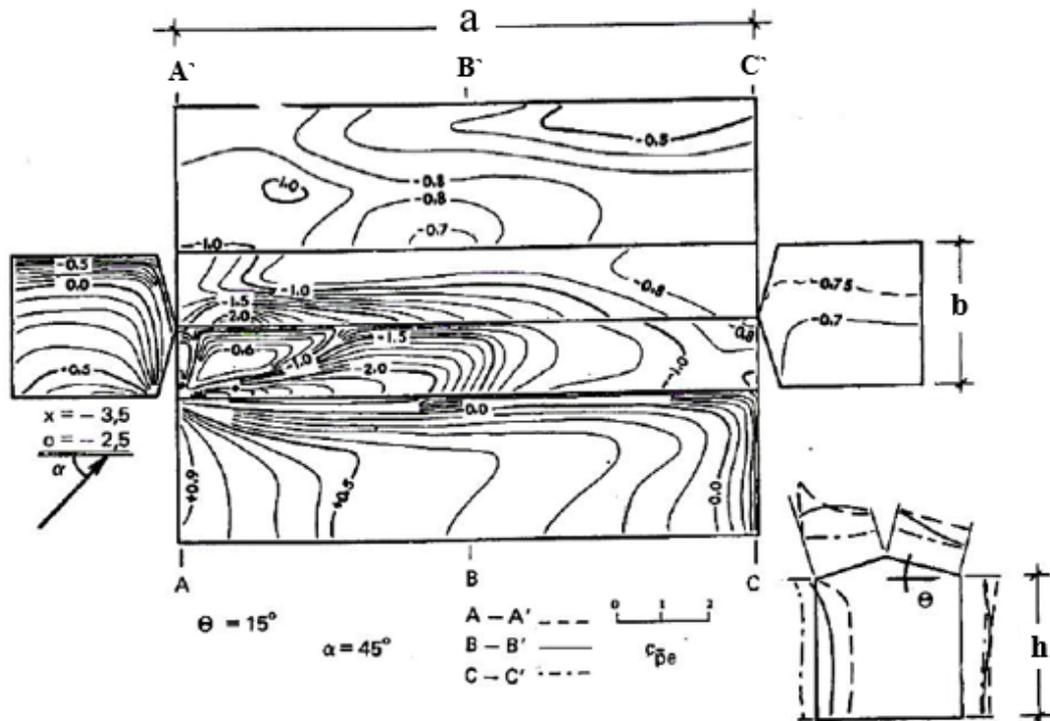


Fonte: Holmes (2004).

As altas sucções locais, além dos vórtices de topo provocados pela atuação do vento oblíquo, também ocorrem da seguinte forma, Blessmann (2009):

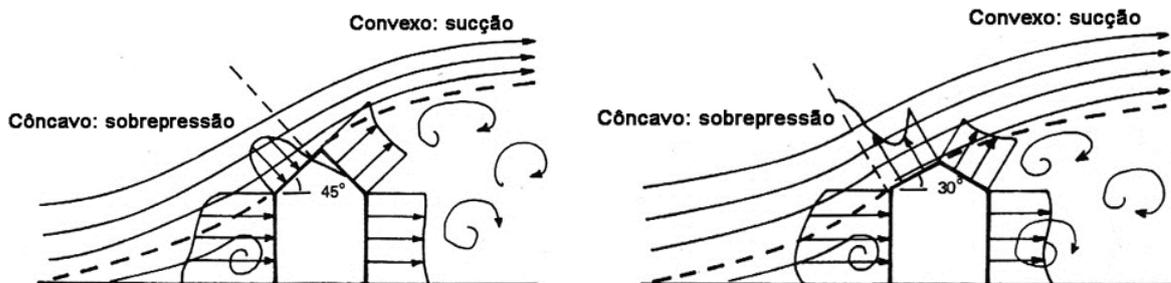
- em regiões de barlavento para vento atuando perpendicularmente à cumeeira, principalmente com inclinações de 8° e 12° , havendo reduções nas sucções com o aumento dessas inclinações e sobrepressões em algumas zonas no telhado para inclinações acima de 35° . Em regiões de cumeeira, sucções altas podem causar o arrancamento das telhas;
- redemoinhos cônicos (vórtices de base) originados de escoamentos do vento que se desprenderam pela lateral após ataque na parede de barlavento e que se inseriram no percurso da esteira, bem como, formação dos escoamentos contínuos redirecionados de acordo com a forma do edifício e pelos turbilhões de base mostrado na figura 29.

Figura 28 - Curvas isobáricas com vento oblíquo (ensaios em Iowa por Chien et al; 1951)



Fonte: Blessmann (2009).

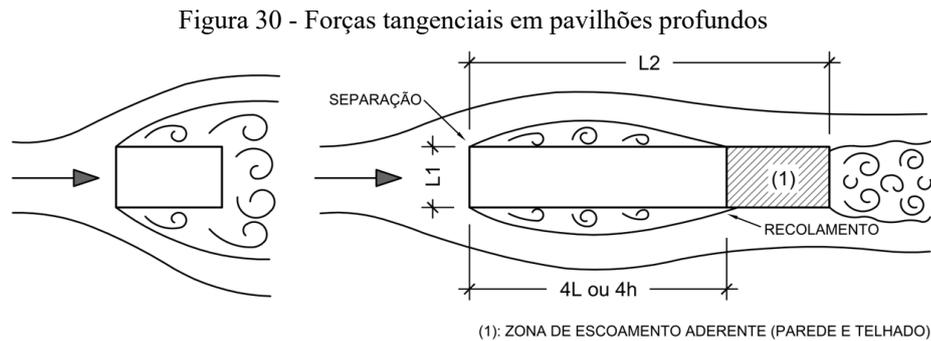
Figura 29 – Influência da forma do escoamento nas pressões



Fonte: Blessmann (2009).

Para efeito do vento incidindo no sentido longitudinal da edificação, se esta for profunda, há um recolamento do escoamento que se separou nas arestas da fachada de barlavento (Blessmann, 2009). Este efeito geralmente se dá, aproximadamente, a uma distância da fachada de barlavento igual a $4L$ ou $4h$, sendo L a maior dimensão e h a altura da construção, devendo ser adotado o menor dos dois valores conforme mostrado na figura 30.

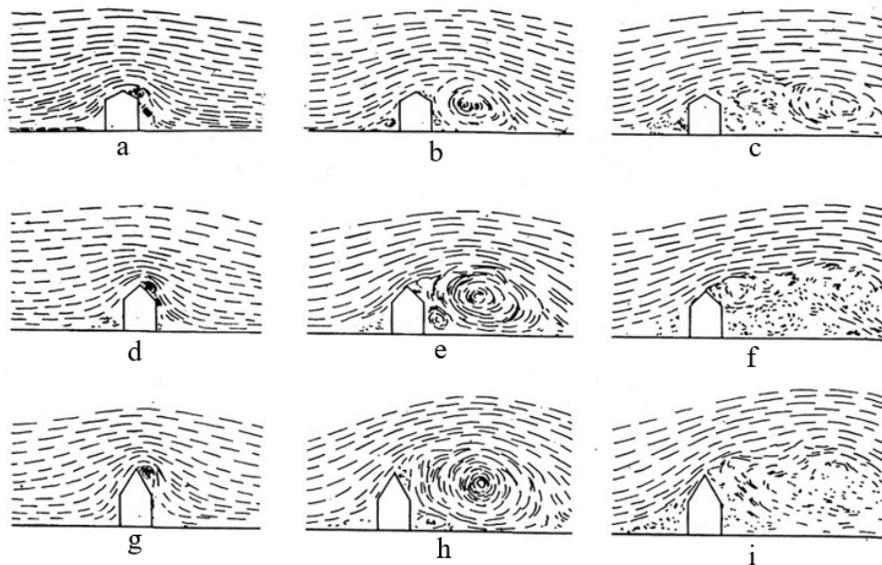
Em pavilhões considerados profundos, ou seja, de comprimentos longos no sentido do vento, Blessmann (2009) também comenta que o bulbo de altas sucções tende a ter uma queda rápida das pressões de sucção obtendo-se valores próximos de zero para vento soprando paralelamente ao eixo longitudinal do pavilhão, podendo ocorrer pequenas sobrepressões na face de sotavento.



Fonte: Adaptado de Blessmann (2009).

Por meio da figura 31, com origem nos ensaios de Irminger e Nökkentved em 1936 relatada por Blessmann (2009), ilustra-se o padrão do escoamento do ar (escoamento uniforme) ocorrendo em três etapas: primeiramente nas movimentações do ar, na sequência por um grande turbilhão a sotavento e na fase final por uma esteira composta por elevado número de pequenos turbilhões.

Figura 31 – Formato do escoamento – telhado 30°, 45° e 60° (ensaios de Irminger e Nökkentved)

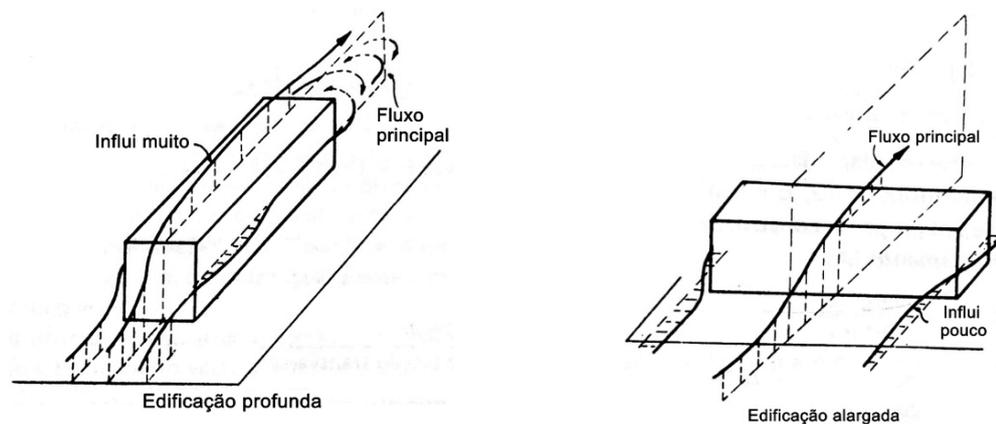


Fonte: Adaptado de Blessmann (2009).

2.2.3 Proporções e formas

Blessmann (2011) considera importante diferenciar entre modelos e edificações longas (escoamento bidimensional) e curtas (escoamento tridimensional). Nas edificações curtas de escoamento tridimensional têm-se as classificações em: alteados, alargados e profundos, sendo nos profundos (figura 32) o enquadramento de construções de grande comprimento em relação as dimensões transversais. Nestas construções profundas a influência do escoamento pelo topo é muito grande reduzindo o movimento da esteira, tendendo para uma forma mais afilada aderente na zona de sotavento e nas fachadas laterais submetidas a ventos de alta turbulência, ocorrendo reduções das sucções a sotavento e surgindo turbilhões estacionários na esteira.

Figura 32 – Classificação da construção de acordo com a sua proporção: profunda e alargada

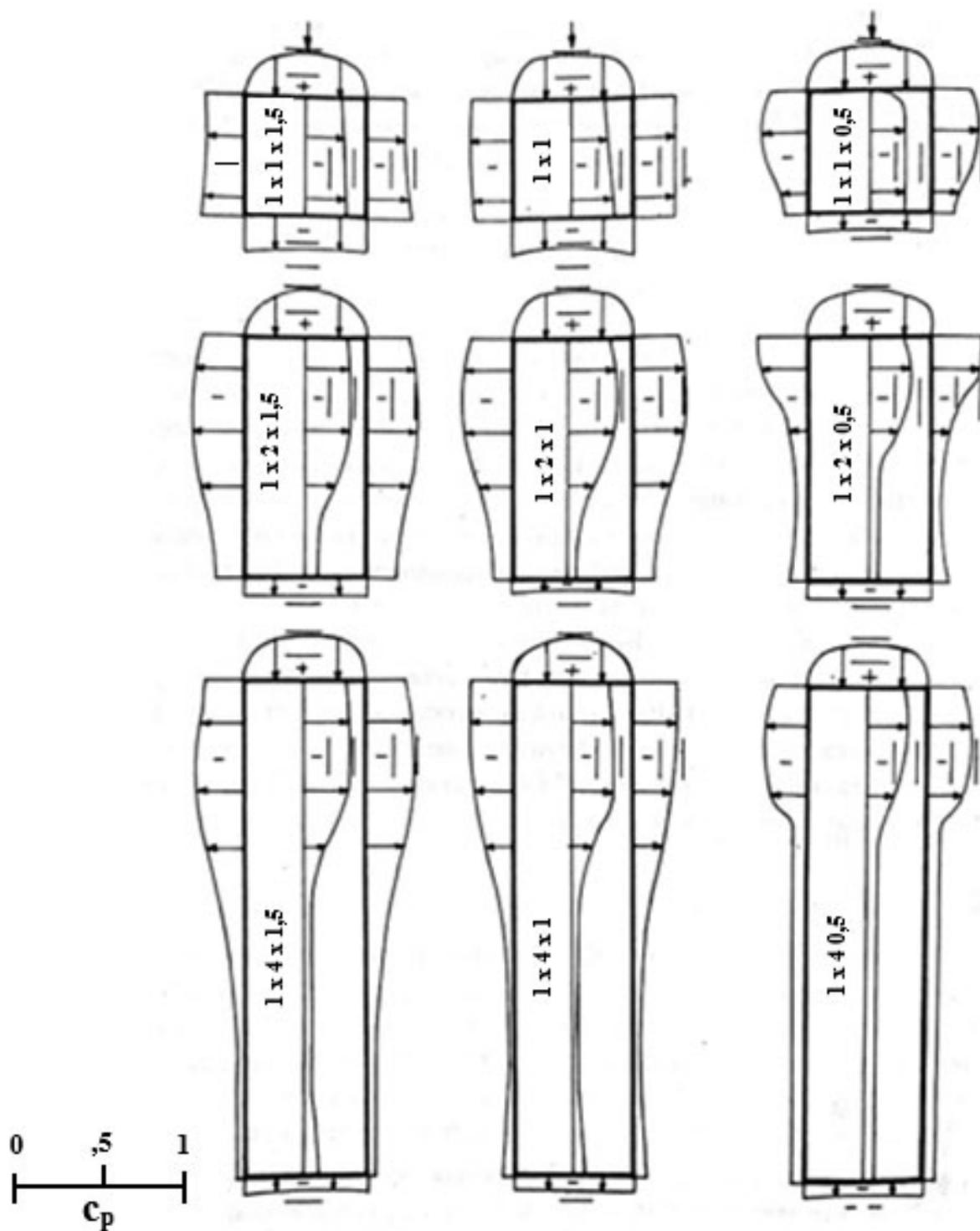


Fonte: Adaptado de Blessmann (2011).

Blessmann (2009) comenta que a partir de relações de comprimento/largura (a/b) próximas de 4, as edificações apresentam força de arrasto quase invariável, mas a componente tangencial aumenta conforme aumenta a profundidade. A figura 33 apresenta a distribuição das pressões para vento longitudinal oriundos dos ensaios de Iowa em 1951, com detalhamento dos perfis longitudinais de c_{pe} em corte horizontal a meia altura para as paredes e em corte vertical do eixo longitudinal do pavilhão para a cobertura horizontal.

Pelos estudos mostrados, os coeficientes de pressão local de maior magnitude ocorrem nos cantos e bordas de telhado e extremidades de paredes. Por essa razão, Gonçalves, Sales, Malite e Neto (2004) indicam que para efeitos de dimensionamento de caixilhos, telhas e mesmo terças e ou outros elementos estruturais secundários e de revestimentos devem ser usados os coeficientes de pressão local que apresentam valores maiores que os coeficientes de forma.

Figura 33 – Perfis de pressão nas paredes e coberturas (ensaio de Iowa, 1951)



Fonte: Adaptado de Blessmann (2009).

2.2.4 Pressões internas

As pressões internas estão diretamente associadas aos tamanhos e posições de aberturas dispostas em paredes e telhados das edificações que permitem a entrada do vento (GONÇALVEZ, SALES, MALITE e NETO; 2004). Segundo Pitta (2014), a localização e as dimensões das aberturas permitem determinar com precisão os valores de pressões internas que podem resultar elevadas pressões negativas internas, bem como sobrepressões quando as fachadas apresentarem grandes áreas de aberturas a barlavento.

As pressões internas induzidas pelo vento podem representar uma alta proporção da carga de vento total de projeto (Holmes, 2004). Estas pressões internas podem ocorrer em diferentes situações de projeto como pressões internas induzidas pelo vento dentro de edifícios provocadas por uma única abertura dominante em uma parede, várias aberturas de parede e o efeito da porosidade da parede (BLESSMANN, 2013b). Para casos de uma abertura dominante na face de barlavento, Holmes (2004) destaca que geralmente em fortes tempestades de vento podem ocasionar quebras de vidros e lançamentos de detritos.

Em edifícios baixos de acordo com Holmes (2004) é comum existir um único espaço interno, e as pressões internas podem ser muito significativas, especialmente quando uma abertura dominante ocorre em uma parede de barlavento. Desta forma, a magnitude dos picos de pressão internos e sua correlação com os picos em pressão, deve ser avaliada.

Blessmann (2013b) destaca a importância da pressão interna nas construções com grandes espaços internos, com estrutura e vedações leves, como por exemplo pavilhões para exposições e indústrias, hangares, estações ferroviárias e rodoviárias, pavilhões agrícolas, depósitos, dentre outros. Destaca que vãos de passagem do vento podem provocar campos de pressões positivas elevadas, ocasionando elevadas sobrepressões internas.

Mas, embora sejam fatores relevantes na determinação da força final devida ao vento em pavilhões baixos, as pressões internas não são consideradas neste trabalho. Somente são tratadas as pressões externas locais.

3 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS

Esse capítulo apresenta os critérios e premissas de projeto para determinação dos coeficientes de pressões locais externas por parte do vento especificadas pelas normas técnicas: ABNT NBR 6123:1988, ASCE/SEI 7-16:2016, EN-1991-1-4:2010, AS/NZS 1170.2:2011 e NBCC:2015. Para cada normativa apresenta-se o escopo geral e o procedimento de cálculo para obtenção das pressões externas locais sobre superfícies de elementos de estrutura secundária, revestimento e fixadores de paredes e telhado. Os métodos de cálculo mostrados são específicos para edificações consideradas baixas ou “horizontais”, com formato de telhado em duas águas e de baixa inclinação citando-se como exemplo, os pavilhões industriais.

Cada padrão normativo estudado apresenta uma nomenclatura específica nas equações de cálculo. Para uma melhor compreensão deste trabalho, parte dos símbolos de mesmo conceito foram padronizados de acordo com a norma brasileira NBR 6123:1988. Toda a simbologia utilizada nas equações e descrições no decorrer deste trabalho estão discriminadas na lista de símbolos desta tese.

3.1 ABNT NBR 6123:1988 – FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES

A norma ABNT NBR 6123 (1988), trata das disposições estabelecidas para o cálculo das forças devidas à ação estática e dinâmica do vento de edificações. São levados em conta nas suas formulações, efeitos meteorológicos, características e rugosidade do terreno e seu entorno, a geometria da edificação, tempo de vida útil, velocidades básicas por região, probabilidades de ocorrência e coeficientes aerodinâmicos de pressão para elementos estruturais principais, secundários e para revestimentos. Considera em seus roteiros de cálculo, modelos e formas de construções padrões mais utilizados na área de engenharia.

Esta norma não se aplica a construções com formatos e dimensões fora do comum, neste caso sendo indicada a realização de estudos especiais ou ensaios em túnel de vento. Estabelece prescrições para projeto de carregamentos do vento para paredes e telhados com formatos em (uma e duas águas), arco, telhados múltiplos em duas águas, sheds e prédios.

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Em relação à altura das edificações, a norma brasileira ABNT NBR 6123:1988 não prescreve critérios, mas, apresenta os coeficientes de pressões de forma e locais externos para paredes independente do tipo de construção e para coberturas especifica coeficientes em acordo com a configuração do telhado (uma água, duas águas, shed, telhados múltiplos de uma e duas águas, dentre outros). Para construções verticais apresenta um método específico de determinação das pressões.

A seguir apresentam-se os procedimentos para determinação das pressões externas locais em função do vento atuante em elementos estruturais secundários, revestimentos de fachadas e cobertura para edificação horizontal e telhado em duas águas.

3.1.1 Velocidade básica do vento (V_0)

A velocidade básica do vento é a velocidade de uma rajada de três segundos de duração excedida em média uma vez em 50 anos, a 10m acima do nível do terreno, em campo aberto e plano, determinada por região através do mapa de isopletas disponível na ABNT NBR 6123:1988.

3.1.2 Fator topográfico (S_1)

O fator topográfico leva em consideração as variações do relevo na superfície do terreno dos seguintes modos:

- para terreno plano ou fracamente acidentado: $S_1 = 1,0$;
- para vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção: $S_1 = 0,9$;
- para taludes e morros o fator topográfico leva em conta a altura média a partir da superfície do terreno estudado, a diferença de nível entre a base e o topo do talude/morro e o ângulo de inclinação médio do talude/encosta do morro, sendo para ângulos $\leq 3^\circ$, $S_1 = 1,0$ e ângulos maiores de 3° , o fator S_1 apresenta valores superiores a 1,0 e devem ser determinados em acordo com os critérios da ABNT NBR 6123:1988.

3.1.3 Fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (S_2)

O fator S_2 considera a combinação da rugosidade do terreno, das variações da velocidade do vento, das dimensões da edificação e da altura acima do terreno. Para determinar este fator são especificadas cinco categorias para caracterizar a rugosidade do local de construção e três

classes para enquadrar a edificação em acordo com suas dimensões geométricas, sendo as classificações:

3.1.3.1 Quanto a rugosidade

- categoria I: superfície lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medidas na direção e no sentido do vento incidente a barlavento;
- categoria II: terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, como árvores e edificações baixas. A cota média do topo dos obstáculos é de até 1,0 m;
- categoria III: terrenos planos ou ondulados com obstáculos como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. A cota média do topo dos obstáculos é de até 3,0 m;
- categoria IV: terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizado. A cota média do topo dos obstáculos é de até 10,0 metros;
- categoria V: terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. A cota média do topo dos obstáculos iguais ou superiores a 25,0 metros.

3.1.3.2 Quanto as dimensões da edificação

Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais da estrutura sem vedação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical atenda os seguintes critérios: para classe A, não exceda 20 metros, para classe B, esteja entre 20 e 50 metros e classe C, exceda 50 metros.

O Fator S_2 usado no cálculo da velocidade do vento na altura (z) obtido pela equação 12:

$$S_2 = b F_r \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

F_r = fator de rajada sempre correspondente a categoria II;

z = altura média a partir da superfície do terreno considerado;

b ou p = parâmetros meteorológicos determinados através da Tabela 04, conforme as categorias e classes de cada projeto sendo os intervalos de tempo “t” de 3s, 5s e 10s correspondentes as classes A, B e C respectivamente.

Tabela 04 – Parâmetros meteorológicos b, p e $F_{r,II}$

Cat.	t (s)	3	5	10	15	20	30	45	60	120	300	600	3600
I	b	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,19	1,21	1,23	1,25
	p	0,06	0,065	0,07	0,075	0,075	0,08	0,085	0,085	0,09	0,095	0,095	0,10
II	b	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	p	0,085	0,09	0,10	0,105	0,11	0,115	0,12	0,125	0,135	0,145	0,15	0,16
	Fr	1,00	0,98	0,95	0,93	0,90	0,87	0,84	0,82	0,77	0,72	0,69	0,65
III	b	0,94	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90	0,90	0,89	0,87	0,86	0,85
	p	0,10	0,105	0,115	0,125	0,13	0,14	0,145	0,15	0,16	0,175	0,185	0,20
IV	b	0,86	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,80	0,79	0,76	0,73	0,71	0,68
	p	0,12	0,125	0,135	0,145	0,15	0,16	0,17	0,175	0,195	0,215	0,23	0,25
V	b	0,74	0,73	0,71	0,70	0,69	0,67	0,64	0,62	0,58	0,53	0,50	0,44
	p	0,15	0,16	0,175	0,185	0,19	0,205	0,22	0,23	0,255	0,285	0,31	0,35

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6123 (1988).

Em edificações ou parte de uma edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 80 metros, o intervalo de tempo “t” correspondente a ser usado na obtenção da velocidade média do vento que incide em uma edificação com essas dimensões deve ser determinado pelas especificações do Anexo A da ABNT NBR 6123 pelas equações 13 e 14 e tabela 04.

$$t = \frac{7,5L}{V_{t(h)}} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

L: altura ou largura da superfície frontal de uma edificação ou parte da edificação em estudo, adotando-se o maior dos dois valores;

$V_{t(h)}$: velocidade média do vento sobre t segundos, no topo da edificação ou da parte de edificação em estudo usando a equação a seguir. O cálculo de $V_{t(h)}$ pode ser feito por aproximações sucessivas.

$$V_{t(h)} = S_1 S_{2(h)} V_0 \quad \text{Equação 14}$$

3.1.4 Fator estatístico (S_3)

O fator estatístico leva em consideração a finalidade prevista para a construção e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação, sendo classificado em cinco grupos:

- grupo 1: edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospital, quartéis de bombeiros e forças de segurança, centrais de comunicações, etc.): $S_3 = 1,10$;
- grupo 2: edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação: $S_3 = 1,0$;
- grupo 3: edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.): $S_3 = 0,95$;
- grupo 4: vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.): $S_3 = 0,88$;
- grupo 5: edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção: $S_3 = 0,8$.

A velocidade básica do vento estabelecida no mapa de isopletas prevê uma probabilidade de 63% de ser igualada ou excedida em média uma vez em 50 anos. Para outros níveis de probabilidade e períodos de exposição, a NBR 6123:1988 indica aplicar as recomendações em seu anexo B, por intermédio da equação 15:

$$S_3 = 0,54 \left[-\frac{\ln(1 - P_m)}{m} \right]^{-0,157} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

P_m : probabilidade estatística;

m : vida útil em anos.

Após calcular o S_3 , recalcula-se a velocidade básica por meio da equação 16.

$$V_0 = S_3 V_0 \quad \text{Equação 16}$$

3.1.5 Velocidade característica do vento (V_k)

A equação 17 determina a velocidade característica do vento (V_k):

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad \text{Equação 17}$$

3.1.6 Pressão dinâmica (q)

A pressão dinâmica é obtida através da equação 18:

$$q = 0,613(V_k^2) \quad \text{Equação 18}$$

3.1.7 Pressões internas

A ABNT NBR 6123:1988 define a pressão efetiva interna Δp_i como a diferença entre a pressão atmosférica em um ponto na face interna da edificação e a pressão atmosférica do vento atuante, incidindo a barlavento da edificação, na corrente de ar não perturbada pela existência de obstáculos.

Em construções totalmente impermeáveis ao ar, não ocorrerá alteração da pressão ao longo do tempo no seu interior e independentemente da velocidade da corrente de ar externa. Todavia, comumente tanto em paredes como em cobertura das edificações consideradas fechadas, seja em estado de uso de serviço ou como consequência de acidentes, permitem a troca de ar, provocando mudanças nas condições supostas nos ensaios.

Em casos de paredes internas permeáveis devem ser adotados os valores de coeficientes de pressão interna c_{pi} específicos para cada configuração e disposição das aberturas especificada na norma. Apresenta duas metodologias, um método simplificado e outro detalhado, no Anexo D.

3.1.8 Pressões externas

Em acordo com a ABNT NBR 6123:1988, a pressão efetiva externa Δp_e é definida como a diferença entre a pressão atmosférica em um ponto na face externa da edificação e a pressão atmosférica do vento incidente agindo a barlavento da edificação, na corrente de ar não perturbada pela existência de obstáculos.

A NBR 6123:1983 descreve que zonas de altas sucções não aparecem simultaneamente em todas estas zonas, para as quais as tabelas apresentam valores médios de coeficientes de pressão externa (c_{pe} médio). As zonas com altas sucções surgem nas proximidades das bordas de paredes e de telhados e têm sua localização dependendo do ângulo de incidência do vento. Estes coeficientes devem ser usados somente para o cálculo das forças do vento nas respectivas zonas, aplicando-se ao dimensionamento, verificação e ancoragem de elementos de vedação e da estrutura secundária.

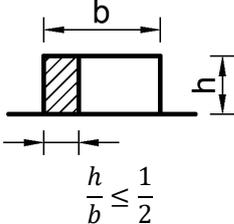
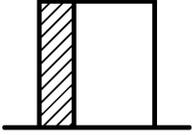
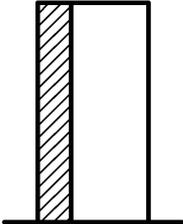
3.1.8.1 Coeficientes de pressão externa para paredes de planta retangular

Os coeficientes de forma externos (C_e) e os coeficientes de pressão locais (c_{pe} médio) para paredes de edificações retangulares são determinados pela tabela 05 e figura 34.

3.1.8.2 Coeficientes de pressão e de forma externos para telhados com duas águas simétricos em edificações de planta retangular

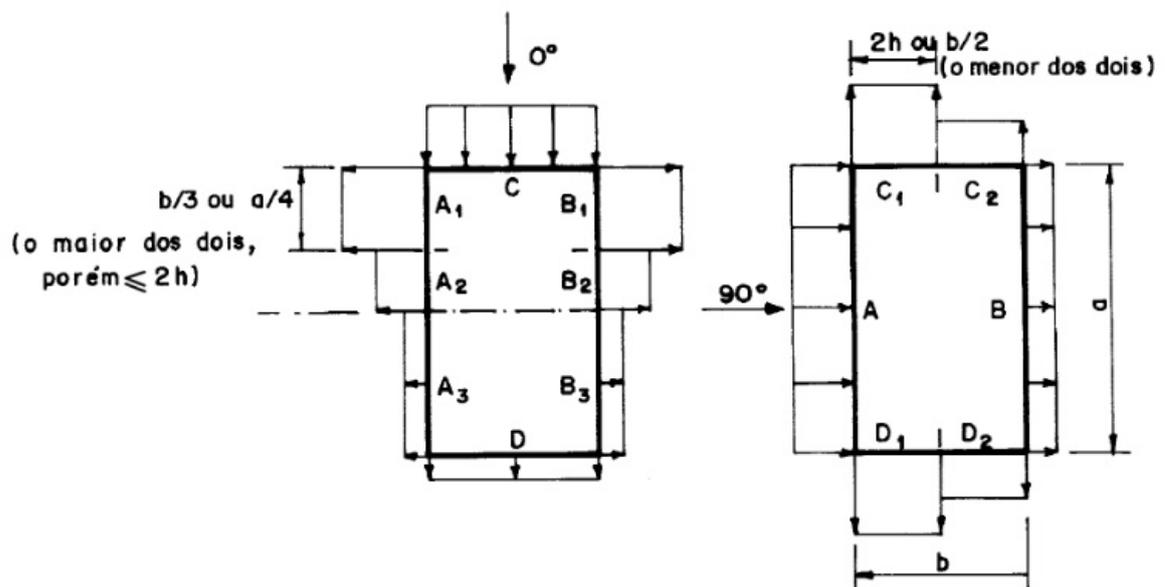
Os coeficientes de forma externos (C_e) e locais (c_{pe} médio) para cobertura em duas águas são determinados pela tabela 06 e figura 35, usando razões com parâmetros da altura, largura, comprimento e ângulo de inclinação do telhado.

Tabela 05 - Coeficientes de pressão e de forma externos para paredes de edificações de planta retangular

Altura Relativa		Valores de C_e para								C_{pe} médio
		$\alpha = 0^\circ$				$\alpha = 90^\circ$				
		A1 e B1	A2 e B2	C	D	A	B	C1 e D1	C2 e D2	
 $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b}$ $\leq \frac{3}{2}$	-0,8	-0,5	+0,7	-0,4	+0,7	-0,4	-0,8	-0,4	-0,9
	$2 \leq \frac{a}{b}$ ≤ 4	-0,8	-0,4	+0,7	-0,3	+0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1,0
 $\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b}$ $\leq \frac{3}{2}$	-0,9	-0,5	+0,7	-0,5	+0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1,1
	$2 \leq \frac{a}{b}$ ≤ 4	-0,9	-0,4	+0,7	-0,3	+0,7	-0,6	-0,9	-0,5	-1,1
 $\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$	$1 \leq \frac{a}{b}$ $\leq \frac{3}{2}$	-1,0	-0,6	+0,8	-0,6	+0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-1,2
	$2 \leq \frac{a}{b}$ ≤ 4	-1,0	-0,5	+0,8	-0,3	+0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-1,2

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 6123 (1988).

Figura 34 - Representação da localização das zonas de atuação dos coeficientes de pressão e de forma externos para paredes de edificações de planta retangular

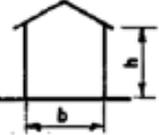


Notas da figura 34:

- Para a/b entre $3/2$ e 2 , interpolar linearmente. Para vento a 0° , nas partes A_3 e B_3 , o coeficiente de forma c_e tem os seguintes valores: para $a/b = 1$: mesmo valor das partes A_2 e B_2 , para $a/b \geq 2$: $C_e = -0,2$ e para $1 < a/b < 2$: interpolar linearmente.
- Para cada uma das duas incidências do vento (0° e 90°), o coeficiente de pressão médio externo c_{pe} médio, é aplicado à parte de barlavento das paredes paralelas ao vento, em uma distância igual a $0,2b$ ou h , considerando-se o menor destes dois valores.

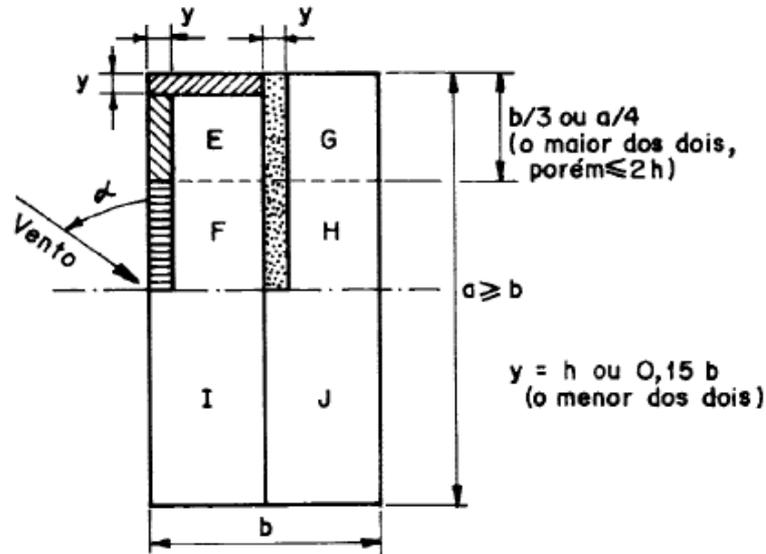
Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 6123 (1988).

Tabela 06 - Coeficientes de pressão e de forma externos para telhados com duas águas simétricos em edificações de planta retangular

Altura relativa	θ	Valores de C_p para				c_{pe} médio			
		$\alpha = 90^\circ$ (A)		$\alpha = 0^\circ$					
		EF	GH	EG	FH				
	0°	-0,8	-0,4	-0,8	-0,4	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,9	-0,4	-0,8	-0,4	-1,4	-1,2	-1,2	-1,0
	10°	-1,2	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,4		-1,2
	15°	-1,0	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,2		-1,2
	20°	-0,4	-0,4	-0,7	-0,6	-1,0			-1,2
	30°	0	-0,4	-0,7	-0,6	-0,8			-1,1
	45°	+0,3	-0,5	-0,7	-0,6				-1,1
	60°	+0,7	-0,6	-0,7	-0,6				-1,1
	0°	-0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,9	-0,6	-0,9	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0
	10°	-1,1	-0,6	-0,8	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,2
	15°	-1,0	-0,6	-0,8	-0,6	-1,8	-1,5	-1,5	-1,2
	20°	-0,7	-0,5	-0,8	-0,6	-1,5	-1,5	-1,5	-1,0
	30°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,8	-1,0			-1,0
	45°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,8				
	60°	+0,6	-0,5	-0,8	-0,8				
	0°	-0,8	-0,6	-0,9	-0,7	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0
	10°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-1,5	-1,2
	15°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-1,8	-1,8	-1,5	-1,2
	20°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-1,5	-1,5	-1,5	-1,2
	30°	-1,0	-0,5	-0,8	-0,7	-1,5			
	40°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,7	-1,0			
	50°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,7				
60°	+0,5	-0,5	-0,8	-0,7					

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 6123 (1988).

Figura 35 - Representação da localização das zonas de atuação dos coeficientes de pressão e de forma externos para telhados com duas águas simétricos em edificações de planta retangular



Notas da figura 35:

- O coeficiente de forma C_e na face inferior do beiral é igual ao da parede correspondente.
- Nas zonas em torno de partes de edificações salientes ao telhado (chaminé, reservatórios, torres, etc.), deve ser considerado um coeficiente de forma $C_e = 1,2$, até uma distância igual à metade da dimensão diagonal da saliência vista em planta.
- Na cobertura de lanternins, c_{pe} médio = -2,0.
- Para vento a 0° , nas paredes I e J o coeficiente de forma c_e tem os seguintes valores: para $a/b = 1$: mesmo valor das partes F e H, para $a/b \geq 2$: $C_e = -0,2$. Para valores intermediários, interpolar linearmente.

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 6123 (1988).

3.2 NBCC:2015 NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA

A normativa NBCC:2015 *National Building Code of Canada* na Divisão “B”, parte “4” estabelece os critérios e procedimentos de projeto para o edifício e seus elementos terem capacidade estrutural suficiente e integridade para resistir com segurança e eficácia a todas as cargas devidas ao vento, efeitos de cargas e influência esperados levando em conta a vida útil esperada para a edificação.

São tratadas cargas de vento para o edifício e seus componentes utilizando procedimentos estáticos, dinâmicos e por meio de túnel de vento. No entanto, para projeto de revestimentos e elementos estruturais de uso secundário, objeto de estudo desta tese, são definidos métodos

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

estáticos e através de testes em túnel de vento. A norma contempla diretrizes de projeto da ação do vento para paredes e telhados em uma, duas e quatro águas, bem como para prédios.

Nos subitens a seguir são mostrados os critérios para obter as pressões locais devidas ao vento atuantes em elementos estruturais secundários e revestimentos de paredes e cobertura para edificação horizontal com baixa altura (altura menor de 20 metros) e telhado em duas águas.

3.2.1 Velocidade do vento e pressão dinâmica

Pela NBCC (2015) edificações baixas são todas aquelas com uma altura menor ou igual a 20m e edificações altas, com altura acima de 20 metros.

Os valores de velocidade e pressões consideradas nessa norma foram constituídas de uma base de dados de valores referenciais regionais e são derivadas da velocidade média horária do vento, de um a dez metros de altura, em terreno plano aberto correspondente a exposição “A” especificada pela norma. O fator de rajada considerado refere-se a durações de aproximadamente 3s para 7s usada para complementar as observações feitas uma vez por hora nas análises.

As pressões da velocidade do vento, “q”, foram calculadas em Pascal através da equação 19:

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

ρ = densidade de ar média = 1,2929 kg/m³;

V = velocidade média do vento em m/s.

3.2.2 Pressão resultante (p)

A pressão externa sobre parte ou sobre toda a superfície de uma edificação é calculada pela equação 20.

$$p = I_w q C_e C_t (C_g C_{pe} - C_{gi} C_{pi}) \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

p = pressão externa agindo estaticamente na direção normal à superfície, considerada positiva quando a pressão atua perpendicular à superfície e no sentido da mesma, e negativa quando atua em sentido contrário à sua atuação na superfície;

I_w = fator de importância da carga do vento para estados limites últimos (ELU) ou de serviço (ELS) - tabela 7;

q = Pressão dinâmica de referência do vento; com probabilidade de ser excedida uma vez em 50 anos;

C_e = fator de exposição que reflete as mudanças na velocidade do vento devido à altura h , bem como, os efeitos de construções adjacentes e da topografia da região;

c_t = fator topográfico: para casos de terrenos planos, sem existência de superfícies montanhosas, $c_t = 1,0$. Para locais com colinas e escarpas, seu valor será maior de 1,0 utilizando critérios estabelecidos pela norma representados por ΔS utilizando $\Delta S_{m\acute{a}x}$ e o coeficiente de redução α para diminuição da alta velocidade com a altura. Os valores de $\Delta S_{m\acute{a}x}$ e α dependem da forma e inclinação da colina ou escarpa.

c_g = fator de efeito de rajada externo que reflete a intensidade da turbulência do vento para o lugar como uma função de altura e da rugosidade da superfície em torno do terreno e das propriedades do prédio como a altura, largura, frequência natural de vibração e amortecimento;

c_{pe} = Coeficiente de pressão externa. Observar que no caso para prédios baixos, a norma prescreve os coeficientes de pressão incluindo o fator de efeito de rajada c_g ;

c_{gi} = fator de efeito de rajada interno;

c_{pi} = coeficiente de pressão interna atuando na superfície.

Tabela 7 – Fator de importância da carga de vento, I_w

Categoria de Importância	Fator de Importância, I_w	
	ELU	ELS
Baixo	0,8	0,75
Normal	1,0	0,75
Alto	1,15	0,75
Pós-desastre	1,25	0,75

Fonte: Adaptado de NBCC (2015).

O fator de exposição C_e tem os seguintes parâmetros para ser determinado, h sendo a altura de referência acima do nível em metros para a superfície:

- a. $(h/10)^{0,2}$: não menor que 0,9 para terrenos abertos, onde o terreno plano apenas com edifícios nivelados, árvores e outras obstruções, águas e litorais, h sendo a altura de referência acima do nível em metros para a superfície;
- b. $0,7 (h/12)^{0,03}$: não menor que 0,7 para terrenos acidentados, são considerados terrenos suburbanos, urbanos ou arborizados, estendendo-se a montante do edifício sem interrupções de pelo menos 1 km ou 20 vezes a altura do edifício, o que for maior;
- c. um valor intermediário entre as definições (a) e (b) acima descritas em casos onde o local é inferior a 1 km ou 20 vezes a altura do edifício na mudança de condição do terreno, o que for maior, utilizado um método de interpolação apropriado;

O fator C_e , é utilizado para procedimentos estáticos e é baseado na rajada do vento em terrenos abertos e em terrenos rugosos. Para os terrenos abertos, o perfil assume uma potência de 0,2 e, para os terrenos rugosos, assume-se a potência 0,3. A rajada de vento possui uma duração de 3 a 5 segundos.

Quando multiplicado pela pressão do vento de referência, “ q ”, o fator de importância, I_w , e fator de exposição, C_e , e o coeficiente de pressão, c_{pe} com o efeito de rajada têm-se uma pressão de projeto estática que representa o mesmo efeito para carga de pico em escoamento turbulento. Os valores de coeficiente de exposição C_e , o fator de importância I_w e os coeficientes de pressão interna c_{pi} , podem ser determinados por meio das especificações da norma NBCC:2015. Quanto aos coeficientes de pressão externa, são mostrados a seguir.

3.2.3 Fator de rajada externo c_g e fator e rajada interno c_{gi}

Os fatores de efeito de rajada externo c_g e interno c_{gi} respectivamente são definidos como a razão do efeito máximo da carga pelo efeito médio da carga. Eles levam em conta:

- flutuação aleatória da força do vento causada pela turbulência na aproximação do vento agindo por curtas durações sobre toda ou parte da estrutura;
- forças flutuantes induzidas pela esteira ao longo da própria estrutura;
- forças inerciais adicionais decorrentes do movimento na própria estrutura como resposta das forças do vento flutuantes;

- forças adicionais aerodinâmicas de alteração no escoamento do vento ao redor da estrutura causada pelo seu movimento (efeito aeroelástico).

Os valores do fator de efeito de rajada externo, c_g , para edifícios de baixa altura são:

- para o edifício como um todo e elementos estruturais de estrutura principal, $c_g = 2,0$;
- para pressões e sucções externas em elementos de estrutura secundária, incluindo revestimento, $c_g = 2,5$;

Os coeficientes de pressão máxima (pico) de certas estruturas de edificações de baixa altura, podem ser determinados diretamente a partir de testes em túnel de vento. Esses coeficientes são valores compostos de $c_g c_{pe}$, incorporando o efeito de rajada somado aos fatores de forma aerodinâmicos. Portanto, o fator de efeito de rajada não deve ser usado em conjunto com esses coeficientes.

Velocidades elevadas sobre colinas e escarpas afeta principalmente a velocidade média do vento e não a amplitude das flutuações turbulentas. Isso significa que uma correção deve ser aplicada ao fator de efeito de rajada para ambos os procedimentos estáticos e dinâmicos para compensar o aumento associado na amplitude da rajada quando o fator de exposição corrigido, C_e é usado.

O valor padrão do fator de efeito de rajada interno, c_{gi} , deve ser tomado como 2,0, exceto quando é permitido ser calculado usando a equação para uma grande estrutura com um único volume não particionado sem um grande número de portas e janelas. Neste caso, a norma deve ser consultada.

3.2.4 Coeficiente de pressão interna (c_{pi})

O coeficiente de pressão interna, c_{pi} , define o efeito do vento na pressão do ar no interior da edificação e é importante no projeto dos elementos de revestimento e das estruturas principais. A magnitude destes coeficientes depende da distribuição e tamanho dos vãos e frestas de aberturas que liberam o ar interno para o exterior. Embora a pressão interna se equilibre aproximadamente à pressão externa média sobre a superfície exposta, a influência das rajadas será atenuada. Em aberturas que são maiores e mais significativas tipo portas ou janelas, a pressão interna se aproximará daquela predominante externamente na abertura dominante e as pressões de rajada serão sentidas no interior.

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

A NBCC:2015, estabelece os coeficientes a serem usados como coeficiente de pressão interna, porém como não serão utilizados nesta tese, podem ser consultados diretamente na norma.

3.2.5 Coeficiente de pressão externa (c_{pe})

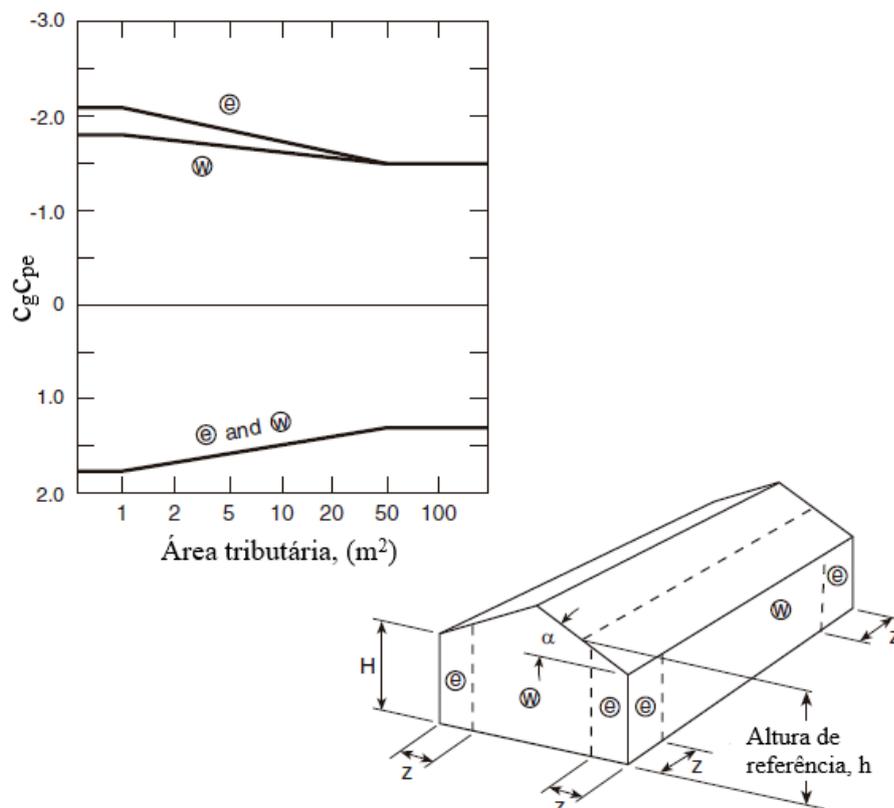
Os coeficientes de pressão externa são dados como coeficientes de pressão médios temporais e espaciais e baseiam-se nas pressões máximas de rajada com duração de aproximadamente 1s, incluindo o efeito do fator de rajada, c_g , representando então o produto de $c_g c_{pe}$. O c_{pe} é o coeficiente de pressão externa médio da área da superfície considerada e c_g é o fator de efeito de rajada. Estes coeficientes são aplicados para a área tributária associada com os elementos particulares ou elementos sobre o qual se supõe que a pressão do vento atue.

O coeficiente de pressão de pico de certas estruturas baixas é obtido diretamente em ensaios de túnel de vento. São valores compostos de $c_g c_{pe}$, incorporando o efeito de rajada além dos fatores de forma aerodinâmica. Portanto, o fator de rajada não deve ser usado em conjunto com esses coeficientes. Estes coeficientes de pressão são as proporções não dimensionais das pressões reais induzidas pelo vento em uma superfície do edifício em relação à pressão de velocidade do vento na altura de referência. Eles contam para o efeito de forma aerodinâmica do prédio, orientação de superfície respeitando o escoamento e perfil de velocidade do vento.

Os coeficientes externos de pressão de rajada são mais indicados e mais adequados para edifícios com uma relação de altura dividido pela largura inferior a 0,5 e uma altura de referência inferior ou igual a 20 m, onde a largura se baseia na dimensão em planta da edificação. Na ausência de mais dados específicos de casos, estes valores também podem ser utilizados para construção com proporções de altura / largura inferiores a 1,0, desde que a altura de referência seja inferior ou igual a 20 m. Em relação ao comprimento, a norma não aborda nenhum critério a ser adotado no cálculo dos coeficientes de pressão ou força do vento.

As figuras 36 e 37 apresentam valores de $c_g c_{pe}$ para revestimentos e estruturas secundárias em parede e para telhados em duas águas respectivamente.

Figura 36 – Coeficientes de pressão externos com pico de rajada, $c_g c_{pe}$, em paredes individuais para o projeto de elementos estruturais secundários e de revestimento – edificações com cobertura em duas águas

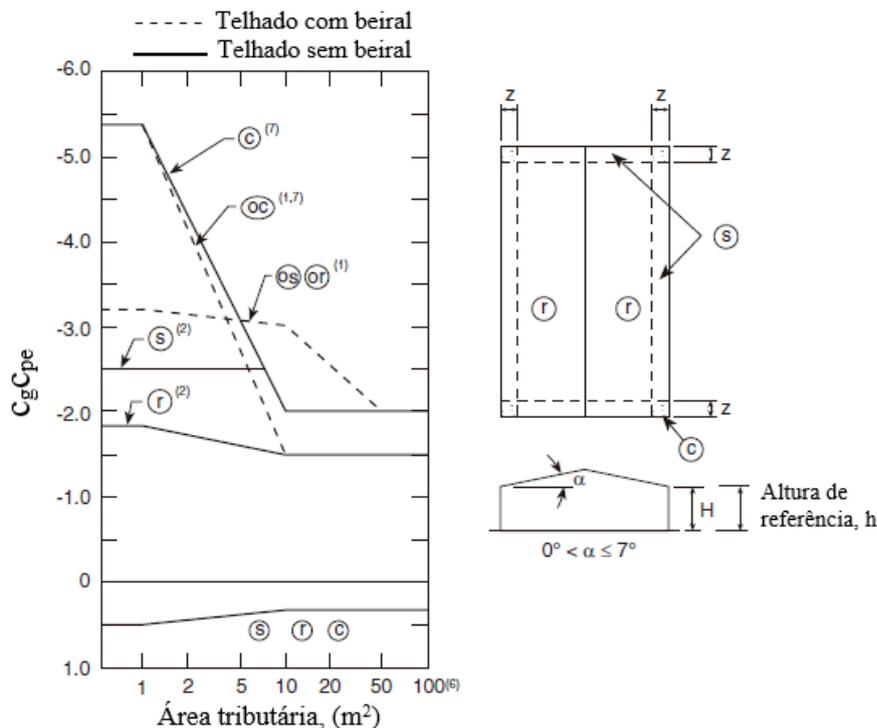


Fonte: Adaptado de National Building Code of Canada (2015).

Notas da figura 36:

- 1) Estes coeficientes aplicam-se para qualquer inclinação do telhado, α .
- 2) A área no eixo das abscissas no gráfico é a área atribuída ao projeto dentro da zona especificada.
- 3) A largura da zona de borda z é menor que 10% da menor dimensão horizontal e 40% de altura, H , não menor do que 4% da menor dimensão horizontal ou 1 m.
- 4) Os coeficientes positivos indicam forças de sobrepessão e os negativos indicam forças de sucção.
- 5) Os coeficientes de pressão geralmente podem ser aplicados em fachadas com características arquitetônicas, no entanto, quando elementos verticais de mais de 1 m são colocados em uma fachada, um $c_g c_{pe}$ local = -2,8 pode ser aplicado à zona “e”.
- 6) O eixo vertical do ábaco na NBCC:2015, especifica $C_p C_g$ = coeficiente de pressão local com fator de rajada foi substituído por simbologia de mesma definição: $c_g c_{pe}$.

Figura 37 - Coeficientes de pressão externos com pico de rajada, $c_g c_{pe}$, em telhados com uma inclinação de 7° ou menos para o projeto de componentes estruturais e revestimento de cobertura duas águas



Fonte: Adaptado de National Building Code of Canada (2015).

Notas da figura 37:

- 1) Os coeficientes para os telhados com beiral têm prefixo "o" e referem-se às mesmas áreas do telhado, conforme referido pelo símbolo correspondente sem um prefixo. Incluem contribuições de superfícies superiores e inferiores. No caso de beirais, as paredes estão no interior do contorno do telhado.
- 2) s e r aplicam-se a ambos os telhados e superfícies no contorno da cobertura próximo do beiral.
- 3) A largura da zona de borda z é menor que 10% da menor dimensão horizontal e 40% de altura, H , mas não inferior a 4% da menor dimensão horizontal ou 1 m.
- 4) Combinações de pressões externas e internas devem ser avaliados para obter as cargas mais severas.
- 5) Os coeficientes positivos denotam forças de sobrepressão e os negativos indicam forças de sucção.
- 6) Para calcular as forças de elevação atribuídas em áreas maiores que $100 m^2$ em telhados desobstruídos quase planos, com parapeitos baixos, e onde o centro da área atribuída é pelo menos duas alturas de construção da borda mais próxima, o valor de $c_g c_{pe}$ pode ser reduzido de -1,5 para -1,1 em $x / H = 2$ e ainda reduzido linearmente para -0,6 em $x / H = 5$, onde x é distância da borda mais próximo e H é a altura da edificação.
- 7) Para os telhados que possuem parapeito no perímetro de 1 m de altura ou maior, os coeficientes de canto $c_g c_{pe}$ atribuído a pequenas áreas tributárias podem ser reduzidos de -5,4 para -4,4.
- 8) A área no eixo das abscissas no gráfico é a área atribuída ao projeto dentro da zona especificada.
- 9) O eixo vertical do ábaco na NBCC:2015, especifica $C_p C_g$ = coeficiente de pressão local com fator de rajada foi substituído por simbologia de mesma definição: $c_g c_{pe}$.

3.3 ASCE/SEI 7-16:2016 – MINIMUM DESIGN LOADS AND ASSOCIATED CRITERIA FOR BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES

Os capítulos 26 e 31 da norma ASCE/SEI 7-16 - *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and other Structures* estabelece parâmetros para determinação da força do vento para estruturas e revestimentos de edifícios. São apresentados procedimentos analíticos e para ensaios em túnel de vento para determinação das pressões em paredes e coberturas para projeto de construções com telhados em (uma, duas e quatro águas), sheds, telhados duas águas múltiplos, arcos e prédios.

Na sequência são descritos os métodos para obter as pressões externas locais para efeitos do vento que agem em componentes estruturais secundários e revestimentos de paredes e cobertura de edificação horizontal com baixa altura (altura $\leq 18,3$ metros) e telhado em duas águas.

3.3.1 Velocidade básica do vento

A velocidade básica, V , utilizada na determinação das cargas de vento para projeto em edifícios e outras estruturas, não deve ser menor que a velocidade associada ao intervalo médio de recorrência e a estimativa deve ser ajustada para equivalência com uma velocidade com 3 segundos de rajada a 10 metros acima do solo na categoria de exposição “C”.

Na norma têm-se as seguintes categorias para classificação da rugosidade:

- categoria B: áreas urbanas e suburbanas, áreas arborizadas, ou terrenos com numerosos espaços obstruídos fechados que tem o tamanho de habitações unifamiliares ou maiores;
- categoria C: terreno aberto com obstruções dispersos com alturas geralmente menores do que 9,1 metros. Essa categoria inclui campos planos, abertos e com grama;
- categoria D: áreas planas sem obstruções e superfícies de água. Inclui também áreas salinas, de lama e gelo.

A obtenção da velocidade básica leva em consideração a categoria de risco estabelecida na tabela 8, sendo que para galpões industriais, objeto de estudo dessa tese enquadra-se como categoria III. Desta forma, para a categoria de risco III com exposição tipo “C”, a velocidade do vento corresponde a aproximadamente 3% de probabilidade de se igualar ou exceder uma

vez em 50 anos. Dados das demais categorias de risco podem ser consultados na ASCE SEI 7-16:2016.

Tabela 8 – Categoria de risco

Uso ou ocupação da edificação ou estrutura	Risco
<p>Edifícios e outras estruturas, cujo fracasso poderia representar um risco substancial para a vida humana.</p> <p>Edifícios e estruturas públicas, não incluídos na Categoria de Risco IV, com potencial para causar um impacto econômico substancial e / ou ruptura em massa da vida civil do dia-a-dia em caso de falha.</p> <p>Edifícios e outras estruturas não incluídas na Categoria de Risco IV (incluindo, mas não limitado a, instalações que fabricam, processam, manipulam, armazenam, usam ou eliminam substâncias como combustíveis perigosos, produtos químicos perigosos, resíduos perigosos ou explosivos) contendo substâncias tóxicas ou substâncias explosivas onde a sua quantidade exceda uma quantidade limiar estabelecida pela autoridade competente e é suficiente para representar uma ameaça para o público.</p>	III

Fonte: Adaptado de ASCE SEI 7-16 (2016).

3.3.2 Pressão dinâmica (q_z)

A pressão dinâmica do vento, q_z , é avaliada na altura z e calculada pela equação 21 em N/m^2 , sendo:

$$q_z = 0,613 k_z k_e k_{zt} k_d V^2 \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

q_z = pressão dinâmica do vento na altura z ;

k_d = fator de direcionalidade do vento que depende do tipo e formato das construções;

k_{zt} = fator topográfico que leva em conta o efeito da aceleração do vento, oriunda do relevo, no cálculo da carga de vento. É necessário determinar k_1 , k_2 e k_3 que também são fatores topográficos de multiplicação da exposição tipo “C” para obter o fator k_{zt} .

k_1 , k_2 e k_3 = fatores que levam em conta: a forma das características topográficas e o efeito da pressão dinâmica máxima, a redução da velocidade com a distância contra o vento e da redução da velocidade com a altura acima do terreno local. Mas também na falta de informação recomenda-se adotar $k_{zt} = 1,0$ para todos os casos;

k_e = fator de elevação do solo que tem como intuito ajustar a densidade do ar. Admite-se $k_e = 1,0$ para todas as elevações;

k_z ou k_h = fator de exposição da pressão dinâmica para classificação de exposição (A, B, C, D e exceções) baseado na rugosidade da superfície do solo que é determinada a partir da topografia natural, vegetação e instalações construídas;

V = velocidade básica do vento para uma rajada de 3s a 10 metros do nível do solo na categoria de exposição “C”.

Demais parâmetros de obtenção dos fatores k_d , k_{zt} , k_e , k_z ou k_h , são estabelecidos para consulta na ASCE SEI 7-16:2016.

A pressão dinâmica na altura média do telhado é calculada como $q_h = q_z$ avaliada usando k_z na altura média do telhado h .

3.3.3 Pressão resultante do vento para edifícios baixos (p)

A pressão dinâmica do vento para projeto de edifícios de baixa elevação, devem ser determinadas pela equação 22:

$$p = q_h [c_g c_{pe} - c_g c_{pi}] \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

p = Força (pressão) do vento (N/m^2);

$q_h = q_z$ = pressão de dinâmica avaliada na altura média do telhado;

$c_g c_{pe}$ = coeficiente de pressão externa com fator de rajada incorporado;

$c_g c_{pi}$ = coeficiente de pressão interna com fator de rajada incorporado, em função da classificação da edificação quanto a sua permeabilidade ao vento externo de acordo com os critérios da ASCE SEI 7-16:2016.

Importante destacar que a ASCE/SEI 7-16/2016 especifica o coeficiente de pressão externa com fator de rajada incorporado através do símbolo GC_p e coeficiente de pressão interna com fator de rajada interno pelo símbolo GC_{pi} . Estes símbolos foram substituídos por $c_g c_{pe}$ e $c_g c_{pi}$ respectivamente como mostra a equação acima e na lista de símbolos e siglas.

3.3.4 Coeficiente de pressão interna ($c_g c_{pi}$)

Coeficiente de pressão interna $c_g c_{pi}$ é a multiplicação do coeficiente de pressão interna e o fator do efeito de rajada para ser usado na determinação da carga de vento nas edificações.

A determinação da pressão interna dar-se-á em função da classificação da edificação quanto a sua permeabilidade ao vento externo, podendo ser considerada como:

- edificação fechada: um edifício que tem área total de aberturas em cada parede, que recebe pressão externa positiva, menor ou igual a $0,37 \text{ m}^2$ ou 1% da área da parede, o que for menor;
- edifícios parcialmente fechados: a construção que cumpre com as condições:
A área total de aberturas em uma parede que recebe pressão externa positiva excede a soma das áreas de aberturas no balanço do envelope do edifício (paredes e telhado) em mais de 10%;
A área total de aberturas em uma parede que recebe pressão externa positiva excede $0,37 \text{ m}^2$ ou 1 por cento da área dessa parede, o que for menor, e a porcentagem de aberturas no balanço do envelope do edifício não excede 20%.
- edifício parcialmente aberto: um edifício que não cumpre os requisitos para edifícios abertos, parcialmente fechados ou fechados;
- edifício aberto: um prédio com cada parede pelo menos 80% aberta.

Os coeficientes de pressão interna, ($c_{gc_{pi}}$), devem ser determinados através da tabela 26.13-1 da ASCE/SEI 7-16 (2-16) com base nas classificações da construção acima descritas podendo ser de valor positivo como negativo.

3.3.5 Coeficiente de pressão externa ($c_g c_{pe}$)

São permitidos dois métodos para o cálculo das cargas do vento para edifícios baixos e rígidos, podendo-se assim, determinar os coeficientes de pressão externa tanto pelo método direcional quanto pelo método de envelope.

O método direcional embora apresente critérios para projeto da força do vento, não considera que as extremidades e bordas de edificações baixas podem apresentar maiores cargas, ou seja, ignora a existência de coeficientes locais de pressão externa e designa o mesmo coeficiente de pressão para determinada zona independentemente de ser zona de borda e ou zona central da edificação. Contudo, o método direcional sempre é prontamente aceito, mas por não apresentar valores específicos para pressões locais não será abordado nesse trabalho.

Já, o método de envelope leva em conta além dos coeficientes e pressões de forma para elementos estruturais primários e principais, a determinação de coeficientes e pressões em

componentes, fixadores e revestimentos. A norma relata que o método envelope geralmente produz a menor pressão do vento de todos os métodos analíticos por ela especificados na própria norma.

A seguir são apresentadas as formas de cálculo dos coeficientes de pressão para estrutura secundária e revestimentos pelo método envelope.

No método envelope, o fator de efeito de rajada para um prédio rígido ou para outras estruturas é permitido ser tomado como 0,85 aceitando-se 5% a 10% abaixo deste valor. Onde for combinado fatores de efeito de rajada e coeficientes de pressão $c_g c_{pe}$, o fator de efeito de rajada não deve ser determinado separadamente.

Os fatores de efeito de rajada são responsáveis pelos efeitos de carregamento ao longo da direção do vento causados pela interação estrutura-turbulência do vento. Eles não incluem a outros efeitos de carregamento através do vento, como, desprendimento de vórtices, instabilidade causada por galope ou vibração, ou amplificação da torção aerodinâmica causada pelo aumento da vibração em modo torcional puro.

3.3.5.1 Coeficientes de pressão para estrutura secundária e revestimentos.

O coeficiente $c_g c_{pe}$ é a multiplicação dos coeficientes de pressão externa e fator do efeito de rajada para ser usado na determinação da carga de vento para prédios baixos com altura $\leq 18,3$ metros.

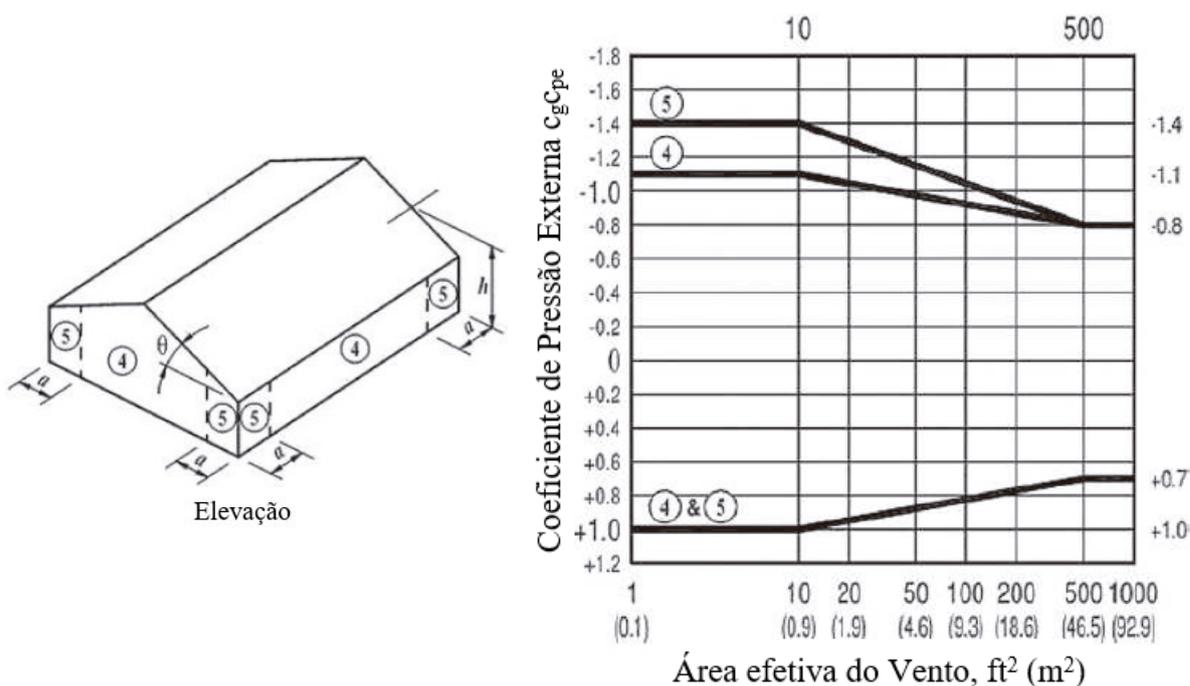
São considerados critérios de permeabilidade e limites de altura para determinar os coeficientes de pressão para estrutura secundária, componentes e revestimentos de paredes e cobertura:

- edificações baixas com altura $h \leq 18,3\text{m}$ fechadas ou parcialmente fechadas;
- edificações com altura $h > 18,3\text{m}$, fechadas ou parcialmente fechadas;
- edificações com altura $18,3\text{m} < h < 48,8\text{m}$ fechadas.

Em relação ao comprimento da edificação, a norma não dispõe de nenhum critério de projeto. Desta forma para edificações baixas com telhado de inclinações inferiores a 7° , são apresentadas as premissas de projeto para $h \leq 18,3\text{m}$ fechadas ou parcialmente fechadas através do

procedimento mostrado nas figuras 38 e 39. Critérios de projeto para inclinações de telhados superiores a 7° , podem ser consultados nos ábacos correspondentes na norma.

Figura 38 - Coeficientes de pressão externa para componentes e revestimentos de paredes de edificações fechadas e parcialmente fechadas com ($h \leq 18,3\text{m}$) - $C_g C_{pe}$



(a) Localização de referência da zona

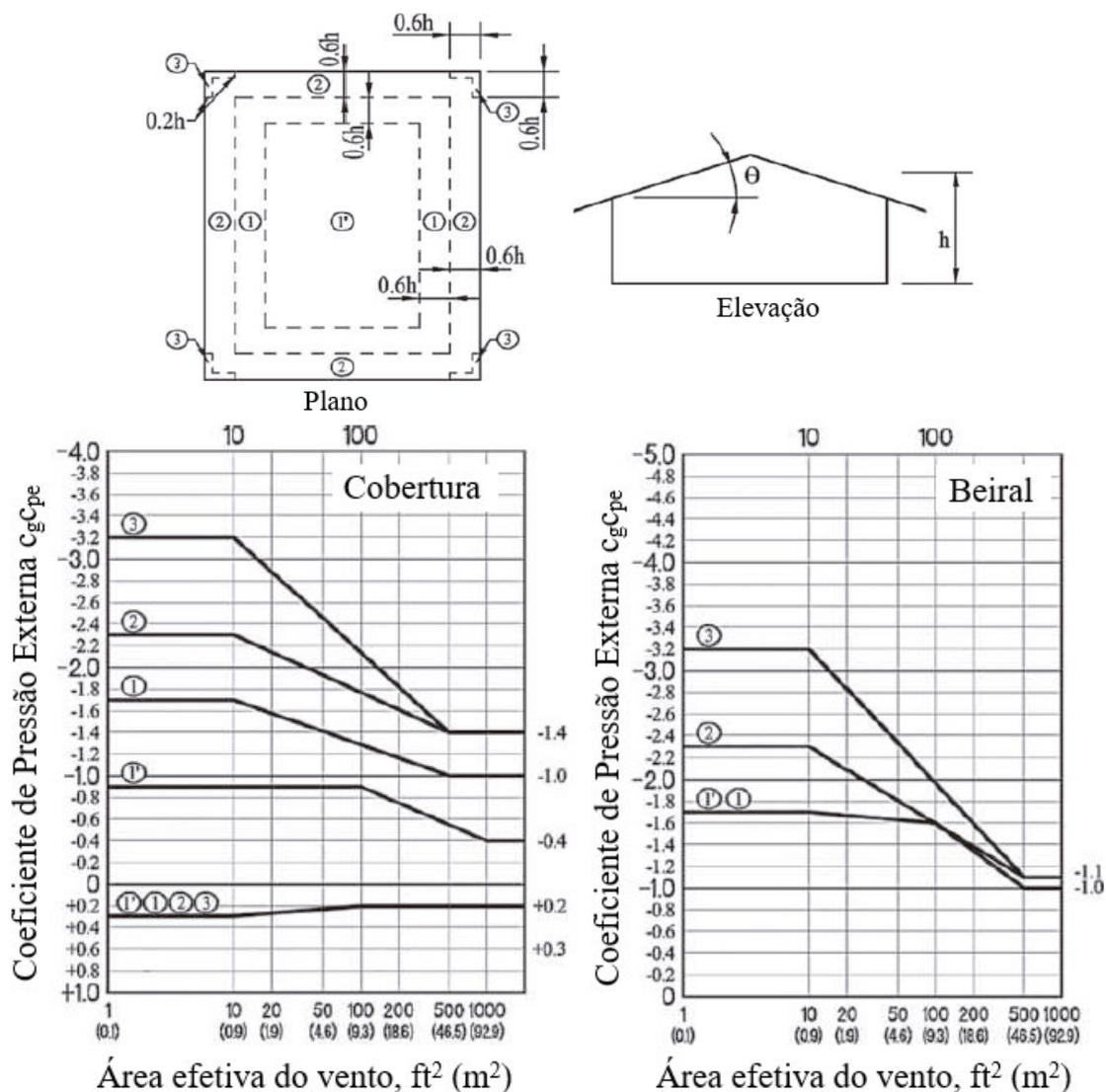
(a) Ábaco de determinação dos coeficientes de pressão local

Fonte: Adaptado de ASCE/SEI 7-16 (2016).

Notas da figura 38:

- $a = 10\%$ da menor dimensão horizontal ou $0,4h$, aquele que for menor, mas não inferior a 4% da menor dimensão horizontal, ou $0,9\text{m}$. Exceção: para construção com $\theta = 0^\circ$ a 7° e a menor dimensão horizontal maior que (90m) , onde a dimensão “ a ” deve ser limitada a um máximo de $0,8h$;
- $h =$ Altura média do telhado, em (m), exceto onde a altura do beiral deve ser usada para $\theta \leq 10^\circ$.
- $\theta =$ Ângulo do plano do telhado com a horizontal, em graus.
- Valores de ($C_g C_{pe}$) para paredes devem ser reduzidos em 10% quando $\theta \leq 10^\circ$.

Figura 39 - Coeficientes de pressão externa para componentes e revestimentos de coberturas em duas águas com e sem beiral para edificações fechadas e parcialmente fechadas para $\theta \leq 7^\circ$ com ($h \leq 18,3\text{m}$) - $C_{gC_{pe}}$



Notas da figura 39:

- Se um parapeito igual ou mais que (0,9 m) for fornecido ao redor do perímetro da cobertura com $\theta \leq 7^\circ$, os valores negativos de ($C_{gC_{pe}}$) na zona 3 serão iguais aos da zona 2, e valores positivos de ($C_{gC_{pe}}$) nas zonas 2 e 3 devem ser iguais aos das zonas de parede 4 e 5, respectivamente.
- Valores de ($C_{gC_{pe}}$) para telhado com beiral incluem contribuições de pressão das superfícies superior e inferior.
- Se existirem beirais, a menor dimensão horizontal do edifício não deve incluir nenhuma dimensão de beiral, mas a distância de borda (a), deve ser medida a partir da borda do beiral.

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

3.4 EUROPEAN STANDARD NORME EUROÉENNE EUROPAISCHE NORM - EN 1991-1-4:2010+A1

O código normativo *European Standard Norme Euroéenne Europäische Norm* – EN 1991-1-4:2010+A1 fornece orientação sobre a determinação das ações do vento para o projeto estrutural de edifícios e obras de engenharia civil para cada uma das áreas carregadas a serem avaliadas. Isso inclui toda a estrutura ou partes da estrutura ou elementos fixados à estrutura, por exemplo, componentes, unidades de revestimento e suas fixações, barreiras de segurança e de ruído.

Estão previstos procedimentos para determinar ações geradas pelo vento para construções com telhados rasos, (uma, duas e quatro águas), sheds, coberturas múltiplas em duas águas, arco e prédios.

São mostrados a seguir as etapas para obter as pressões externas locais em função do vento atuantes em elementos estruturais secundários e revestimentos de paredes e cobertura em edificação com formato de telhado em duas águas.

O efeito da ação do vento calculada usando a norma EN 1991-1-4 (2010), depende do tamanho, formato e propriedades dinâmicas da estrutura. A resposta da estrutura deve ser determinada pelo pico da pressão dinâmica, q_p , na altura de referência em um campo de vento turbulento, pela força e os coeficientes de pressão e pelo fator estrutural c_{scd} . Desta forma, a pressão dinâmica q_p depende do clima do vento, da rugosidade do terreno e orografia e da altura de referência. O valor da pressão q_p é igual a pressão dinâmica média somado a contribuições de pressões flutuantes de curta duração.

3.4.1 Velocidade e pressão dinâmica do vento

O valor básico da velocidade de referência, V_{b0} , é o valor característico fundamental da velocidade média do vento referida a períodos de 10 minutos. A velocidade V_{b0} considera um risco anual de ser excedida de 0,02, independentemente da direção do vento e da época do ano, a uma altura de 10 m acima do nível do solo em terreno do tipo campo aberto considerado categoria II. Esta categoria prevê vegetação rasteira como grama, e obstáculos isolados com separações entre si de pelo menos 20 vezes a sua altura.

A velocidade do vento e a pressão dinâmica possuem uma componente média e uma componente flutuante. A velocidade média do vento, V_m , deverá ser determinada a partir do

valor de referência da velocidade do vento, V_b , o qual depende do regime local de ventos e da variação do vento em função da altura, determinada a partir da rugosidade do terreno e da orografia. A componente de turbulência da velocidade do vento tem um valor médio nulo e um desvio padrão.

A pressão dinâmica de referência do vento $q_{b(z)}$ em relação à altura z , que inclui velocidades significativas a curto espaço de tempo é dada pela equação 23:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho V_b^2 \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

ρ = massa específica do ar, recomendado 1,25 kg/m³;

V_b = valor de referência da velocidade básica do vento, definida como uma função da direção do vento, a uma vez ao ano, a 10 metros acima do nível do terreno correspondente a categoria II.

A equação 24 serve para calcular a velocidade básica do vento V_b é:

$$V_b = c_{dir} c_{season} V_{b,0} \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

c_{dir} = fator direcional, pode ser encontrado no Anexo Nacional, todavia, o valor recomendado é 1,0;

c_{season} = fator de estação, pode ser encontrado no Anexo Nacional, sendo o valor recomendado é 1,0;

$V_{b,0}$ = valor fundamental da velocidade básica do vento.

A pressão dinâmica de pico à altura z , $q_{p(z)}$ resulta da velocidade média e das flutuações de curta duração da velocidade do vento, sendo representada pela equação 25. Na pressão dinâmica média q_p estão inclusas oscilações do vento de curto espaço de tempo.

$$q_{p(z)} = \left[1 + (7I_{v(z)}) \right] \frac{1}{2} \rho (V_{m(z)})^2 = C_{e(z)} q_b \quad \text{Equação 25}$$

Onde:

V_m = velocidade média do vento;

q_b = pressão dinâmica de referência;

$C_e(z)$ = coeficiente de exposição;

O valor “ 7 ” na expressão de “ q_p ” é baseado no fator de pico igual a 3,5 e é consistente com o valor da pressão e dos coeficientes de força;

$l_{v(z)}$ = a intensidade de turbulência à altura z , $l_{v(z)}$, é definida como o quociente entre o desvio padrão da turbulência e a velocidade média do vento.

O valor da intensidade de turbulência $l_{v(z)}$ é definido pelas equações 26 e 27:

$$l_{v(z)} = \frac{\sigma_v}{V_{m(z)}} = \frac{k_l}{c_{0(z)} \ln \frac{z}{z_0}} \rightarrow \text{para } z_{min} \leq z_{max} \quad \text{Equação 26}$$

$$l_{v(z)} = l_{v(z_{min})} \rightarrow \text{para } z \leq z_{min} \quad \text{Equação 27}$$

Onde:

σ_v = desvio padrão da turbulência;

k_l = fator de turbulência, recomenda-se o valor de 1,0;

c_o = fator de orografia, dado como 1,0 para terrenos planos. Para terrenos com colinas, falésias, consultar o anexo A.3 da norma;

z_o = comprimento de rugosidade (m) – tabela 9;

z = altura acima do terreno.

Os valores de V_m e $C_e(z)$ são obtidos pelas equações 28 e 29:

$$V_{m(z)} = c_{r(z)} c_{0(z)} V_b \quad \text{Equação 28}$$

$$c_{e(z)} = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad \text{Equação 29}$$

Onde:

$c_{r(z)}$ = fator de rugosidade: estabelece a variabilidade da velocidade média na estrutura.

O fator de rugosidade do terreno $c_{r(z)}$ é definido pela equação 30 e 31:

$$z_{min} \leq z \leq z_{max} : \rightarrow c_{r(z)} = k_r \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad \text{Equação 30}$$

$$z \leq z_{min} : \rightarrow c_{r(z_{min})} \quad \text{Equação 31}$$

Onde:

z_0 = comprimento da rugosidade (m);

k_r = fator do terreno, conforme comprimento da rugosidade, através da equação 32:

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad \text{Equação 32}$$

Onde:

$z_{0,II} = 0,05$, conforme a categoria II do terreno;

z_{min} = altura mínima;

z_{max} = deve ser admitido como 200 metros;

z_0 e z_{min} variam conforme a categoria (tabela 9).

Tabela 9 - Categorias e Parâmetros do terreno

	Categoria do Terreno	z_0 (m)	z_{min} (m)
0	Mar ou área costeira exposta ao mar aberto	0,003	1
I	Lagos ou área plana e horizontal com vegetação insignificante e sem obstáculos	0,01	1
II	Áreas com vegetação baixa como grama e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações de pelo menos 20 alturas de obstáculos	0,05	2
III	Área com cobertura regular de vegetação ou edifícios ou com obstáculos com separações de no máximo 20 alturas de obstáculos (tal como aldeias, terrenos suburbanos, floresta permanente)	0,3	5
IV	Área na qual pelo menos 15% da superfície é coberta por edificações e sua altura média é superior a 15 metros)	1,0	10

Nota: as categorias do terreno podem ser consultadas no Anexo A.1 da norma.

Fonte: Adaptado da EN-1991-1-4 (2010).

3.4.2 Pressão resultante do vento (p)

A pressão resultante exercida numa parede, numa cobertura ou num elemento é a diferença entre as pressões que atuam sobre as faces opostas levando em conta os seus sinais. Logo, a pressão resultante pode ser determinada pela equação 33:

$$p = q_{p(z)}(c_{pe} - c_{pi}) \quad \text{Equação 33}$$

Onde:

$q_{p(z)}$ = pressão dinâmica de pico;

z = altura de referência para a pressão exterior;

c_{pe} = coeficiente de pressão externa;

c_{pi} = coeficiente de pressão interna que considera o tamanho e distribuição das aberturas da edificação.

3.4.3 Coeficiente de pressão interna (c_{pi})

As pressões interiores e exteriores devem ser consideradas atuando simultaneamente. Deve ser considerada a combinação mais desfavorável das pressões exteriores e interiores para cada combinação de possíveis aberturas e outras vias de passagem de ar.

O coeficiente de pressão interna, c_{pi} , depende do tamanho e distribuição das aberturas no envelope da edificação. A norma especifica os valores de coeficientes de pressão interna considerando conceitos de abertura dominante, dentre outros e pode ser consultada para obter os coeficientes correspondentes a cada situação de projeto.

3.4.4 Coeficiente de pressão externa (c_{pe})

3.4.4.1 Paredes

Os coeficientes de pressão externa são denominados como $c_{pe,1}$, para coeficientes locais e $c_{pe,10}$, para coeficientes de forma (globais), respectivamente. Os valores de $c_{pe,1}$ são utilizados para o projeto de pequenos elementos e fixações com uma área por elemento de 1m^2 ou menos como elementos de revestimento e elementos para cobertura. Valores de $c_{pe,10}$, podem ser usados para o projeto da estrutura principal do edifício. Estes coeficientes de pressão externa, $c_{pe,1}$ e $c_{pe,10}$, para zonas A, B, C, D e E são definidos na figura 40 e tabela 10.

3.4.4.2 Telhado

Há casos onde a força do vento em estruturas de edificações é determinada pela aplicação dos coeficientes de pressão c_{pe} na lateral de barlavento e sotavento (zonas D e E) e para prédios simultaneamente. Esta falta de correlação da pressão do vento na lateral de barlavento com sotavento é considerada da seguinte forma:

- para edificações com $h/d \geq 5$ a força resultante é multiplicada por 1;
- para edificações com $h/d \leq 1$, a força resultante é multiplicada por 0,85;
- para valores intermediários de h/d , interpolar linearmente para serem aplicados.

Para coberturas com telhados com inclinação de $(-5^\circ < \alpha < 5^\circ)$, a norma direciona para o uso dos coeficientes de pressão externa considerando o telhado como se fosse plano em duas águas. Para outras inclinações de cobertura, a norma deve ser consultada.

A localização dos coeficientes de pressão externa para o telhado é mostrada na figura 41 e os valores indicados na tabela 11. A referência de altura z_e para o telhado deve ser tomada igual a h . E quanto as dimensões de comprimento e largura, a norma não apresenta nenhum critério específico para determinação das ações do vento.

Tabela 10 - Valores recomendados para coeficientes e pressão externa para paredes verticais de plantas de edificações retangulares

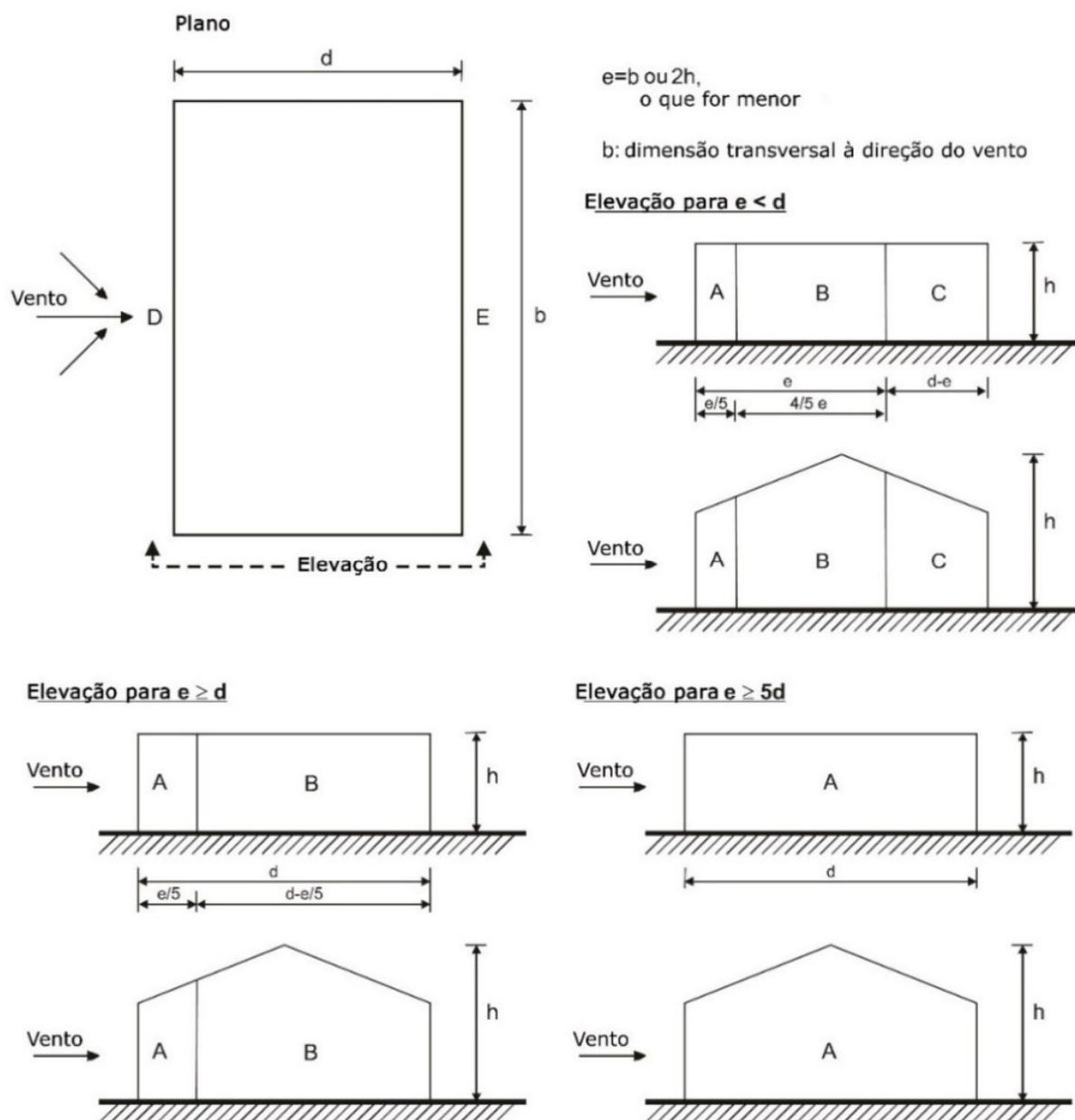
Zona	A		B		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$								
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	-	+0,8	+1,0	-0,7	-
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	-	+0,8	+1,0	-0,5	-
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	-	+0,7	+1,0	-0,3	-

Notas da tabela 10:

- Para valores intermediários de h/d , interpolação linear deverá ser aplicada.
- Para edificações com relações $h/d > 5$, para o cálculo da carga total de vento deve ser consultadas as especificações da EUROCODE-1991-1-4 (2010).
- Edificações com $h/d < 1$, a força resultante deve ser multiplicada por 0,85.

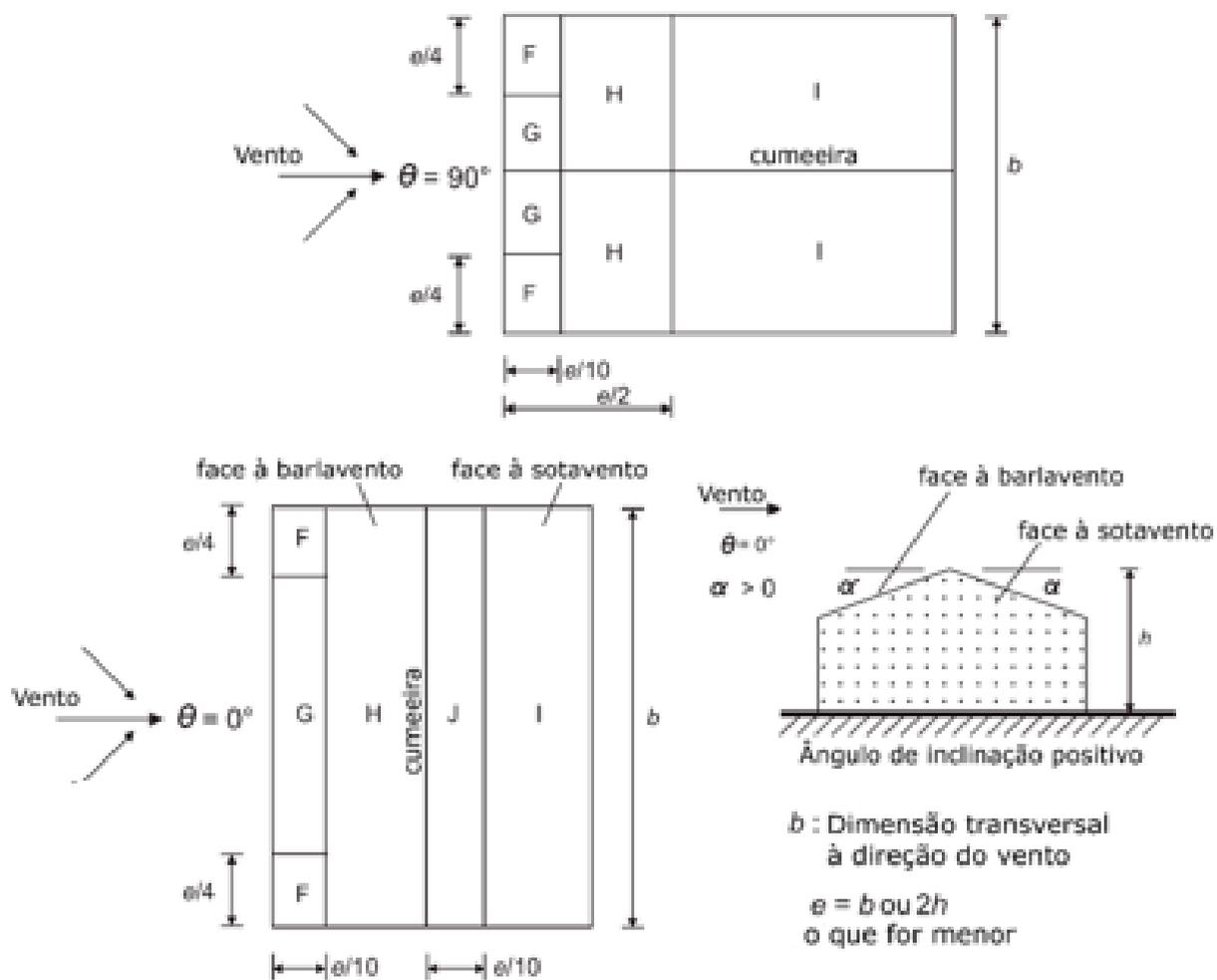
Fonte: Adaptado de EUROCODE-1991-1-4 (2010).

Figura 40 - Representação da localização das zonas para coeficientes de pressão externa $C_{pe,1}$ e $C_{pe,10}$ em paredes verticais



Fonte: Adaptado de EUROCODE-1991-1-4 (2010).

Figura 41 - Representação da localização das zonas para coeficientes de pressão externa de coberturas de edificações em duas águas



Fonte: Adaptado de EUROCODE-1991-1-4 (2010).

Tabela 11 - Valores recomendados para coeficientes de pressão externa de telhados planos

Tipo de telhado	Zona							
	F		G		H		I	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
Telhados duas águas	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+0,2 e -0,2	

Fonte: Adaptado de EUROCODE-1991-1-4 (2010).

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

3.5 STANDARD NEW ZEALAND / AUSTRALIA: STRUCTURAL DESIGN ACTIONS PART 2 - WIND ACTIONS: AZ/NZS 1170.2:2011

A norma *New Zealand/Australia: Structural Design Action Part 2 – Wind Actions* AS/NZS 1170:2011 estabelece procedimentos para determinar a velocidade do vento e suas ações resultantes para uso em projeto estrutural de estruturas sujeitas a ações do vento que não sejam causadas por tornados. O padrão normativo é aplicável a: edifício com altura menor ou igual a 200 m, estrutura com vãos de telhado inferiores a 100m e estruturas que não sejam de offshore, pontes e torres de transmissão.

São previstas na normativa, especificações para projeto da carga de vento sobre edificações baixas em (uma, duas e quatro) águas, quatro águas em formato de “L” e prédios para alturas maiores de 25 metros. Apresenta-se método de determinação das pressões externas que incidem sobre componentes estruturais e revestimentos de superfícies como paredes e telhado.

3.5.1 Velocidade básica e pressão dinâmica do vento

Os valores da velocidade do vento devem ser apropriados para o tipo de estrutura ou elemento estrutural, seu uso pretendido e para a sua vida útil.

São mostrados fatores na forma de coeficientes de força em vez de coeficientes de pressão. Para determinar a pressão dinâmica utiliza-se a equação 34:

$$p = (0,5\rho_{\text{air}}) \cdot (V_{\text{desc},0}^2) c_{\text{fig}} c_{\text{dyn}} \quad \text{Equação 34}$$

Onde:

p : pressão dinâmica de projeto do vento em pascal: p_e , p_i ou p_n onde o sinal é dado pelo valor de c_p usado para avaliar c_{fig} .

ρ : densidade do ar = 1,25 kg/m³

$V_{\text{des},0}$: velocidade de projeto do vento ortogonal à edificação, a um ângulo de 0°, 90°, 180° e 270° determinada em função da altura (z);

c_{fig} : fator de forma aerodinâmico do vento usado para projeto, obtido pela combinação de pressão internas e externas nas edificações fechadas, ou seja, ($c_{\text{fig},e} - c_{\text{fig},i}$);

c_{dyn} : fator de resposta dinâmica, sendo o valor igual a 1,0 exceto onde a estrutura é dinamicamente sensível ao vento.

Os valores de c_{fig} devem ser usados na determinação de pressões aplicadas para cada superfície. Para cálculo das pressões, o sinal de c_{fig} indica a direção da pressão na superfície do elemento.

A velocidade de projeto $V_{desc,o}$ foi tomada como o máximo da direção cardinal da pressão dinâmica do vento $V_{sit,B}$ linearmente determinada entre pontos cardinais com um setor ($\pm 45^\circ$) para a direção ortogonal considerada determinada pela equação a seguir. A velocidade $V_{desc,o}$ é igual ao valor máximo da velocidade do vento local $V_{sit,B}$, sendo através da equação 35:

$$V_{sit,B} = V_R M_d (M_{z,cat} M_s M_t) \quad \text{Equação 35}$$

Onde:

V_R = pressão dinâmica regional para 3s de rajada, em m/s, para uma probabilidade anual de excedência de $1/R$;

M_d = multiplicador da direção do vento para 8 direções cardinais (β);

$M_{z,cat}$ = multiplicador de altura do terreno;

M_s = multiplicador de proteção/blindagem (obstáculos);

M_t = multiplicador topográfico.

Geralmente a velocidade do vento é determinada na altura média (h) do telhado. Em alguns casos varia, sendo mostrado pela norma AS/NZS 1170.2:2011 pela figura 2.1, os casos específicos em acordo com o tipo de estrutura.

A velocidade $V_{sit,B}$, considera a velocidade regional V_R para todas as oito direções cardinais, e é baseada na pressão dinâmica para rajada de 3 segundos, para uma probabilidade anual de excedência de $1/R$, onde R é o intervalo de recorrência médio, ou seja, é o inverso da probabilidade anual de excedência da velocidade do vento para estados limites últimos ou de serviço que é maior ou menor de 50 anos. Desta forma se obtém uma probabilidade de que a velocidade possa ser igualada ou excedida de 63%. Tendo-se uma rajada de 3s, a velocidade média corresponde a períodos de medições de 10 minutos.

Para admitir os devidos parâmetros de tempo de retorno e probabilidade de excedência, classifica-se a edificação conforme seu nível de importância de acordo com o apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Definição do nível de importância

Consequência da falha	Descrição	Nível de Importância	Comentário
Baixa	Consequência baixa para perdas de vida humana, ou pequena e moderada consequência econômica, social e ambiental	1	Estruturas menores (falha não coloca em perigo a vida humana)
Comum	Consequência média para perdas de vida humana, ou consideráveis consequências econômicas, sociais e ambientais	2	Estruturas normais e estruturas que não são de outros níveis
Alta	Consequência alta para perdas de vida humana, ou maiores consequências econômicas, sociais e ambientais	3	Estruturas maiores (afetam muito)
		4	Estruturas pós desastres (funções de desastre ou atividades perigosas)
Excepcional	Circunstâncias onde a reabilitação deve ser definida caso a caso.	5	Estruturas excepcionais

Fonte: Adaptado da AS/NZS 1170.0 (2011).

3.5.1.1 Multiplicador Direcional do Vento (M_d)

O multiplicador direcional do vento M_d é definido por:

- 0,95 para determinar as forças e momentos resultantes em condições completas de edifícios e ações eólicas sobre os principais elementos estruturais;
- 1,0 para todos os outros casos incluindo revestimentos e elementos de suporte.

3.5.1.2 Multiplicador de Terreno/Altura ($M_{z,cat}$)

Classifica-se o terreno fazendo-se a escolha da categoria levando-se em conta a presença dos obstáculos que constituem a rugosidade da superfície de acordo com descrições abaixo:

- Categoria 1: Terreno aberto e exposto com poucas ou nenhuma obstrução, superfícies de água;
- Categoria 2: Lagos, terrenos abertos, pouca grama, com obstruções dispersas de alturas entre 1,5m e 10m;

- Categoria 3: Terrenos com numerosas e fechadas obstruções de alturas entre 3m e 5m, com áreas de habitação suburbana;
- Categoria 4: Terrenos com numerosas obstruções grandes, altas, com alturas entre 10m e 30m, pouco espaçadas, como grandes centros urbanos e complexos industriais bem desenvolvidas.

O multiplicador da altura do terreno M_{zcat} que varia com a altura (z) devido efeito da rugosidade na velocidade do vento deve ser tomado pelos valores da tabela 13 interpolando-se linearmente valores de altura (z) intermediários.

Tabela 13 – Multiplicador do terreno/altura para rajadas de vento em terrenos completamente desenvolvidos – estados limites últimos de projeto – Regiões A/B/W, C/D

Altura (z) m	A, B e W				C e D	
	Categorias				Categorias	
	1	2	3	4	1 e 2	3 e 4
≤ 3	0,99	0,91	0,83	0,75	0,90	0,80
5	1,05	0,91	0,83	0,75	0,95	0,80
10	1,12	1,00	0,83	0,75	1,00	0,89
15	1,16	1,05	0,89	0,75	1,07	0,95
20	1,19	1,08	0,94	0,75	1,13	1,05
30	1,22	1,12	1,00	0,80	1,20	1,15
40	1,24	1,16	1,04	0,85	1,25	1,25
50	1,25	1,18	1,07	0,90	1,29	1,29
75	1,27	1,22	1,12	0,98	1,35	1,35
100	1,29	1,24	1,16	1,03	1,40	1,40
150	1,31	1,27	1,21	1,11	1,40	1,40
200	1,32	1,29	1,24	1,16	1,40	1,40

Fonte: Adaptado da AS/NZS 1170.2 (2011).

3.5.1.3 Multiplicador de Proteção (M_s)

A proteção pode ser fornecida por um edifício ou estrutura a barlavento, mas proteções como árvores ou vegetação não é permitida nesta norma. É utilizado para diminuir a pressão do vento quando estruturas próximas estiverem presentes.

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

O multiplicador de proteção deve ser 1,0 onde o gradiente médio à barlavento é maior que 0,2, ou onde os efeitos de proteção não são aplicáveis para direções particulares de vento ou são desconsideradas. Demais situações deve-se consultar a norma.

3.5.1.4 Multiplicador Topográfico (M_t)

O fator topográfico M_t deve ser considerado de acordo com:

Para locais a mais de 500 metros acima do mar (Nova Zelândia), pela equação 36:

$$M_t = M_h M_{lee} (1 + 0,00015 z_{cat} E) \quad \text{Equação 36}$$

- Para o restante dos lugares, considera-se o maior valor entre $M_t = M_h$ ou $M_t = M_{lee}$.

Onde:

M_{lee} = multiplicador de efeitos, com valor de 1,0, exceto em zonas da Nova Zelândia que deve ser consultada a norma AS/NZS 1170.2:2011.

M_h = multiplicador em forma de colina, para cada direção cardinal, considerando a seção topográfica mais adversa que ocorre em uma faixa de 22,5° de cada lado da direção cardinal considerada. Considera-se $M_h = 1,0$ para terrenos planos ou praticamente planos. Para colinas, onde a relação H/L_u (altura da colina/distância horizontal perpendicular ao vento até a crista da colina) é maior que 0,05, bem como demais situações deve-se consultar a norma.

E = elevação do local acima do nível médio do mar, em metros.

3.5.2 Fator de forma aerodinâmica (c_{fig})

Compreende os fatores de forma aerodinâmica para estruturas e partes de estruturas. Valores de c_{fig} devem ser usados na determinação de cada pressão aplicada sobre cada superfície. O efeito da ação do vento usada para projeto deverá ser a soma dos valores determinados pelo efeito da pressão pela combinações de pressão internas e externas nas edificações fechadas, ($c_{fig,e} - c_{fig,i}$). São considerados valores de fatores de forma para edifícios retangulares em planta fechados incluindo métodos para outros tipos de edifícios fechados, membros expostos, torres de treliça, telhados livres e outras estruturas.

O fator de forma aerodinâmico (c_{fig}) deverá ser determinado para superfícies internas e externas ou partes de superfícies em edificações fechadas usando as equações 37 e 38 sendo:

$$c_{fig,i} = c_{p,i} k_{c,i} \rightarrow \text{para pressão interna} \quad \text{Equação 37}$$

$$c_{fig,e} = c_{p,e} k_a k_{c,e} k_l k_p \rightarrow \text{para pressão externa} \quad \text{Equação 38}$$

Onde:

c_{pe} = coeficiente de pressão externa;

c_{pi} = coeficiente de pressão interna, em função da permeabilidade relativa da superfície externa na edificação;

k_a = fator de redução da área que deve ser tomado igual a 1,0, exceto casos específicos que deve ser consultado a norma.

$k_{c,e}$ = fator de combinação aplicado para pressões externas;

$k_{c,i}$ = fator de combinação aplicado para pressões internas;

k_l = fator de pressão local;

k_p = fator de redução do revestimento poroso, deve ser tomado igual a 1,0 exceto onde uma superfície externa consiste de revestimento permeável sendo para esses casos necessário consultar valores específicos apresentados na norma.

3.5.3 Coeficientes e pressão interna para edificações retangulares

Os fatores de forma aerodinâmicos para pressão interna, c_{pi} , devem ser determinados considerando critérios de: paredes permeáveis sem abertura dominante, e outra situação com abertura dominante em uma superfície. Esses fatores devem ser usados para casos de projeto onde as aberturas são consideradas abertas.

Uma superfície é considerada como abertura dominante se a soma das áreas de todas as aberturas nesta superfície exceder a soma das áreas das aberturas em cada uma das superfícies consideradas uma por vez. Uma abertura dominante não precisa ser grande e pode ocorrer como resultado de um cenário específico proposto, como uma abertura de ar aberta, enquanto todas as outras potenciais aberturas estão fechadas.

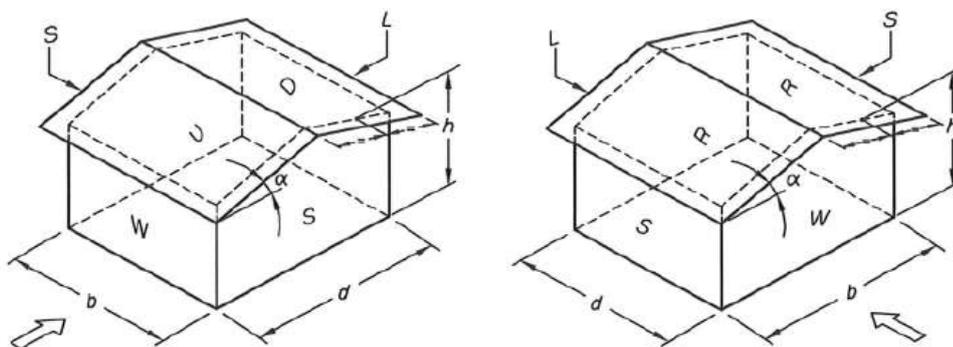
O coeficiente de pressão interna é função da permeabilidade relativa das superfícies externas da edificação. A permeabilidade de uma superfície deve ser calculada adicionando áreas de abertura para frestas nesta superfície do edifício, como por exemplo frestas de janelas.

Combinações de aberturas devem ser realizadas com o intuito de verificar as pressões internas, que juntamente com pressões externas apresentem a condição mais desfavorável do vento. Aberturas potenciais incluem portas, janelas e aberturas. Portas fechadas, incluindo portas giratórias e janelas devem ser consideradas como aberturas, a menos que sejam capazes de resistir a pressões do vento em todas as regiões e cargas de impacto de detritos transportados pelo vento.

3.5.4 Coeficientes e pressão externa para edificações retangulares

Os coeficientes de pressão externa ($c_{p,e}$) para superfícies de edificações retangulares são dadas nas tabelas 14, 15 e 16 para paredes e na tabela 17 para telhados com inclinação $\leq 10^\circ$. Os parâmetros como por exemplo dimensões de referência dessas tabelas e altura média são mostradas na figura 42.

Figura 42 – parâmetros de edificações retangulares fechadas



Fonte: Adaptado de AS/NZS 1170.2 (2011).

A norma não prevê o uso das dimensões de comprimento e largura da edificação ou razões entre comprimento e largura ou razão entre altura e largura, para o cálculo dos coeficientes de pressão externa locais e de forma. Mas, apresenta o procedimento mostrado a seguir.

Tabela 14 – Paredes: Coeficientes de pressão externa ($c_{p,e}$) para edificações retangulares fechadas - parede de barlavento (W)

h	Coeficientes de pressão externa ($c_{p,e}$)
> 25,0 m	0,8 (velocidade vento varia com a altura)
≤ 25,0 m	Para edificações no nível do solo:
	0,8 quando a velocidade do vento varia com a altura ou
	0,7, quando a velocidade do vento é dada por $z = h$
	Para edificações elevadas: 0,8 (velocidade do vento dada por h)

Fonte: Adaptado de AS/NZS 1170.2 (2011).

Tabela 15 - Paredes: Coeficientes de pressão externa ($c_{p,e}$) para edificações retangulares fechadas - parede de sotavento (L)

Direção do vento θ graus	Forma do telhado	Inclinação do telhado (α) – (ver Nota a)	d/b (ver Nota a)	Coeficiente de pressão externa ($c_{p,e}$)
0	2 águas	< 10	≤ 1	-0,5
			2	-0,3
			≤ 4	-0,2
0	2 águas	10	Todos valores	-0,3
0	2 águas	15		-0,3
0	2 águas	20		-0,4
0	2 águas	≥ 25	≤ 0,1	-0,75
			≥ 0,3	-0,5
90	2 águas	Todos valores	≤ 1	-0,5
			2	-0,3
			≤ 4	-0,2

Notas da tabela 15:

- Para valores intermediários de d/b e α , interpolação linear deverá ser usada.
- Para outros tipos de formatos de telhado, consultar a norma.

Fonte: Adaptado de AS/NZS 1170.2 (2011).

Tabela 16 – Paredes: Coeficientes de pressão externa ($c_{p,e}$) para edificações retangulares fechadas - paredes laterais (S)

Distância horizontal da borda de barlavento	Coeficiente de pressão externa ($c_{p,e}$)
0 para 1h	-0,65
1h para 2h	-0,5
2h para 3h	-0,3
> 3h	-0,2

Fonte: Adaptado de AS/NZS 1170.2 (2011).

Tabela 17 – Cobertura: Coeficientes de pressão externa ($c_{p,e}$) para edificações retangulares fechadas – Lateral inclinada barlavento (U), e lateral inclinada a sotavento (D) e (R) para cobertura duas águas, para $\alpha < 10^\circ$

Inclinação e tipo de cobertura		Distância horizontal da borda do beiral a barlavento da cobertura	Coeficiente de pressão externa ($c_{p,e}$)	
Inclinação para vento longitudinal cobertura 2 águas (R)	Inclinação à barlavento (U), inclinação sotavento (D)		$h/d \leq 0,5$ (ver Nota a)	$h/d \geq 1,0$ (ver Nota a)
Todos α	$\alpha < 10^\circ$	0 para 0,5 h	-0,9; -0,4	-1,3; -0,6
		0,5 para 1h	-0,9; -0,4	-0,7; -0,3
		1h para 2h	-0,5; 0	(-0,7); (-0,3)
		2h para 3h	-0,3; 0,1	Ver Nota b
		> 3h	-0,2; 0,2	

Notas da tabela 17:

- Para valores intermediários de inclinações de telhado e relação de h/d, deverá ser interpolado linearmente. Interpolação será somente para valores de mesmo sinal.
- Os valores dados em parênteses são fornecidos para propósito de interpolação.

Fonte: Adaptado de AS/NZS 1170.2 (2011).

A norma apresenta coeficientes de pressão externa também para telhados com formato de uma, duas e quatro águas com inclinação $\geq 10^\circ$, mas não foram inclusos por não ser foco da pesquisa.

3.5.5 Fator de pressão local (k_1) para revestimentos

O fator da pressão local k_1 deverá ser considerado com valor de 1,0 em todos os casos exceto onde determinado força do vento aplicada para revestimentos, seus fixadores, para elementos que suportam diretamente os revestimentos e seus fixadores. Nos casos onde k_1 deverá ser como 1,0 ou o valor da tabela 18 para área e localização das zonas indicadas na figura 43, deve ser

usado o valor que apresentar efeito mais adverso quando combinado com a pressão interna e externa. Onde mais do que um caso se aplica, o maior valor de k_1 da tabela 18 deverá ser usado.

Para edificações retangulares, o limite negativo resultante da multiplicação do $k_1 c_{p,e}$ deverá ser (-3,0) em todos os casos. O caso RC1 somente aplica-se para telhados planos ou quase planos (inclinações menores do que 10°).

Tabela 18 - Fator de pressão local K_1

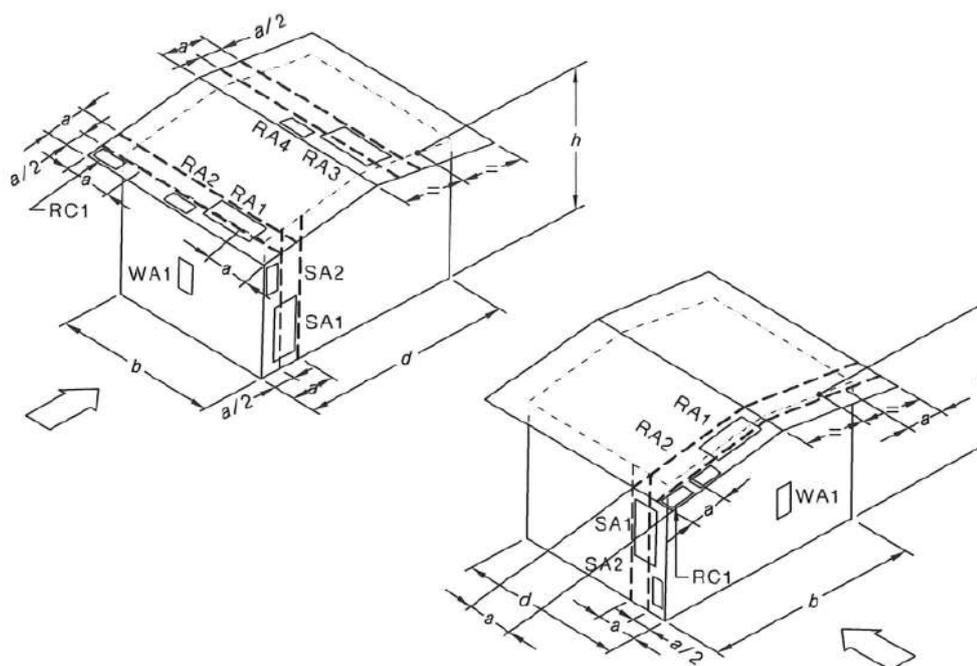
Caso de projeto	Zona	Índice do aspecto da edificação (r)	Área (A) m ²	Proximidade das bordas/beiral	k_1
Pressão positiva					
parede de barlavento	WA1	A11	$A \leq 0,25 a^2$	Qualquer lugar	1,5
Todas outras áreas	-	A11	-	-	1,0
Pressão negativa					
Cantos a barlavento em telhados com inclinação $< 10^\circ$	RC1	A11	$A \leq 0,25 a^2$	$< a$ de duas bordas	3,0
Bordas/beiral do telhado a barlavento	RA1	A11	$A \leq a^2$	$< a$	1,5
	RA2	A11	$A \leq 0,25 a^2$	$< 0,5a$	2,0
Lado a sotavento da cumeeira e cobertura 4 águas com inclinação $\geq 10^\circ$	RA3	A11	$A \leq a^2$	$< a$	1,5
	RA4	A11	$A \leq 0,25 a^2$	$< 0,5a$	2,0
Paredes laterais próximo as bordas das paredes de barlavento	SA1	≤ 1	$A \leq a^2$	$< a$	1,5
	SA2	≤ 1	$A \leq 0,25 a^2$	$< 0,5a$	2,0
Todas outras áreas	-	A11	-	-	1,0

Notas da tabela 18:

- Referência da localização das zonas e dimensões “a” são definidas na figura 43.
- Se uma área de revestimento é coberta por mais do que um caso na tabela 21, usar o maior valor de K_1 obtido em qualquer caso.
- A relação de aspecto da edificação (r) é definido como a altura média do telhado (h) dividido pelo menor de b e d.

Fonte: Adaptado de AS/NZS 1170.2 (2011).

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 43 - Fatores de pressão local k_f 

Notas:

- O valor da dimensão "a" é o mínimo de $0,2b$, $0,2d$ e h .
- A relação lateral de qualquer área do fator de pressão local no telhado não deve exceder 4.

Fonte: Adaptado de AS/NZS 1170.2 (2011).

3.5.6 Fator de redução de área (k_a) para telhados e paredes

O fator de redução de área (k_a) para telhados e paredes laterais deve ser considerado para todos os casos $k_a = 1,0$. Mas pode variar em função da área tributária sendo: para áreas de até 10m^2 o fator será $k_a = 1,0$, áreas de 25m^2 o fator será $k_a = 0,9$ e áreas maiores que 100m^2 o fator será $k_a = 0,8$. Áreas intermediárias a esses valores, deve-se interpolar linearmente.

3.5.7 Fator de redução da permeabilidade do revestimento (k_p)

O fator de redução de permeabilidade para revestimentos deve ser adotado como $k_p = 1,0$ exceto onde uma superfície consiste de revestimentos impermeáveis e o índice de solidez é menor de 0,999 ou excede 0,99. Nestes outros valores de k_p estão especificados na norma.

3.5.8 Fator de combinação de ação (k_c)

Onde as pressões agem em uma combinação de superfícies de um prédio fechado como por exemplo (parede de barlavento, telhado, parede lateral, parede de sotavento e superfície interna)

contribuem simultaneamente para o efeito da ação estrutural (como por exemplo a força de momento fletor) em um elemento, fatores de combinação (k_{ce} e k_{ci}), menores do que 1,0 podem ser aplicados para superfícies internas e externas ao calcular forças combinadas.

Uma superfície deve ser uma parede de barlavento, uma parede lateral, uma parede de sotavento, (um telhado perpendicular e ou paralelo ao vento devem ser tratados juntos como uma única superfície), ou as superfícies internas do edifício tratadas como uma única superfície. Uma superfície interna não deve ser tratada como uma superfície efetiva se $c_{pi} < 0,2$.

Onde as pressões em duas superfícies contribuintes atuam juntas em combinação para produzir um efeito de ação estrutural, k_{ce} e k_{ci} pode ser considerado como 0,9. Onde três (ou mais) superfícies contribuintes atuam em combinação, k_{ce} e k_{ci} podem serem considerados como 0,8. Exemplos de fatores de combinações k_{ce} e k_{ci} são descritos a seguir:

- 3 superfícies efetivas: pressões para paredes a barlavento e sotavento combinadas com pressões da cobertura, $k_{ce} = 0,8$ e $k_{ci} = 1,0$, sendo para k_{ci} nenhuma superfície efetiva;
- 4 superfícies efetivas: pressões para paredes a barlavento e sotavento combinadas com as pressões de cobertura e pressões internas, $k_{ce} = 0,8$ e $k_{ci} = 0,8$;
- 3 superfícies efetivas: pressões de paredes laterais combinadas com as pressões de cobertura, $k_{ce} = 0,8$ e $k_{ci} = 1,0$, sendo para k_{ci} nenhuma superfície efetiva;
- 4 superfícies efetivas: pressões das paredes laterais combinadas com as pressões de cobertura e as pressões internas, $k_{ce} = 0,8$ e $k_{ci} = 0,8$;
- 1 superfície efetiva: pressões da cobertura atuando sozinha, $k_{ce} = k_{ci} = 1,0$, sendo para k_{ci} nenhuma superfície efetiva;
- 2 superfícies efetivas: pressões da cobertura combinadas com pressões internas, $k_{ce} = k_{ci} = 0,9$;
- 2 superfícies efetivas: pressão lateral em paredes de barlavento e sotavento, $k_{ce} = 0,9$ e $k_{ci} = 1,0$, sendo para k_{ci} nenhuma superfície efetiva;
- 2 superfícies efetivas: pressão lateral na superfície interna e externa, $k_{ce} = k_{ci} = 0,9$.

Para quaisquer telhados e paredes laterais, o produto k_{ce} e k_{ci} não deve ser inferior a 0,8. E, fatores de combinação de ação inferiores a 1,0 são responsáveis pela ação não simultânea de pico pressões em superfícies efetivas.

4 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo aborda-se os tipos de túneis de vento, sua importância e funções das diferentes partes que compõem um túnel de vento, bem como toda a técnica utilizada para os ensaios com modelos reduzidos, desde a fabricação dos modelos até os métodos de aquisição de dados. Apresenta-se também, a teoria da semelhança entre escala real e escala do modelo reduzido, os parâmetros a serem controlados durante os ensaios para obter as medições das pressões e as características dos modelos dos pavilhões industriais consideradas para o estudo em túnel de vento mostrados neste trabalho.

4.2 TEORIA DA SEMELHANÇA

Quando não se pode determinar por estudo teórico todas as características do escoamento de um fluido com elemento sólido imerso, a alternativa é por técnicas experimentais. No caso deste trabalho a análise experimental será por meio de simulação em túnel de vento para confirmar a adaptação do sólido à sua realidade, mas requer algumas condições de semelhança.

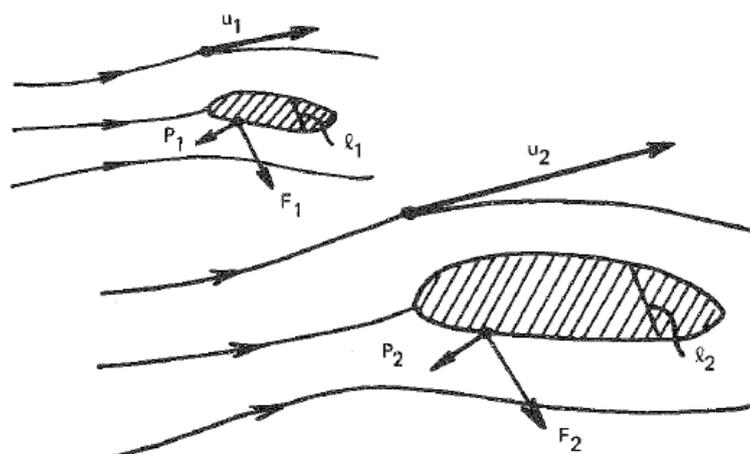
Segundo Blessmann (2009) a forma de escoamento nas vizinhanças do modelo ou edificação real, depende dos fatores que formam o número de Reynolds e da turbulência do vento, mas também das características da rugosidade superficial do sólido. Em resumo, a forma do escoamento nas vizinhanças do sólido depende essencialmente da localização da linha de separação do escoamento de ar. O autor acrescenta ainda que a forma do escoamento define um certo campo de velocidades ao qual está associado um campo de pressões, que por sua vez, determinará as forças que atuam sobre a edificação ou seu modelo. Define também, como conceito do número de Reynolds a razão entre o produto da dimensão característica do modelo “l” e a velocidade do vento “V” pela ν , a viscosidade cinemática do ar definida na equação 39.

$$Re = \frac{Vl}{\nu} \quad \text{Equação 39}$$

As condições de semelhança se fazem necessárias, para que o estudo em modelo reduzido com dispositivos de simulação do vento natural reproduza em túnel de vento as mesmas condições que são encontradas na natureza. Para tanto, Blessmann (2011) estabelece que é imprescindível que a semelhança física a qual engloba as semelhanças: geométrica, dinâmica e cinemática sejam cumpridas de forma que as linhas de escoamento tenham o mesmo aspecto, sendo:

- semelhança geométrica: exige que o modelo reduzido seja semelhante à edificação real em forma com inclusão de detalhes e acabamentos superficiais, porém com medidas proporcionais e em orientação no escoamento. Além disso, as condições em que o modelo está inserido também devem ser semelhantes à realidade, como por exemplo, a rugosidade, topografia, vegetação e detalhes dos objetos analisados. Pode-se dizer semelhança de detalhes e rugosidades das superfícies analisadas. Matematicamente, é constante a relação entre os comprimentos em todos os pares de linhas homólogas nos dois escoamentos sendo $l_1/l_2 = \text{constante}$ mostrado na figura 44;
- semelhança cinemática ou semelhança dos escoamentos: também chamada de estrutura do vento, inclui a mesma lei de distribuição de velocidades médias e as mesmas características da turbulência. Nesse caso é necessário que as medidas de comprimento e tempo sejam proporcionais entre a estrutura real e o modelo reduzido. Matematicamente, é constante a relação entre os módulos das velocidades em todos os pares de pontos correspondentes nos dois escoamentos sendo $u_1/u_2 = \text{constante}$ apresentado na figura 44;
- semelhança dinâmica ou semelhança das forças incidindo sobre o corpo: traduz o movimento do corpo, considerando as forças que o induziram ao movimento. As forças de pressão, de viscosidade e de inércia devem ser proporcionais. Em um escoamento natural, têm-se as forças de gravidade, viscosidade, inércia e pressão. Para a situação experimental, as forças de gravidade não são consideradas, em função do desprezível peso do volume do ar. Matematicamente, é constante a relação entre os módulos das forças em todos os pares dos pontos correspondentes nos dois escoamentos sendo $F_1/F_2 = \text{constante}$ de acordo com a figura 44.

Figura 44 - Semelhanças



Fonte: Adaptado de Blessmann (2011).

De acordo com Blessmann (2011) a semelhança entre a edificação real e a edificação em modelo reduzido implica na igualdade dos parâmetros adimensionais de força de pressão, viscosidade e de inércia. Existindo semelhança dinâmica, a relação entre as pressões em pontos correspondentes do modelo e da construção real é constante para qualquer par destes pontos. Sendo assim, tendo-se as medições das pressões no modelo, têm-se as pressões nos pontos correspondentes da construção por meio do coeficiente de proporcionalidade denominado de k . Através da figura 45 têm-se:

- na edificação real, o coeficiente de pressão no ponto n (equação 40):

$$c_{pr} = \frac{\Delta p_r}{q_r} \quad \text{Equação 40}$$

Sendo (equação 41):

$$q_r = \frac{1}{2} \rho V_r^2 \quad \text{Equação 41}$$

Onde:

Δp_r = pressão efetiva no ponto n da edificação real;

q_r = pressão dinâmica da edificação real;

V_r = velocidade de referência da edificação real.

- No modelo, o coeficiente de pressão no ponto n (equação 42):

$$c_{pm} = \frac{\Delta p_m}{q_m} \quad \text{Equação 42}$$

Sendo (equação 43):

$$q_m = \frac{1}{2} \rho V_m^2 \quad \text{Equação 43}$$

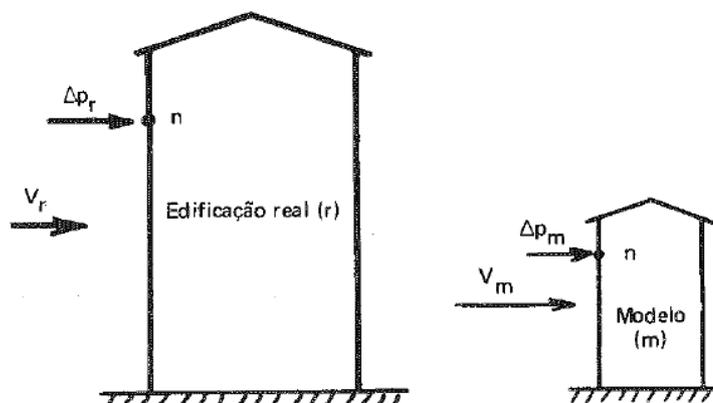
Onde:

Δp_m = pressão efetiva no ponto n do modelo;

q_m = pressão dinâmica do modelo;

V_m = velocidade de referência do modelo.

Figura 45 – Estudos em modelos



Fonte: Adaptado de Blessmann (2011).

Por definição de semelhança dinâmica (equação 44 e 45):

$$\Delta p_r / \Delta p_m = k \quad \text{Equação 44}$$

$$q_r / q_m = k \quad \text{Equação 45}$$

Desta forma, têm-se a equação 46 e 47;

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

$$\Delta p_r = k \Delta p_m \quad \text{Equação 46}$$

$$q_r = k \Delta q_m \quad \text{Equação 47}$$

Com a substituição na equação 40 e 42, têm-se a equação 48 e 49:

$$c_{pr} = \frac{k \Delta p_m}{k q_m} = \frac{\Delta p_m}{q_m} \quad \text{Equação 48}$$

$$c_{pr} = c_{pm} \quad \text{Equação 49}$$

Determinando-se assim, o mesmo coeficiente de pressão para o modelo e para a edificação.

Resumindo-se, as forças estáticas devido à ação do vento podem ser determinadas em modelo reduzido, em escoamento de velocidade e de fluido diferentes, desde que se tenha semelhança geométrica, cinemática e dinâmica (BLESSMANN, 2011). Dentre as relações pode-se citar: escala de comprimento, tempo e velocidades, sendo:

O fator de escala de comprimento ou escala geométrica, é definida pela dimensão do modelo reduzido e sua dimensão correspondente na estrutura real, sendo pela equação 50:

$$\lambda_L = \frac{L_m}{L_p} \quad \text{Equação 50}$$

O fator de escala de tempo é dado pelo inverso do fator de escala de frequência pela equação 51:

$$\lambda_T = \frac{1}{\lambda_f} \quad \text{Equação 51}$$

Quanto ao fator de escala de velocidade têm-se como a relação entre a velocidade do modelo e a velocidade da estrutura real. Este fator também pode ser determinado pela multiplicação do fator geométrico e de frequência pela equação 52:

$$\lambda_v = \frac{V_m}{V_p} = \frac{\frac{L_m}{t_m}}{\frac{L_p}{t_p}} = \frac{\lambda_L}{\lambda_T} = \lambda_L \cdot \lambda_f \quad \text{Equação 52}$$

Onde:

λ_L = fator de escala geométrica;

L_m = comprimento do modelo;

L_p = comprimento do protótipo (estrutura real);

λ_T = fator de escala de tempo;

λ_f = fator de escala de frequência;

λ_v = fator de velocidades;

V_m = velocidade do modelo;

V_p = velocidade do protótipo (estrutura real);

t_m = tempo de medição da velocidade do modelo;

t_p = tempo de medição de velocidade do protótipo;

Entretanto, vale destacar que mesmo igualdade de Re conduzir sempre a escoamentos semelhantes respeitando todas as condições de semelhança, é possível ter escoamentos semelhantes sem igualdade de Re como ocorre em construções com bordas de cantos vivos, entre outros. (BLESSMANN, 2011).

4.3 TÚNEIS DE VENTO

Os ensaios em túnel de vento de modelos reduzidos são realizados com instrumentação adequada e utilizados equipamentos eletrônicos de alta tecnologia. Os equipamentos e instrumentos possibilitam obter registros de informações quanto as grandezas necessárias para estudo e avaliação, determinando-se valores médios e valores de picos de pressões do vento que necessitam de análises.

4.3.1 Tipos de túneis

Existem (de um modo bem genérico) dois tipos de túneis, os para fins aeronáuticos e os que simulam a camada limite atmosférica para estudos de vento em edificações. Em túneis para fins aeronáuticos são gerados ventos uniformes, de pequena turbulência e com alta velocidade, e túneis aplicados para a construção civil, são utilizadas velocidades mais baixas do que os túneis aeronáuticos (BLESSMANN, 2011). No entanto, existem inúmeras variações nas características de cada túnel, fazendo com que se obtenha túneis para várias aplicações na engenharia. Barlow, Rae e Pope (1999) descreveram um túnel de vento de camada limite, projetados para simular a camada limite atmosférica e comumente utilizados para determinar cargas do vento atuantes sobre construções.

A maioria tem formato geométrico de um corredor, sendo os túneis de vento de camada limite com duas configurações de formato: circuito aberto ou fechado, sendo a seção de testes aberta ou fechada. Nos túneis de circuito fechado, os ventos percorrem no corredor com forma de anel com recirculação do escoamento, sendo este mais comportado e controlado, podendo-se inserir mesas em diversas posições para simular diversas características de escoamentos (HOLMES, 2004).

Os métodos de simulação como “métodos de rugosidade, barreira e dispositivo de mistura” empregando corpos sólidos para a reprodução de uma ou mais características do vento natural que tem sido desenvolvido, tem aumentado sua precisão. E, todos estes métodos, em menor ou maior redução, provocam uma diminuição da velocidade média obtida no túnel (COOK, 1990, APUD LOREDO-SOUZA, SCHETTINI e PALUCH; 2004).

Sarkar e Haan (2002) estudaram a importância dos túneis de vento para simulações de tornados para mostrar as características da turbulência atmosférica na interação do fluido-estrutura, não mostradas em túneis de camada limite e aeronáuticos. Sarkar, Haan, Balaramudu e Sengupta (2006) definem os tornados como vórtices com componentes de velocidades tangenciais e verticais significativas, sendo assim o campo de escoamento em um tornado é muito diferente do campo de vento em uma camada limite.

4.3.2 Túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Os ensaios experimentais desta pesquisa foram realizados no túnel de vento Professor Joaquim Blessmann, do Laboratório de Aerodinâmica das Construções LAC situado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. É um túnel de camada limite com configuração de circuito fechado tipo Prandtl, onde podem ser realizados ensaios experimentais estáticos e dinâmicos para modelos reduzidos de edificações da construção civil em geral, mostrado na figura 46.

Figura 46 – Vista externa da câmara de ensaios do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Fonte: LAC – Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2020).

4.3.2.1 Características do túnel de vento

O túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann pode reproduzir velocidade máxima de escoamento com vento suave e uniforme sem a presença de modelos em seu interior superior a 46 m/s (165 Km/h), reproduzindo a camada limite atmosférica em uma parte do túnel onde são desenvolvidas altas velocidades. Tem relação comprimento/altura da câmara principal de 10,3 e dimensões da seção principal de trabalho de (130; 90; 932) centímetros de (largura; altura; comprimento). Para operação o túnel possui um motor elétrico de 100 HP de potência, que aciona as hélices do ventilador e assim fazem o ar circular com controle de velocidade do escoamento a partir de um dispositivo inversor de frequências, e possui número de Reynolds de $2,6 \times 10^6$ (BLESSMANN, 2011). A figura 47 mostra o esquema do circuito aerodinâmico do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann.

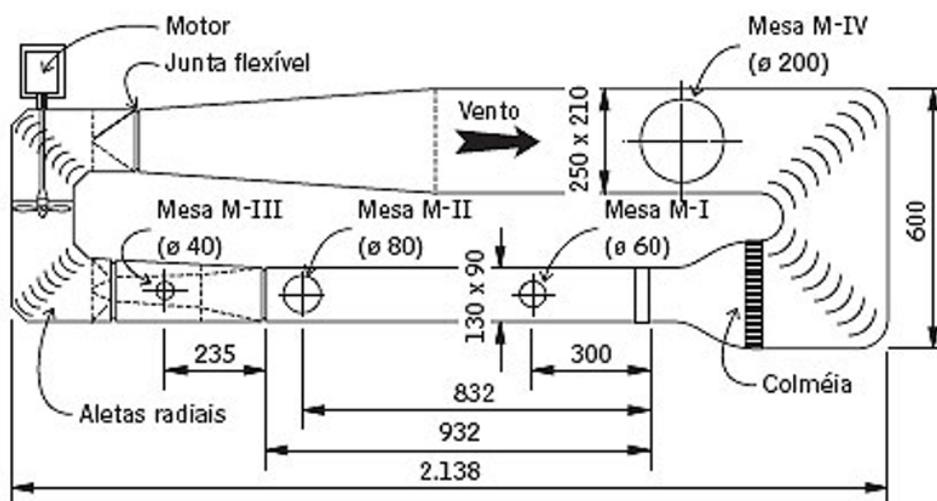
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Os modelos para ensaio são fixados sobre mesas giratórias, sendo que o túnel dispõe de quatro mesas, as quais podem ser visualizadas na figura 48, cujas dimensões estão em cm e cada uma delas apresenta suas utilizações específicas. Blessmann (2011) relata que as mesas são:

- mesa I: ensaio do tipo aeronáutico no piso do túnel, com camada limite de baixa espessura e escoamento do ar de baixa turbulência, ensaios para indústria da construção com geradores de turbulência dispostos na câmara de simulação, pesquisas em elementos de seção geométrica simples, em modelos bidimensionais ou tridimensionais. O modelo pode ser disposto tanto na posição vertical como na horizontal;
- mesa II: ensaios do tipo aeronáutico no eixo do túnel, ensaios para construção civil, com blocos colocados no piso e ou geradores de turbulência na câmara de simulação e ou em outras seções do túnel, ou com jatos transversais;
- mesa III: essa mesa apresenta elevada rigidez localizada no primeiro divergente do túnel, construída para estudos dinâmicos em estruturas de grandes alturas, como por exemplo torres em especial de (televisão, micro-ondas e mastros), chaminés, pilares de viadutos, e mastros em geral. As frequências naturais estão acima de 500Hz;
- mesa IV: mesa localizada no retorno do túnel, onde a seção transversal mede 240 x 210 centímetros, aplicada a ensaios de modelos que necessitam ser reproduzidos em maior escala, ensaios para baixas velocidades do vento, como por exemplo, ensaios de dissipação de fumaça e de gases industriais, influência de topografia sobre os ventos, efeitos de interação, modelos de pontes, etc.

Para a execução dos ensaios experimentais como os realizados para esta pesquisa foi utilizada a mesa II. Nesta mesa é possível obter o perfil de velocidades desejado, considerando medições através do giro manual da mesa para ângulos de incidência do vento de 15° em 15° mostrado na figura 48 totalizando 24 direções, a fim de obter os casos de carga de vento mais críticos, em intervalos de 15 graus.

Figura 47 – Esquema do circuito aerodinâmico do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Fonte: LAC – Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2020).

Figura 48 – Mesa giratória II do Túnel de Vento do Prof. Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Fonte: elaborado pelo Autor (2020).

4.3.2.2 Dispositivos de simulação do vento natural

A seguir são descritas as características e dispositivos para simulação do escoamento do vento no túnel de vento Prof Joaquim Blessmann com modelos reduzidos.

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

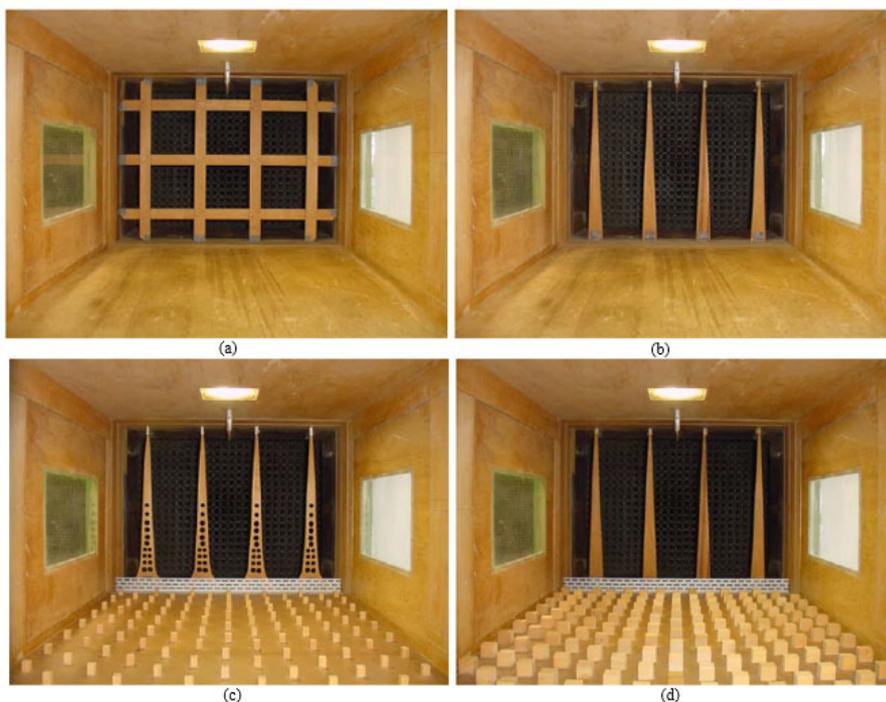
A altura total da camada limite de acordo com Loredou-Souza, Schettini e Paluch (2004) pode ser melhorada por meio de barras perfuradas ou agulhas (spires) como por exemplo a do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann da UFRGS que, além da função de barreira contribui para mistura e geração da turbulência tendendo a aumentar na mesma intensidade a medida que a simulação é realizada próxima do solo. E, para simular a parte mais baixa da camada limite atmosférica são comumente utilizados dispositivos de rugosidade, agulhas e placas perfuradas e em algumas ocasiões jatos transversais.

Para simular as características de intensidade e escala de turbulência, espectro e curva de correlação, Blessmann (2011) recomenda:

- tela uniforme: turbulência fina sobreposta a uma corrente de ar uniforme;
- telas curvas e planas: para obtenção de perfis de velocidades médias e turbulência fina;
- barras finas com seção circular com variação de diâmetro e espaçamento com a finalidade de obter perfis de velocidades médias e turbulência fina;
- triângulos com diferentes dimensões, de seção cheia ou vazada, de lados retos ou curvos) com o intuito de determinar os perfis de velocidades médias e turbulência;
- grelha de malha quadrada ou retangular compostas de elementos de seção retangular): turbulência sobreposta a uma corrente de ar aproximadamente uniforme;
- grelha única de malha variável ou grelha sobreposta a uma corrente de ar uniforme;
- grelha de barras horizontais de seção retangular ou circular (espessura e espaçamento variáveis) para obter perfil de velocidade média e turbulência média.

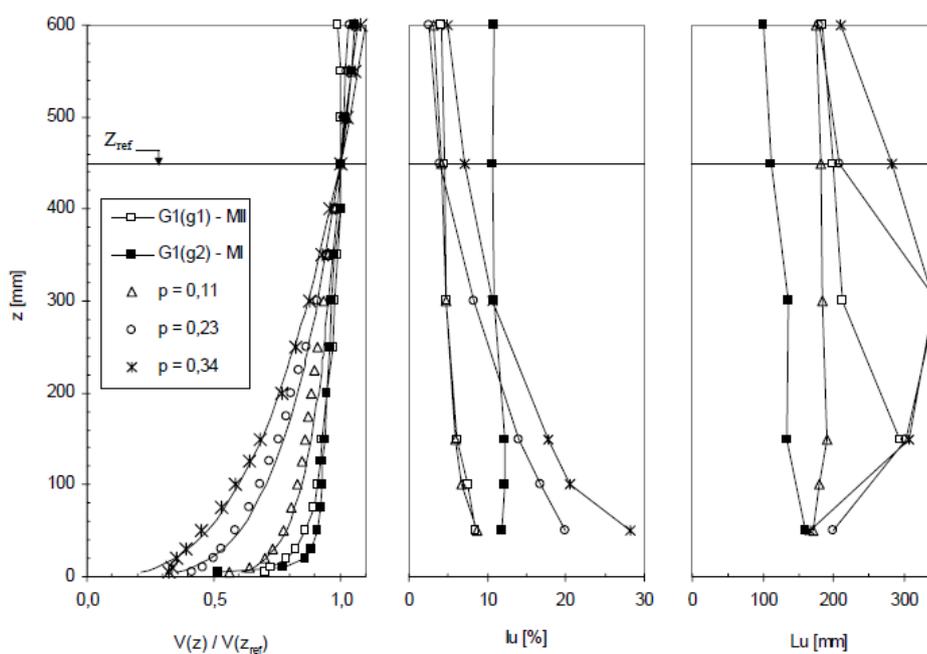
Na figura 49 são mostrados os dispositivos utilizados na simulação de quatro tipos de escoamento e na figura 50 são exibidos os correspondentes perfis de velocidade média correspondentes a lei potencial com expoentes $p = 0,11, 0,23$ e $0,34$, intensidade e escala de componente longitudinal de turbulência para duas seções de ensaio do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Figura 49 – Dispositivos de geração das diferentes camadas limites do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann: (a) grelha; (b) $p = 0,11$; (c) $p = 0,23$; (d) $p = 0,34$



Fonte: Loredou-Souza, Schettini e Paluch (2004).

Figura 50 – Perfis de velocidade média, intensidade e escala da componente longitudinal da turbulência, para o eixo vertical de duas seções de ensaio do Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann



Fonte: Loredou-Souza, Schettini e Paluch (2004).

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

A intensidade (I_u) e a macroescala (L_u) da componente longitudinal da turbulência representam respectivamente a quantidade de energia cinética presente nas rajadas do vento (oscilações) e o tamanho dos maiores turbilhões do vento atuante sobre determinada superfície/região (BLESSMANN, 2009).

Os perfis de velocidades médias representados na figura 50, reproduzem as categorias de rugosidade e suas particularidades, bem como as alturas de terreno descritas na norma brasileira NBR 6123:1988 conforme mostrado na tabela 19.

Tabela 19 – Classificação dos perfis potenciais de velocidade média pela NBR 6123:1988

Perfil potencial de velocidades médias de expoente “p”	Categoria de rugosidade - classificação pela NBR 6123:1988
0,11	I
0,23	III e IV
0,34	V

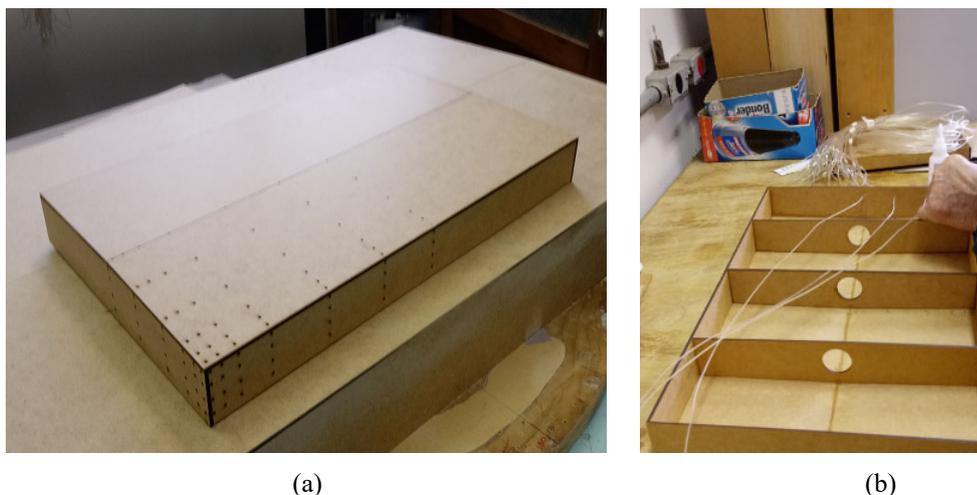
Fonte: Loredou-Souza, Schettini e Paluch (2004).

Nos ensaios em túneis de vento, Holmes (2004) enfatiza que a similaridade da intensidade da turbulência só será alcançada com igualdade h/z_0 , se a camada superficial interna turbulenta na camada limite atmosférica estiver corretamente simulada na camada limite do túnel de vento.

4.3.2.3 Sistema de aquisição de dados

No método de simulação experimental as tomadas para coleta das pressões são dispostas nos modelos em escala reduzida tanto em paredes como em telhados. Para levantamento das pressões, são realizados orifícios de 1,3mm de diâmetro para inserção das tomadas de pressão em todas as zonas identificadas, através de tubos de policloreto de vinila (pvc) de 1mm de diâmetro interno, colocados perpendicularmente à superfície das fachadas e da cobertura. A tomada de pressão que não estiver em posição perpendicular à superfície do modelo, ocasiona interferência na direção do escoamento local do vento. A fixação dos tubos de pvc se dá pelo aquecimento, afinação e inserção nos orifícios, cortando-se posteriormente as rebarbas para permitir o alinhamento. A figura 51 mostra as tomadas de pressão em fase de preparação e instalação em um modelo.

Figura 51 – Tomadas de pressão: (a) Furações para passagem das tomadas de pressão; (b) Instalação de tomadas de pressão



Fonte: elaborado pelo Autor (2020).

Para evitar problemas durante a coleta de dados, antes de iniciar os ensaios em túnel de vento, os transdutores de pressão elétricos são zerados e calibrados. Nesta fase também, inserindo-se a gaveta da figura 52, é feito o teste de sucção no espaço destinado a simulação do modelo reduzido. Essa sucção tem o intuito de gerar pressão na região de ensaio menor que a pressão externa do túnel de vento.

Figura 52 – Gaveta de teste de sucção



Fonte: LAC – elaborado pelo Autor (2020).

Os modelos reduzidos a partir da instalação das tomadas de pressão são dispostos no interior do túnel sobre a mesa giratória M-II e submetidos a incidência do vento deslizante e turbulento. As tomadas de pressão instaladas no modelo são conectadas ao transdutor elétrico de pressão de marca *Scanivalve* e através de módulos de canais, a taxa de aquisição máxima de dados é de 20 KHz.

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

\hat{p}_{RMS} = valor RMS da pressão (média quadrática ou valor positivo da raiz quadrada do valor quadrado médio) das pressões no instante t para o período de amostragem. Aqui é admitida sua nomenclatura geral em Engenharia do Vento, quando a média é zero;

\bar{p} = pressão obtida com velocidades médias do vento de 1 hora para o período de amostragem t ;

g = fator de rajada;

p_{max} = pressão obtida pela soma da velocidade média com o produto entre o fator de rajada e o desvio padrão de 1 hora para o período de amostragem t . Segundo

Blessmann (2005), p_{max} em 1 hora certamente encontra-se entre 3,5 a 4,5 vezes o desvio padrão acima da média, geralmente denominado de fator de pico;

σ_y = desvio padrão do período de amostragem t .

No interior do túnel de vento, a velocidade é determinada, de forma indireta, através da diferença de pressão, Δp_a , obtida da leitura de dois anéis piezométricos localizados na área de entrada da seção de trabalho do túnel (convergente do túnel), sendo as leituras feitas por intermédio dos transdutores de pressão *Scanivalve* acompanhando de um manômetro diferencial digital *Schiltknecht Manoair 500*. O manômetro diferencial digital é conectado a um termômetro digital para medições da temperatura do ar no interior da câmara.

Outro instrumento necessário é o barômetro para medição da pressão atmosférica durante os ensaios com leituras para cada ângulo de ataque do vento, pelo fato da pressão e temperatura serem os parâmetros que determinam a massa específica do ar.

A medição da pressão estática de referência experimental é obtida em um ponto a barlavento, localizado entre as mesas M-I, e M-II na parede lateral do túnel, conhecido como referência III.

Alguns instrumentos utilizados no túnel para os ensaios são mostrados nas figuras 54 (a, b, c, d) sendo o transdutor de pressão *Scanivale*, o manômetro diferencial digital *Manoair*, o termômetro digital e o barômetro, respectivamente.

Com todos os equipamentos de ensaios testados e o modelo instrumentado, são realizadas as aquisições instantâneas de pressões para cada canal, ou seja, no ponto de tomada de pressão instalada no modelo.

Figura 54 – Instrumentos de aquisição de dados do Túnel de Vento Prof Joaquim Blessmann: (a) Transdutores de pressão; b) Manômetro diferencial digital *Manoair*; c) Termômetro digital; d) Barômetro



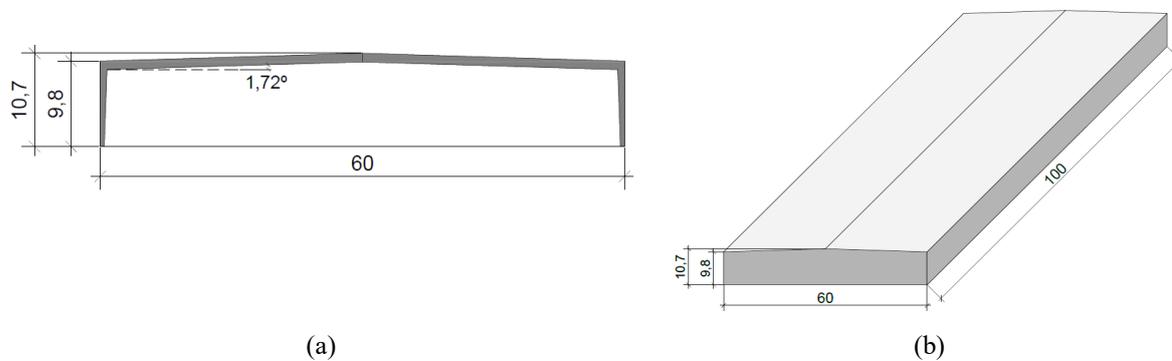
Fonte: elaborado pelo Autor (2020).

4.4 DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE ESTUDO

4.4.1 Geometria do modelo

O pavilhão em duas águas, objeto de estudo desta pesquisa apresenta as dimensões geométricas e formato mostrados na figura 55 e tabela 20.

Figura 55 - Esquema da geometria dos pavilhões - Dimensões em metros



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 20 – Dimensões dos galpões industriais, em metros

Largura (b)	Comprimento (a)	Altura (h)	Altura total (z)	a/b	h/b	Inclinação i (% e Θ)	a/b NBR 6123	h/b NBR 6123
60	100	9,8	10,70	1,67	0,16	3% = 1,72°	$1,5 \leq a/b \leq 2,0$	$h/b < 0,5$

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Na escolha das dimensões do pavilhão foi levando em conta: as configurações geométricas e ângulo de inclinação mais utilizadas pela indústria de construção metálica mostradas na tabela 01 e as relações de comprimento/largura, altura/largura e ângulos de inclinações de telhado atualmente previstas pela norma brasileira vigente para projeto da ação do vento.

4.4.2 Características de ensaio em túnel de vento

O pavilhão com geometria de $b = 60$ metros e $a = 100$ metros foi ensaiado no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann do Laboratório de Aerodinâmica das Construções LAC da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Foram ensaiados 03 modelos reduzidos sendo um para cada uma das escalas geométricas 1:400, 1:200 e 1:100. Na tabela 21 constam as dimensões em escala real e as dimensões correspondentes em escala reduzida.

Tabela 21 – Dimensões em escala real e reduzida do pavilhão industrial modelo (60x100) metros

Dimensões	Escala geométrica	Escala geométrica reduzida (m)		
	real (m)	1:400	1:200	1:100
Escala		1:400	1:200	1:100
Largura (m)	60	0,15	0,30	0,60
Comprimento (m)	100	0,25	0,50	1,00
Altura da parede (h)	9,80	0,0245	0,049	0,098
Altura total – nível da cumeeira (z)	10,70	0,0267	0,0535	0,107

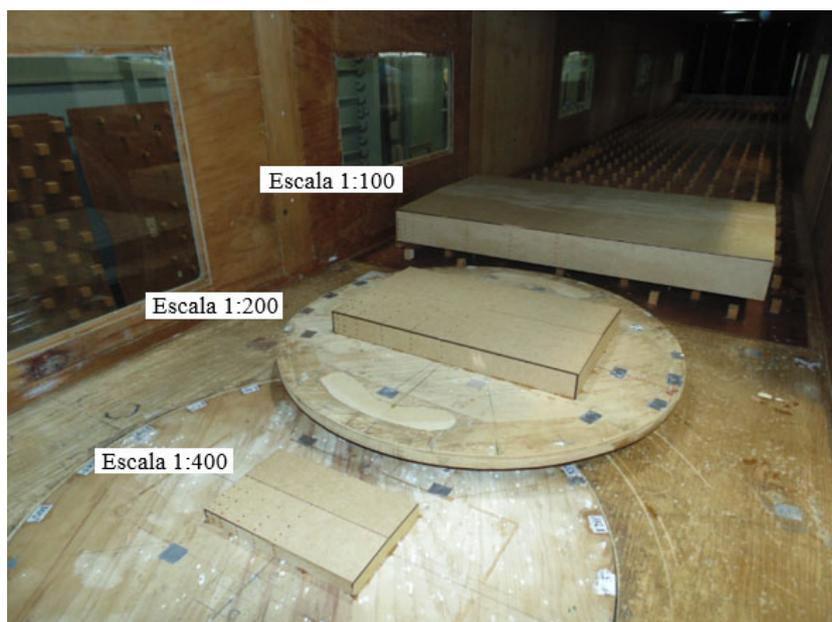
Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Os modelos reduzidos foram construídos todos em mdf no Laboratório de Engenharia e Arquitetura da Faculdade da Imed em Passo Fundo – RS e apresentados na figura 56.

As razões de bloqueio em relação a seção de baixas velocidades do túnel de vento são, respectivamente, 0,6%; 2,3% e 9,1% para os modelos com escalas geométricas 1:400, 1:200 e 1:100.

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 56 – Modelos de galpões reduzidos para ensaios nas escalas 1:400, 1:200 e 1:100



Fonte: elaborado pelo Autor (2020).

Com os modelos confeccionados foram definidas as posições das tomadas de pressão sendo estas concentradas mais nas zonas de bordas de paredes e telhados para obter as pressões externas locais.

Todavia, por causa das dimensões do modelo e tamanho do túnel de vento, foi instrumentado um único quadrante em cada modelo. Pelas figuras 57, 58 e 59 pode-se verificar a localização e numeração das tomadas de pressão para as escalas ensaiadas. A numeração e localização das tomadas possibilita a distinção dos valores de pressões em cada ponto medido nas superfícies verticais de paredes laterais, paredes de oitão e nos caimentos do telhado.

No modelo reduzido na escala 1:400 foram instaladas 63 tomadas com numeração de 1 a 63 (figura 57). No modelo na escala 1:200 constavam 94 tomadas sendo a numeração da tomada 64 até a 157. E por último o modelo na escala 1:100 contendo 161 tomadas iniciando na 158 até 318. Os modelos das escalas 1:200 e 1:100 são mostrados nas figuras 58 e 59 respectivamente.

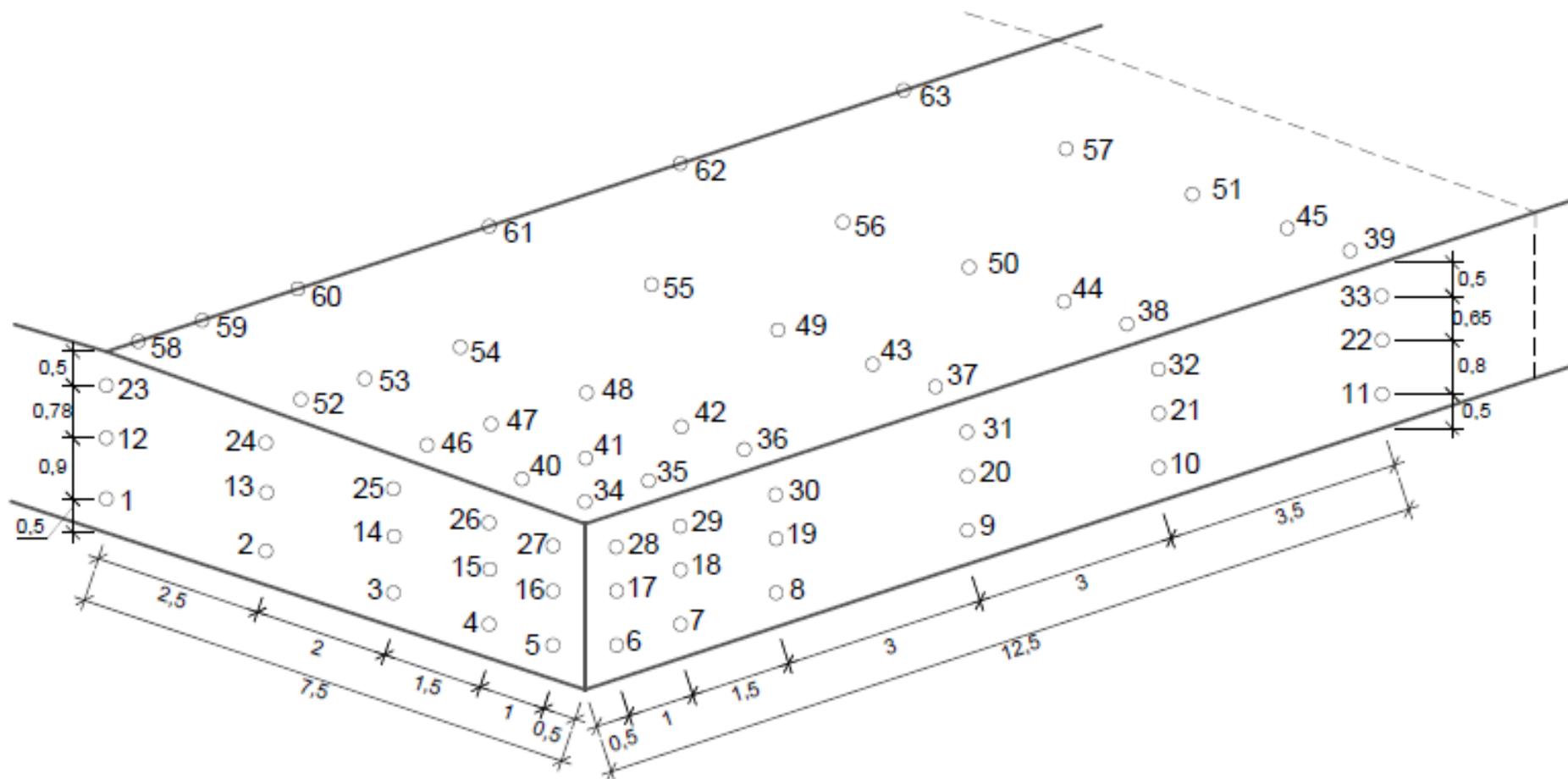
Para dispor as tomadas de pressão em policloreto de vinila (pvc) de 1mm de diâmetro em cada ponto definido em projeto para cada modelo na sua respectiva escala geométrica, foram feitos furos redondos de 1,3mm de diâmetro para passagem das tomadas. As tomadas foram colocadas

na posição perpendicular a superfície de medição de pressão. A figura 60 (a, b) mostram as fases de teste de passagem e colocação das tomadas pelas furações.

Tendo-se os modelos instrumentados com as tomadas em um de seus quadrantes, cada modelo foi instalado dentro do túnel e fixado na mesa II de ensaio. Na sequência preparou-se a área do túnel com os dispositivos para representação da rugosidade do terreno em acordo com as categorias III e IV da norma ABNT NBR 6123:1988. Estas categorias correspondem na simulação do escoamento do vento ao perfil de velocidade média de lei potencial com expoente $p = 0,23$ e intensidade e escala de componente longitudinal de turbulência para duas seções de ensaio do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A figura 61 (a, b) indica os pontos de fixação do modelo na mesa II do túnel e os dispositivos que geram o escoamento deslizando e turbulento para vento com perfil $p = 0,23$.

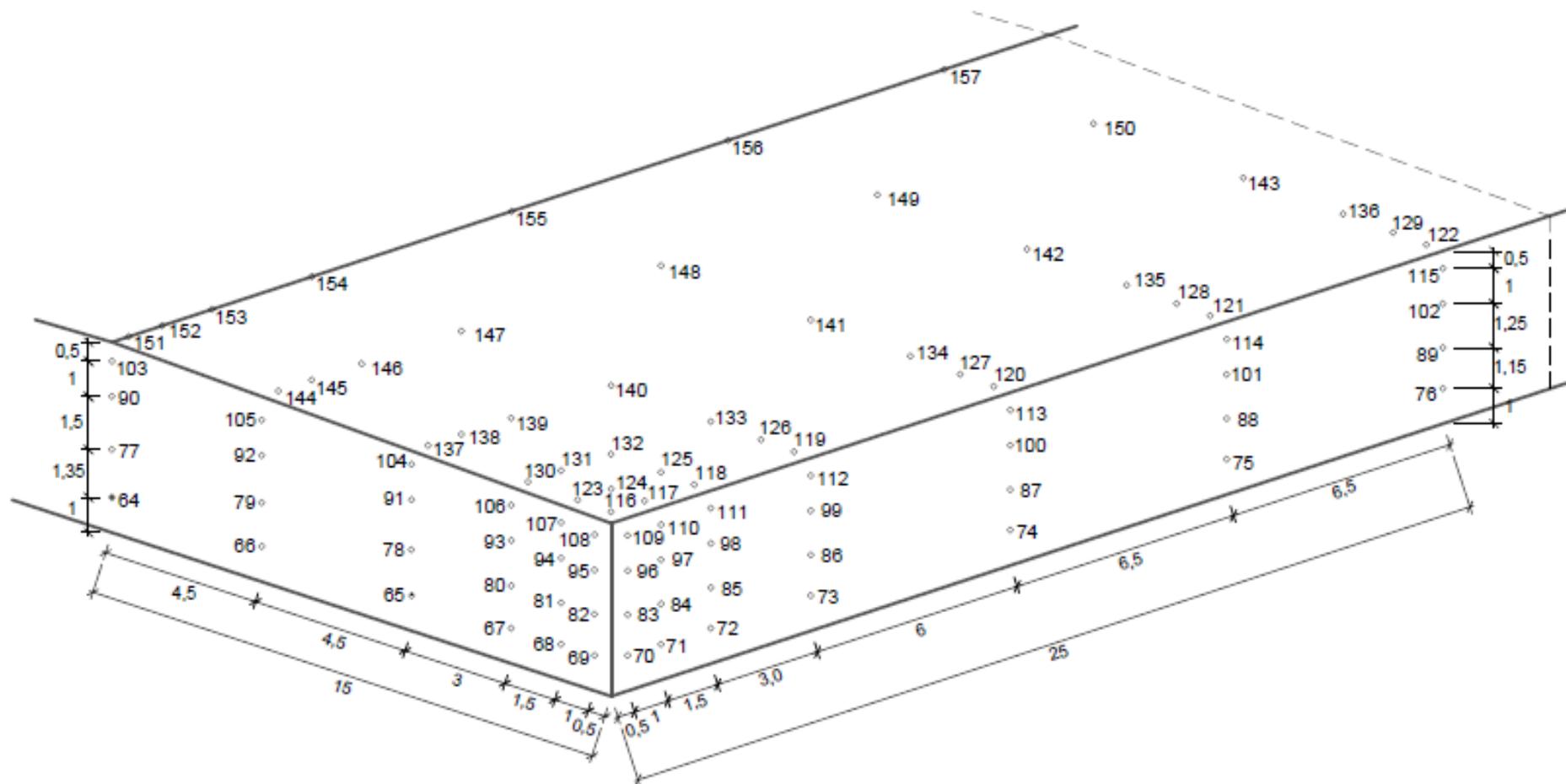
Os testes dos modelos foram realizados separadamente para cada escala, sendo necessário zerar e calibrar o transdutor de pressão elétrico antes de cada ensaio para impedir falhas durante a medições e obtenção dos dados das pressões. Nesta fase também se executou o teste de sucção no local designado a simulação do modelo com o propósito de reproduzir pressão na região de ensaio menor que a pressão externa do túnel de vento.

Figura 57 – Posição e numeração das tomadas de pressão no quadrante do modelo reduzido na escala 1:400. Dimensões em centímetros



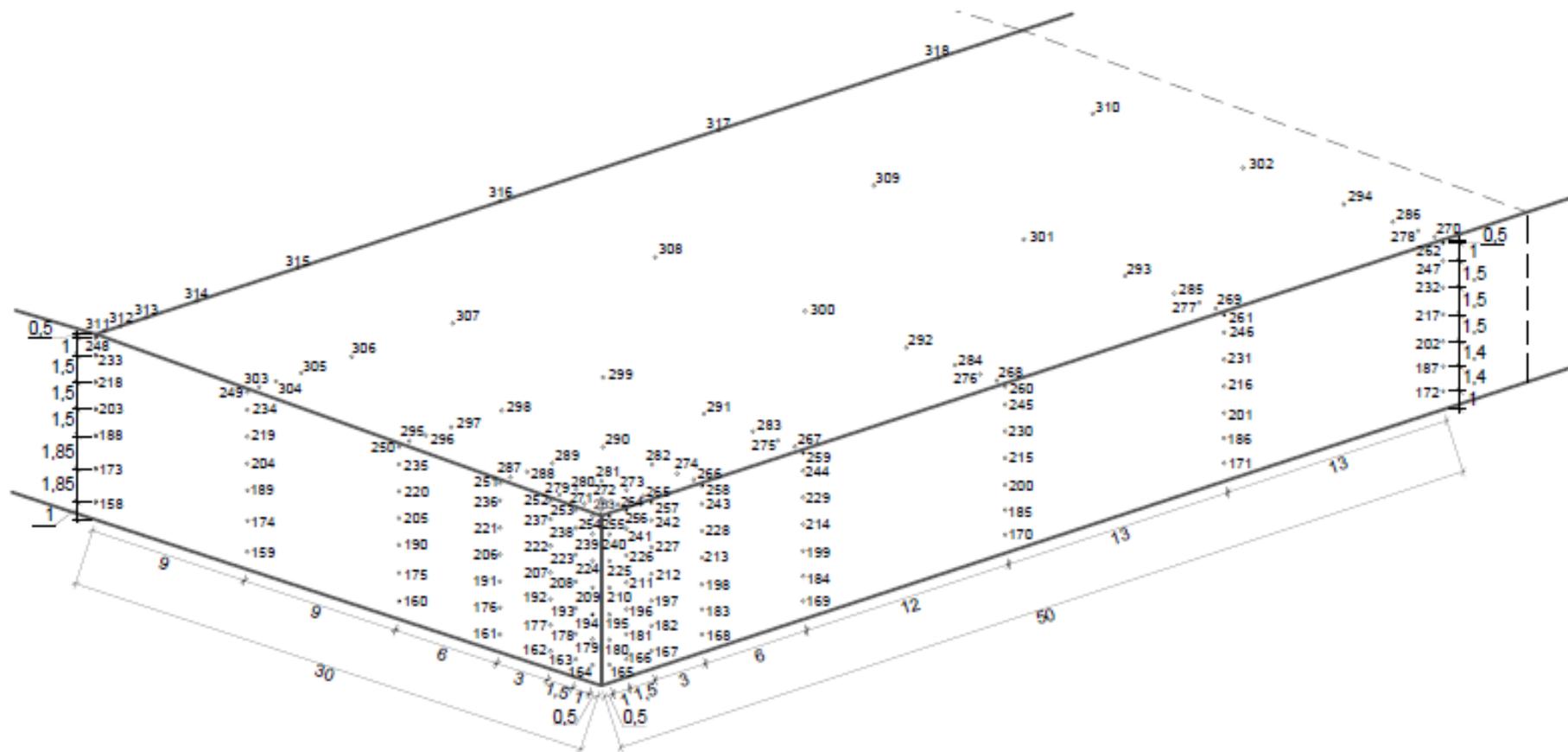
Fonte: própria do autor (2020).

Figura 58 – Posição e numeração das tomadas de pressão no quadrante do modelo reduzido na escala 1:200. Dimensões em centímetros.



Fonte: própria do autor (2020).

Figura 59 – Posição e numeração das tomadas de pressão no quadrante do modelo reduzido na escala 1:100. Dimensões em centímetros.



Fonte: própria do autor (2020).

Figura 60 – Inserção das tomadas nas furações de cada superfície



(a)



(b)

Fonte: elaborado pelo Autor (2020).

Figura 61 – Fixação do modelo a mesa de ensaio II (a) e representação do perfil de velocidade de expoente $p = 0,23$ (b)



(a)



(b)

Fonte: elaborado pelo Autor (2020).

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

A figura 62 (a, b, c) exibe o pavilhão industrial nas escalas 1:400, 1:200 e 1:100 respectivamente no interior do túnel, fixados na mesa II. A escala 1:100 serve para comparativo de efeitos secundários, fora da escala de simulação do vento no túnel, mas, foi realizado desta forma para identificar as distorções das pressões em relação a escala.

Figura 62 – Modelos reduzidos no túnel de ensaio Prof. Joaquim Blessmann nas escalas 1:400 (a), 1:200 (b) e 1:100 (c)



(a)



(b)



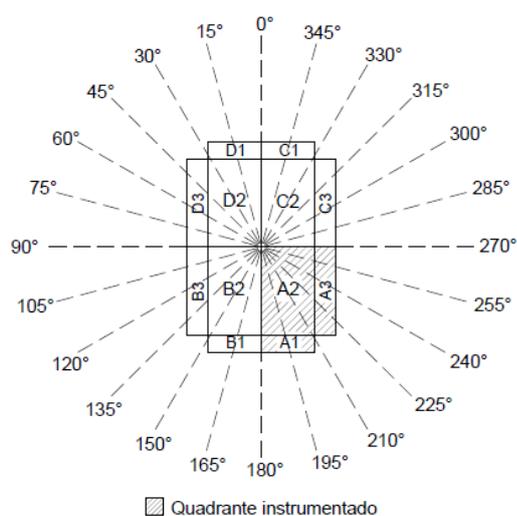
(c)

Fonte: elaborado pelo Autor (2020).

Com o modelo fixado à mesa II e testes do túnel realizados, iniciaram-se os ensaios medindo-se as pressões no pavilhão para vento incidindo em 24 ângulos (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° ,

105°, 120°, 135°, 150°, 165°, 180°, 195°, 210°, 225°, 240°, 255°, 270°, 285°, 300°, 315°, 330°, 345°. Com o quadrante instrumentado, o mesmo foi posicionado na direção de incidência de cada um dos ângulos e as pressões externas de cada tomada foram adquiridas pelos transdutores de pressão. A figura 63 destaca o quadrante instrumentado do modelo reduzido em relação às posições de cada ângulo de ensaio.

Figura 63 – Ângulos de incidência dos ventos sobre os modelos reduzidos de ensaio



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

5 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os coeficientes e pressões externas locais indicados pelos procedimentos normativos e também os obtidos experimentalmente por ensaios em túnel de vento. Constam comparativos entre as pressões e larguras de zonas determinadas por normas e métodos experimentais aplicados às configurações de zoneamento estabelecido por cada norma. Entretanto, para uma análise detalhada dos conjuntos de pressões com base nas diferentes normativa estudadas em relação as pressões para diferentes escalas geométricas de ensaio em túnel de vento, as pressões foram distribuídas por zonas em um único modelo de diagrama, o qual contempla todas as zonas previstas pelas normas avaliadas. Por meio deste diagrama destacam-se as configurações de zoneamento, apresentam-se avaliações, comentários e considerações sobre os resultados alcançados.

5.1 RESULTADOS NORMATIVOS

São descritos a seguir as características dos procedimentos analíticos aplicados ao mesmo galpão industrial especificado para ensaios em túnel de vento com dimensões de $b = 60$ metros de largura, $a = 100$ metros de comprimento, altura total $z = 10,70$ metros e inclinação do telhado $\theta = 1,72^\circ$.

5.1.1 Características e processamento de resultados analíticos

Para obter os resultados foram utilizadas relações geométricas do pavilhão descritas no item 4.4.1 deste trabalho e os critérios de projeto estabelecidos em cada norma exibidos no capítulo 3 tais como: caracterização da velocidade básica do local de construção, pressão dinâmica, turbulência do vento, coeficientes de pressão externa locais para superfície de paredes e telhado setorizadas por zonas, entre outros.

Os procedimentos normativos da ABNT NBR 6123:1988, ASCE/SEI 7-16:2016, EN-1991-1-4:2010, AS/NZS 1170.2:2011 e NBCC:2015, consideram edificações de baixa altura $h \leq 20$ m, com baixa inclinação de telhado $\alpha \leq 3^\circ$ em duas águas e sem platibanda. Por estes padrões são determinadas: pressões dinâmicas, coeficientes de pressão, pressões locais e suas respectivas dimensões das zonas de distribuição sobre superfícies de fachadas e da cobertura.

Na aplicação dos procedimentos foram considerados os seguintes parâmetros:

- geometria do pavilhão, ângulo de inclinação e formato do telhado: tabela 20;
- máxima velocidade média medida sobre 3s para a região de localização da construção da cidade de Passo Fundo – RS: $V_0 = 45\text{m/s}$ em acordo com o Mapa de Isopletras da ABNT NBR 6123:1988 com medição a 10 metros sobre o nível do terreno em lugar aberto plano correspondente a categoria II;
- relevo do terreno – fator topográfico: considerado terreno plano ou fracamente acidentado = 1,0;
- coeficientes de pressão interna: foi desprezada, $c_{pi} = 0$, de modo a não interferir no resultado das pressões externas locais, objeto de estudo desta pesquisa;
- grau de segurança requerido e a vida útil do pavilhão: fator estatístico = 1,0;
- categoria de rugosidade do terreno entre as categorias III e IV da ABNT NBR 6123 conforme exposto abaixo, sendo estas enquadradas dentro das especificações de cada padrão normativo. As normas avaliadas não apresentam considerações idênticas quanto às categorias de rugosidade, mas os critérios abaixo serviram para fazer a classificação, sendo:

categoria III: terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. Exemplos: granjas e casas de campo, com exceções das partes com matos, fazendas com sebes e ou muros, subúrbios a considerável distância do cento, com casas baixas e esparsas. Cota média dos obstáculos de 3 metros.

categoria IV: terrenos cobertos por obstáculos numerosos e poucos espaçados, em zona florestal, industrial e ou urbanizada. Exemplos: zonas de parques e bosques, com muitas árvores, cidades pequenas e seus arredores, subúrbios densamente construídos de grandes cidades, áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas. A cota média dos obstáculos é considerada de 10 metros. Inclui zonas de obstáculos maiores e que ainda não possam ser considerados na categoria V.

- parâmetros de medição da máxima velocidade média do vento (velocidade básica V_0): percentual de probabilidade de a velocidade ser igualada ou excedida, período de recorrência (retorno) em anos: tabela 22.
- Pressão final devida ao vento: através das equações designadas por cada norma e expostas na tabela 22.

Tabela 22 – Parâmetros da máxima velocidade média (velocidade básica do vento V_0)

Norma	Duração de medição: máxima da velocidade média (segundos)	Probabilidade de recorrência (%)	Tempo de recorrência - retorno (anos)	Pressão final devido ao vento
NBR 6123:1988	3	63	50	$\hat{q}_{3s} \bar{c}$
NBCC:2015	3600	63	50	$\bar{q}_{3600s} \hat{c}$
ASCE/SEI 7-16:2016	3	78	50	$\hat{q}_{3s} \bar{c}$
EN-1991-1-4:2010 (Maior Valor)	600	63	50	$\bar{q}_{600s} \hat{c}$
EN-1991-1-4:2010 (0° e 90°)	600	63	50	$\bar{q}_{600s} \hat{c}$
AS/NZS1170.2:2011	3	63	50	$\hat{q}_{3s} \bar{c}$

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Nota da tabela 22:

\hat{q}_{3s} = pressão dinâmica de pico com medições da máxima velocidade média sobre 3s;

\bar{q}_{600s} = pressão dinâmica com medições da máxima velocidade média sobre 600s;

\bar{q}_{3600s} = pressão dinâmica com medições da máxima velocidade média sobre 3600s;

\bar{c} = coeficiente de pressão médio (forma ou local);

\hat{c} , \check{c} = coeficiente de pressão de pico máximo e mínimo respectivamente.

Pelo fato de cada norma técnica possuir distribuições e dimensões geométricas específicas das zonas de pressões, bem como nomenclaturas diferentes, o resultado dos cálculos dos coeficientes de pressões e das pressões são representados na forma planificada tanto para o

telhado como para as paredes por diferentes representações em cada superfície setorizada do pavilhão.

Destaca-se que algumas das normas apresentam coeficientes de pressões locais para parte das zonas setorizadas estabelecidas no procedimento normativo. Demais regiões especificam coeficientes de pressões de forma. Por esta razão, zonas sem valor de coeficientes de pressão local adota-se o maior valor do coeficiente de forma. Um exemplo disso, é a norma brasileira que dispõe de coeficiente de pressão local somente para arestas de paredes, bordas de telhado e cumeeira. Demais áreas aplicam-se os seus maiores valores positivos e negativos de coeficientes de forma para as direções de vento agindo a 0° e 90° para paredes e coberturas em duas águas.

5.1.2 Pressões dinâmicas

Nas tabelas 23 e 24 encontram-se os resultados dos parâmetros considerados na determinação das pressões dinâmicas de cada padrão normativo.

Os procedimentos técnicos das normas estudadas possuem critérios específicos para determinação das pressões dinâmicas do vento. Como consequência disso, foram estabelecidas premissas na metodologia desta pesquisa descritas no item 5.1.1 onde fatores que influenciam na pressão dinâmica relativos à topografia, classificação em razão do uso da construção, dentre outros foram considerados com valor igual a 1,0, pressão interna com valor igual a zero, bem como outros fatores elencados nas tabelas 23 e 24. O propósito desta definição foi não ocasionar interferência no resultado final das pressões, uma vez que o objetivo da pesquisa é avaliar as pressões externas locais, permitindo assim, a comparação dos resultados entre coeficientes e pressões externas locais. Destaca-se que resultados de cada um dos fatores mostrados nas tabelas 23 e 24, seguem respectivamente a sequência descrita em cada fator.

Tabela 23 – Parâmetros para determinação das pressões: NBR 6123:1988, NBCC:2015 e ASCE:2016

NBR 6123:1988		NBCC:2015		ASCE/SEI 7-16:2016	
Velocidade básica do vento V_0 , categoria II, $t = 3s$	45 m/s	Velocidade básica do vento V_0 , categoria II e $t = 3s$ (NBR 6123)	45 m/s	Velocidade básica do vento V_0 , categoria II, 3s (NBR 6123)	45m/s
Altura da medição da velocidade máxima	10m	Altura da medição da velocidade máxima	10m	Altura da medição da velocidade máxima	10m
Fator topográfico S_1	1,0	Fator topográfico S_1 (NBR 6123)	1,0	Fator topográfico S_1 (NBR 6123)	1,0
Altura z	10,70 m	Altura z (NBR 6123)	10,70 m	Altura z (NBR 6123)	10,25 m
Fator rugosidade S_2 Classe A, categoria III e IV para $t = 3s$ e $t = 3600s$	0,91 e 0,505	Fator rugosidade S_2 Classe A, categoria II (NBR 6123) para $t = 3s$ e $t = 3600s$	1,00 e 0,66	Fator rugosidade S_2 Classe A, categoria II (NBR 6123) para $t = 3s$ e $t = 3600s$	1,0 e 0,65
Fator estatístico S_3	1,0	Fator estatístico S_3 (NBR 6123)	1,0	Fator estatístico S_3	0,94
Velocidade característica V_{k3s} e V_{k3600s}	40,95 e 22,73 (m/s)	Velocidade característica V_{k3s} e V_{k3600s} (NBR 6123)	45 e 29,70 (m/s)	Velocidade característica V_{k3s} e V_{k3600s} (NBR 6123)	42,30 e 27,50 (m/s)
Pressão dinâmica \hat{q}_{3s} e \bar{q}_{3600s}	1,03 e 0,317 (kN/m ²)	Pressão dinâmica \hat{q}_{3s} e \bar{q}_{3600s}	1,309 e 0,57 (kN/m ²)	Fator de exposição - rugosidade do terreno Categoria C: k_h ou k_z	1,0
		Fator de exposição de rugosidade (corresponde a categoria III e IV da NBR 6123): C_e	0,86	Fator topográfico: k_{zt}	1,0
		Fator de importância da carga de vento “normal” devido ao uso e ocupação da construção para ELU: I_w	1,0	Fator de direcionalidade: k_d	1,0
		Pressão resultante p_{3s} e p_{3600s}	1,126 e 0,49 (kN/m ²)	Fator de elevação: k_e	1,0
				Pressão dinâmica $\hat{q}_{z3s} = \hat{q}_{h3s}$	1,10 kN/m ²
				Pressão dinâmica $\bar{q}_{z3600s} = \bar{q}_{h3600s}$	0,464 kN/m ²

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 24 – Parâmetros para determinação das pressões: EN 1191-1-4:2010 (Maior Valor, 0° e 90°) e AS/NZS 1170.2:2011

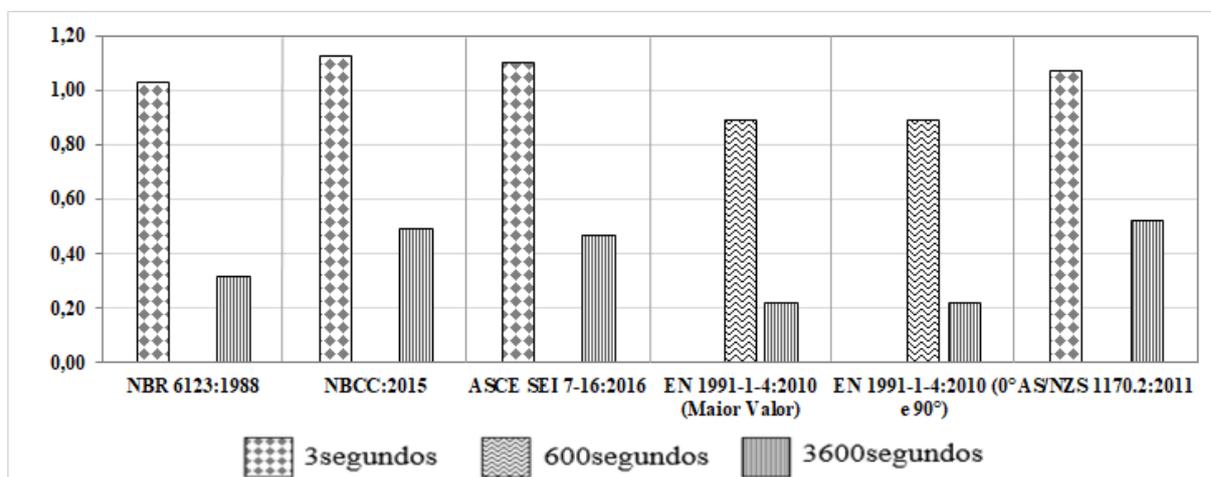
EN 1191-1-4:2010 (Maior Valor) e (0° e 90°)		AS/NZS 1170.2:2011	
Coefficiente de probabilidade C_{prob}	1,0	Multiplicador da direção do vento para todas adireções cardenais (β), e todos os casos de revestimentos e elementos de suporte, M_d	1,0
Altura da medição da velocidade máxima	10 m	Multiplicador da altura do terreno em função da rugosidade - média da categoria II e III, $M_{z,cat}$	0,94
Fator topográfico S_1	1,0	Multiplicador de obstáculos/proteções M_s	1,0
Altura z	10,70 m	Multiplicador topográfico M_t	1,0
Fator rugosidade S_2 , Classe A, categoria II para $t = 3s$, $t = 600s$ e $t = 3600$	1,0; 0,70; 0,65	Velocidade básica do vento para 3s de rajada V_0	45 m/s
Velocidade básica do vento $V_0 = V_{b0} = V_b$ categoria II $t = 3s$, $t = 600s$; $t = 3600s$	45; 31,50; 29,25 (m/s)	Velocidade regional para 3s de rajada V_R	45 m/s
Fator direcional C_{dir}	1,0	Velocidade de projeto do vento ortogonal ao edifício – velocidade máxima do vento no local da direção cardinal para 3s $V_{desl,0}$	45 m/s
Coefficiente de temporada / estação C_{season}	1,0	Velocidade do vento para oito direções cardinais na altura z (β) acima do solo $V_{sit, B 3s}$	42,30 m/s
Comprimento de rugosidade terreno categoria II Z_{oll}	0,05m	Velocidade do vento para oito direções cardinais na altura z (β) acima do solo $V_{sit, B 3600s}$	29,50 m/s
Comprimento de rugosidade terreno categoria II e IV Z_o	0,65m	Fator de resposta dinâmica – para estrutura não dinamicamente sensíveis ao vento C_{dyn}	1,0
Fator do terreno dependendo da rugosidade k_r	0,23	Fator de redução para telhados e paredes dependendo da área tributária da força considerada k_a	0,87 para $10m^2 \leq A \leq 25m^2$ 0,80 para $A \geq 100m^2$
Fator de rugosidade $C_{r(z)}$	0,64	Fator de combinação de pressão externa $k_{c,e}$	1,0
Fator orográfico terreno plano c_o	1,0	Fator de combinação de pressões internas $k_{c,i}$	1,0
Velocidade média do vento $V_{m(z)3s}$; $V_{m(z)600s}$, $V_{m(z)3600s}$	28,80; 20,16; 18,72 (m/s)	Fator de redução da porosidade do revestimento de telhado e parede - revestimento impermeável k_p	1,0
Fator de turbulência k_l	1,0	Fator de pressão local para revestimentos k_l	Zona SA1: 1,5; outras: 1,0
Desvio padrão turbulência σ_{v3s} , σ_{v600s} , σ_{v3600s}	10,35; 7,25; 0 (m/s)	Pressão dinâmica $\hat{p}_{z 3s}$	1,07 $c_{pe} c_a k_l$ (kN/m ²)
Intensidade de turbulência $I_{v(z)3s}$, $I_{v(z)600s}$, $I_{v(z)3600s}$	0,36; 0,36; 0	Pressão dinâmica $\bar{p}_{z 3600s}$	0,522 $c_{pe} c_a k_l$ (kN/m ²)
Fator de exposição (média categoria III e IV) $c_{e(z)}$	1,45		
Pressão dinâmica básica q_{b3s} ; q_{b600s} ; q_{b3600s}	1,27; 0,62; 0,535 kN/m ²		
Fator estrutural c_s, c_d	1,0		
Pressão dinâmica de pico q_{p3s} ; q_{p600s} ; q_{p3600s}	1,84; 0,89; 0,22 (kN/m ²)		

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Através dos resultados das tabelas 23 e 24, elaborou-se a figura 64 onde é mostrado um resumo das pressões dinâmicas em função das velocidades médias máximas por norma.

Figura 64 – Pressões dinâmicas (kN/m^2) sobre velocidades médias máximas



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Pelos resultados da tabela 23 e 24 verifica-se que os padrões normativos utilizam diferentes critérios e considerações quando avaliado um mesmo fator como por exemplo a rugosidade. Entretanto, cada método visa determinar a pressão dinâmica do vento, por isso os parâmetros envolvidos são importantes, sendo um destes além da rugosidade, o tempo de medição das velocidades do vento consideradas.

Sabe-se que as normas NBR 6123:1988, ASCE/SEI 7-16:2016 e AS/NZS 1170.2:2011 prescrevem velocidades de pico sobre 3 segundos e verifica-se pela figura 60 resultados de pressões dinâmicas muito próximos, todos em torno de $1,0\text{kN/m}^2$. E ao se comparar esses resultados com a NBCC:2015 quando determinado sua pressão dinâmica para 3 segundos, mesmo que seu método especifique pressão dinâmica sobre 3600 segundos, também são exibidos resultados semelhantes a $1,0\text{kN/m}^2$.

Dentre as normas estudadas, a única normativa que em seu procedimento de determinação da pressão dinâmica leva em conta uma velocidade média sobre 3600 segundos (1 hora) é a NBCC:2015 obtendo resultado de $0,5\text{kN/m}^2$. Pressões dinâmicas calculadas com velocidades médias máximas de 600 segundos somente são adotadas pela EN 1991-1-4:2010 (Maior valor; 0° e 90°).

Por outro lado, um fator que também tem influência são as velocidades básicas consideradas para probabilidades de 63% de ser igualada ou excedida uma vez a cada 50 anos, exceto a norma da ASCE/SEI 7-16:2016 que adota um percentual de 78%. Todavia, mesmo assim, a pressão dinâmica da ASCE/SEI 7-16:2016 calculada para um tempo de medição de velocidade de 3 segundos se manteve com resultados próximos da NBCC:2015, AS/NZS 1170.2:2011, com diferenças máximas 4%, com a NBR:6123:1988 e EN 1191-1-4:2010, diferenças máximas de 6,5% e 13,4% respectivamente.

5.1.3 Coeficientes de pressão local

Por meio de relações geométricas do pavilhão de estudo como, comprimento pela largura, altura pela largura e ângulo de inclinação do telhado, nas figuras 65 a 70 são apontados os coeficientes de pressão externa locais dispostos por região nas superfícies de paredes e cobertura definidos através das normas. Os coeficientes de pressão são distinguidos pelo seu sinal, sendo positivo para sobrepressões e negativo para sucções. Superfícies de zonas sem pressão positiva, são representadas pelo valor “zero”. Indicam-se também as dimensões das larguras das regiões de atuação de cada coeficiente, em metros.

Para a norma brasileira ABNT NBR 6123:1988, por considerar valores de coeficientes de pressão médios e coeficientes de forma para intervalos de proporções do comprimento pela largura para paredes e intervalos entre ângulos de inclinação do telhado para a cobertura, foram realizadas interpolações. Zonas de paredes e telhado que a ABNT NBR 6123:1988 especifica coeficientes de pressão médios, como por exemplo bordas de parede e do telhado e cumeeiras, as interpolações foram feitas entre estes. No entanto, zonas que a norma não dispõe de coeficiente de pressão médio, foram feitas interpolações entre os maiores valores de coeficiente de forma da referida zona.

Na norma EN 1991-1-4:2010 são indicados coeficientes de pressão externa para revestimentos, fixadores e pequenos elementos estruturais, como por exemplo estruturas secundárias. Mas, especifica também, coeficientes de pressão para estruturas principais. Para diferenciar estes coeficientes, os resultados são denominados como:

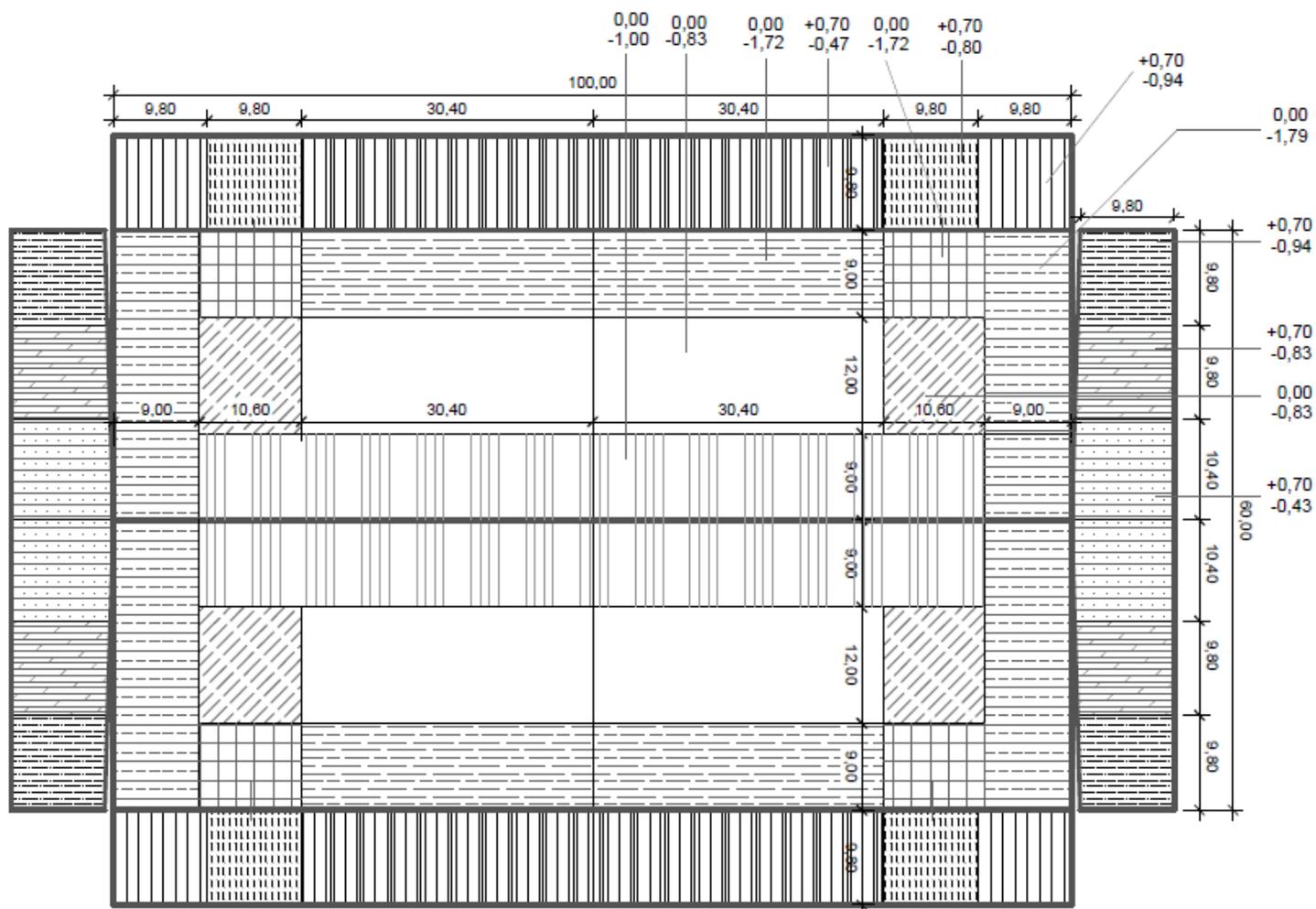
- Coeficientes de pressão externos locais (Maior Valor): para revestimentos, fixadores e estruturas secundárias;

- Coeficientes de pressão externos locais (0° e 90°): para estruturas principais.

As demais normas, NBCC:2015, ASCE/SEI 7-16:2016 e AS/NZS 1170.2:2011, especificam coeficientes de pressão externa locais para revestimentos, fixadores e estruturas secundárias.

Como descrito acima, em algumas zonas para a ABNT NBR 6123:1988 foram mostrados coeficientes de forma e para a EN 1991-1-4:2010 (0° e 90°) são coeficientes de pressão para estruturas principais. Porém, pelo fato de as normas não apresentarem outros coeficientes de pressão para estes casos, estes são os considerados atualmente para projeto da ação do vento, quando não se dispõe de ensaios específicos em túnel de vento. Desta forma, todas as representações de coeficientes de pressão determinados pelos critérios normativos mostrados nas figuras 65 a 70 são chamados de “coeficientes de pressão externa local”.

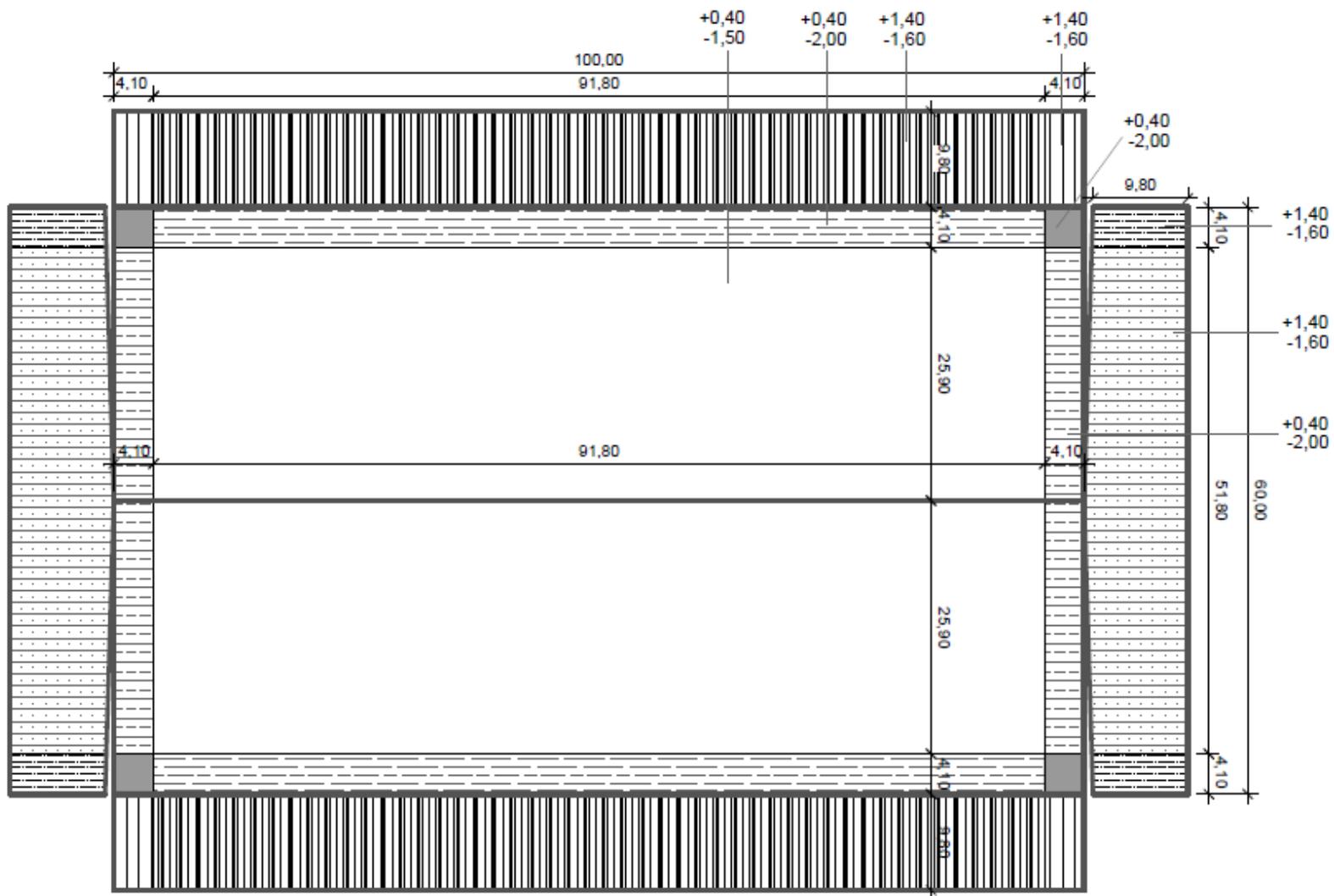
Figura 65 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepessão e Sucção] nas paredes e telhado - NBR 6123:1988. Dimensões em metros



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

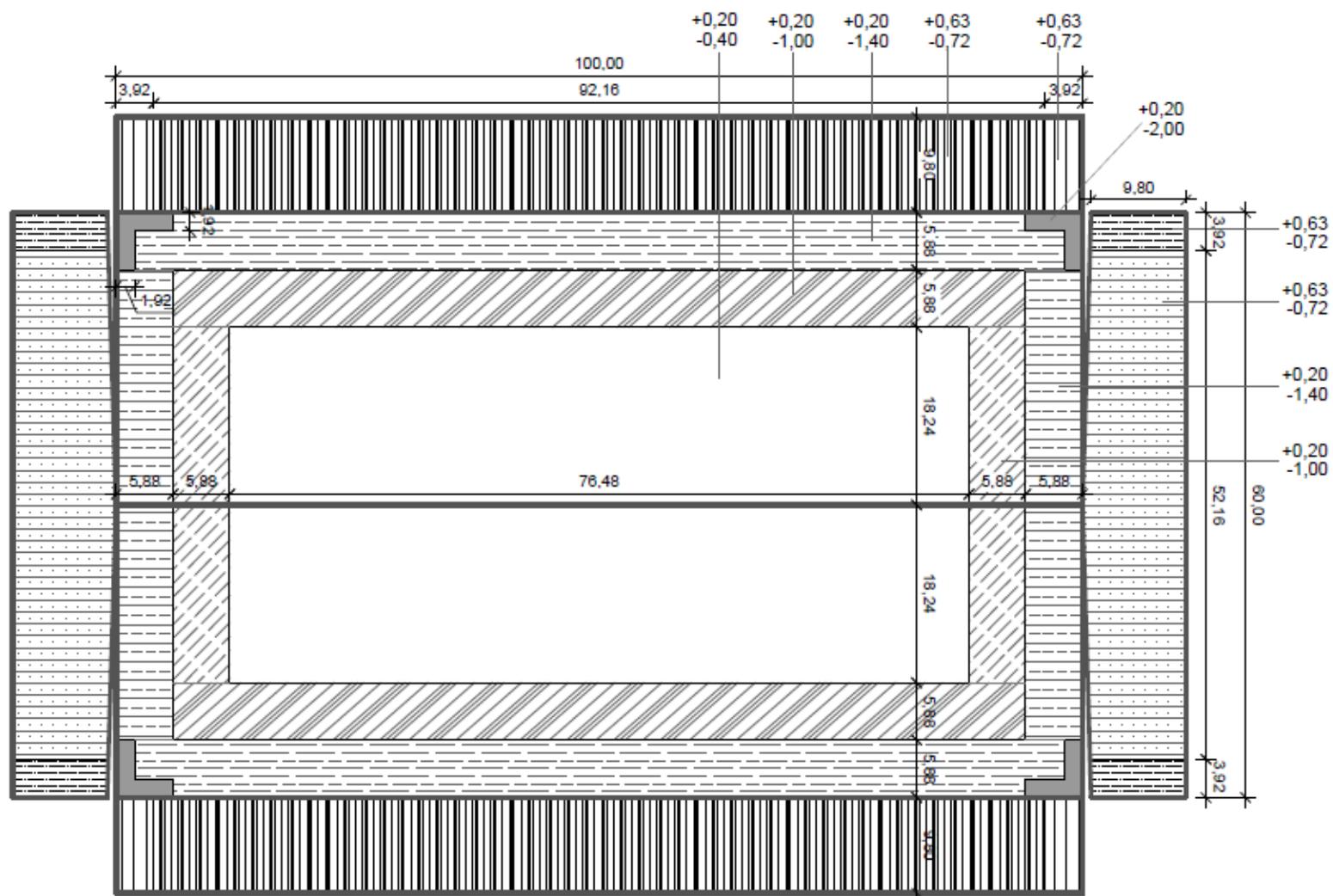
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 66– Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepessão e Sucção] nas paredes e telhado - NBCC:2015. Dimensões em metros



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

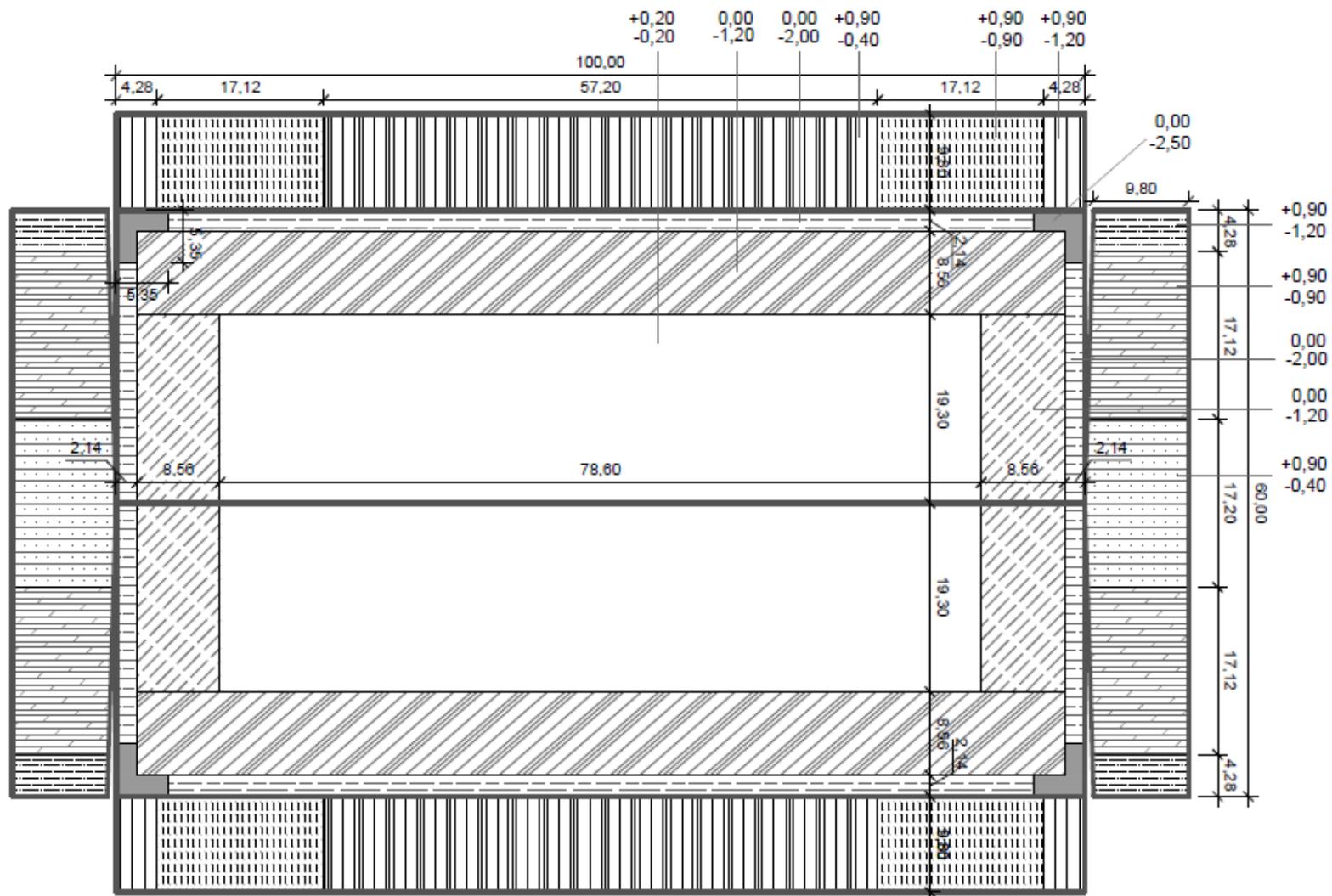
Figura 67 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepressão e Sucção] nas paredes e telhado – ASCE/SEI 7-16:2016. Dimensões em metros



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

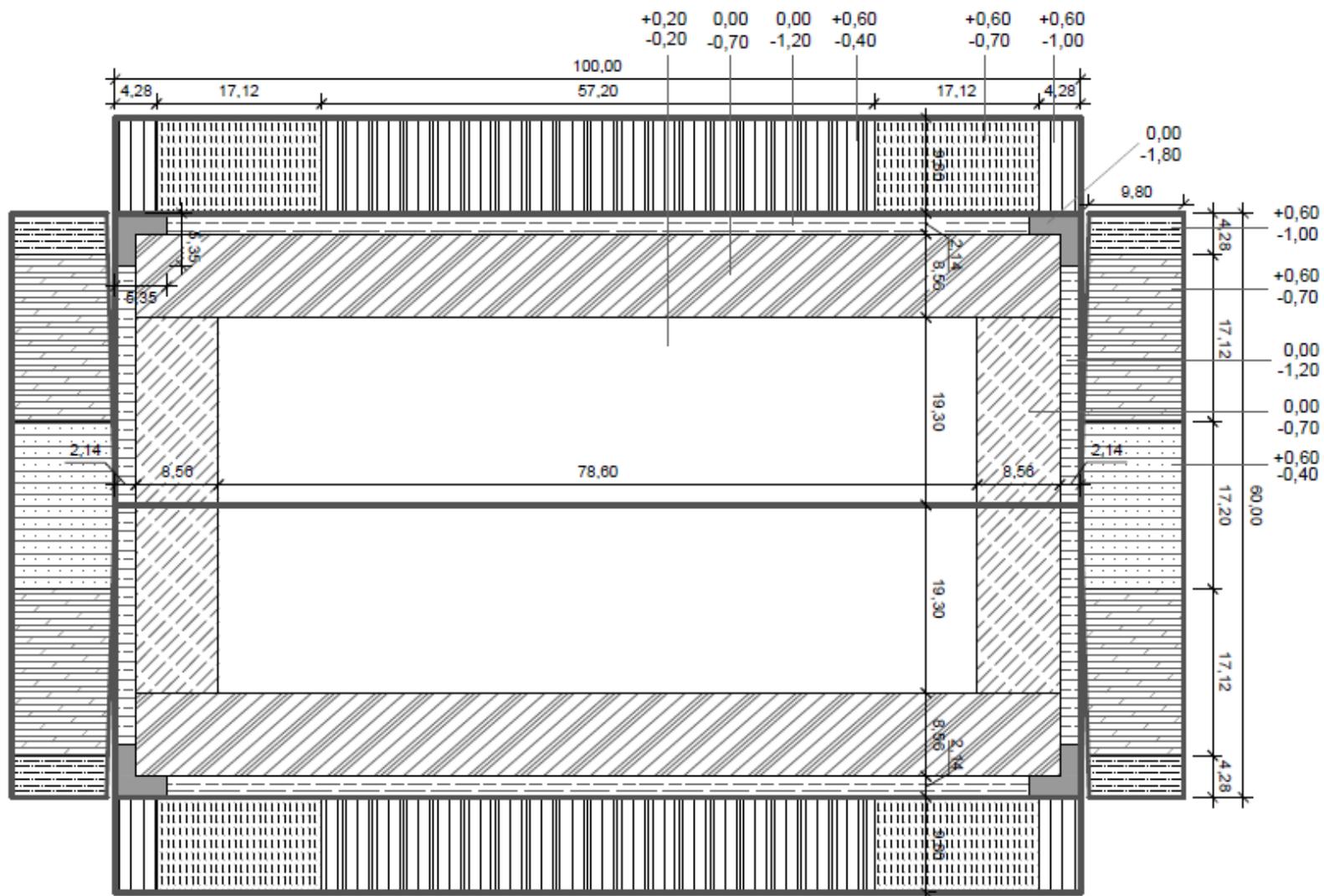
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 68 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepressão e Sucção] nas paredes e telhado - EN 1991-1-4:2010 (Maior Valor). Dimensões em metros



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

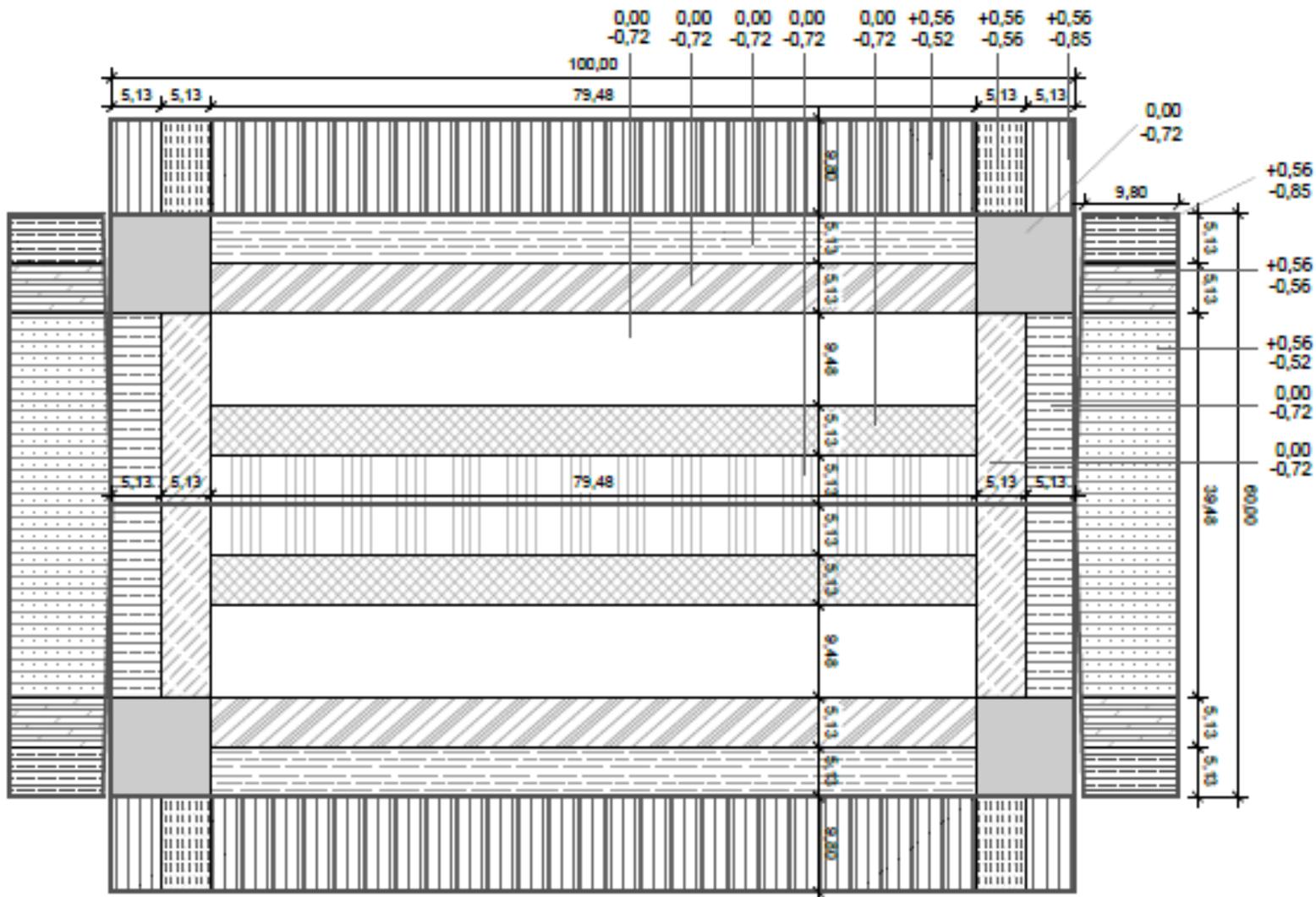
Figura 69 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepressão e Sucção] nas paredes e telhado - EN 1991-1-4:2010 (0° e 90°). Dimensões em metros



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 70 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepressão e Sucção] nas paredes e telhado - AS/NZS 1170.2:2011. Dimensões em metros



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Os resultados dos coeficientes de pressão externa locais demonstrados sobre suas respectivas zonas nas figuras 65 a 70 são resumidos na tabela 25 e 26 para sobrepressões e nas tabelas 27 e 28 para sucções em paredes e telhado respectivamente. Nestas tabelas, zonas não consideradas na setorização de cada procedimento normativo não apresentam valores de pressões externas locais.

Tabela 25 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepressão] das paredes

Norma	Parede de oitão:	Parede laterais:
	60m	100m
NBR 6123:1988	+0,70	+0,70
NBCC:2015	+1,40	+1,40
ASCE/SEI 7-16:2016	+0,63	+0,63
EN 1191-1-4:2010 (Maior Valor)	+0,90	+0,90
EN 1191-1-4:2010 (0° e 90°)	+0,60	+0,60
AS/NZS 1170.2:2011	+0,56	+0,56

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 26 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepressão] do telhado

Norma	Borda de oitão		Bordas laterais		Cumeeira		Canto	Demais áreas
								
NBR 6123:1988	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NBCC:2015	+0,40	0,00	+0,40	0,00	0,00	0,00	+0,40	+0,40
ASCE/SEI 7-16:2016	+0,20	+0,20	+0,20	+0,20	0,00	0,00	+0,20	+0,20
EN 1191-1-4:2010 (Maior Valor)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	+0,20
EN 1191-1-4:2010 (0° e 90°)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	+0,20
AS/NZS 1170.2:2011	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 27 – Coeficientes de pressão externa locais [Sucção] das paredes

Norma	Borda de oitão		Oitões centrais	Bordas laterais		Laterais centrais
						
NBR 6123:1988	-0,94	-0,83	-0,43	-0,94	-0,80	-0,47
NBCC:2015	-1,60	0,00	-1,60	-1,60	0,00	-1,60
ASCE/SEI 7-16:2016	-0,72	0,00	-0,72	-0,72	0,00	-0,72
EN 1191-1-4:2010 (Maior Valor)	-1,20	-0,90	-0,40	-1,20	-0,90	-0,40
EN 1191-1-4:2010 (0° e 90°)	-1,00	-0,70	-0,40	-1,00	-0,70	-0,40
AS/NZS 1170.2:2011	-0,85	-0,56	-0,52	-0,85	-0,56	-0,52

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 28 – Coeficientes de pressão externa locais [Sucção] do telhado

Norma	Borda de oitão		Bordas laterais		Cumecira		Canto	Demais áreas
								
NBR 6123:1988	-1,79	-0,83	-1,72	0,00	-1,00	0,00	0,00	-0,83
NBCC:2015	-2,00	0,00	-2,00	0,00	0,00	0,00	-2,00	-1,50
ASCE/SEI 7-16:2016	-1,40	-1,00	-1,40	-1,00	0,00	0,00	-2,00	-0,40
EN 1191-1-4:2010 (Maior Valor)	-2,00	-1,20	-2,00	-1,20	0,00	0,00	-2,50	-0,20
EN 1191-1-4:2010 (0° e 90°)	-1,20	-0,70	-1,20	-0,70	0,00	0,00	-1,80	-0,20
AS/NZS 1170.2:2011	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

5.1.2.1 Análise dos resultados para o exemplo de estudo da tabela 20

Pelos resultados das figuras 65 a 70 e tabelas 25 a 28 verifica-se que existem diferenças entre os coeficientes de pressões locais sendo menores entre as sobrepessões e maiores entre as sucções.

Os procedimentos normativos admitem para a cobertura valores de coeficientes de sobrepressões locais baixos não ultrapassando o intervalo de 0,20 a 0,40. Todavia, para o telhado, somente as normas ASCE/SEI 7-16:2016 e NBCC:2015 compreendem coeficientes positivos em todas as zonas de telhado incluindo-se áreas do perímetro da cobertura e cumeeira. A NBR 6123:1988 e a AS/NZS 1170.2:2011 não estipulam coeficientes de pressões locais positivos para os telhados. Em contrapartida, a EN 1991-1-4 (Maior Valor) admite sobrepressões na cumeeira e nas grandes áreas centrais, exceto em bordas, regiões essas de altas sucções.

Analisando os coeficientes de sobrepressões das paredes, se referem as pressões de incidência do vento à barlavento e apresentam valores sem muita disparidade entre as normas com exceção da NBCC:2015 que institui valores muito maiores em relação as demais normas.

Em relação aos coeficientes de sucções das paredes, mais uma vez, pela NBCC:2015 denotam-se valores muito maiores com relação as demais normas sem diferenciar valor para região de borda com áreas mais centrais das paredes. A ASCE/SEI 7-16:2016 também indica mesmos valores de sobrepressão independente da zona, mas com valor mais próximo da NBR 6123:1988, AS/NZS 1170.2:2011 e EN 1991-1-4 (Maior Valor, 0° e 90°). Por outro lado, com exceção da NBCC:2015 e ASCE/SEI 7-16:2016, todas as normas admitem coeficientes de sucção maiores nas bordas de extremidade e menores nas regiões centrais das fachadas, com reduções elevadas em relação a borda de extremidade.

Diferenças maiores são identificadas nos coeficientes de pressão de sucção do telhado, sendo as de maiores valores, a NBCC:2015 e a EN 1991-1-4 (Maior Valor), com valores muito próximas da NBR 6123:1988 nas regiões de borda. As variações estão em um intervalo de -0,20 a -2,0 dentro de uma mesma norma, porém em posições de zonas diferentes.

Contudo, os cantos, bordas de contorno do telhado e região de cumeeira são apontadas como as regiões de coeficientes de pressão negativa mais crítica quando comparadas as grandes áreas centrais do telhado. Importante destacar que a AS/NZS 1170.2:2011 demonstra valores de sucção constantes em todo o telhado e com valores mais baixos dentre todos os demais padrões técnicos avaliados.

Observado que as normas NBCC:2015 e a EN 1991-1-4 (Maior Valor), são as que apresentam os maiores coeficientes de pressão negativa tanto para paredes como para o telhado, destacando

que são procedimentos normativos que levam em conta uma pressão dinâmica calculada com uma velocidade média sobre 3600 s (1 hora) e 600s (10 minutos), o que pode reduzir muito o valor da pressão final do vento e os resultados destas normas apresentar pressões com valores próximos das demais.

De modo geral, os coeficientes de sucção do telhado tanto em paredes quanto na cobertura, vão reduzindo de forma gradual em acordo com a extensão do comprimento da parede e ou do telhado. Tanto nas fachadas laterais como de oitão, predominam coeficientes negativos maiores dos positivos. Desta forma, reforça a pesquisa de Jing e Li (2013) que descrevem a necessidade de cuidados com coeficientes de pressão locais negativos por afetarem os revestimentos e provocarem o arrancamento nos demais componentes da construção.

Denota-se aqui o estudo de vários autores mencionados nesta pesquisa como por exemplo Suaris e Irwin (2010), Geurts, Kopp e Morrison (2013), Blessmann (2009), dentre outros, onde os vórtices se iniciam nas proximidades da quina mais de barlavento, desenvolvendo-se de forma cônica ao longo das duas arestas do telhado. Nestas zonas segundo Blessmann (2009) são regiões onde se inicia o processo de arrancamento à sucção.

Com relação a redução das pressões ao longo das paredes obtidas nos resultados, reforça os estudos de Blessmann (2009) em relação a pavilhões de grandes comprimentos onde o bulbo de altas sucções segue uma baixa rápida das sucções para valores pequenos, próximos a zero, podendo inclusive aparecer pequenas sobrepressões, como explicitado pelas normas NBCC:2015, ASCE/SEI 7-16:2016 e para algumas regiões da EN 1191-1-4 (Maior valor; 0° e 90°).

Fazendo-se uma verificação geral são identificados coeficientes de pressões locais muito discrepantes dentro de uma mesma zona entre as normas em estudo tanto em paredes como no telhado estando as maiores distorções em coeficientes negativos. Mas, como cada código normativo possui seu critério de determinação da máxima velocidade sobre rajadas de 3s, 600s ou 3600s, esta velocidade por ser um parâmetro usado no cálculo da pressão dinâmica tem forte influência nos resultados finais das pressões. Sendo assim, as discrepâncias necessitam ser avaliadas considerando as pressões dinâmicas determinadas com as máximas velocidades estipuladas em cada padrão técnico.

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO TÚNEL DE VENTO

A seguir apresenta-se o detalhamento das fases de processamento dos resultados obtidos por meio de ensaios no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann com modelos reduzidos do pavilhão industrial estudado. É importante ser mencionado que os coeficientes ou que as pressões medidas nos ensaios não foram corrigidas por efeitos secundários (bloqueio) das paredes do túnel de vento. Maior detalhamento a respeito de bloqueio pode ser encontrado em Pope (1984).

5.2.1 Processamento dos dados de ensaio

O procedimento de processamento dos dados de ensaio mostrado a seguir está fundamentado nas condições de semelhança e do número de Reynolds descrito de forma detalhada por Blessmann (2009) e Blessmann (2011) de modo a proporcionar similaridade das características do modelo real atribuídas ao modelo reduzido.

Com a pressão dinâmica de referência experimental (q_{ref}), recorre-se a uma correlação estabelecida entre a magnitude da pressão dinâmica no ponto de altura z ($q(z)$) e o valor da pressão diferencial entre os anéis piezométricos (Δp_a). Da correlação citada surge o parâmetro $k(z)$ dado pela equação 53:

$$k_{(z\ ref)} = \frac{q_{(z\ ref)}}{\Delta p_a} \quad \text{Equação 53}$$

A partir da definição da pressão dinâmica é calculado a velocidade média do vento no ponto de referência experimental, usando-se as equações 54 e 55:

$$q_{ref} = k_{(z\ ref)} \Delta p_a \quad \text{Equação 54}$$

$$V_{ref} = \sqrt{2 \frac{q_{ref}}{\rho_{ar}}} \quad \text{Equação 55}$$

Onde:

$q_{(z\ ref)}$ = pressão dinâmica de referência experimental (N/m^2);

$k_{(z_{ref})}$ = parâmetro obtido da correlação para a cota em escala correspondente a altura em metros do modelo reduzido, z_{ref} (adimensional);

Δp_a = pressão diferencial registrada entre os anéis piezométricos durante os ensaios (N/m^2);

ρ = massa específica do ar definida pela equação 56;

ρ_0 = massa específica do ar em condições normais de pressão (p_0) e temperatura (T_0) = 1,2249 kg/m^3 ;

$T_0 = 15^\circ C = 288,2K$;

$p_0 = 760mmHg = 1013,25 \text{ mm.c.c} = 101325 \text{ Pa}$;

p_{atm} = pressão atmosférica no momento do ensaio (mm Hg);

T_e = temperatura na câmara no momento do ensaio (K): $T_e = 273,2 + t$ ($^\circ C$).

$$\rho_{ar} = \rho_0 \frac{T_0 p_{atm}}{T_e p_0} \quad \text{Equação 56}$$

Logo, têm-se a equação 57:

$$\rho_{ar} = 0,4645 \frac{p_t}{273,2 + t} \quad \text{Equação 57}$$

Resultando a equação 58:

$$V_{ref} = \sqrt{\frac{2k_{ref}\Delta p_a}{0,4645 \frac{p_{atm}}{273,2 + t}}} \quad \text{Equação 58}$$

Para o cálculo de ν é utilizado a equação 59:

$$\nu = (13 + 0,1 T_e)10^{-6} \quad \text{Equação 59}$$

Onde:

ν = viscosidade cinemática do ar na temperatura média do ensaio (m^2/s).

p_t = pressão total no ponto de verificação (ponto de ensaio).

Para cada ângulo dos conjuntos de resultados de pressões médias, pressões de pico máximo e pico mínimo e pressões RMS (*root mean square*) obtidas via túnel de vento, são apresentados resultados de diferença de pressões entre os anéis piezométricos do túnel para cada ângulo ensaiado. Estes valores devem ser comparados com a mesma diferença de pressão obtida Δp_a no convergente do túnel coletados via transdutores de pressão de vento, considerando variação máxima de 0,5. Em caso de não atendimento, adotar os valores determinados diretamente via sistema eletrônico do transdutor de pressão. As pressões obtidas no túnel de vento são medidas em em voltz nos transdutores e depois transformadas em milímetros de coluna de água (mm.c.a).

Tendo-se as diferenças de pressões instalada do túnel em milímetros de coluna de água (mm.c.a) da forma científica transformando-a para a forma ordinal, calcula-se o k_z , parâmetro adimensional obtido da correlação para a cota em escala correspondente a altura em metros do modelo reduzido, z_{ref} considerando perfil de velocidade média de lei potencial com expoente $p = 0,23$. A altura do modelo reduzido e o valor do coeficiente k_z para cada escala geométrica é exposta na tabela 29.

Tabela 29 – Altura do modelo reduzido por escala geométrica para expoente $p = 0,23$

Dimensões	Escala geométrica real (m)	Escala geométrica reduzida (m)		
Escala		1:400	1:200	1:100
Altura total – nível da cumeeira (z)	10,70	0,027	0,054	0,107
Coefficiente k_z		0,324	0,418	0,579

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Com o resultado do fator k_z e a diferença de pressão Δp_a , calcula-se a pressão dinâmica e a velocidade do vento de referência, ambas na altura z ($q_{z\ ref}$) utilizando-se as expressões mostradas neste capítulo.

Todas as pressões oriundas dos ensaios em túnel de vento, sejam médias, pico máximo, pico mínimo e médias + 3,5 RMS (*root mean square*) necessitam serem transformadas em coeficiente adimensional pela equação 60:

$$c_{pe} = \frac{\Delta p_e}{q_{(z\ ref)}} = \frac{p - p_{ref}}{1/2 \rho_{ar} V_{ref}^2} \quad \text{Equação 60}$$

Onde:

Δp_e = pressão estática efetiva externa local no ponto em estudo no instante t, dada pela diferença entre a pressão estática medida no ponto em estudo (p) e a pressão estática de referência experimental (p_{ref});

$q_{(z\ ref)}$ = pressão dinâmica de referência experimental definida anteriormente, medida indiretamente pela diferença de pressão entre os anéis piezométricos (Δp_a).

Desta forma, são definidos os coeficientes de pressões locais adimensionais utilizando a equação 61:

$$c_{pe} = \frac{\Delta p_e}{k_{(z\ ref)} \Delta p_a} \quad \text{Equação 61}$$

Como as pressões externas Δp_e obtidas apartir de registros de séries temporais podem ser calculadas as médias, valor RMS (*root mean square*), pico máximo e pico mínimo. A partir da equação 61, derivam-se nas equações 62 a 65 mostradas a seguir para determinação dos coeficientes de pressões externas médios, (médios +3,5 RMS), pico máximo e pico mínimo, sendo:

$$\bar{c} = \frac{\overline{\Delta p_e}}{k_{(z\ ref)} \Delta p_a} \quad \text{Equação 62}$$

$$\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS} = \frac{\overline{\Delta p_e} + 3,5\widehat{\Delta p_e}_{(RMS)}}{k_{(z\ ref)} \Delta p_a} \quad \text{Equação 63}$$

$$\hat{c} = \frac{\widehat{\Delta p_e}}{k_{(z\ ref)} \Delta p_a} \quad \text{Equação 64}$$

$$\check{c} = \frac{\widetilde{\Delta p_e}}{k_{(z_{ref})} \Delta p_a} \quad \text{Equação 65}$$

Onde:

$\overline{\Delta p_e}$, $3,5 \widehat{\Delta p_e}_{(RMS)}$, $\widehat{\Delta p_e}$, $\widetilde{\Delta p_e}$ = pressão estática efetiva externa local (média, média +3,5RMS, pico máximo e pico mínimo) no ponto em estudo no instante t, dada pela diferença entre a pressão estática medida no ponto em estudo (p) e a pressão estática de referência experimental (p_{ref}).

\bar{c} , $\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS}$, \hat{c} , \check{c} = coeficiente de pressão local médio, médio + 3,5 RMS, pico máximo e pico mínimo, respectivamente;

$q_{(z_{ref})}$ = pressão dinâmica de referência definida anteriormente.

Na equação 54 evidencia-se que o coeficiente de pressão RMS foi multiplicado por “3,5” e somado ao coeficiente médio o qual, Blessmann (2005) através do conceito recomendado por Davenport, leva em consideração que o valor de pico de rajada em uma hora provavelmente situa-se na faixa de 3,5 a 4,5 vezes o desvio padrão acima da média. Desta forma podem ser considerados valores extremos das pressões médias.

Para interpretação dos resultados provenientes de ensaios de túnel de vento, segue-se a convenção de sinais para coeficientes de pressão externa, conforme a ABNT NBR 6123:1988, onde coeficientes de sobrepessão tem sinal positivo e coeficientes de sucção, tem sinal negativo.

5.2.2 Linhas isobáricas de coeficientes de pressões externas locais

Os ensaios em túnel de vento foram realizados para o vento agindo sobre o pavilhão industrial a cada 15°, totalizando 24 ângulos com instrumentação em um quadrante de cada modelo reduzido nas escalas geométricas 1:400, 1:200 e 1:100.

Para ilustrar a distribuição dos coeficientes de pressão atuantes sobre as superfícies dos quatro quadrantes dos modelos ensaiados, são mostrados os coeficientes obtidos em todas as tomadas de pressões por grupo de ângulos correspondentes sendo: (0° = 180°), (15° = 165°, 195° e 345°), (30° = 150°, 210° e 330°), (45° = 135°, 225° e 315°), (60° = 120°, 240° e 300°), (75° = 105°, 255° e 285°) e (90° = 270°) para as três escalas geométricas ensaiadas. Para cada ângulo de incidência e cada tomada de pressão têm-se um conjunto de coeficientes de pressões (médios,

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

médios + 3,5 RMS - *root mean square*, pico máximo e pico mínimo), considerando o perfil de velocidades médias de expoente $p = 0,23$.

De modo a possibilitar melhor compreensão do efeito do vento sobre as faces das paredes e faces do telhado para os diferentes ângulos ensaiados dos pavilhões, os coeficientes de pressão são expressados através de linhas isóbaras sendo estas dispostas em duas formas mostradas a seguir, onde valores positivos e negativos correspondem a coeficientes de sobrepressão e sucção respectivamente.

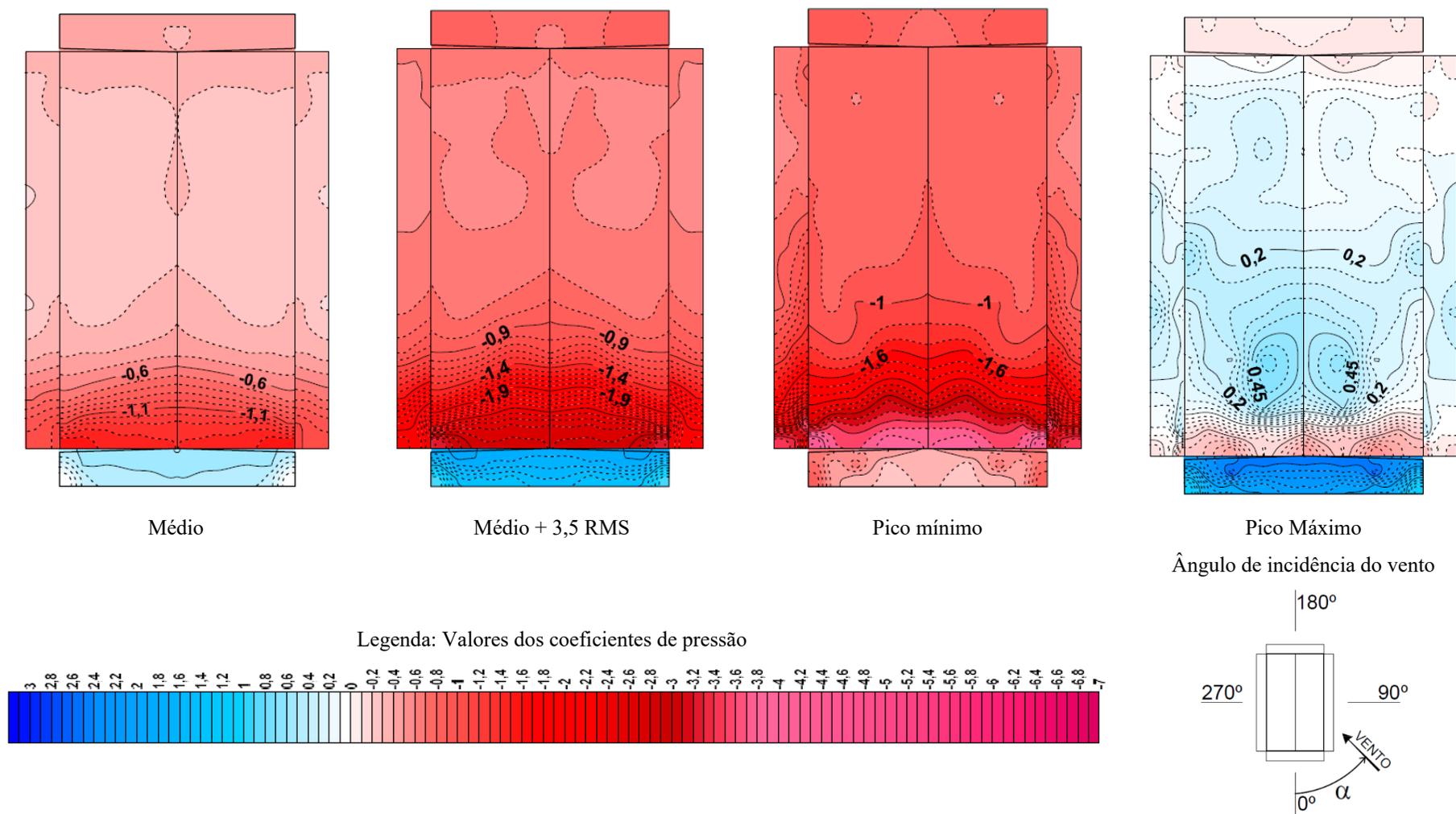
5.2.2.1 Grupo A: Conjunto de coeficientes de pressão externa locais para mesma escala geométrica

No grupo A são contemplados os coeficientes de pressão (médios, médio + 3,5 RMS - *roots mean square*, pico mínimo e pico máximo) por ângulo e para mesma escala geométrica: figuras 71 a 77 para escala 1:400, figuras 78 a 84 para escala 1:200 e figuras 85 a 91 para escalas 1:100.

5.2.2.2 Grupo B – Conjunto de coeficientes de pressão externa locais para diferentes escalas geométricas

No grupo B são mostrados os coeficientes de pressão médios por ângulo nas escalas geométricas 1:400, 1:200 e 1:100: figuras 92 a 98. Coeficientes de pressão (médio + 3,5 *root mean square* RMS) por ângulo nas escalas geométricas 1:400, 1:200 e 1:100: figuras 99 a 105. Coeficientes de pressão de pico mínimo por ângulo nas escalas geométricas 1:400, 1:200 e 1:100: figuras a 106 a 112. Coeficientes de pressão de pico máximo por ângulo nas escalas geométricas 1:400, 1:200 e 1:100: figuras 113 a 119.

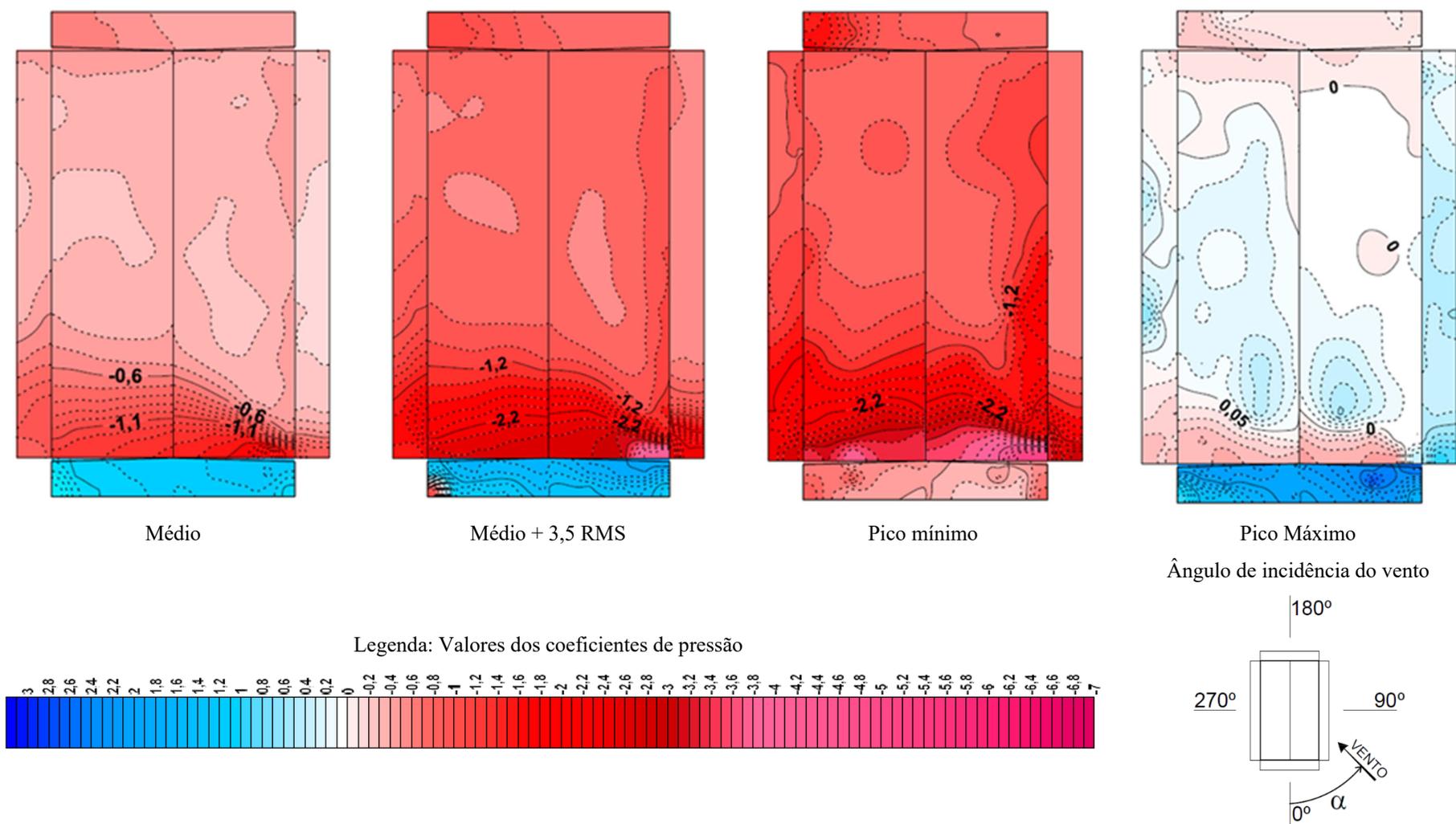
Figura 71 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 0° - Escala geométrica 1:400



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

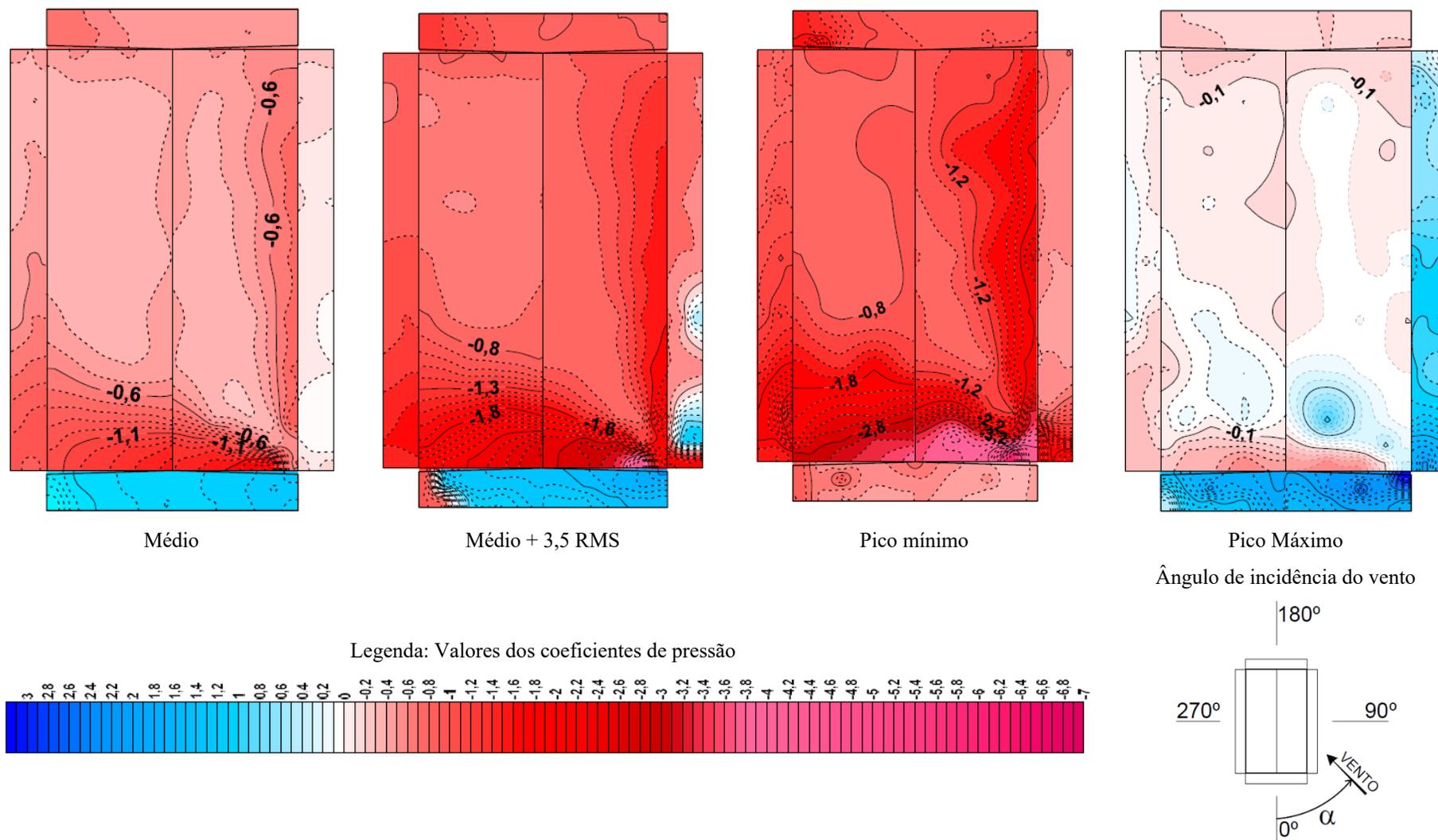
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 72 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 15° - Escala geométrica 1:400



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

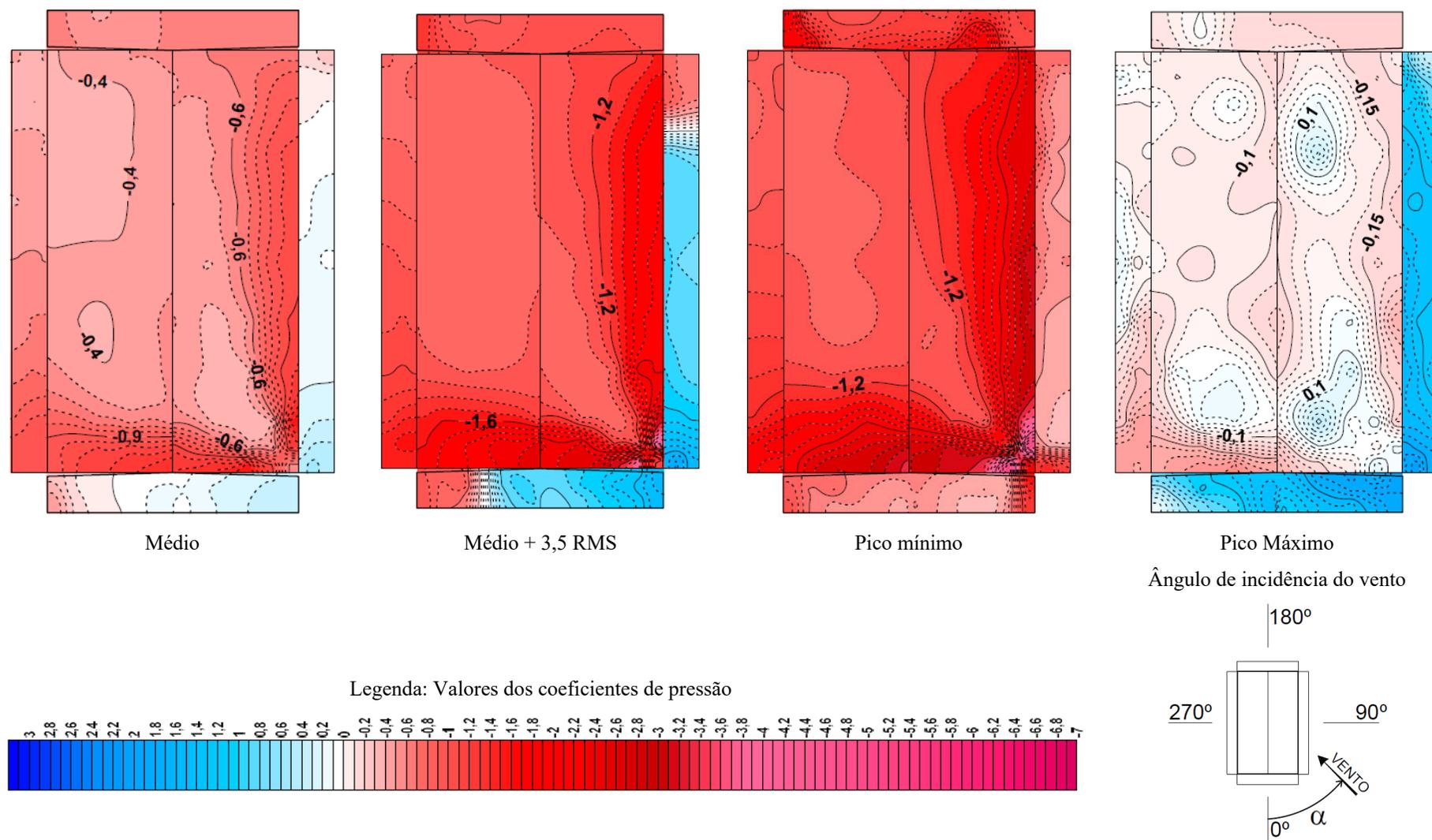
Figura 73 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 30° - Escala geométrica 1:400



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

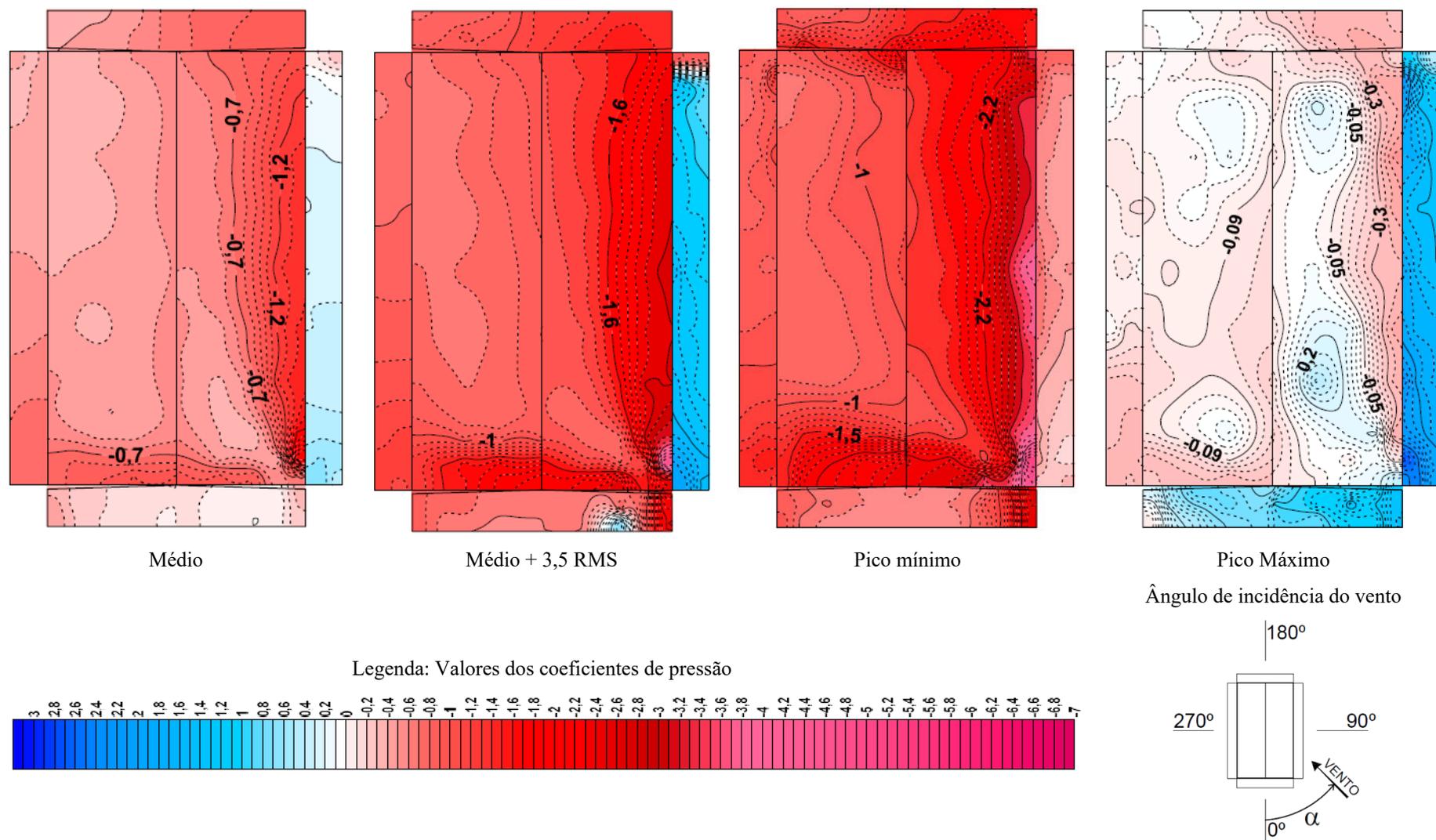
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 74 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 45° - Escala geométrica 1:400



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

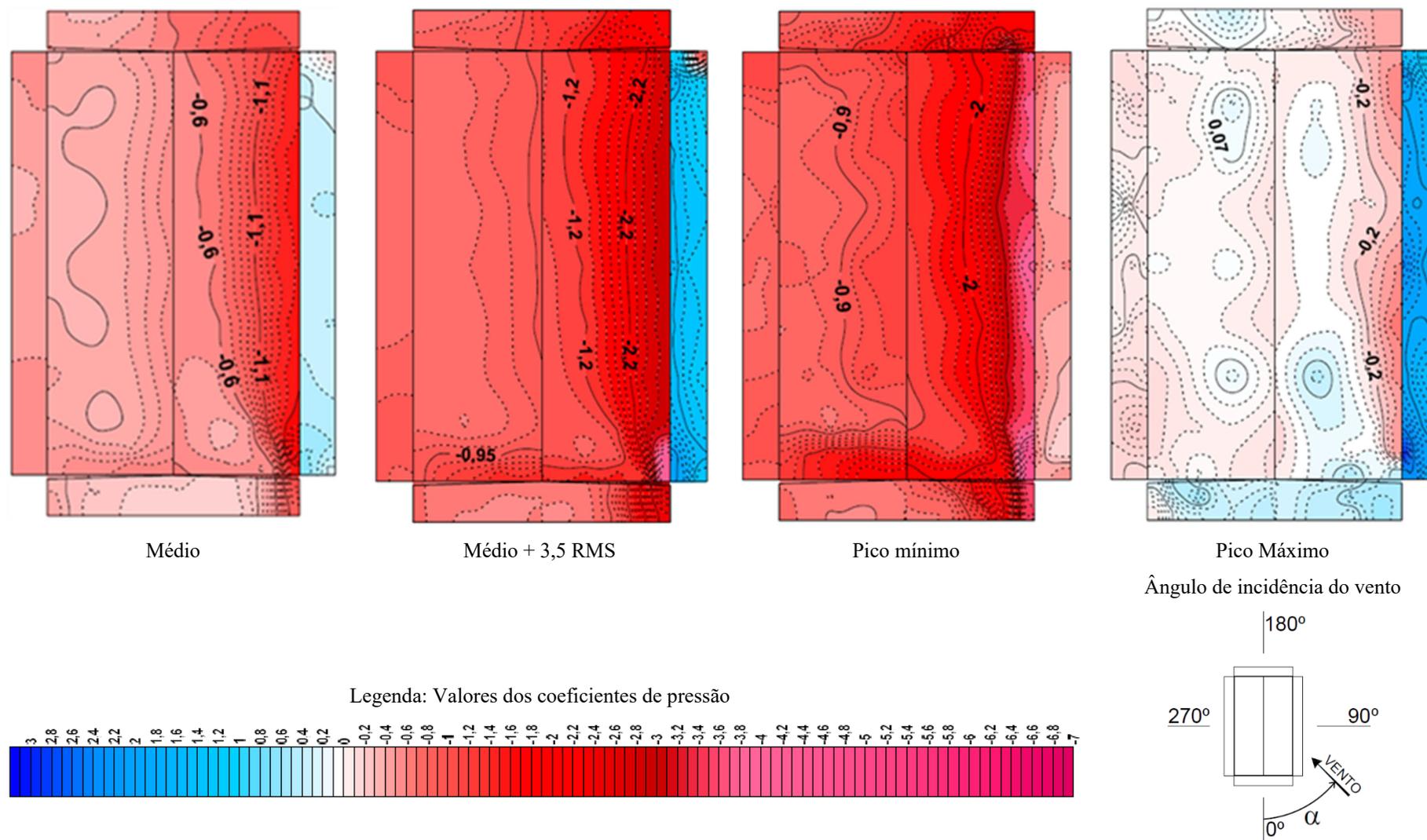
Figura 75 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 60° - Escala geométrica 1:400



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

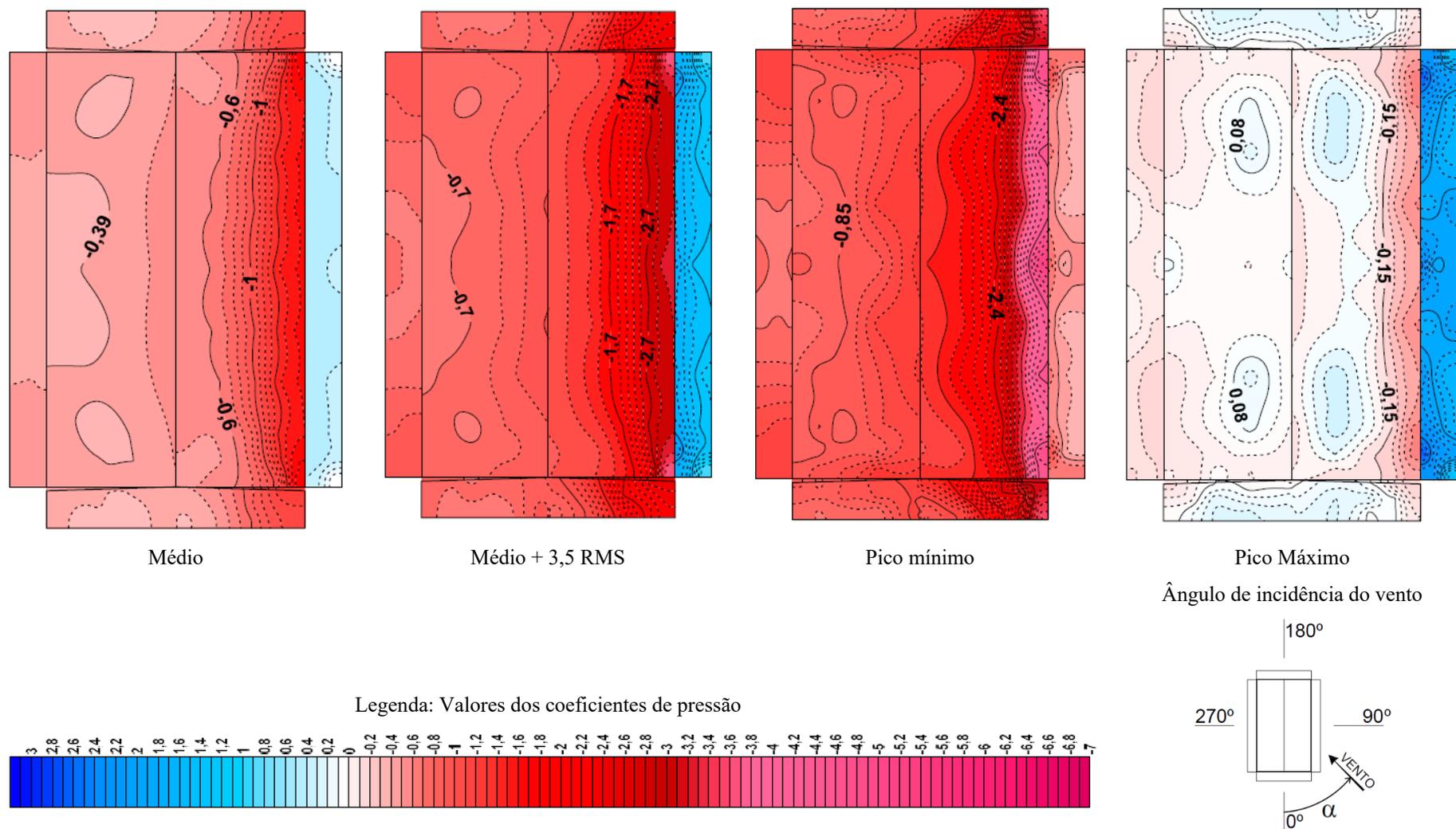
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 76 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 75° - Escala geométrica 1:400



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

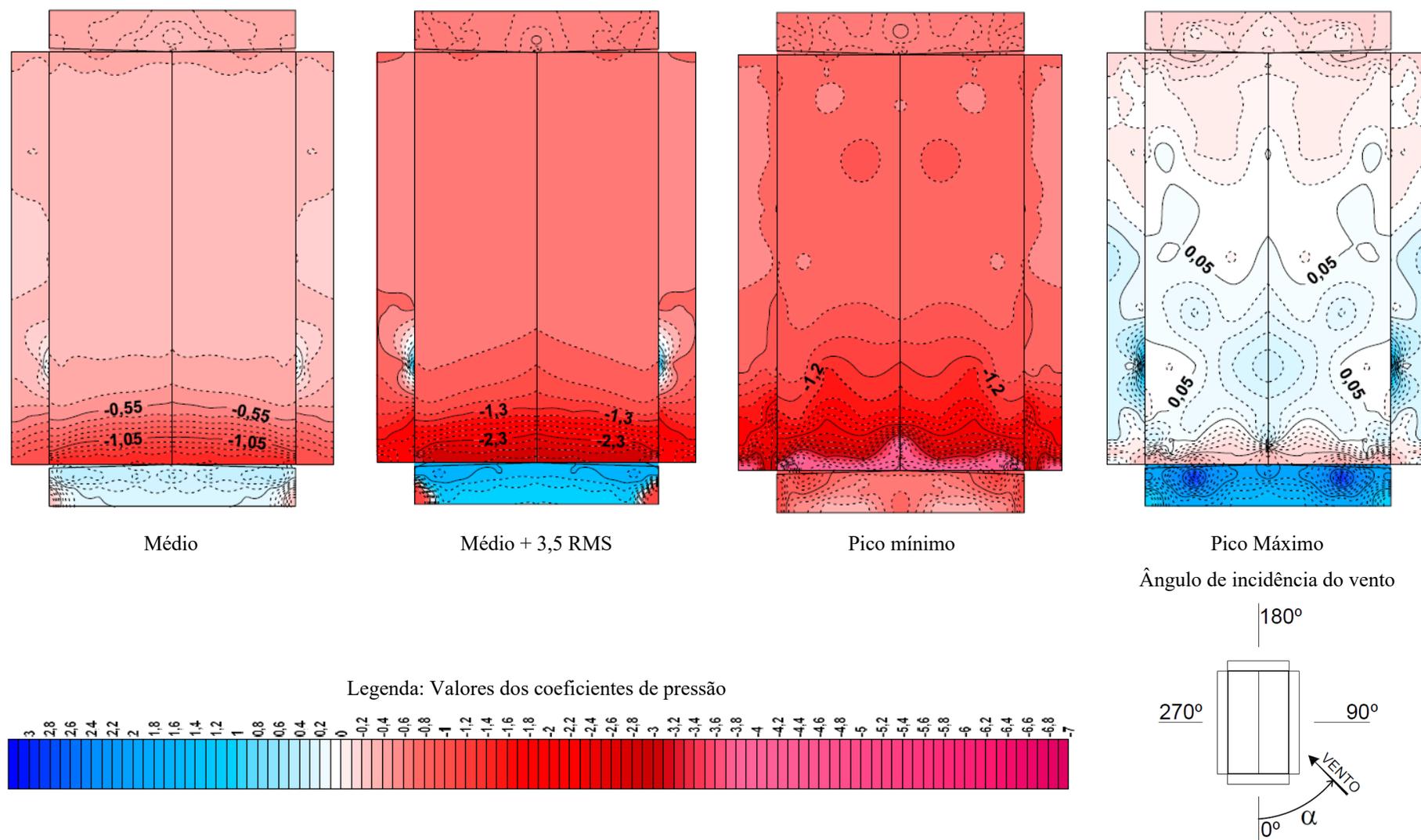
Figura 77 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 90° - Escala geométrica 1:400



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

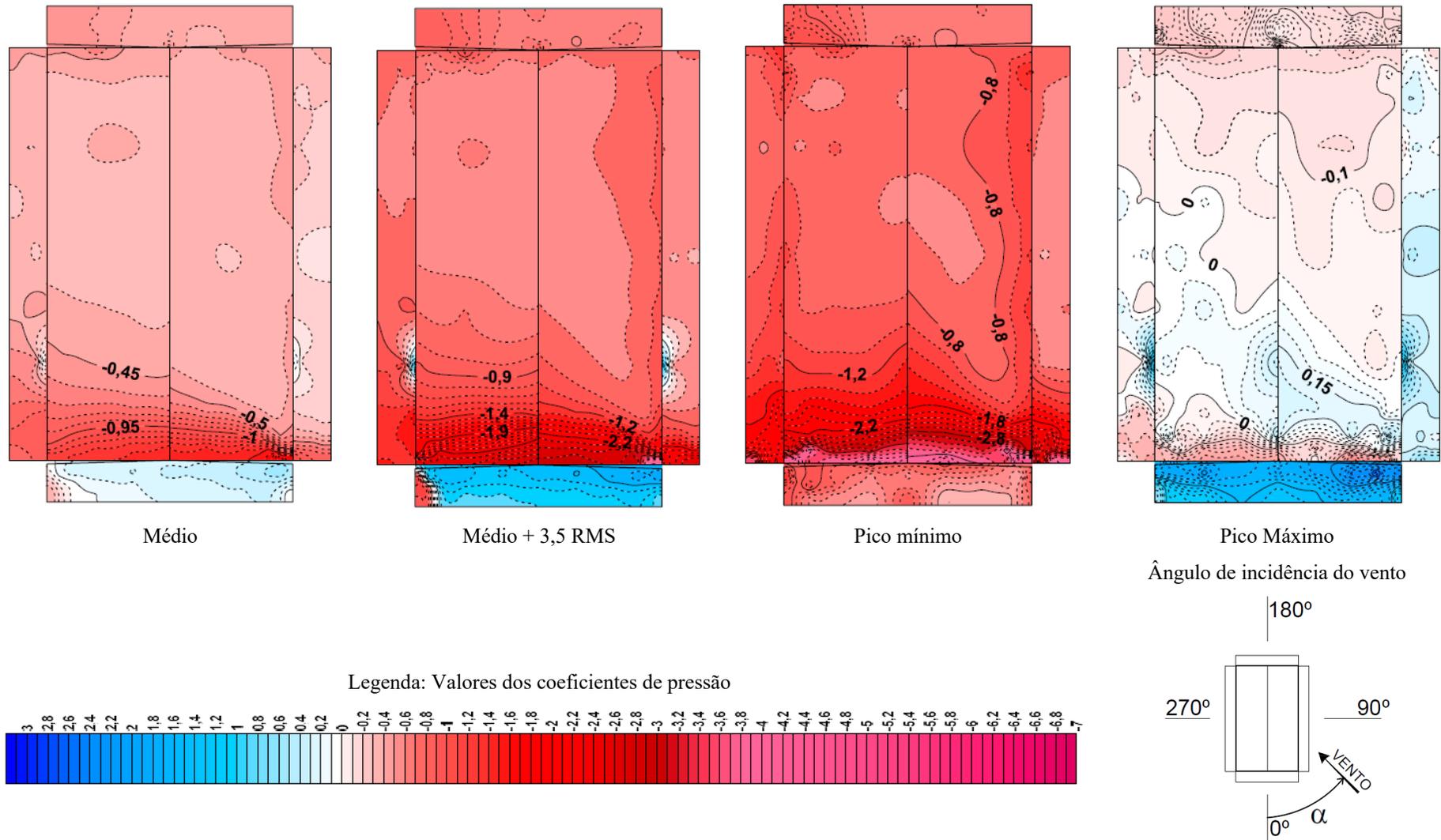
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 78 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 0° - Escala geométrica 1:200



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

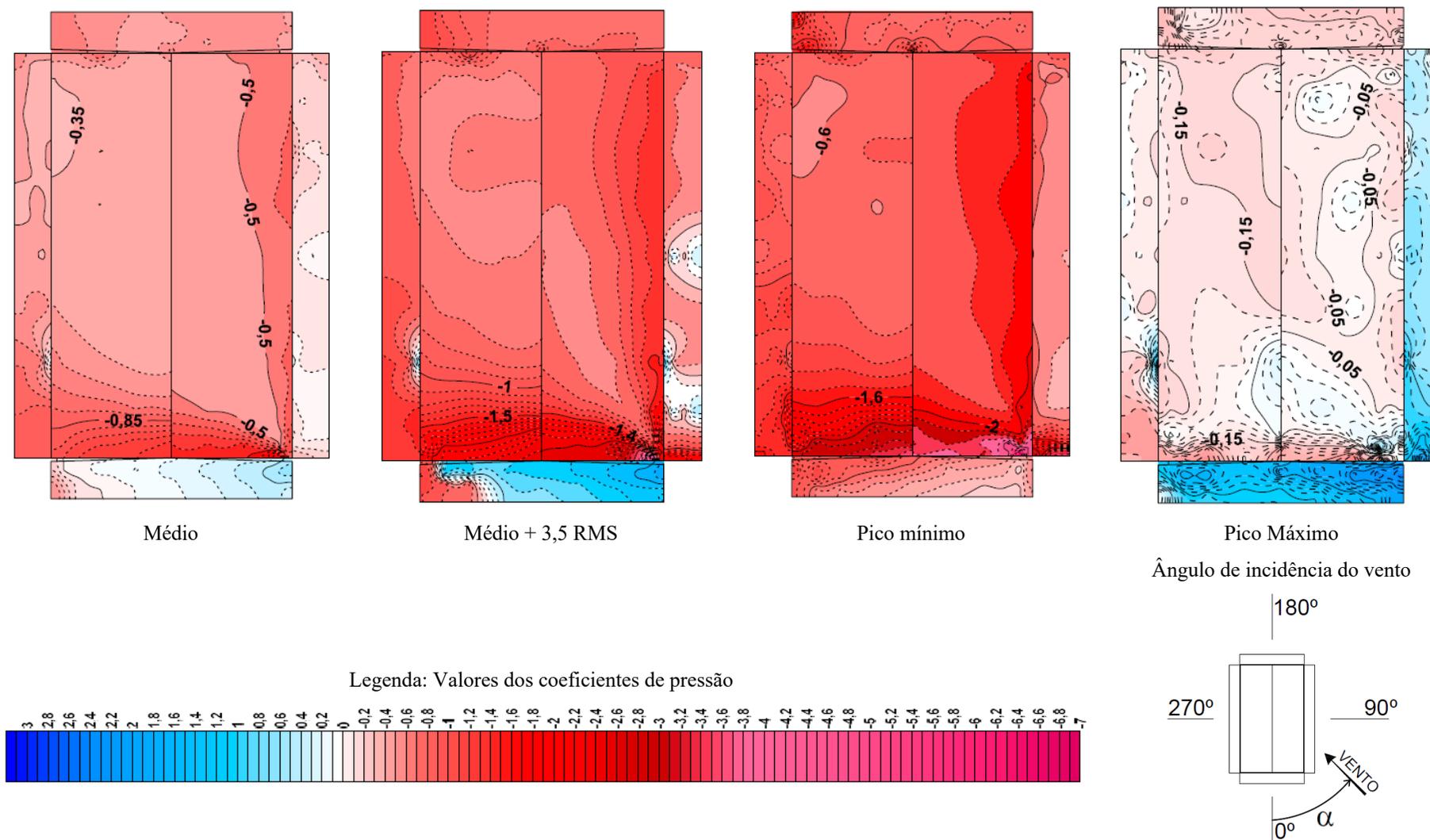
Figura 79 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 15° - Escala geométrica 1:200



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

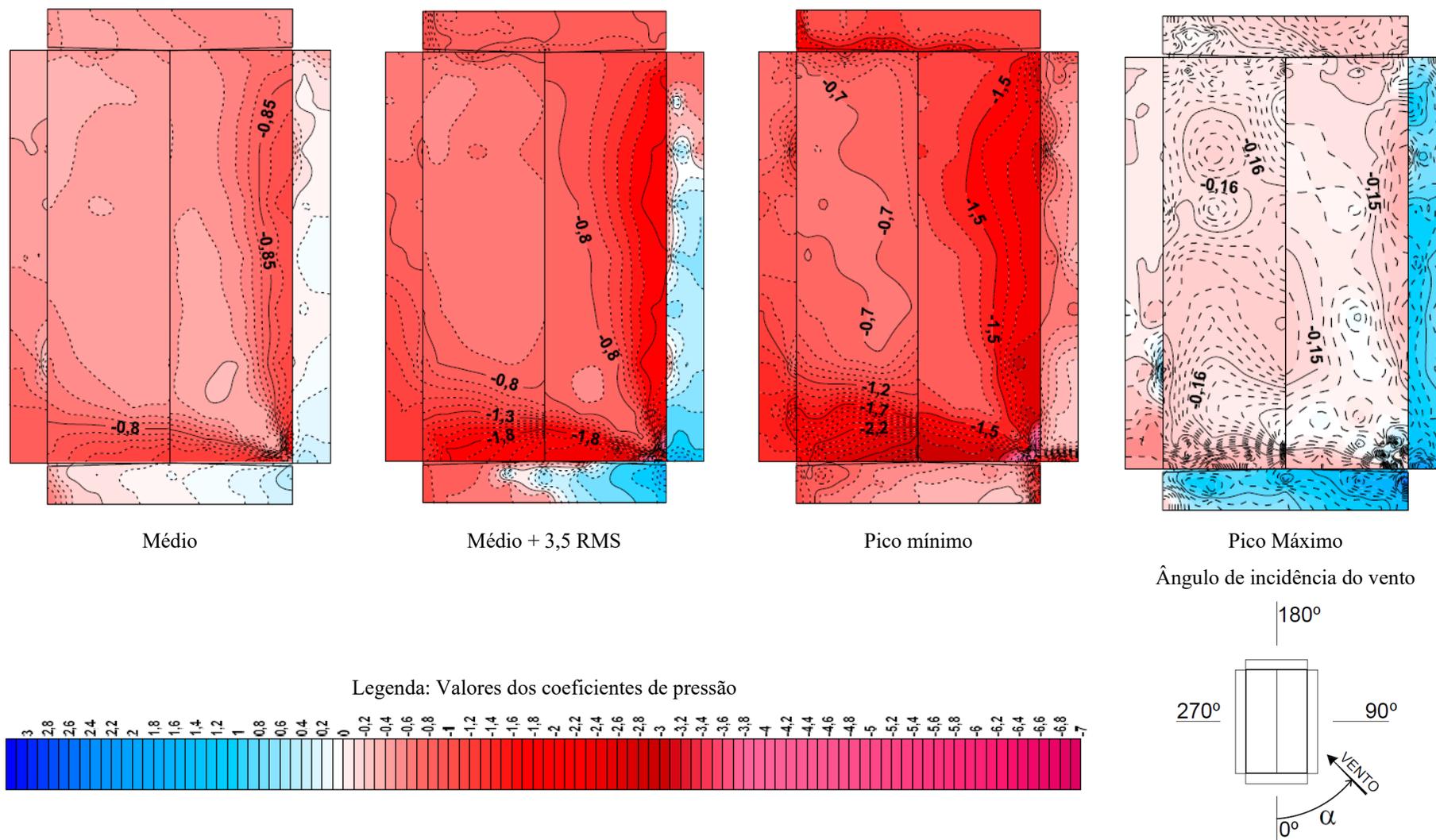
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 80 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 30° - Escala geométrica 1:200



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

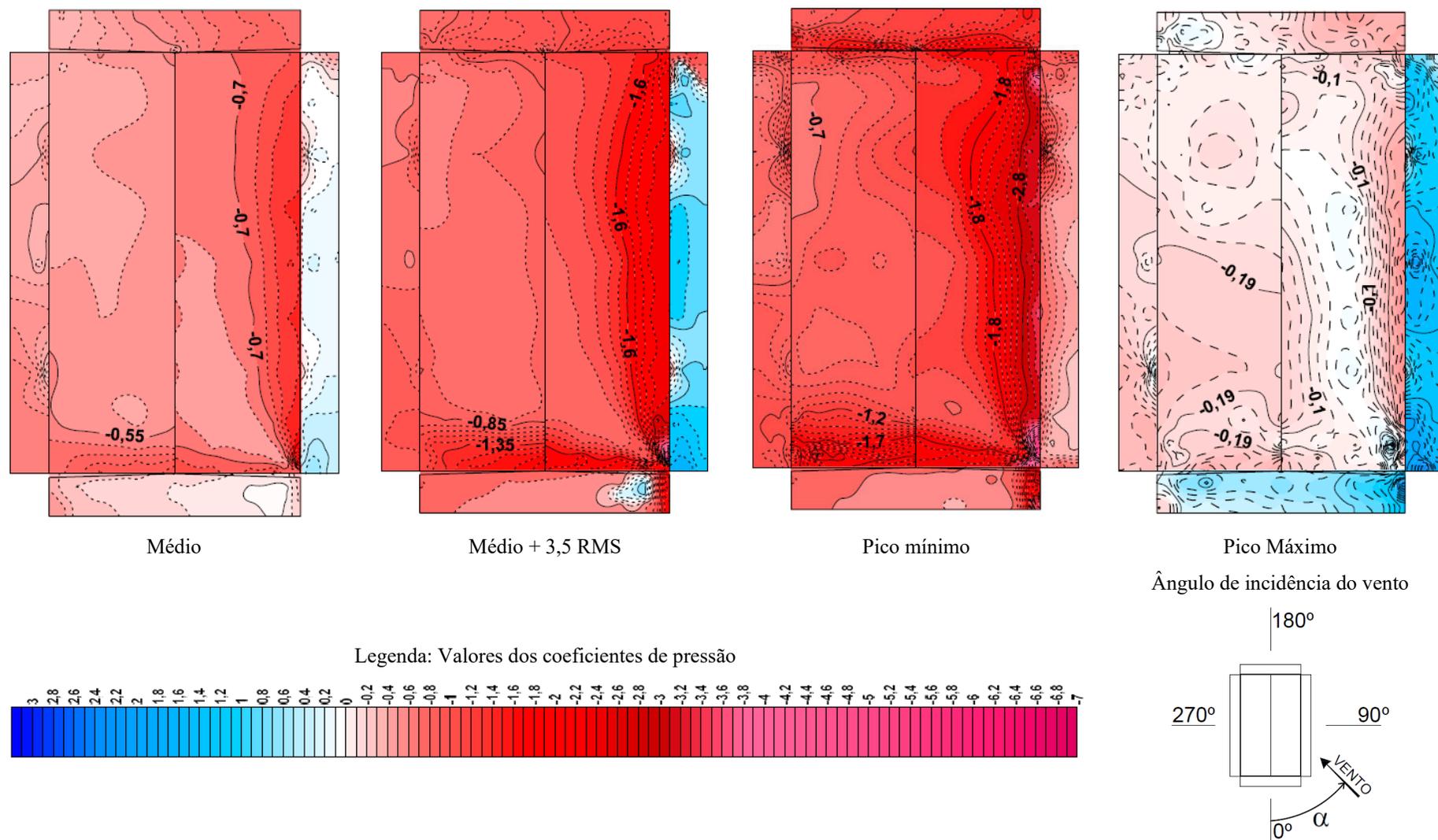
Figura 81 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 45° - Escala geométrica 1:200



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

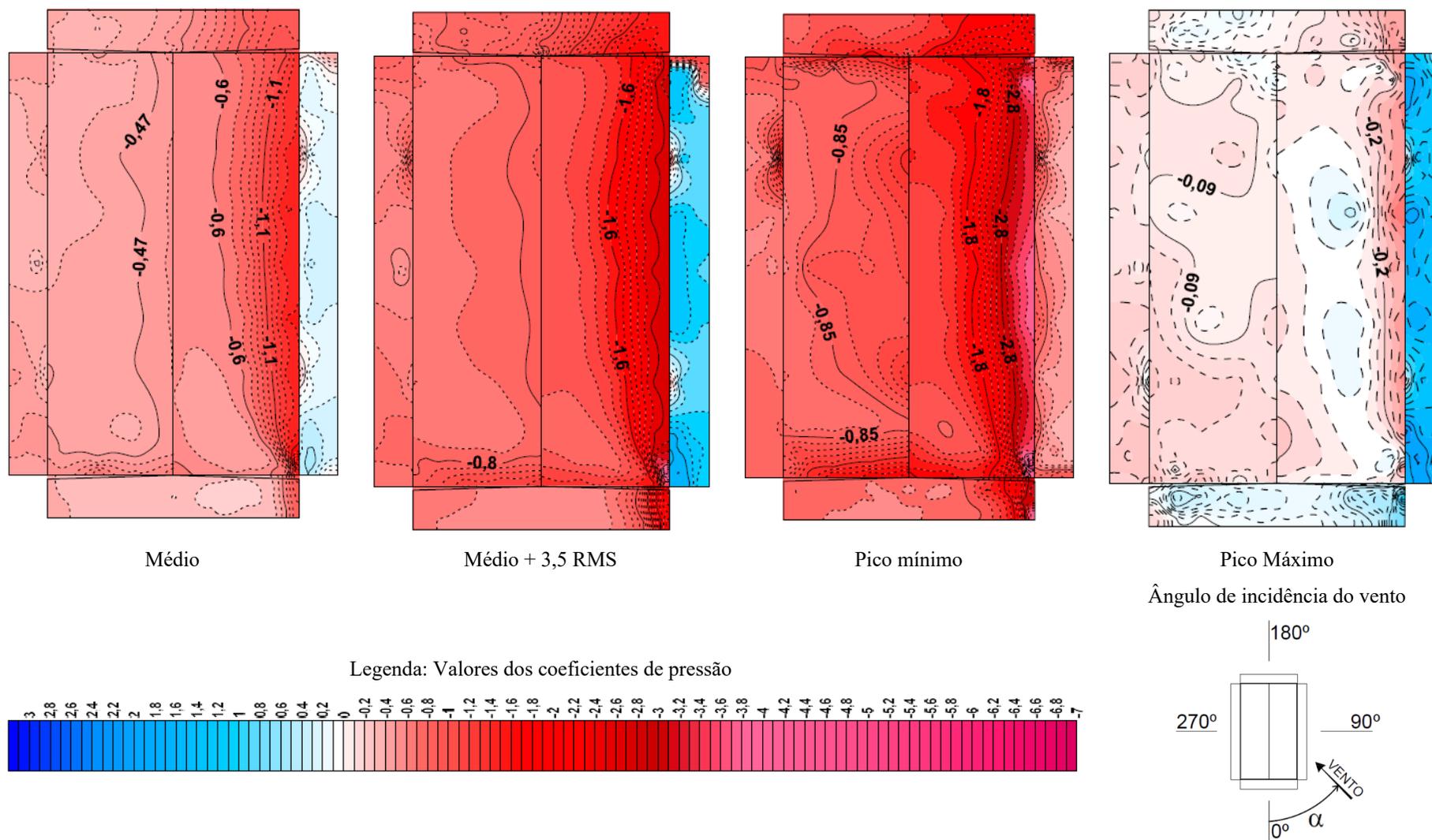
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 82 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 60° - Escala geométrica 1:200



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

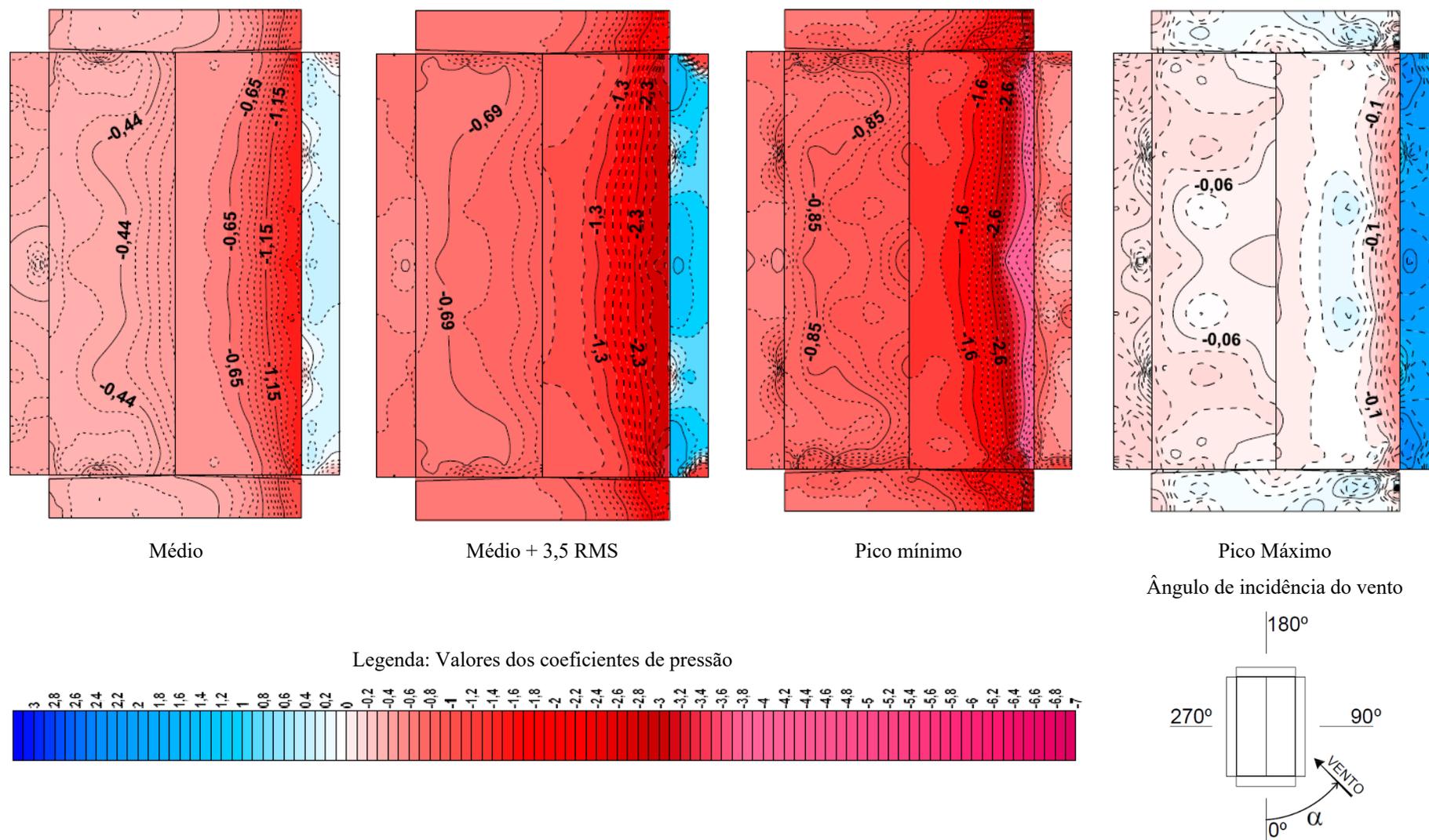
Figura 83 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 75° - Escala geométrica 1:200



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

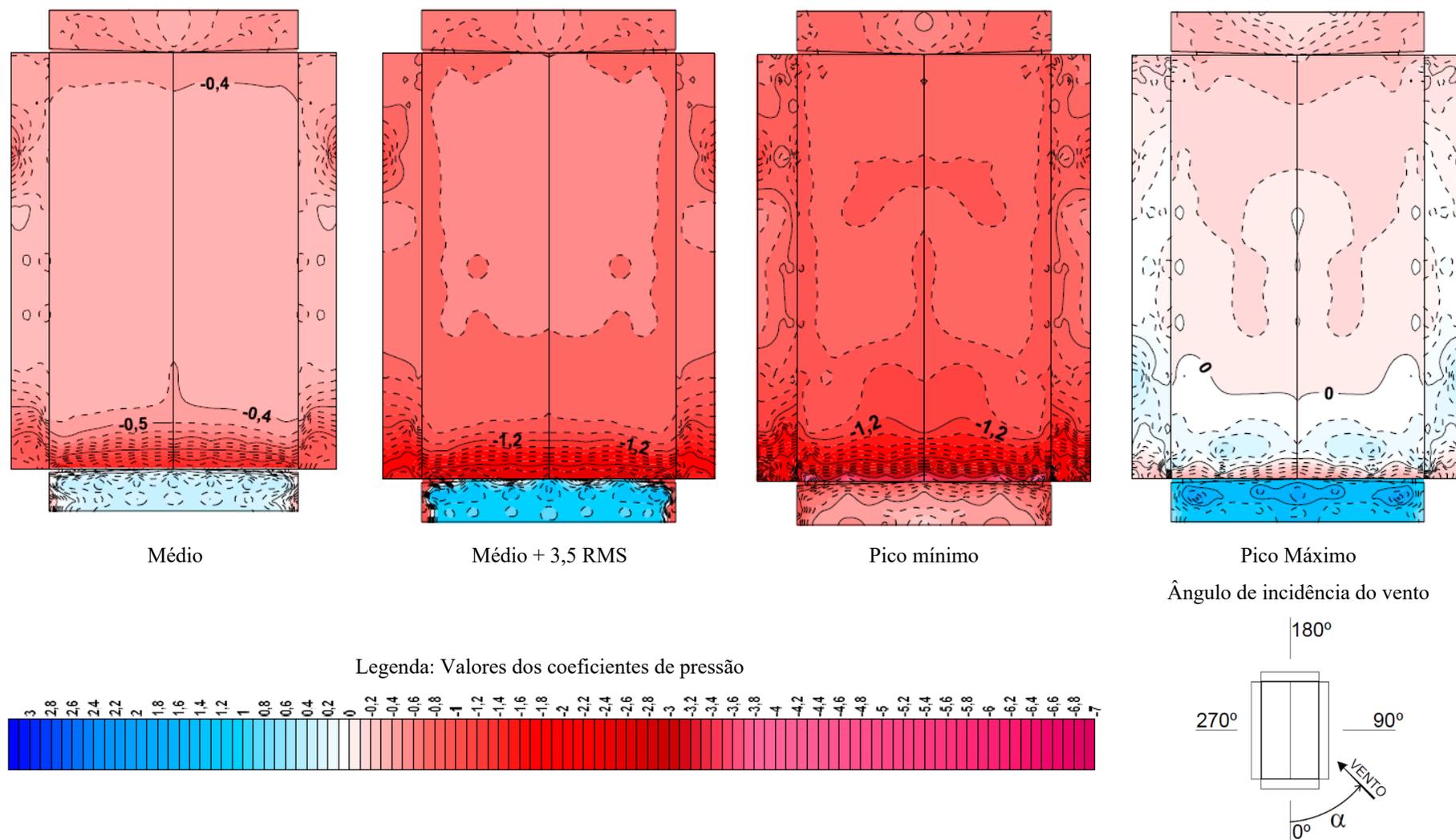
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 84 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 90° - Escala geométrica 1:200



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

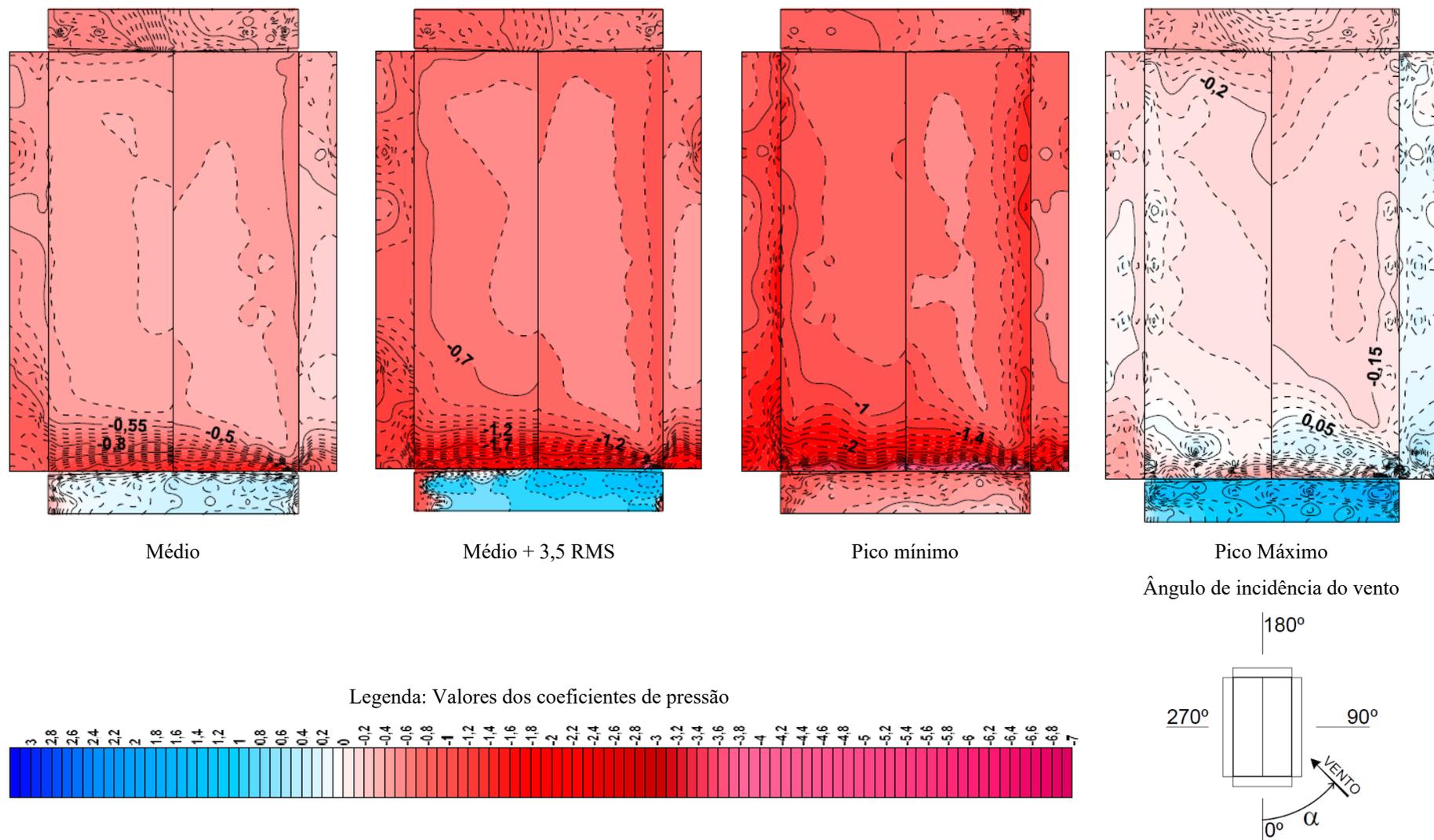
Figura 85 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 0° - Escala geométrica 1:100



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

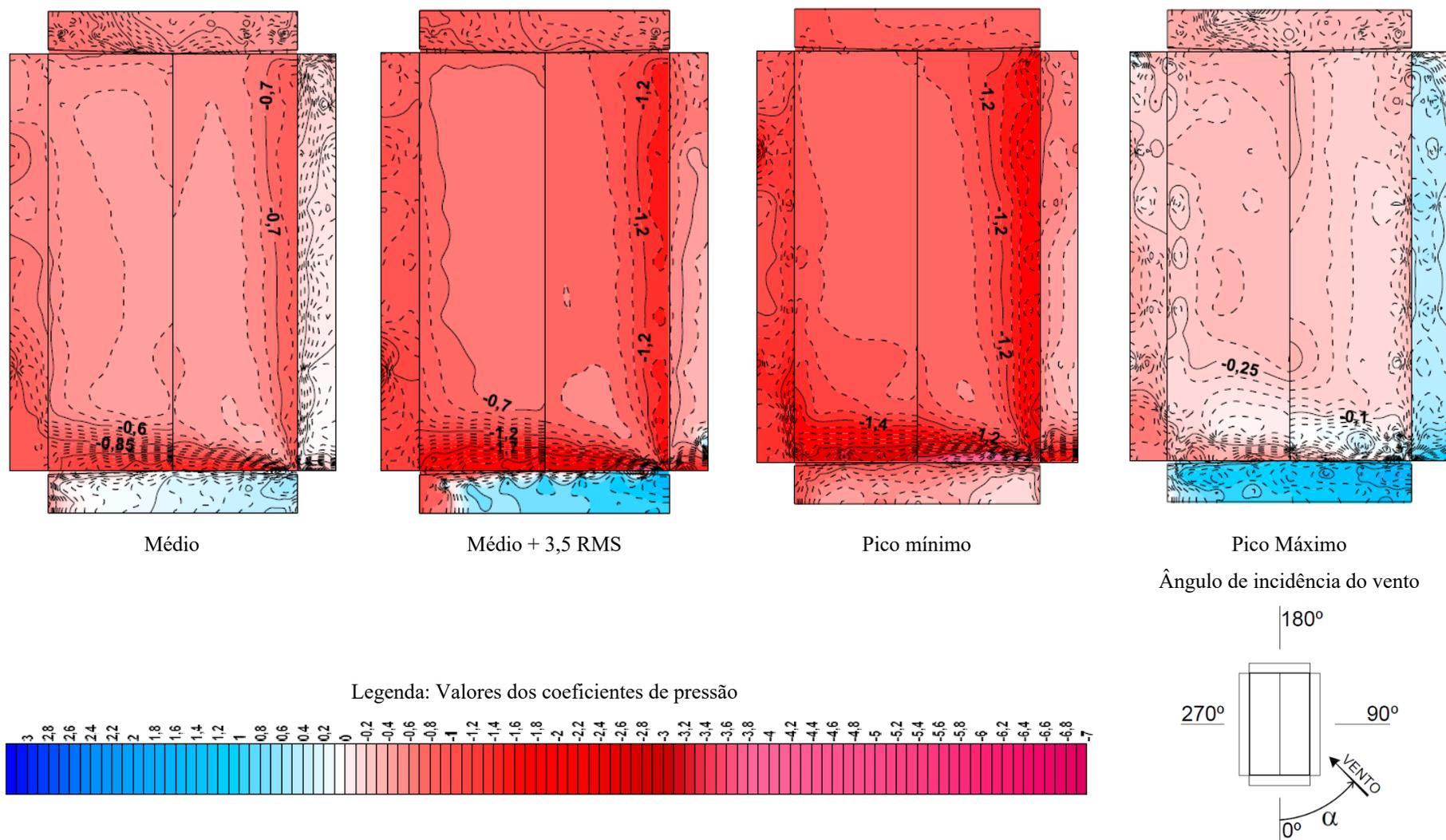
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 86 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 15° - Escala geométrica 1:100



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

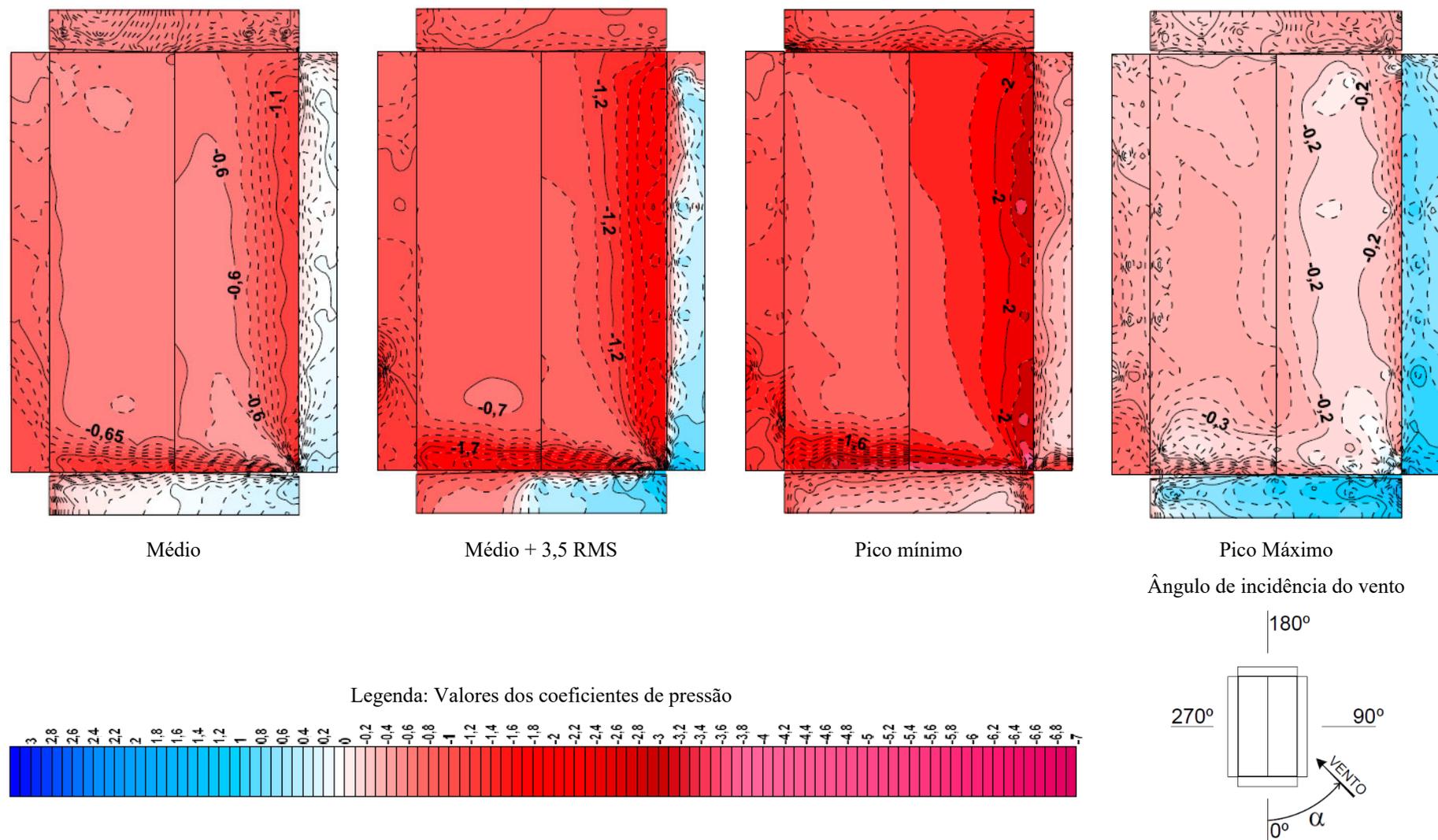
Figura 87 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 30° - Escala geométrica 1:100



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

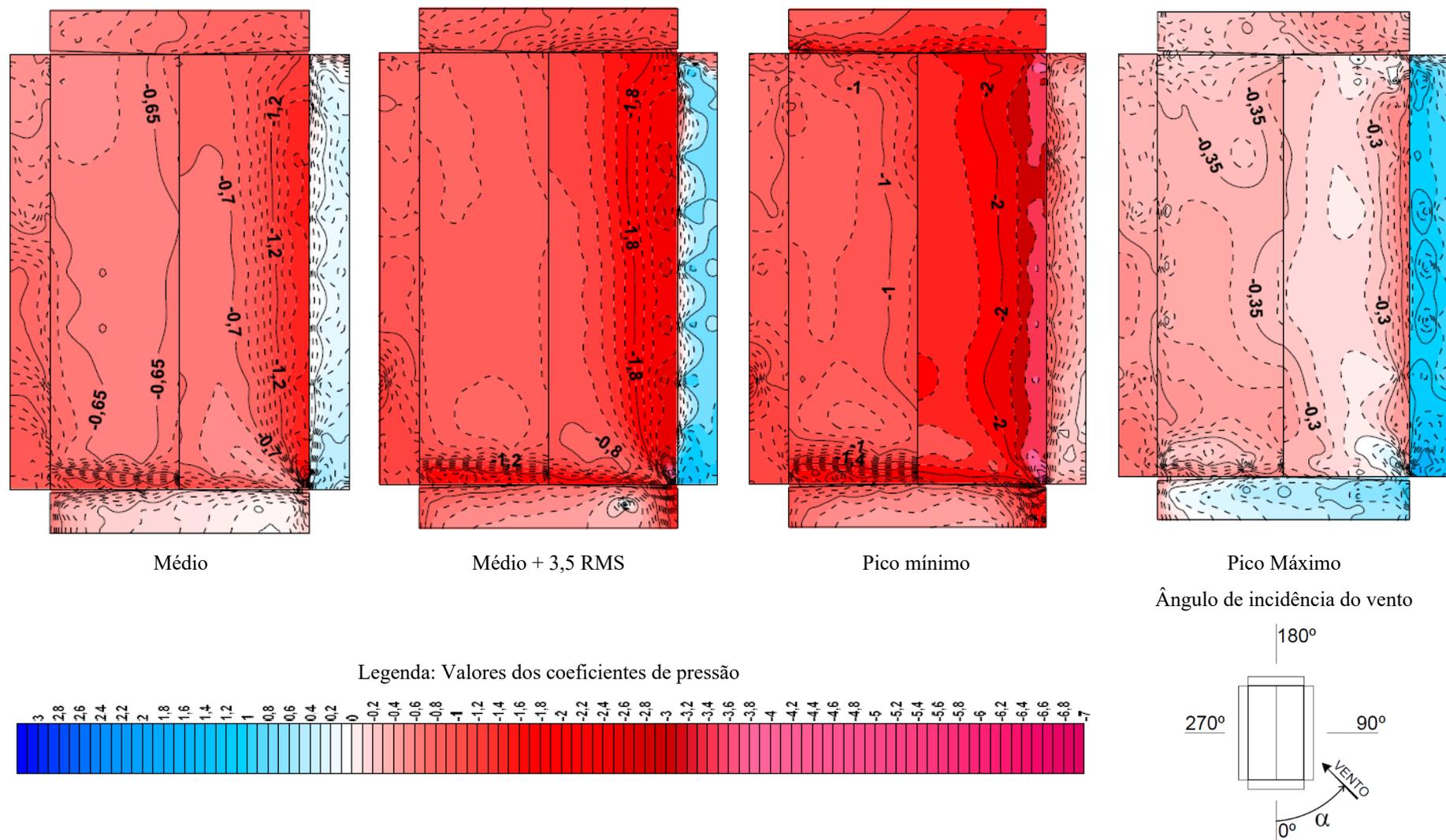
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 88 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 45° - Escala geométrica 1:100



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

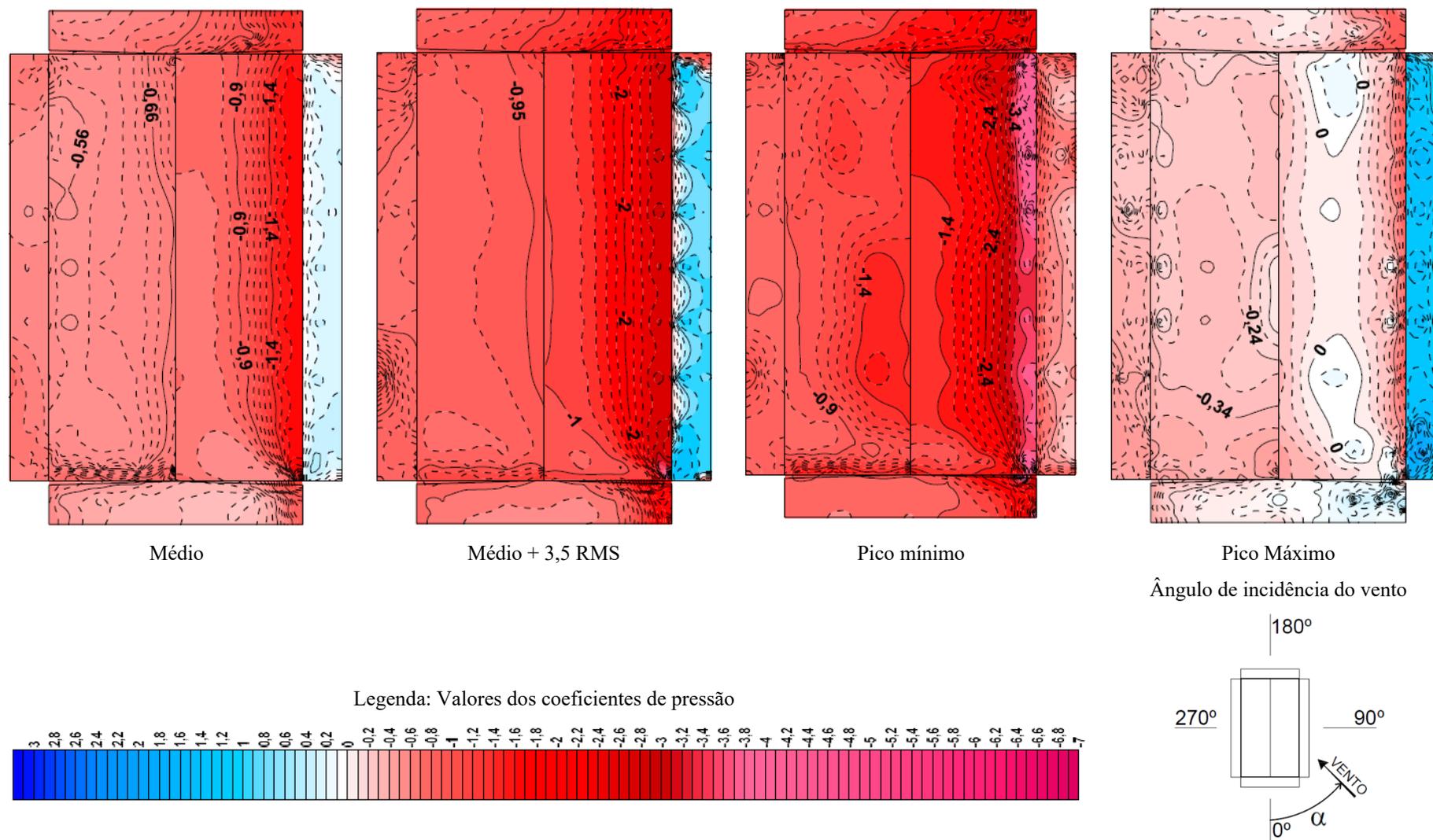
Figura 89 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 60° - Escala geométrica 1:100



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

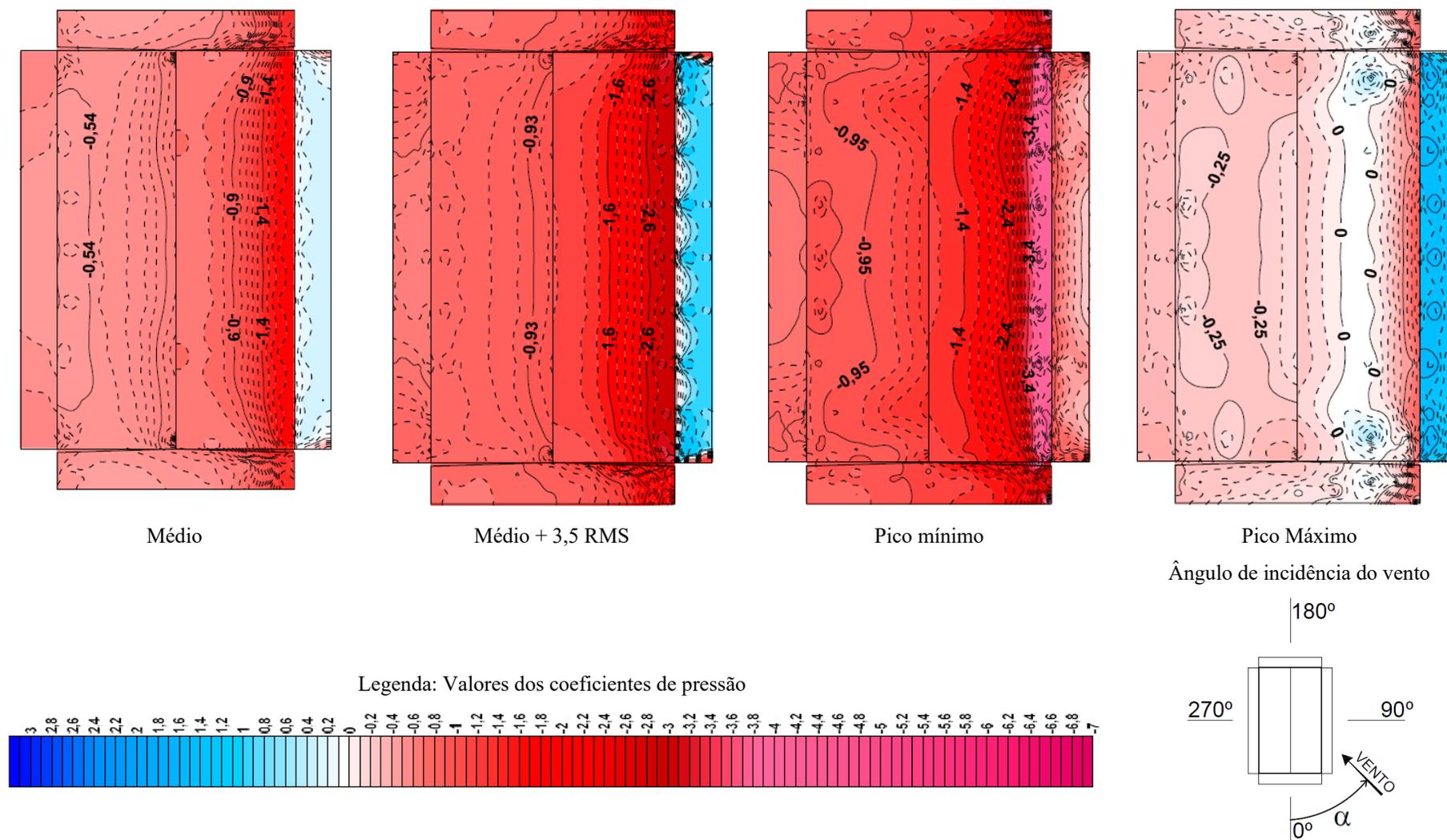
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 90 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 75° - Escala geométrica 1:100



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

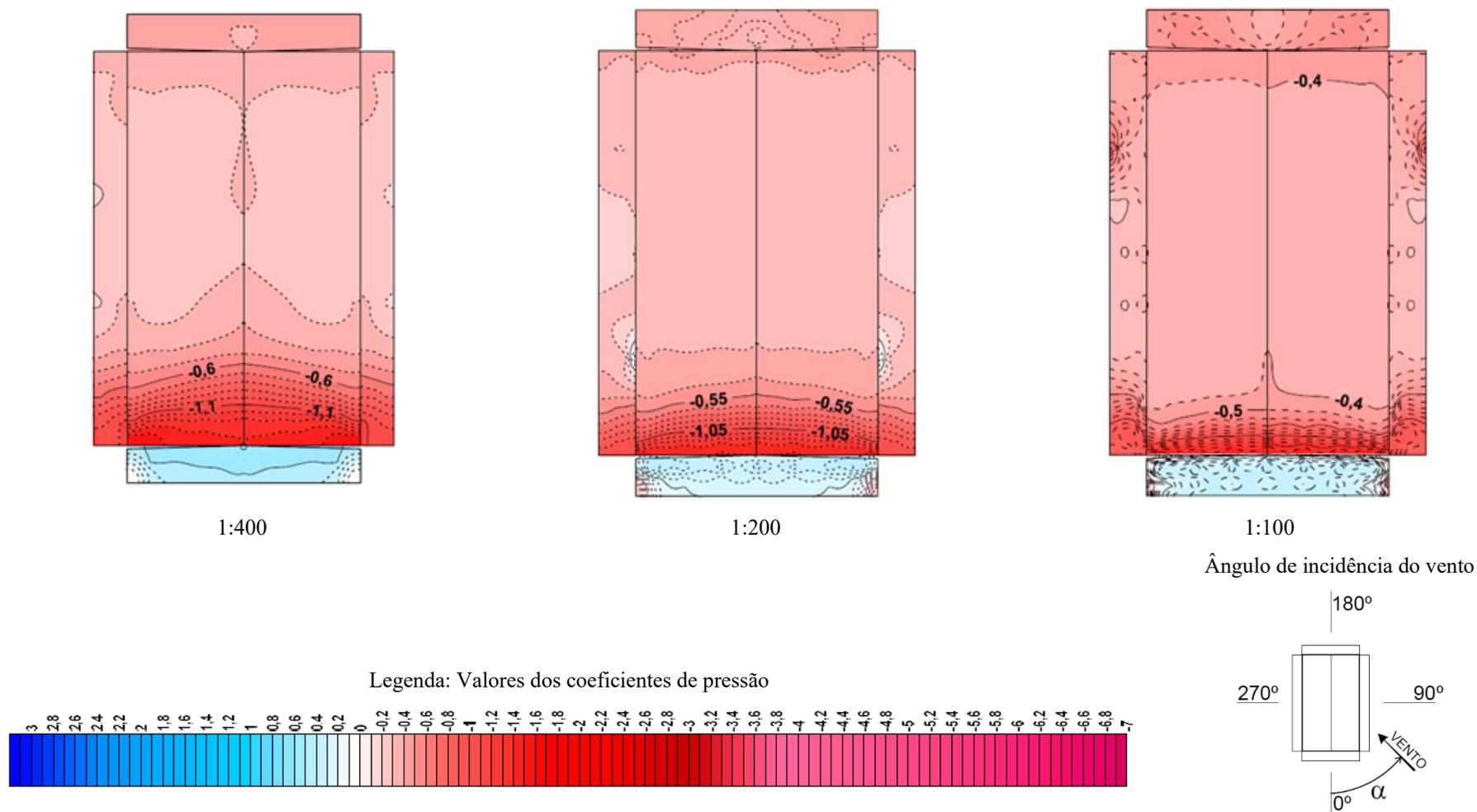
Figura 91 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais para ângulo 90° - Escala geométrica 1:100



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

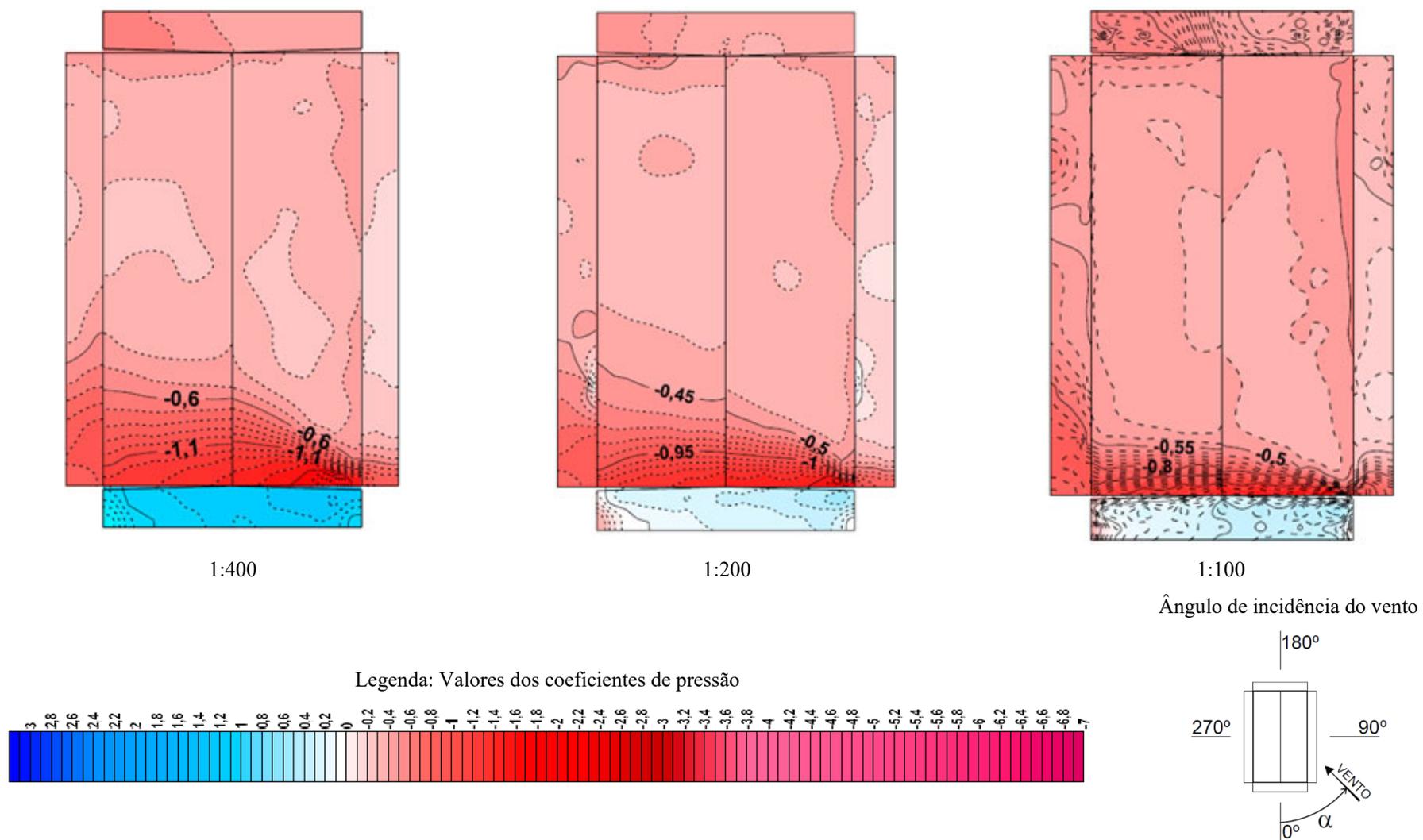
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 92 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios] para ângulo 0°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

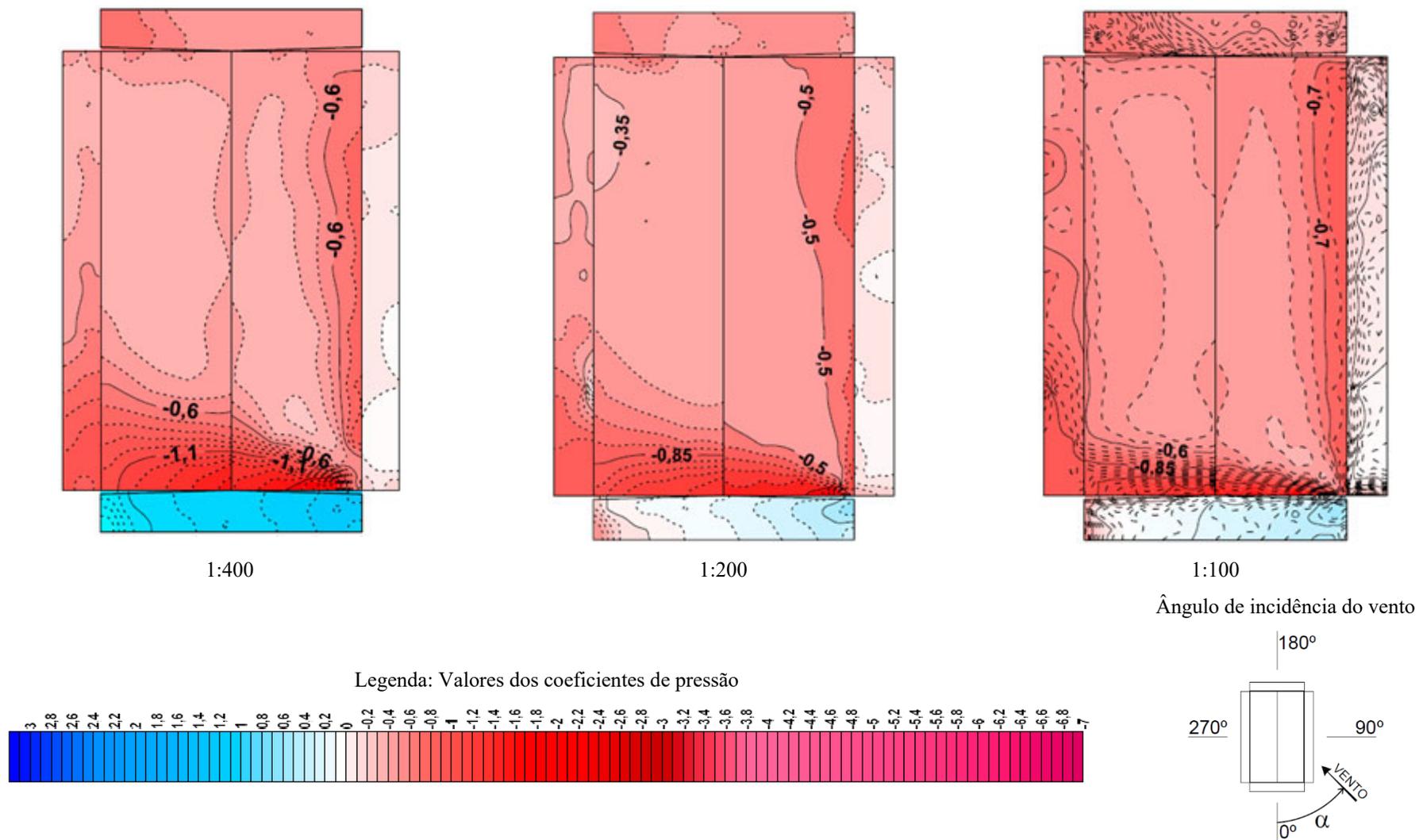
Figura 93 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios] para ângulo 15°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

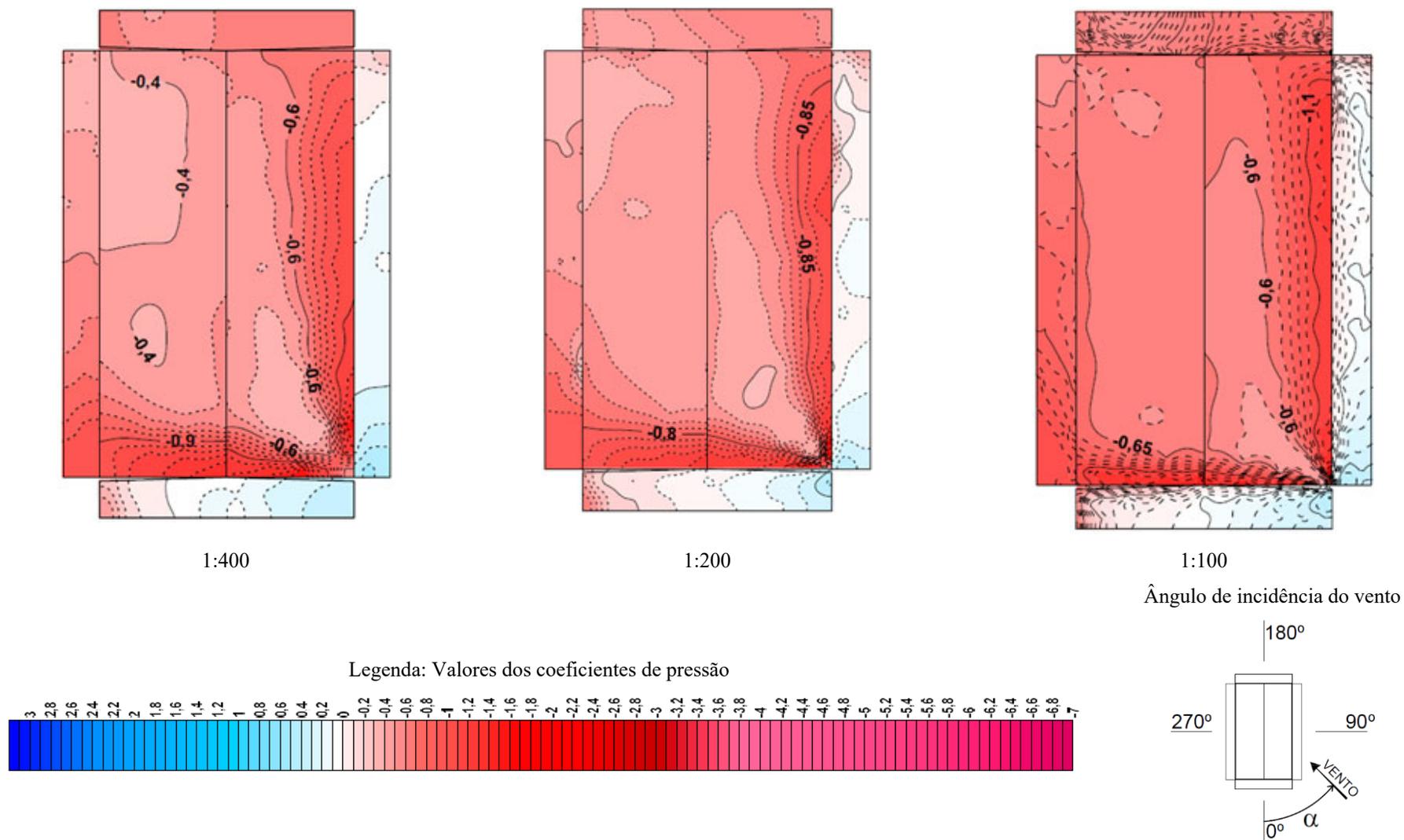
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 94 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios] para ângulo 30°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

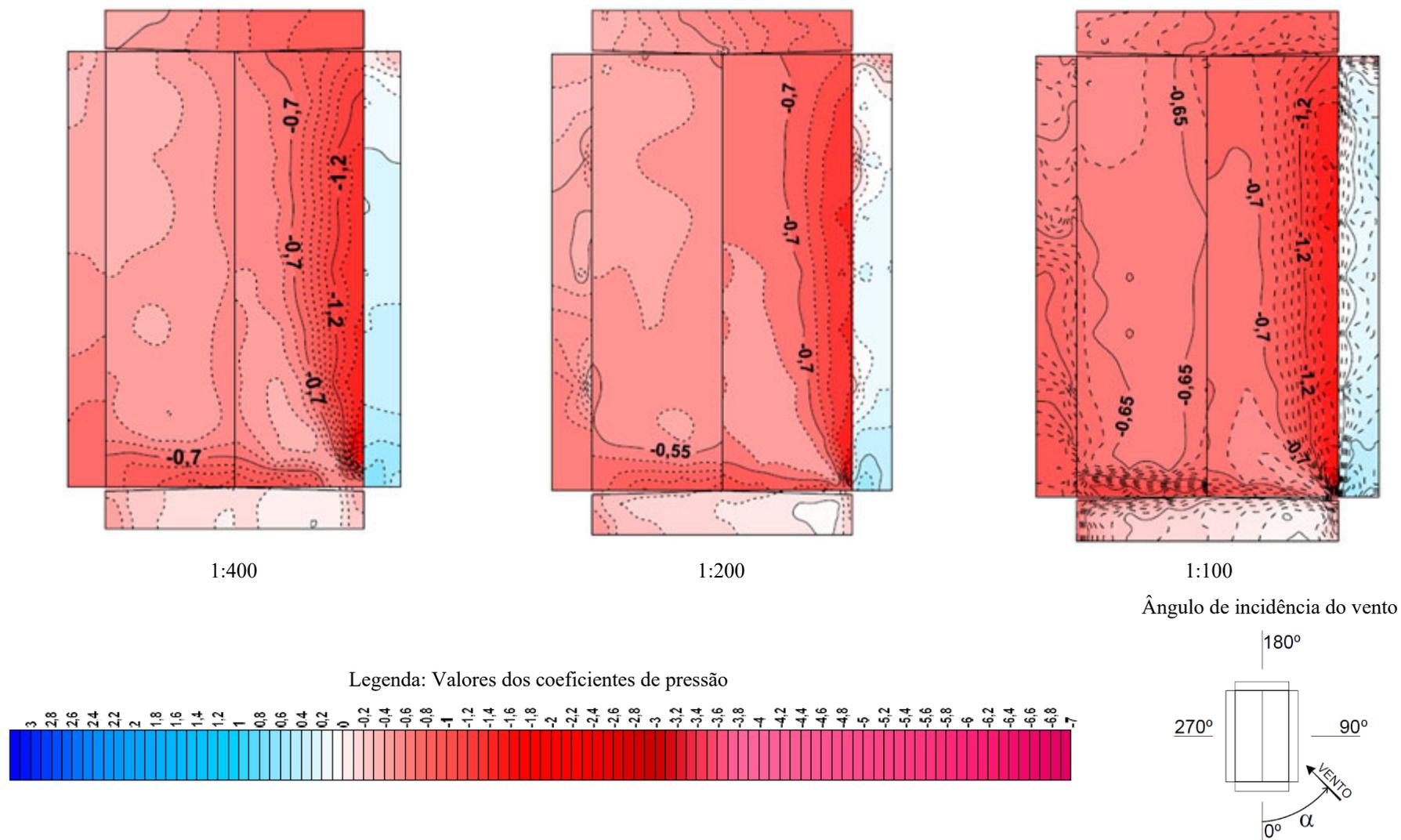
Figura 95 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios] para ângulo 45°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

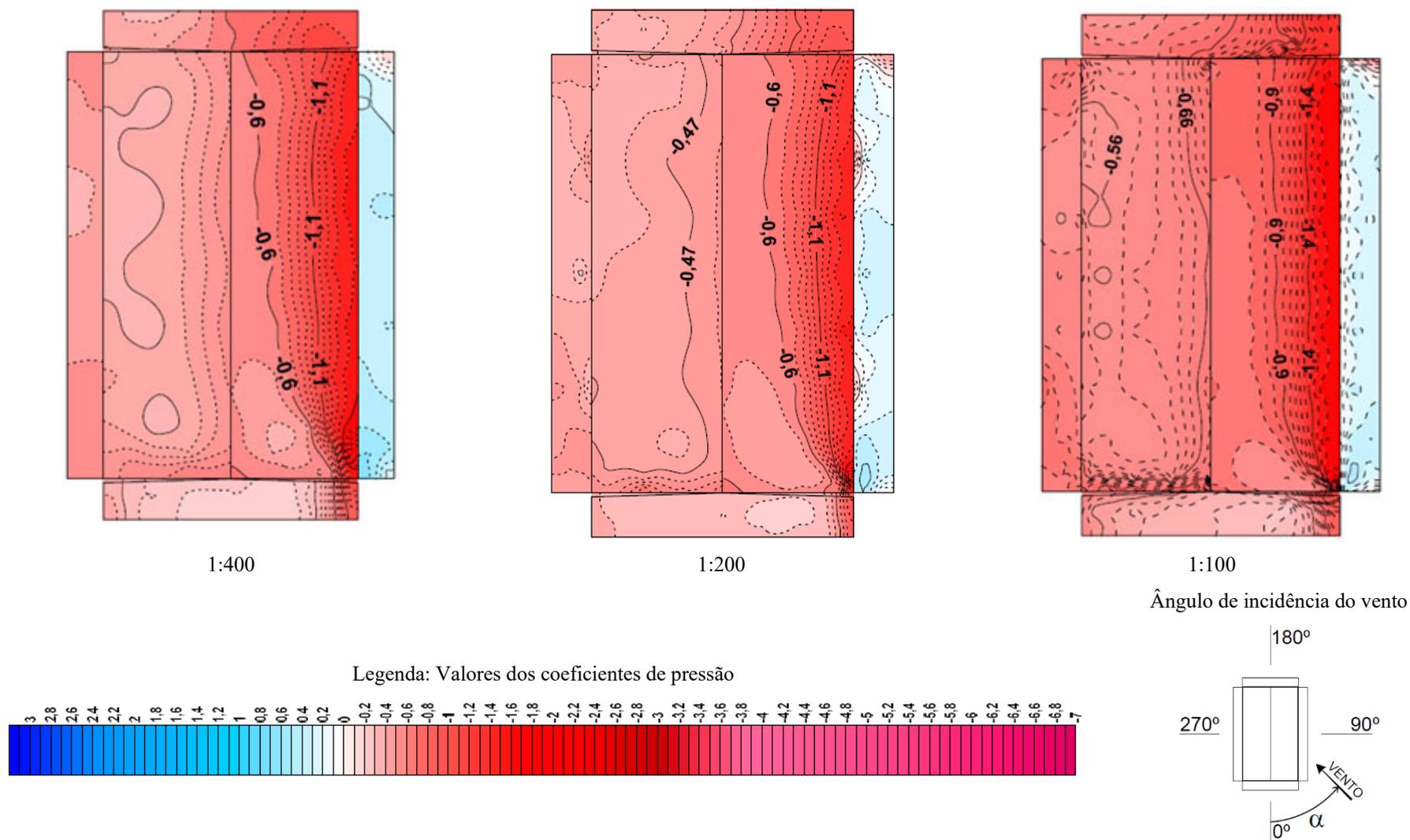
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 96 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios] para ângulo 60°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

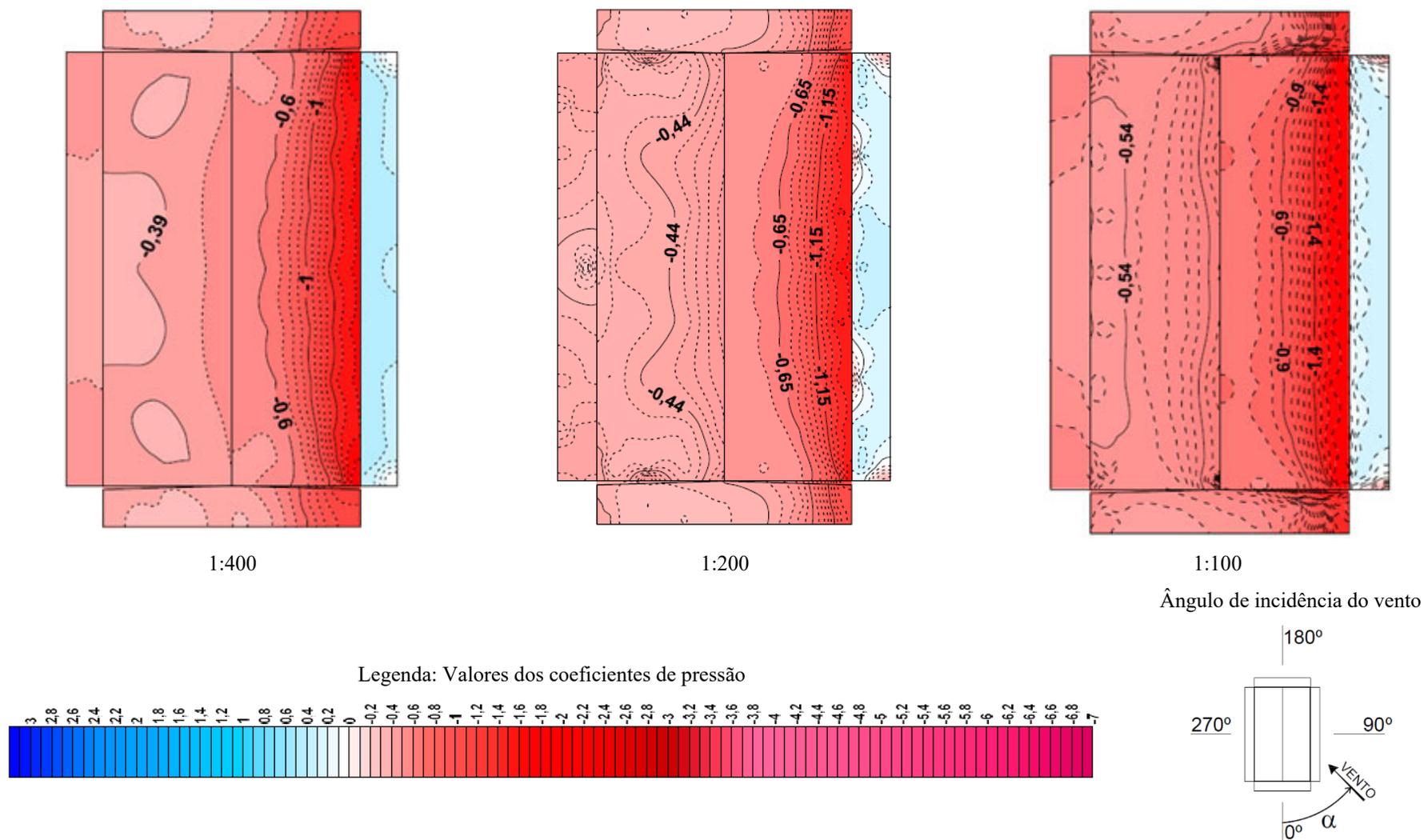
Figura 97 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios] para ângulo 75°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

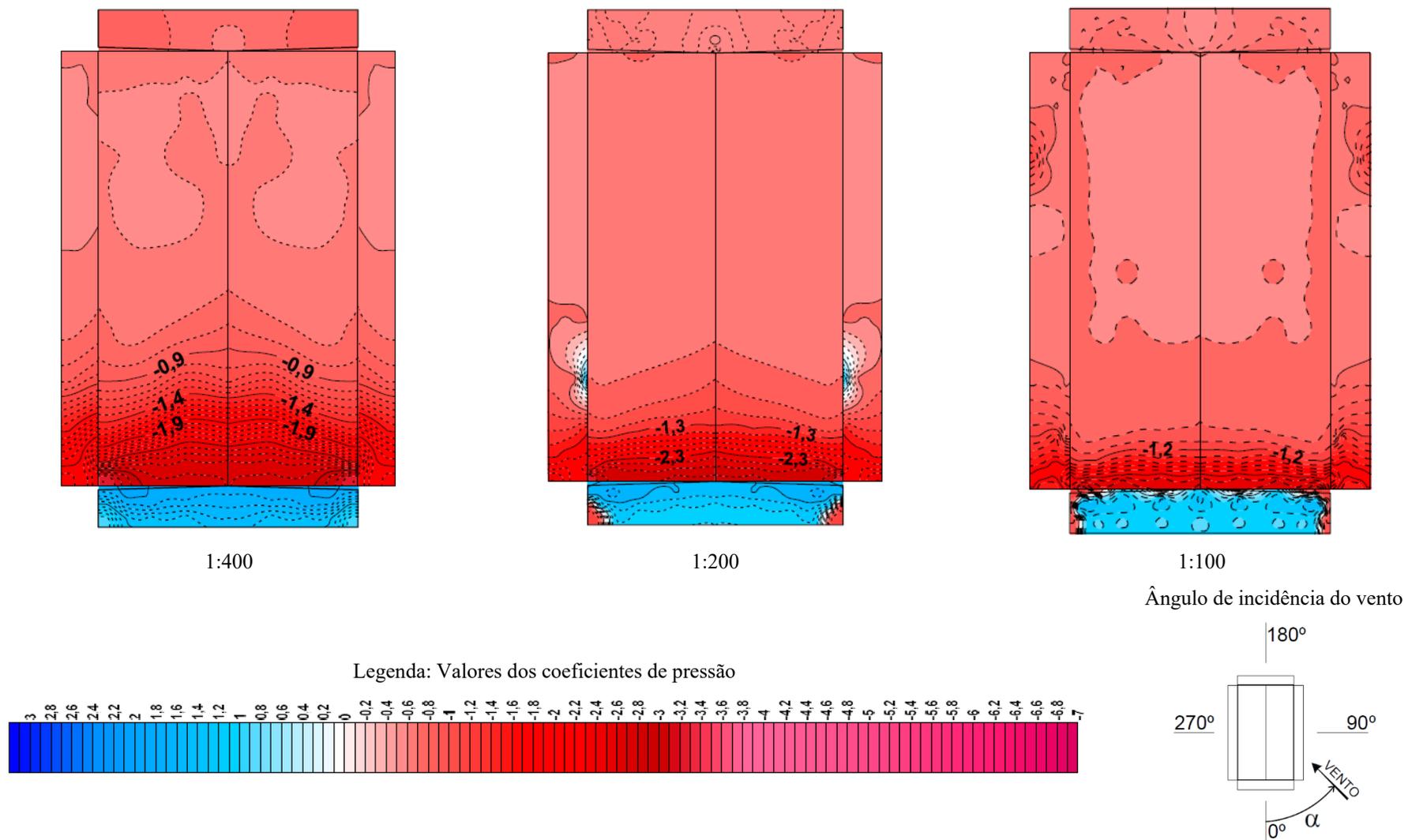
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 98 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios] para ângulo 90°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

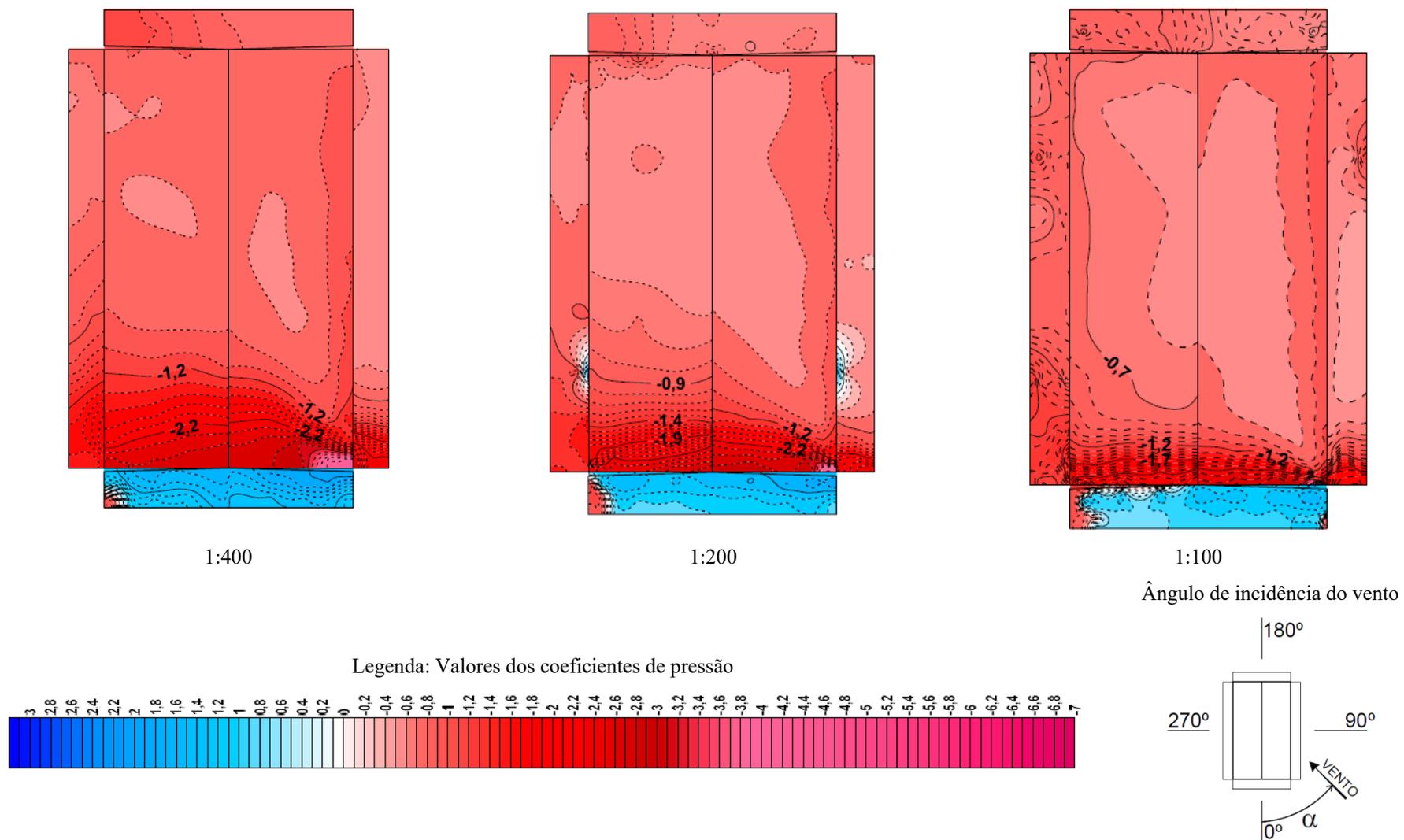
Figura 99 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios + 3,5RMS] para ângulo 0°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

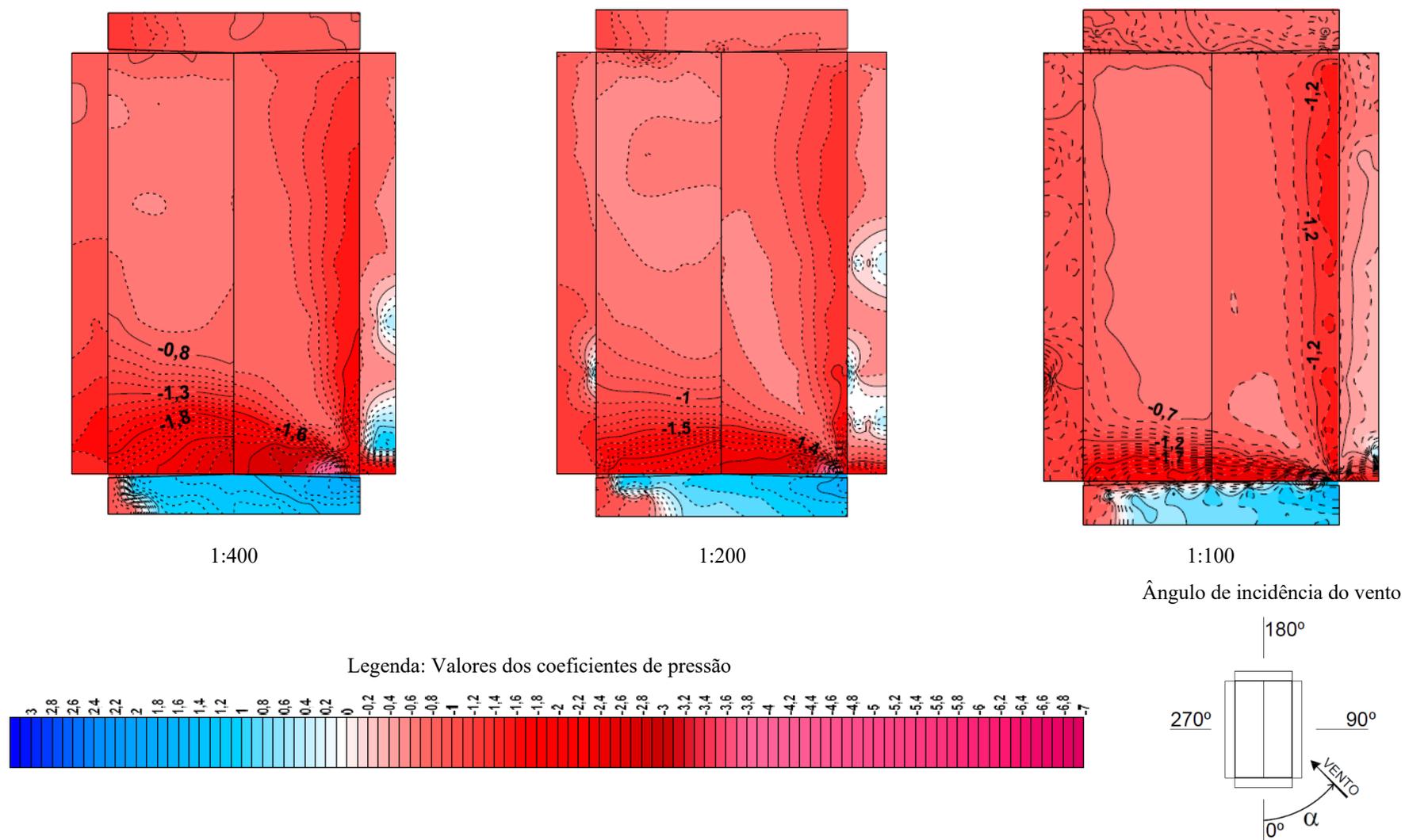
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 100 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios + 3,5RMS] para ângulo 15°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

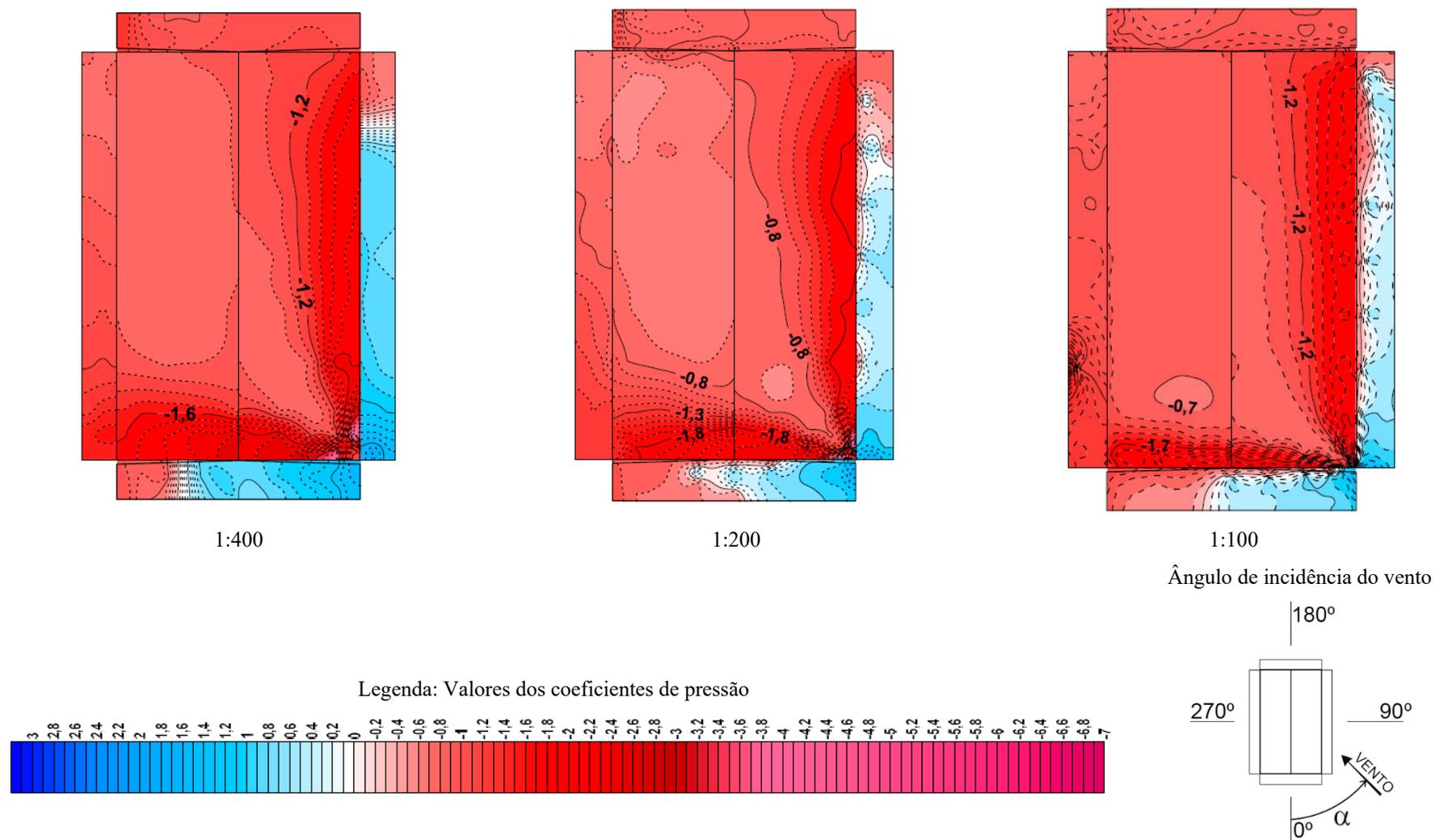
Figura 101 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios + 3,5RMS] para ângulo 30°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

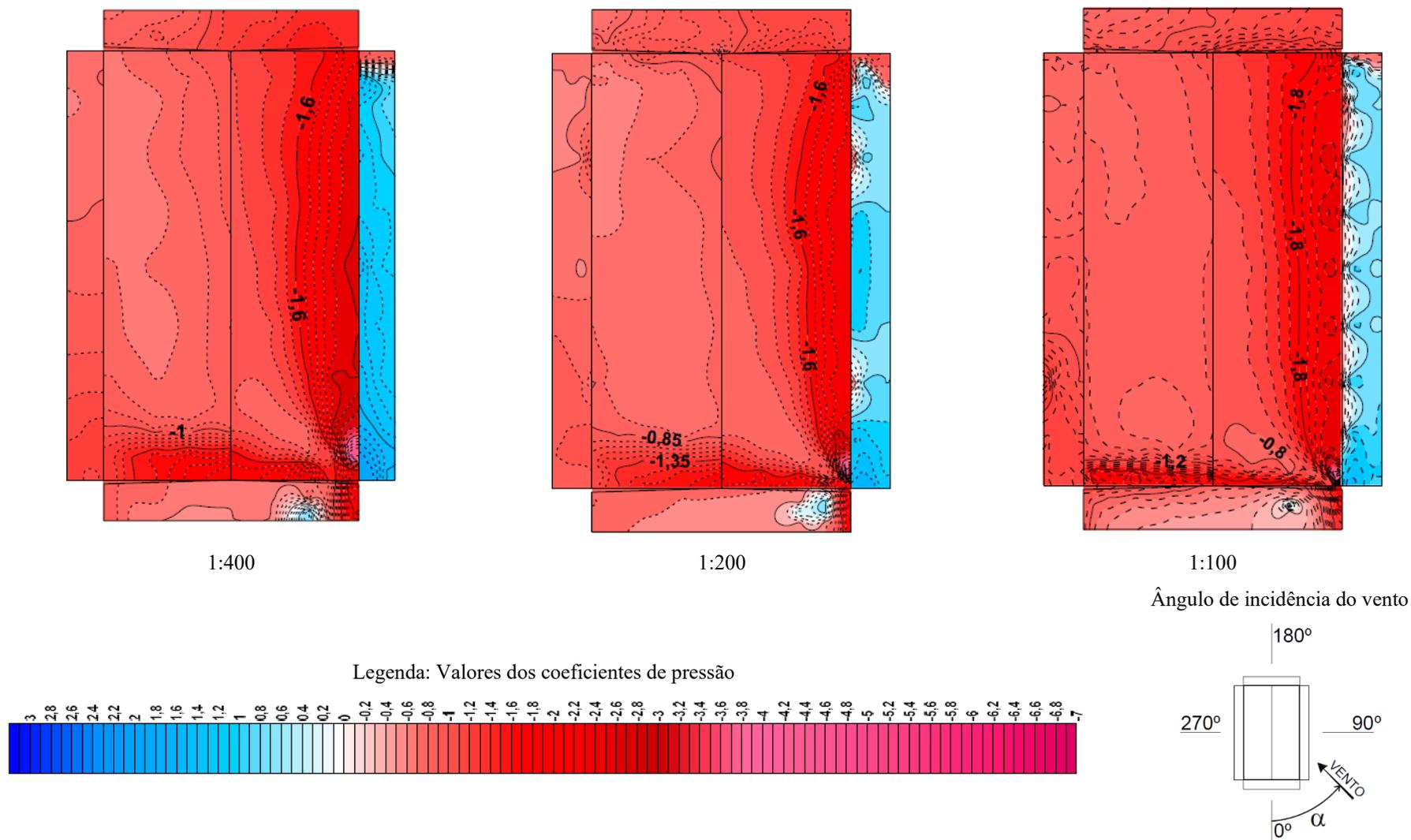
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 102 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios + 3,5RMS] para ângulo 45°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

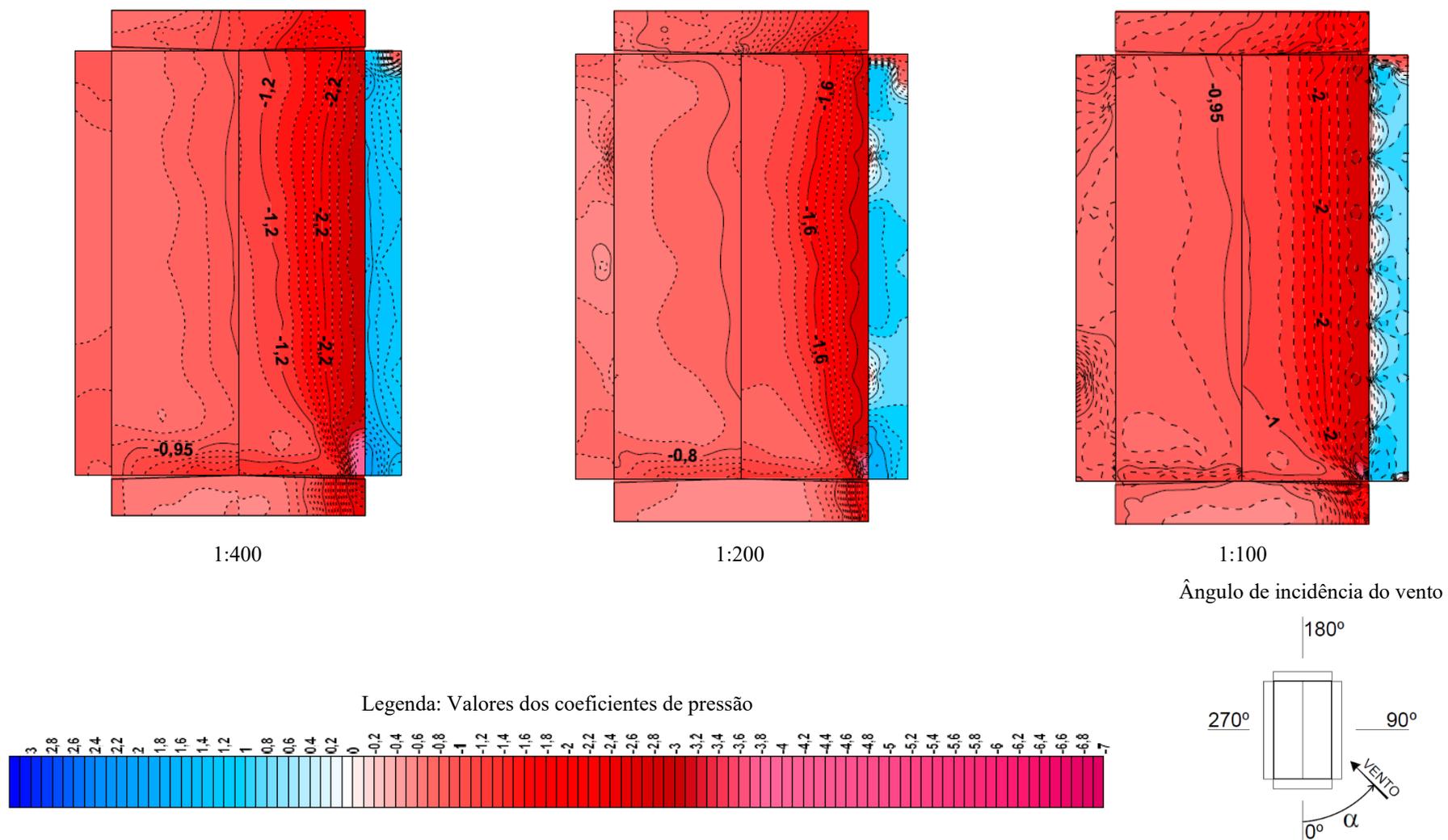
Figura 103 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios + 3,5RMS] para ângulo 60°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

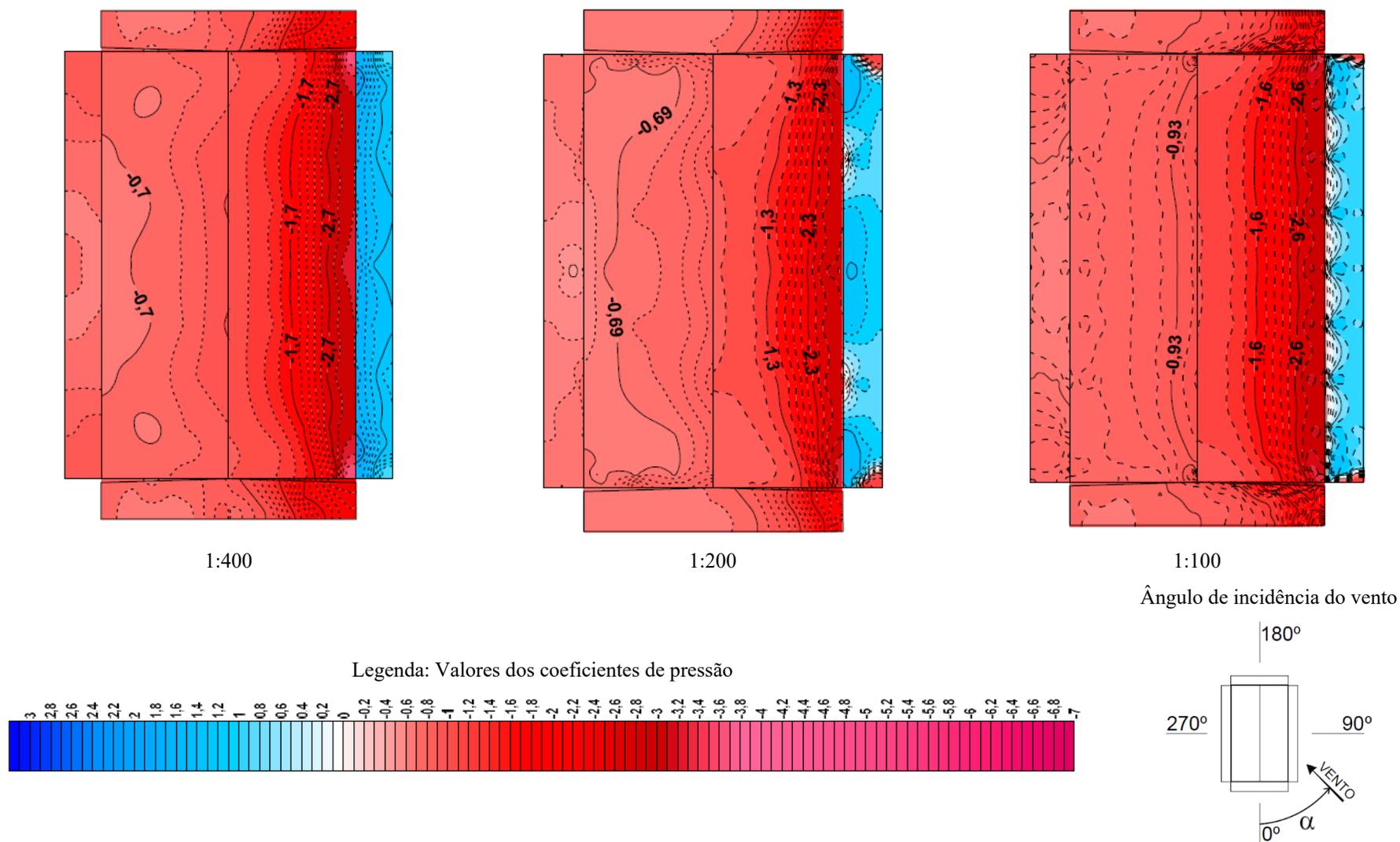
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 104 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios + 3,5RMS] para ângulo 75°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

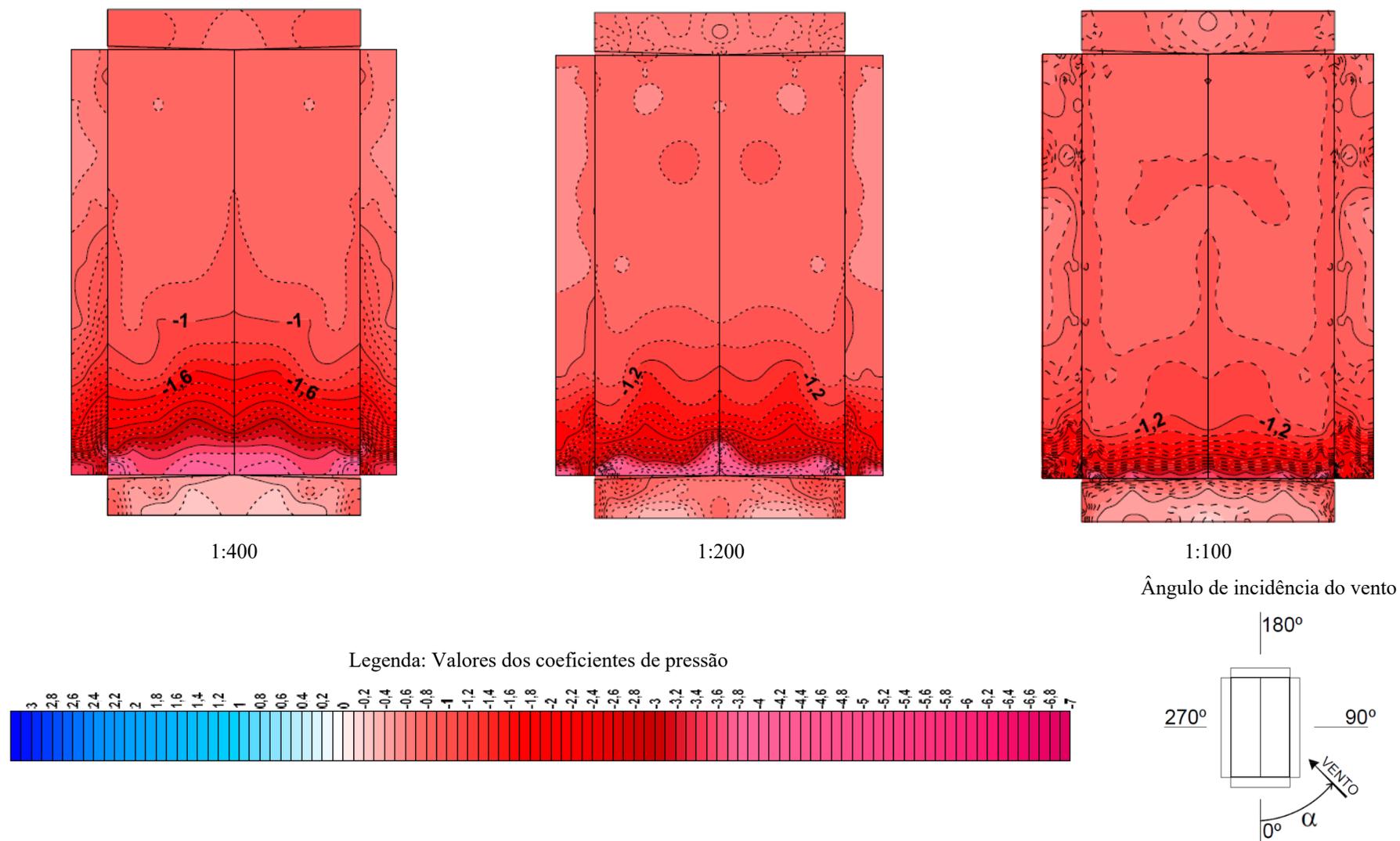
Figura 105 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais [Médios + 3,5RMS] para ângulo 90°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

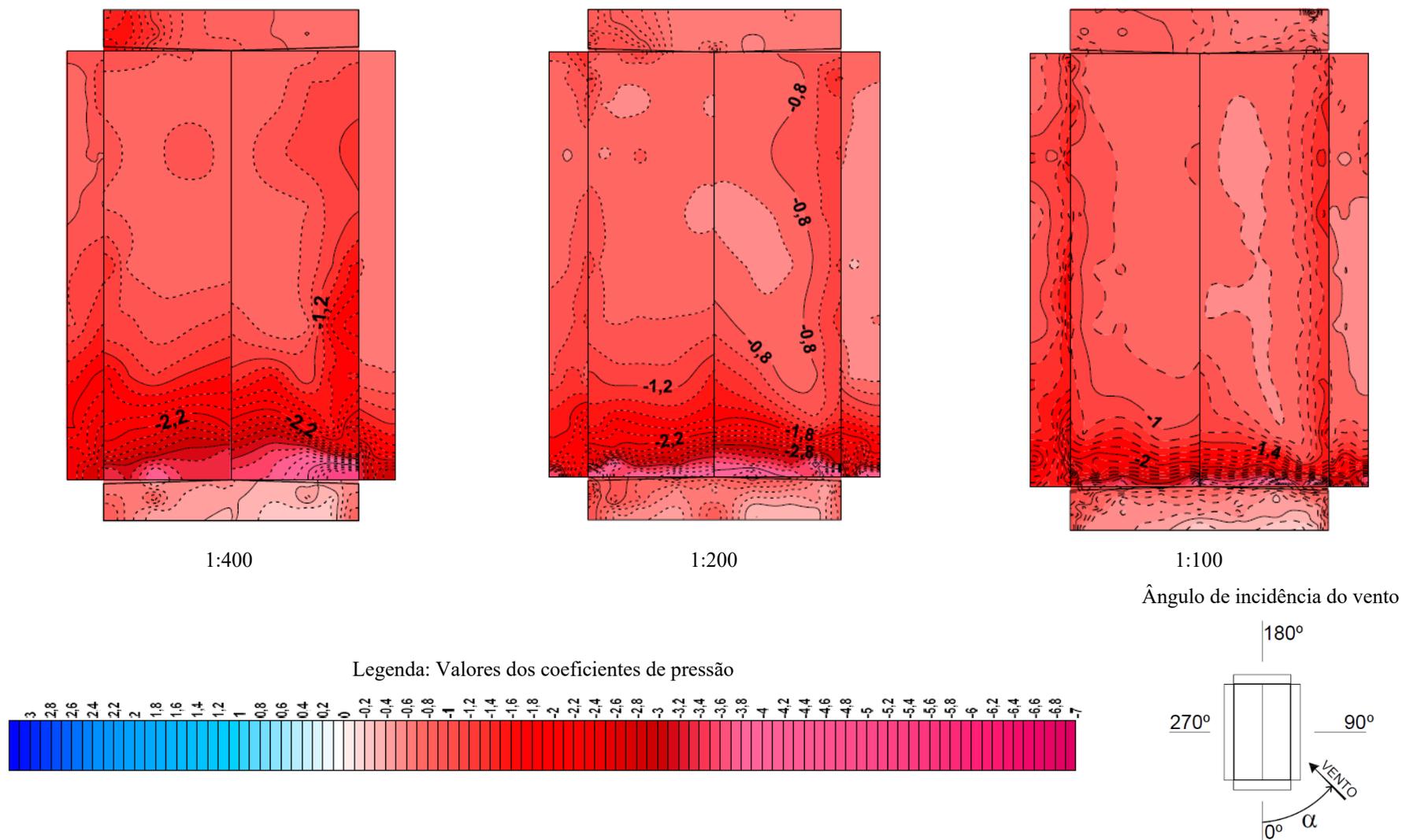
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 106 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Mínimo] para ângulo 0°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

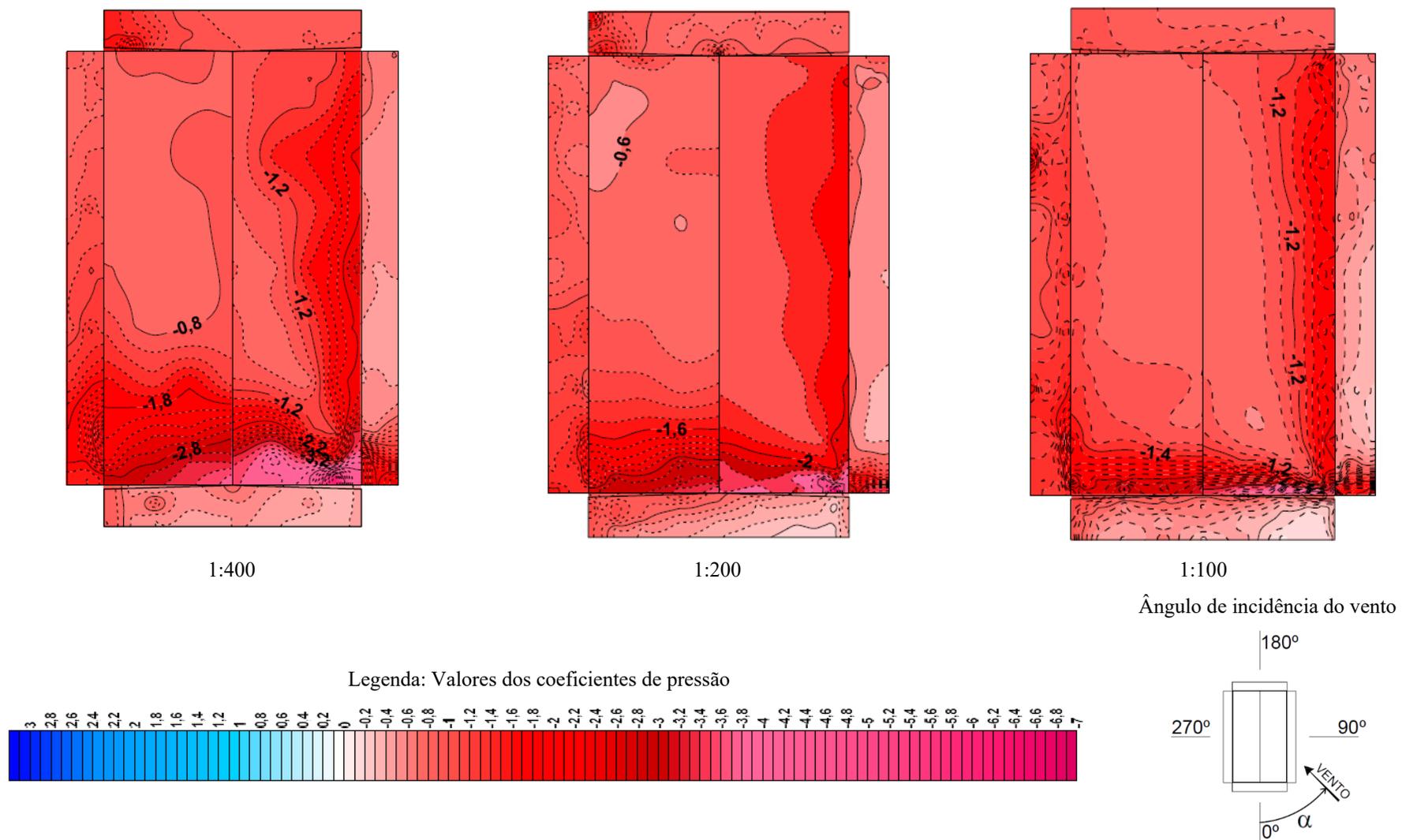
Figura 107 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Mínimo] para ângulo 15°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

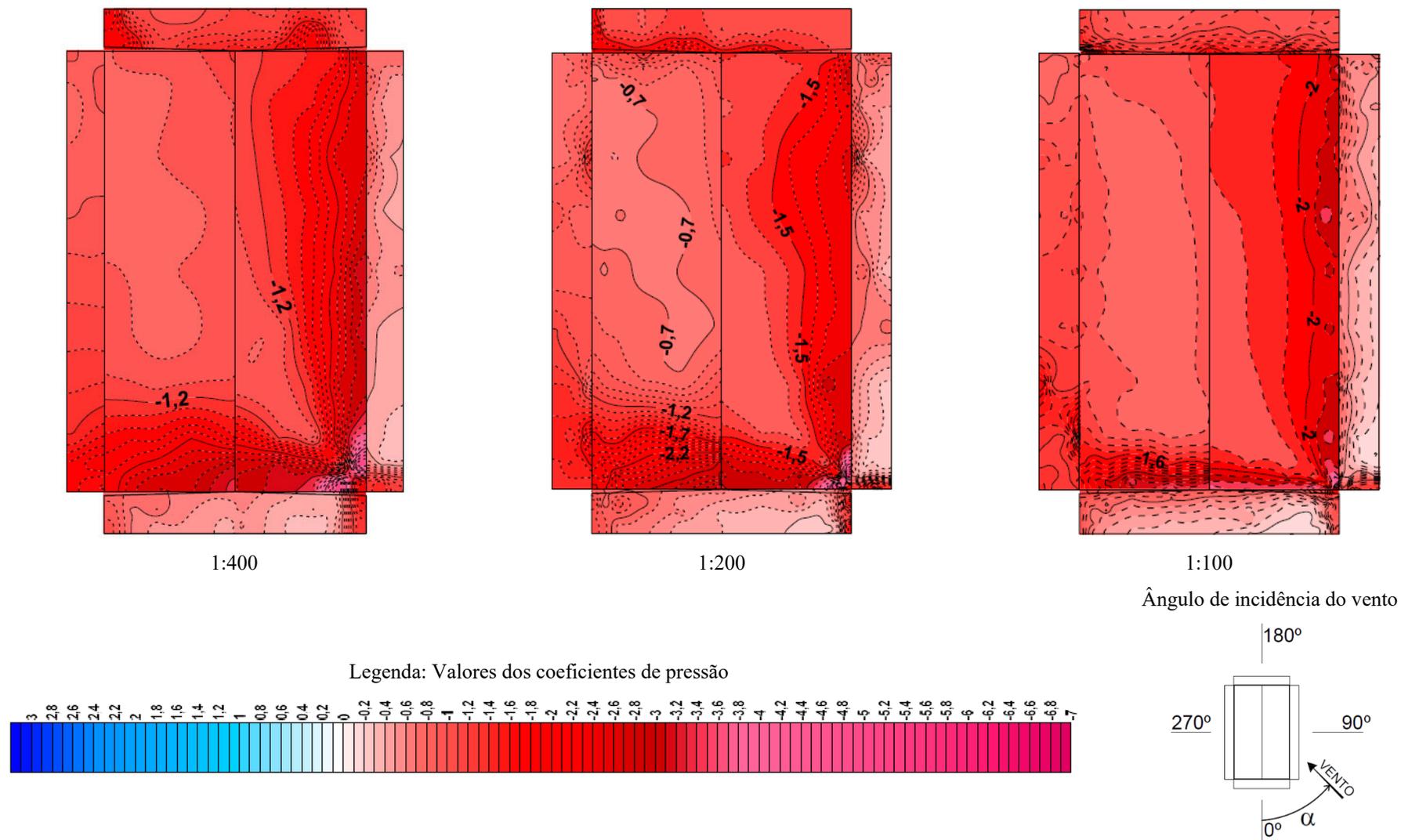
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 108 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Mínimo] para ângulo 30°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

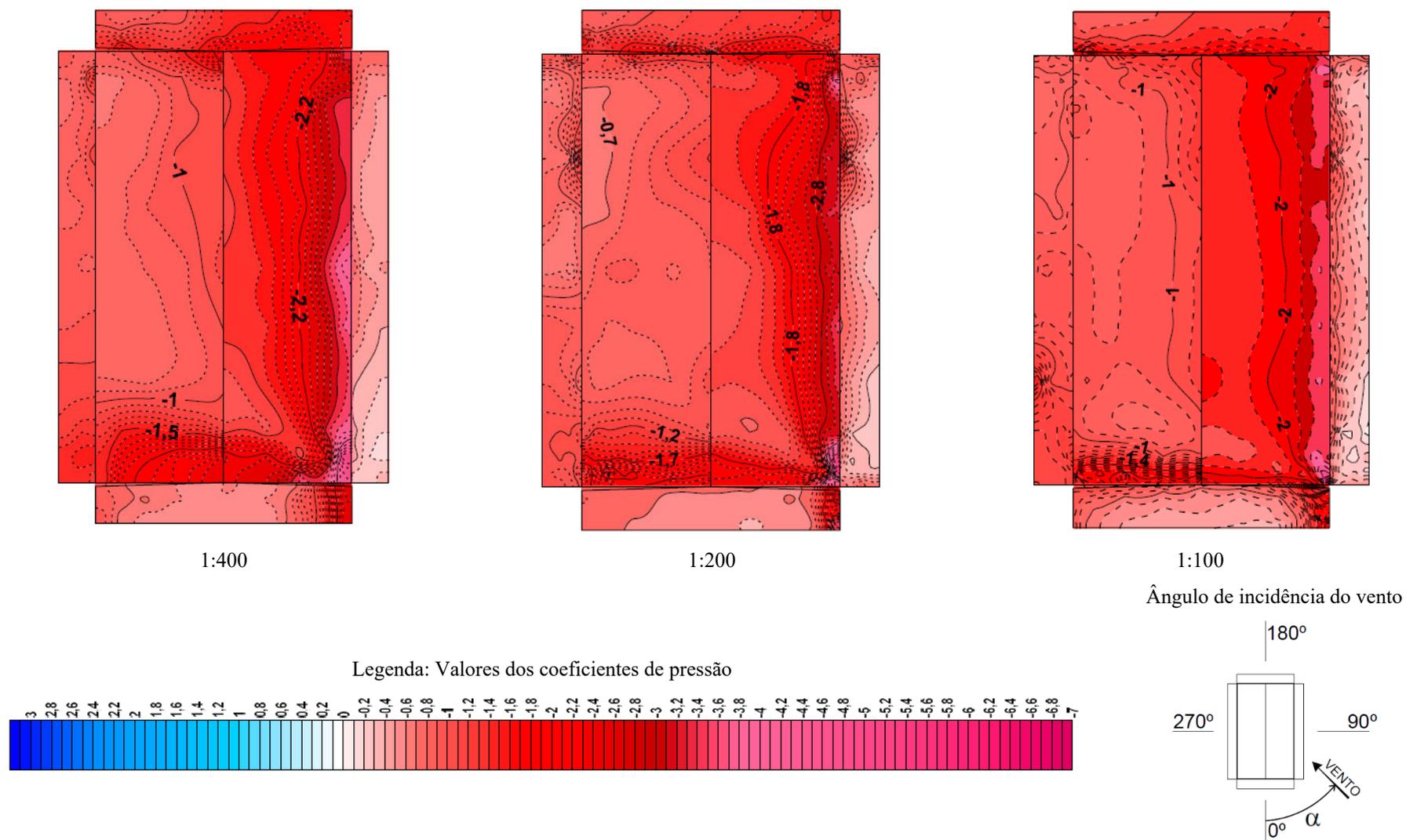
Figura 109 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Mínimo] para ângulo 45°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

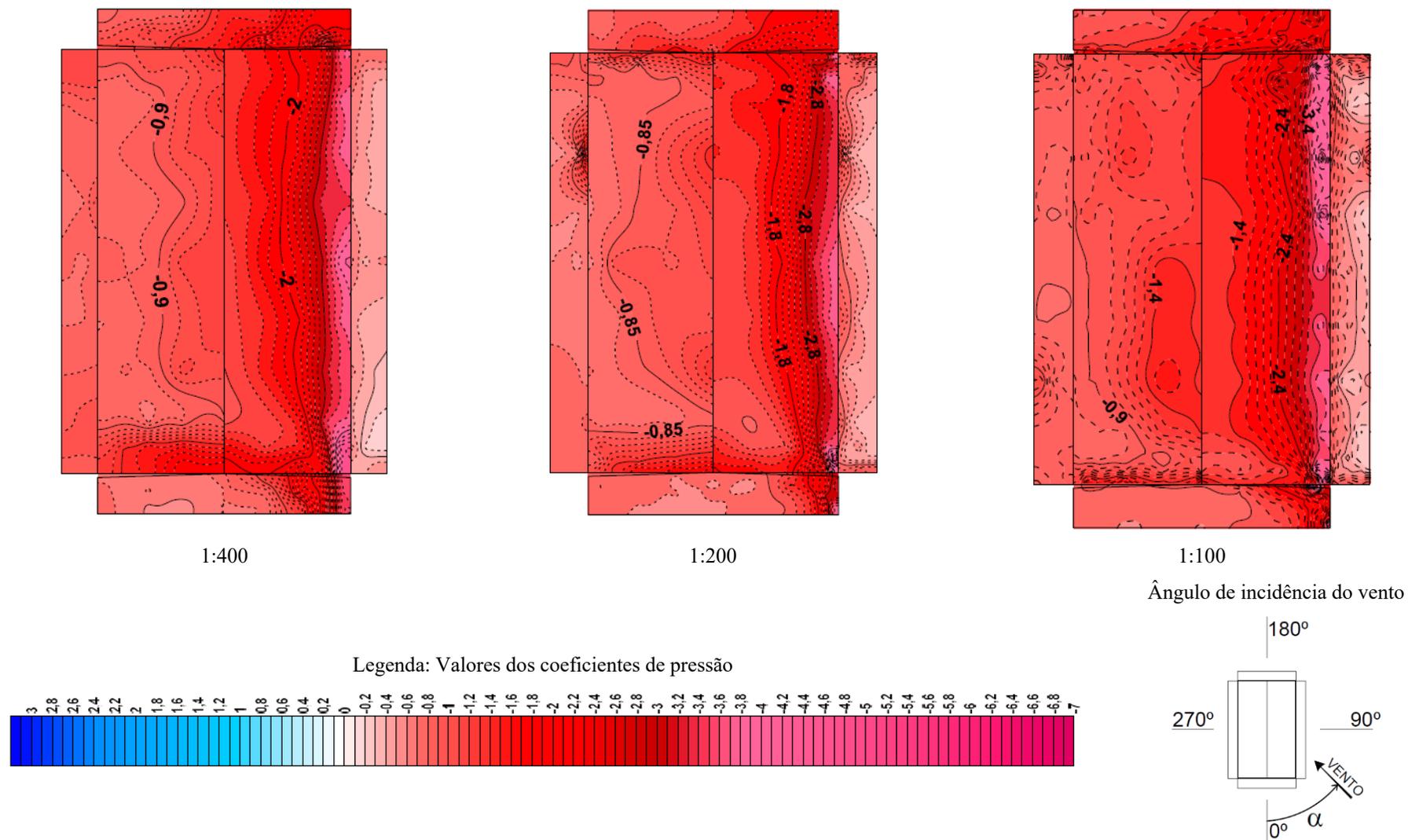
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 110 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Mínimo] para ângulo 60°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

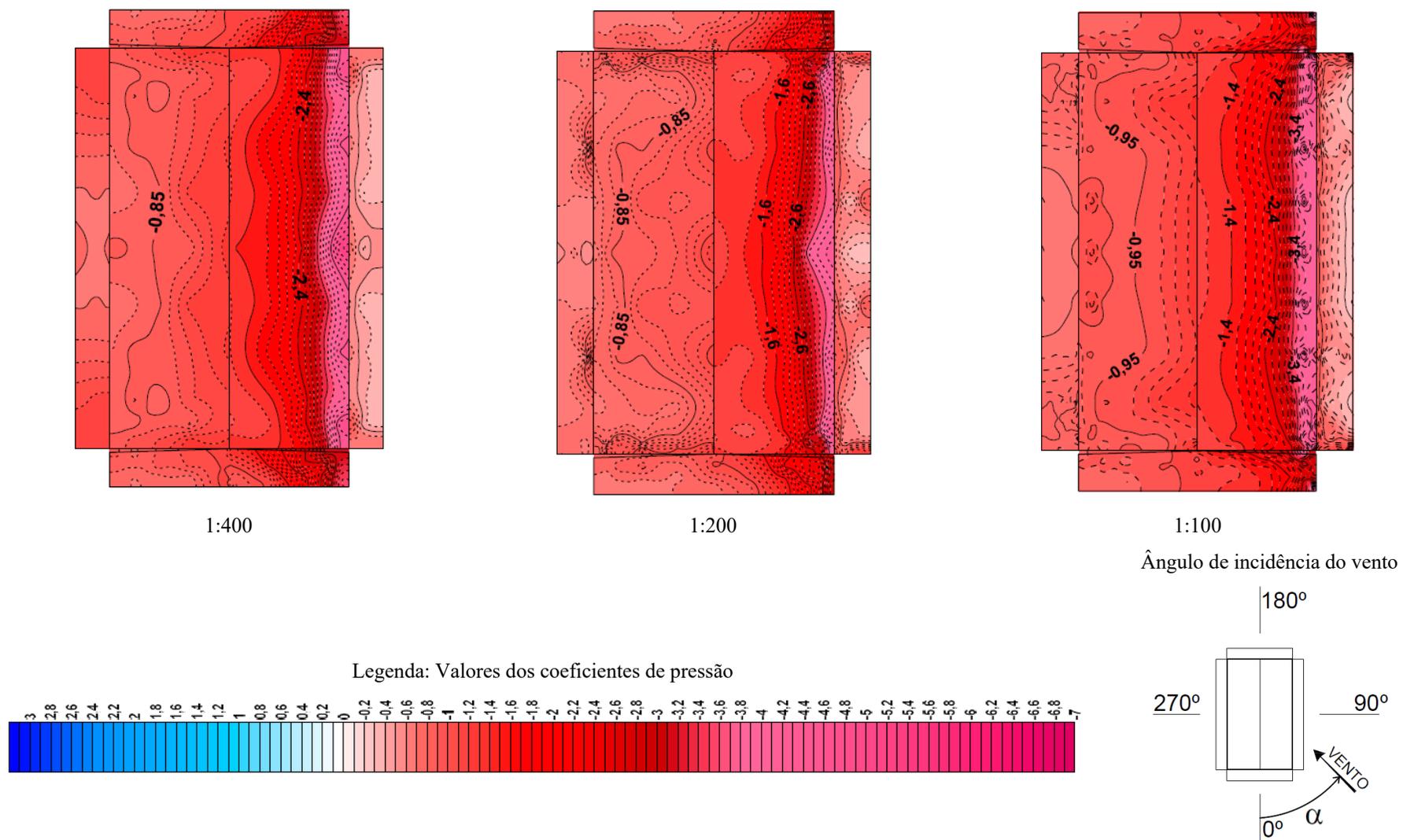
Figura 111 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Mínimo] para ângulo 75°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

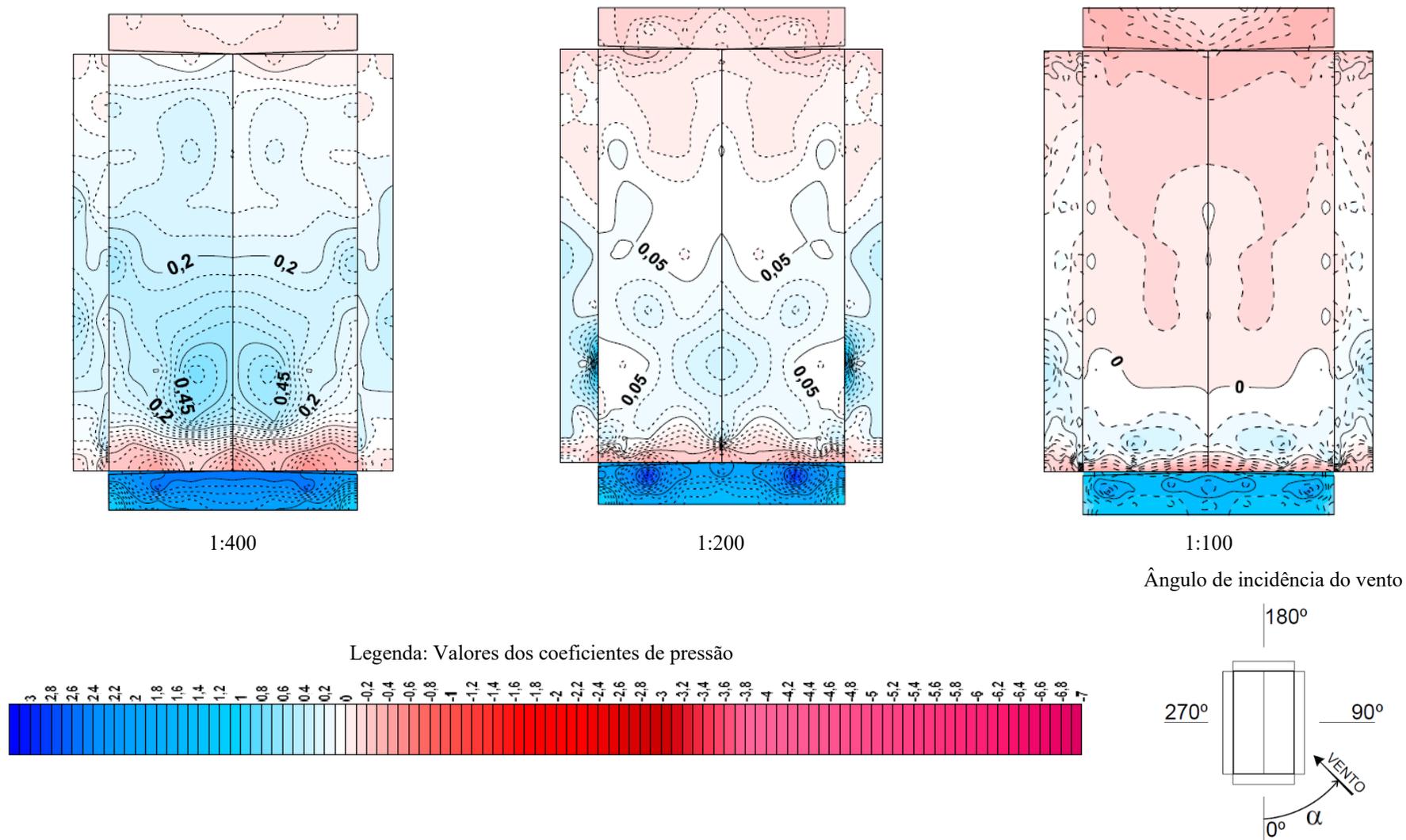
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 112 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Mínimo] para ângulo 90°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

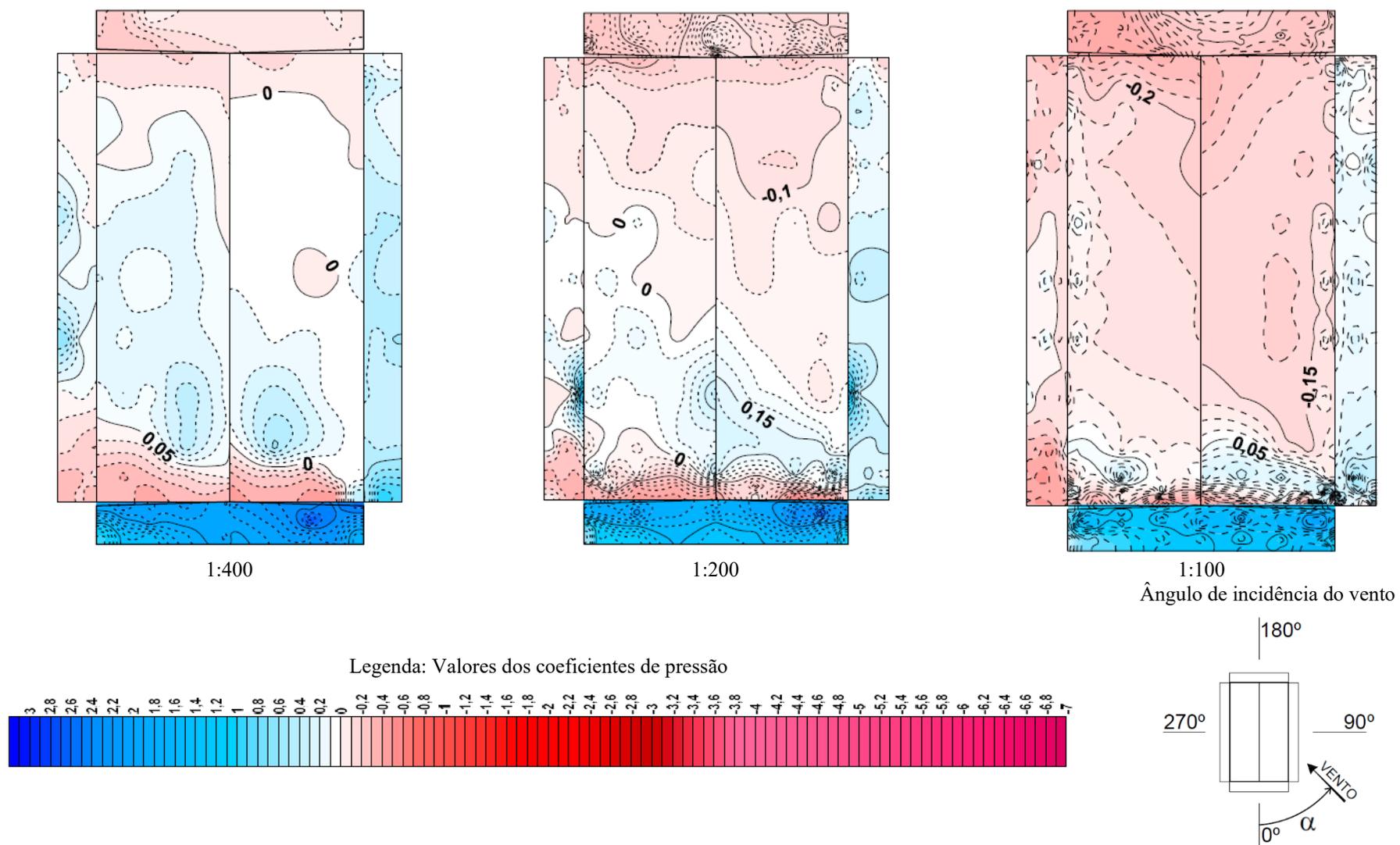
Figura 113 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Máximo] para ângulo 0°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

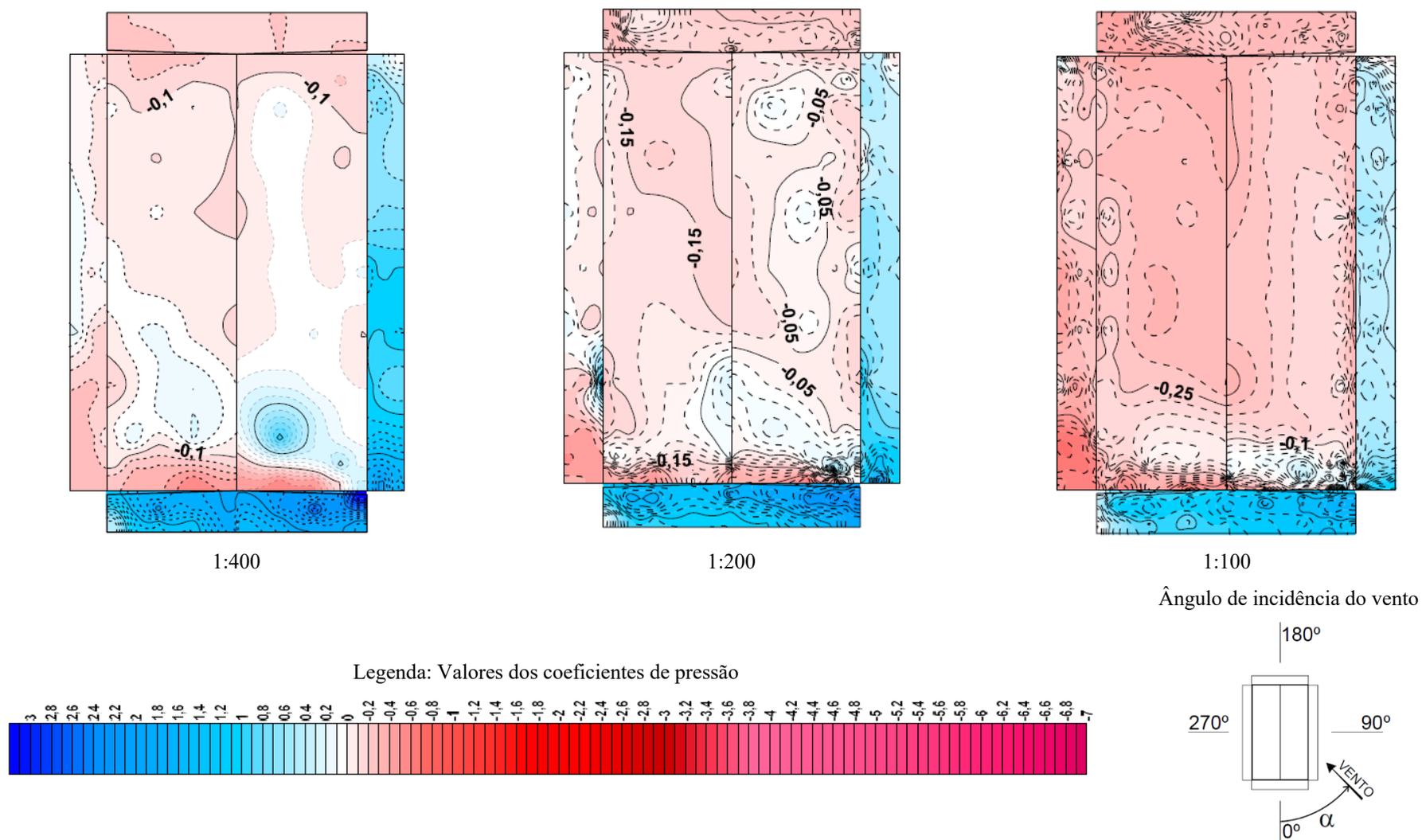
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 114 – Distribuição dos coeficientes de pressão locais de [Pico Máximo] para ângulo 15°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

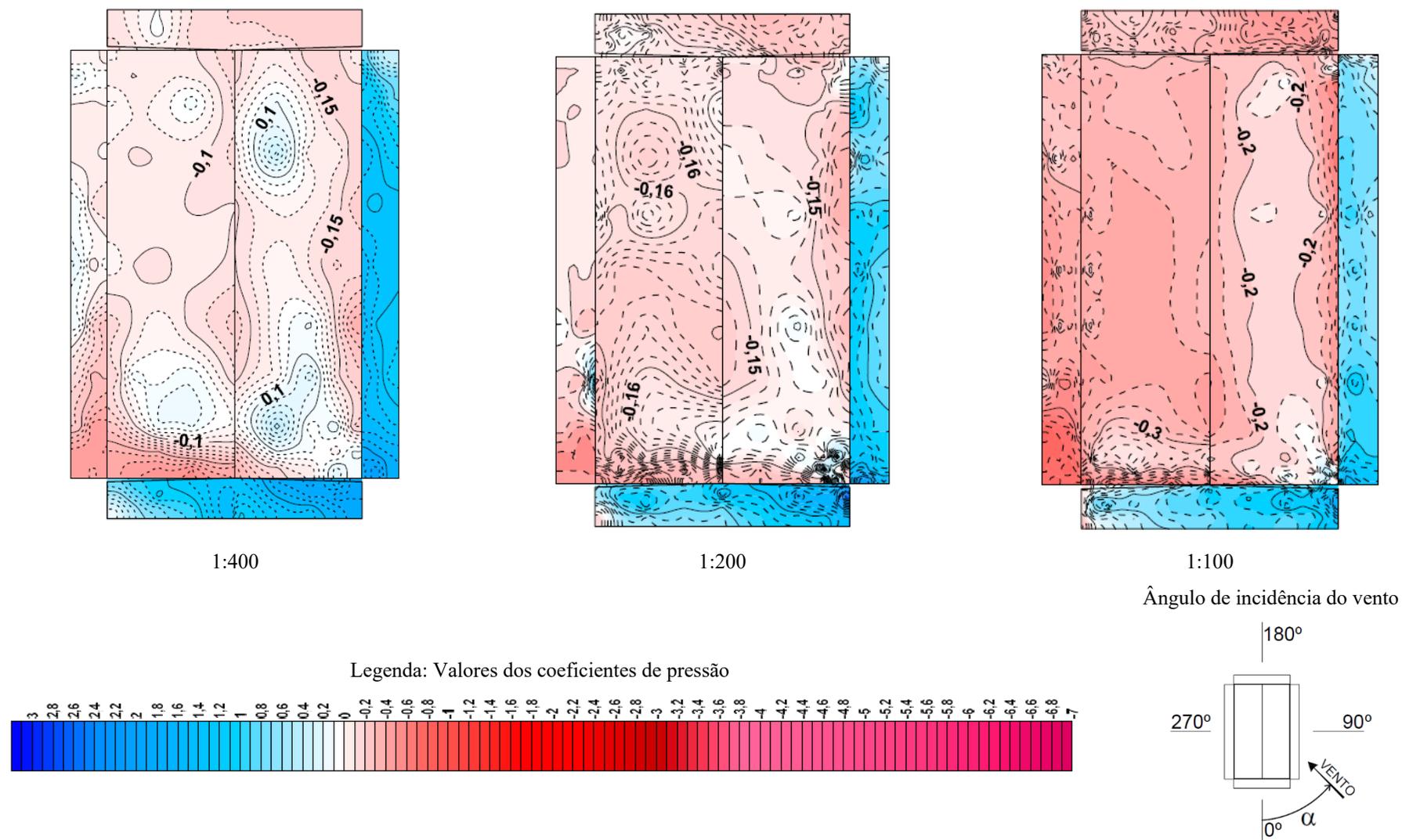
Figura 115 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Máximo] para ângulo 30°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

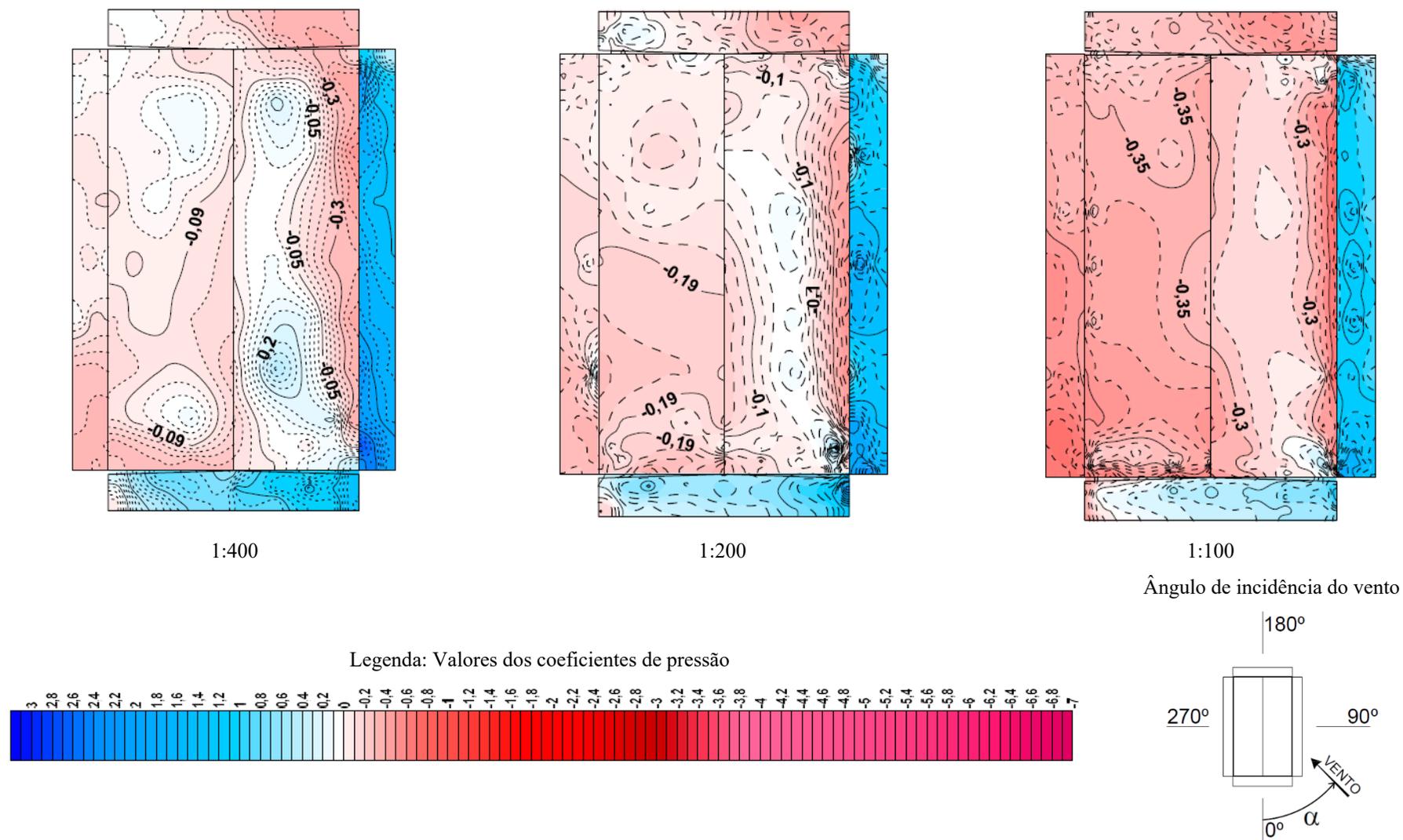
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 116 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Máximo] para ângulo 45°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

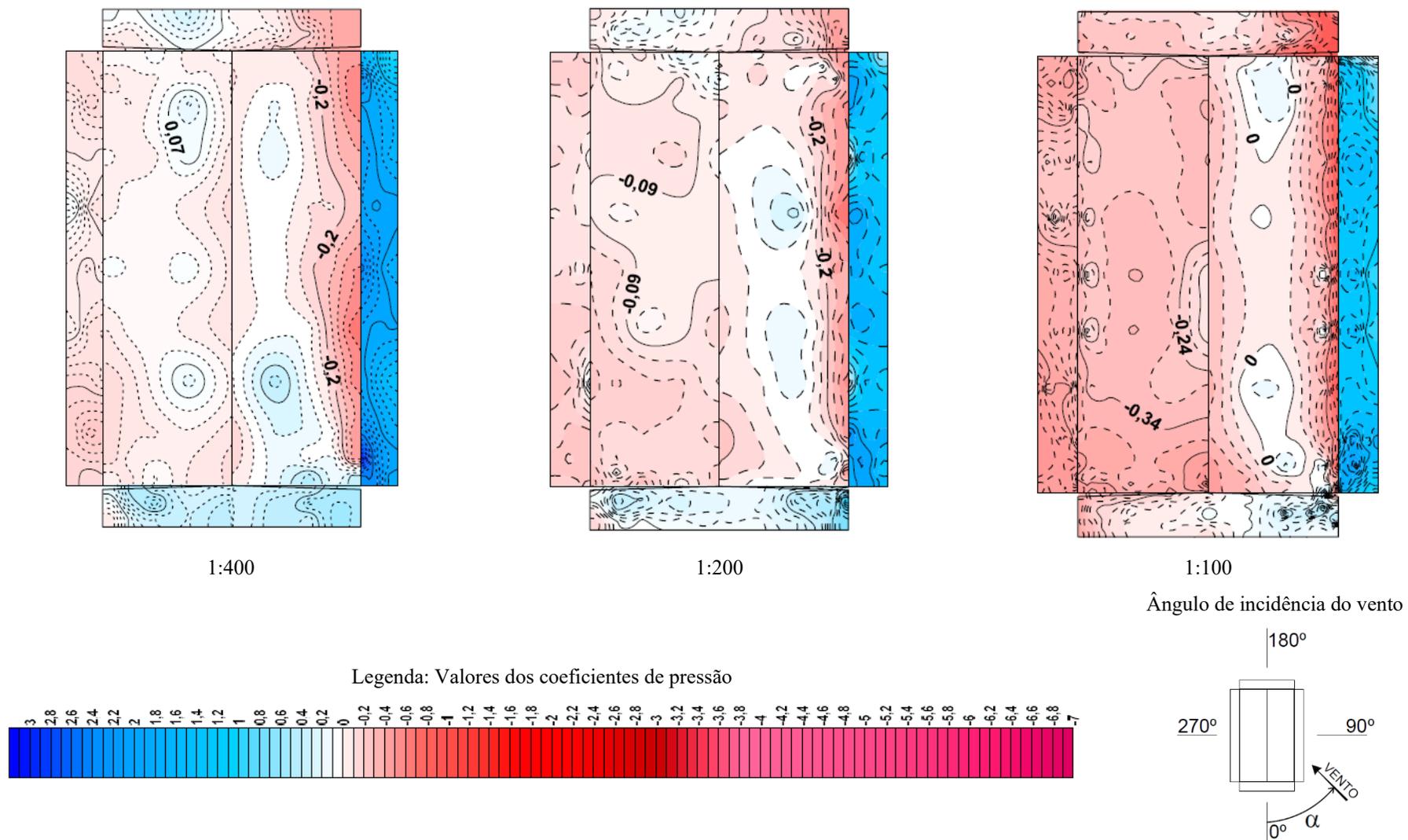
Figura 117 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Máximo] para ângulo 60°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

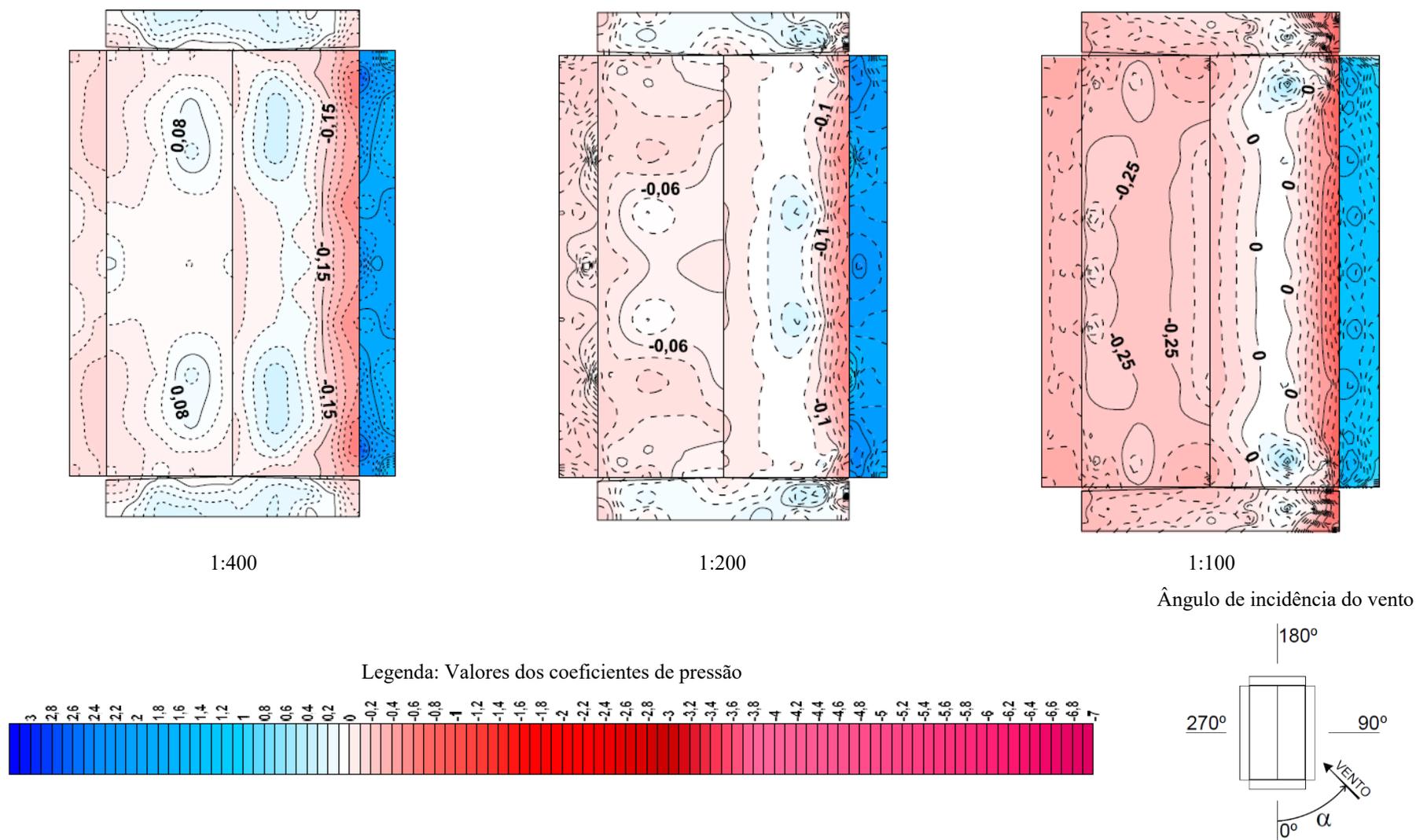
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 118 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Máximo] para ângulo 75°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Figura 119 – Distribuição dos coeficientes de pressão externa locais de [Pico Máximo] para ângulo 90°



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

5.2.3 Análise dos resultados

Analisando-se os coeficientes de pressão externa locais representados no grupo A (figuras 71 a 91) e no grupo B (figuras 92 a 119) têm-se as considerações e comentários para as sobrepressões e sucções descritos a seguir.

Em todos conjuntos de coeficientes de pressões médios, médios +3,5 RMS, picos máximos e picos mínimos para ângulos na direção 0° (figuras 71, 78, 85, 92, 99, 106 e 113), 15° (figuras 72, 79, 86, 93, 100, 107 e 114), 30° (figuras 73, 80, 87, 94, 101, 108 e 115), são identificadas reduções tanto nas sucções como sobrepressões de telhados e sucções de paredes para as escalas geométricas 1:400 em relação a 1:200 e 1:100. Entretanto, nos ângulos 45° (figuras 74, 81, 88, 95, 102, 109 e 116), 60° (figuras 75, 82, 89, 96, 103, 110 e 117), 75° (figuras 76, 83, 90, 97, 104, 111 e 118) e 90° (figuras 77, 84, 91, 98, 105, 112 e 119) nota-se pequenos acréscimos graduais dos coeficientes de pressão de acordo com o aumento da escala geométrica utilizada no ensaio.

E, para alguns casos principalmente em coeficientes médios e (médios + 3,5RMS) com ângulos de 30°, 45° e 60°, da escala 1:200 (figuras 80, 81 e 82) são observados valores próximos dos coeficientes de pressão da escala 1:100 (figura 87, 88 e 89) sendo alguns coeficientes inclusive maiores na escala 1:100 em relação à 1:200. Mas, na grande maioria os coeficientes da escala 1:200 e 1:100 são menores aos da escala 1:400 (figuras 73, 74 e 75). Estes resultados também podem ser vistos nas figuras 94, 95 e 96 para coeficientes médios a 30°, 45° e 60° respectivamente. Para coeficientes médios + 3,5 RMS pode ser visto pelas figuras 101, 102 e 103 para ângulos a 30°, 45° e 60° respectivamente.

Entretanto, é importante ressaltar que não foi feito a correção do efeito de bloqueio, possibilitando ocorrer aumento das pressões na escala 1:100 devido efeitos secundários decorrentes da interação com as paredes do túnel. A escala 1:100 serve para comparativo de efeitos secundários (bloqueio alto), fora da escala do túnel, mas, foi realizado desta forma para identificar as distorções das pressões em relação a escala.

Por outro lado, a escala 1:400 e 1:200 serve para comparar os resultados dos coeficientes de pressão porque o vento simulado no túnel de vento é próximo dessa escala: 1:200 a 1:400. Por essa razão, os resultados dos coeficientes de pressão da escala 1:400 e 1:200 reinteram o exposto

por Alrawasdeh e Stathopoulos (2015) que dizem que as pressões dependem da geometria e das dimensões da edificação, podendo ocorrer recolamentos em paredes e telhados de grandes dimensões implicando na redução das magnitudes de pressões ao longo do comprimento do pavilhão.

Foi observado que a distribuição das sobrepressões em paredes independem do ângulo de atuação do vento. Sendo assim, para todos os conjuntos de coeficientes médios, (médio + 3,5 RMS) e picos máximos verifica-se uma pequena redução na medida que são consideradas escalas geométricas maiores como 1:200 e 1:100.

Em relação aos picos máximos de coeficientes de pressões positivas nas paredes foi observado pelas figuras 71, 77, 78, 84, 85, 91, 92, 98, 99, 105, 113 e 119 que ocorrem onde o vento é perpendicular a uma grande área correspondente a fachada de 60 metros e ou de 100 metros, compreendendo valores acima de +1,0.

No telhado denota-se através das isobáricas de pico máximo mostradas nas figuras 113 a 119 pequenas sobrepressões na escala 1:400 da ordem de no máximo +0,45 em pontos localizados, ocorrendo para ângulo de incidência do vento a 0° pela figura 113. Nas direções de 45° (figura 116) e 60° (figura 117) surgem valores de +0,10 a +0,20, e para demais ângulos praticamente não existe sobrepressão. Pelas figuras 113 a 119, na escala de 1:200 surgem sobrepressões em regiões localizadas do telhado com coeficientes inferiores a +0,15 e na escala 1:100 são praticamente zeradas. Em isobáricas de coeficientes médios e (médios +3,5RMS) para telhado mostrado nas figuras 92 a 98 e 99 a 105 respectivamente também não são constatadas sobrepressões.

Analisando os apontamentos citados sobre as curvas isóbaras, admite-se o estudo de Blessmann (2013a) quanto aos tamanhos dos turbilhões. Construções de menores dimensões como o pavilhão da escala 1:400 tem tendência a ser afetado na sua totalidade por uma força oriunda de um ou vários turbilhões de pequena dimensão, mas de alta velocidade. Portanto, ao passo que se aumentam as dimensões da edificação, esses pequenos turbilhões perdem a força, ou seja, se reduz a velocidade, minimizando-se assim o efeito dos vórtices e conseqüentemente as sucções.

Quando o vento age obliquamente, direções como 30° (figuras 73, 80, 87, 94, 101 e 108), 45° (figuras 74, 81, 88, 95, 102 e 109), 60° (figuras 75, 82, 89, 96, 103 e 110) por exemplo, existem

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

sucções elevadas nos cantos e arestas. As zonas de sucção que apresentam maiores valores são as de borda tanto em paredes como no telhado em regiões próximas às de barlavento independente do ângulo e tipo de conjunto de coeficientes de pressão (médio, médio + 3,5 RMS e pico mínimo). Regiões de arestas possuem pequenas áreas, mas sucções de magnitude elevada, reforçando o estudo de Holmes (2004) que por serem de pequenas dimensões, estão sujeitas a pressões maiores. Este resultado corrobora com o estudo de Blessmann (2013a) que vórtices (turbilhões) mesmo sendo pequenos agindo de forma desordenada podem atingir pequenas áreas implicando em um local propenso a arrancamentos.

5.3 COMPARATIVO: RESULTADOS NORMATIVOS E EXPERIMENTAIS

A seguir é mostrado a metodologia utilizada na obtenção das pressões externas locais de sobrepressão e de sucção obtidas por meio de ensaios em túnel de vento comparando-as às pressões determinadas utilizando os procedimentos das normas técnicas.

5.3.1 Processamento e resultados das pressões

Para representar as pressões externas locais positivas e negativas, utiliza-se a mesma configuração de distribuição e tamanho das zonas considerada nas especificações de cada um dos padrões normativos, porém incluindo também pressões obtidas experimentalmente para as tomadas de pressão compreendidas dentro da mesma área tributária estabelecida no método analítico.

Os valores de pressões externas locais decorrentes dos coeficientes experimentais nas escalas 1:400, 1:200 e 1:100 são determinadas pelo somatório de pressões das tomadas com suas respectivas áreas de contribuição localizadas dentro de cada zona setorizada.

As pressões dinâmicas consideradas para gerar as pressões locais experimentais são as mesmas instituídas pelos métodos analíticos normativos levando em conta as máximas velocidades médias com medições sobre durações de rajadas de (3s, 600s ou 3600s). A tabela 30 exibe as equações usadas na definição das pressões locais.

Obs. 1: Para a norma NBCC:2015 utilizou-se a pressão dinâmica sobre velocidade média máxima de 1 hora (3600 segundos) pelo fato de a norma dispor de coeficientes de pressão

externa local de pico, ou seja, coeficiente com fator de rajada incorporado. No entanto, para pressões experimentais são obtidos coeficientes médios sem fator de pico, por isso utilizou-se a pressão dinâmica sobre velocidade de 3 segundos. Desta forma, no cálculo das pressões com coeficientes de pico máximo e mínimo experimentais, é considerado pressão dinâmica sobre velocidade de 1 hora.

Tabela 30 – Equações de determinação da pressão devidas ao vento

Norma	Pressão \hat{P}			
NBR 6123:1988	$\hat{P} = \hat{q}_{3s} \bar{c}$	$\hat{P} = \bar{q}_{3600s}(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$	$\hat{P} = \bar{q}_{3600s}\hat{c}$	$\hat{P} = \bar{q}_{3600s}\check{c}$
NBCC:2015	$\hat{P} = \hat{q}_{3s} \bar{c}$	$\hat{P} = \bar{q}_{3600s}(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$	$\hat{P} = \bar{q}_{3600s}\hat{c}$	$\hat{P} = \bar{q}_{3600s}\check{c}$
ASCE/SEI 7-16:2016	$\hat{P} = \hat{q}_{3s} \bar{c}$	$\hat{P} = \bar{q}_{3600s}(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$	$\hat{P} = \bar{q}_{3600s}\hat{c}$	$\hat{P} = \bar{q}_{3600s}\check{c}$
EN-1991-1-4:2010 (Maior Valor)	$\hat{P} = \hat{q}_{600s} \bar{c}$	$\hat{P} = \bar{q}_{3600s}(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$	$\hat{P} = \bar{q}_{3600s}\hat{c}$	$\hat{P} = \bar{q}_{3600s}\check{c}$
EN-1991-1-4:2010 (0° e 90°)	$\hat{P} = \hat{q}_{600s} \bar{c}$	$\hat{P} = \bar{q}_{3600s}(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$	$\hat{P} = \bar{q}_{3600s}\hat{c}$	$\hat{P} = \bar{q}_{3600s}\check{c}$
AS/NZS1170.2:2011	$\hat{P} = \hat{q}_{3s} \bar{c}$	$\hat{P} = \bar{q}_{3600s}(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$	$\hat{P} = \bar{q}_{3600s}\hat{c}$	$\hat{P} = \bar{q}_{3600s}\check{c}$
Legenda:				
$\hat{q}_{3s} \bar{c}$	Coeficiente médio e pressão dinâmica de pico para máxima velocidade média sobre 3s.			
$\hat{q}_{600s} \bar{c}$	Coeficiente médio e pressão dinâmica de pico para máxima velocidade média sobre 600s (10 minutos).			
$\bar{q}_{3600s}(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$	Coeficiente médio + 3,5 coeficiente RMS (<i>root mean square</i>) e pressão dinâmica média para máxima velocidade média sobre 1 hora (3600s).			
$\bar{q}_{3600s}\hat{c}$	Coeficiente de pico máximo e pressão dinâmica média para máxima velocidade média sobre 1 hora (3600s).			
$\bar{q}_{3600s}\check{c}$	Coeficiente de pico mínimo e pressão dinâmica média para máxima velocidade média sobre 1 hora (3600s).			

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Para representar os conjuntos de pressões (médias, médias + 3,5 RMS, picos máximos e picos mínimos) foram gerados diagramas em formato planificado das paredes e da cobertura, incluindo-se a legenda da figura 120 para apresentação dos resultados por zona para cada escala geométrica de ensaio.

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 120 – Legenda de representação da pressão externa local

Legenda:

Pressões em kN/m ² - Norma e Túnel de Vento			
Norma	TV (1:400)	TV (1:200)	TV (1:100)
	$\hat{q}\bar{c}$	$\hat{q}\bar{c}$	$\hat{q}\bar{c}$
	$\bar{q}(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$	$\bar{q}(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$	$\bar{q}(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$
	$\bar{q}\hat{c}$ ou $\bar{q}\check{c}$	$\bar{q}\hat{c}$ ou $\bar{q}\check{c}$	$\bar{q}\hat{c}$ ou $\bar{q}\check{c}$

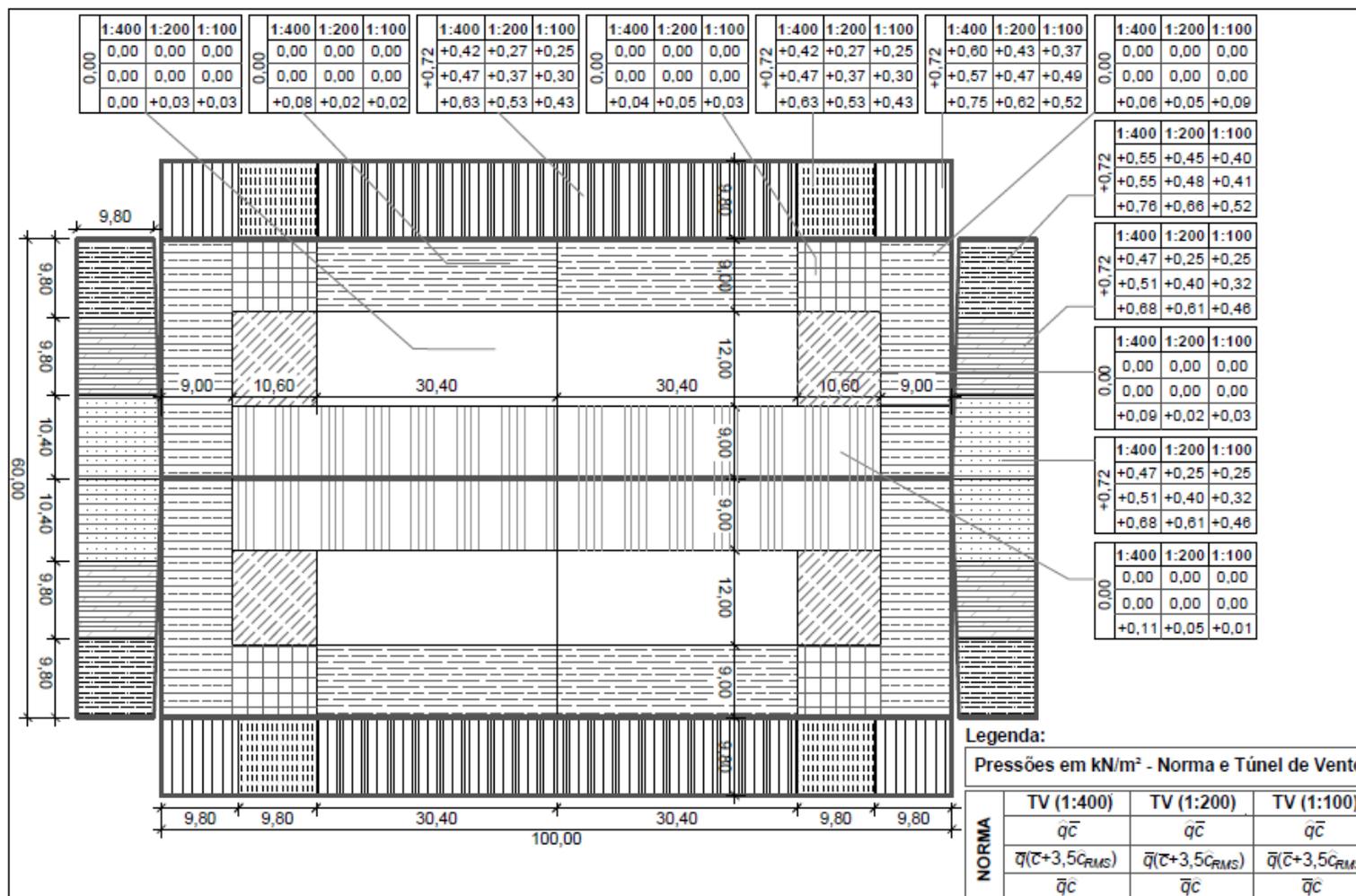
Fonte: elaborado pelo autor (2020).

A descrição de cada parâmetro que compõe as equações da legenda da figura 120 são as mesmas elencadas na tabela 30. Nas representações planificadas das pressões são exibidas as larguras de cada região em metros.

Destaca-se que as normas não estipulam pressões locais para todas as zonas setorizadas estabelecidas no procedimento. Por esta razão, zonas sem valor de coeficientes de pressão local adota-se a pressão de sobrepressão ou sucção com o maior valor do coeficiente de forma. Um exemplo disso, é a norma brasileira que dispõe de pressões locais somente para arestas de paredes, bordas de telhado e cumeeira e demais áreas aplicam-se os maiores valores das pressões com coeficientes de forma. Outro exemplo a ser citado é a NBCC:2015 que estabelece pressões externas locais diferentes somente para bordas de parede, bordas e cantos de telhados, sendo o restante da área de cobertura, fachada lateral e fachada de oitão sem discretizações das regiões e com mesmo valor de pressão.

Os valores das pressões locais externas de sobrepressões e sucções são exibidos nas figuras 121 e 122 para a ABNT NBR 6123:1988, nas figuras 123 e 124 para NBCC:2015, 125 e 126 para ASCE/SEI 7-16:2016, 127 e 128 para EN-1991-1-4:2010 (maior valor) , 129 e 130 para EN-1991-1-4:2010 (0° e 90°), 131 e 132 para AS/NZS 1170.2:2011. Valores com sinal positivo representam sobrepressões e sinal negativo sucções. Nestas figuras também estão inseridas as cotas de cada zona em metros determinada pelo respectivo procedimento normativo.

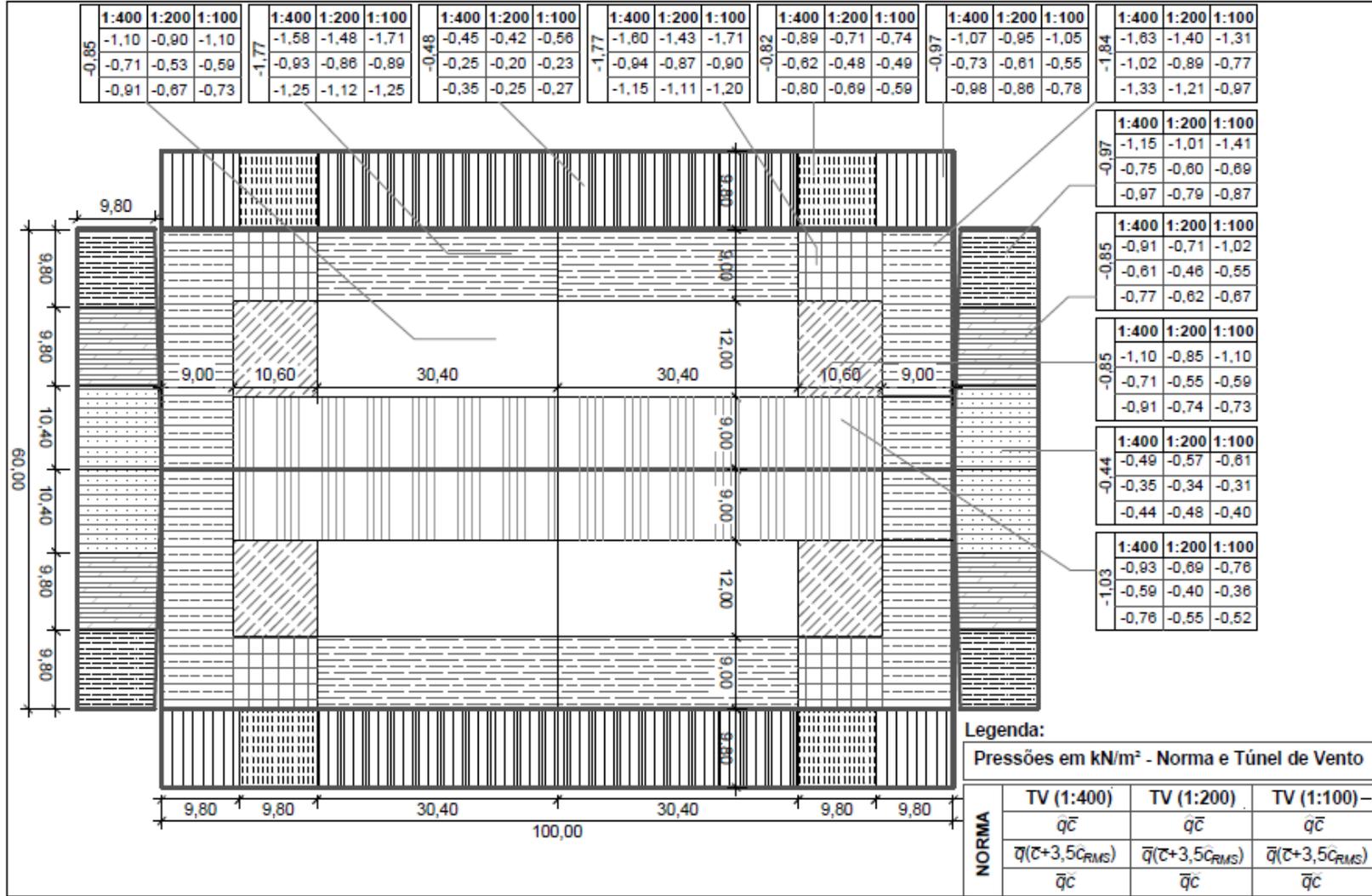
Figura 121 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES] nas paredes e telhado – NBR 6123:1988 e Túnel de Vento. Dimensões em metros



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

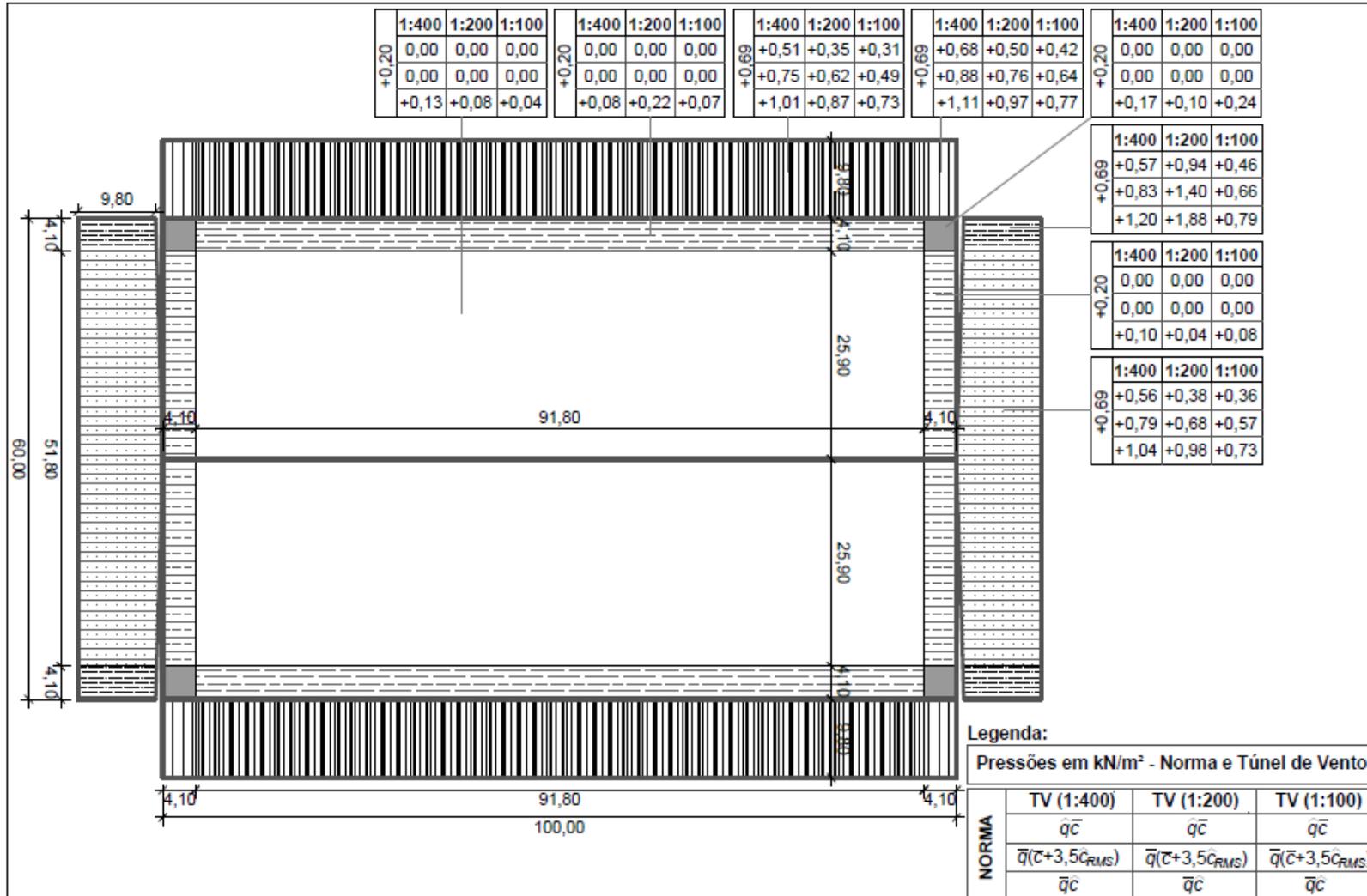
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 122 – Pressões externas locais [SUCÇÕES] nas paredes e telhado – NBR 6123:1988 e Túnel de Vento. Dimensões em metros



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

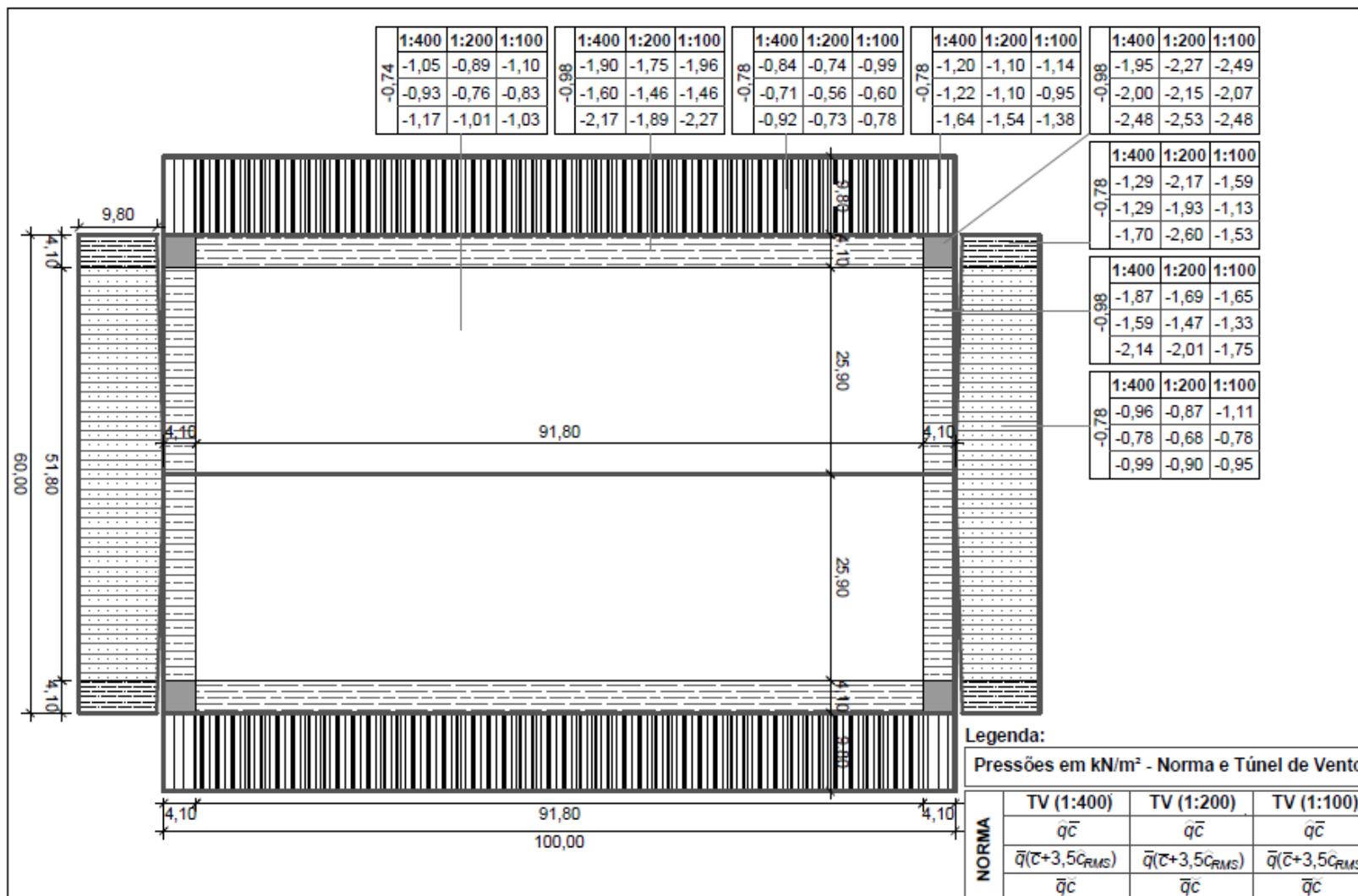
Figura 123 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES] nas paredes e telhado – NBCC:2015 e Túnel de Vento. Dimensões em metros



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

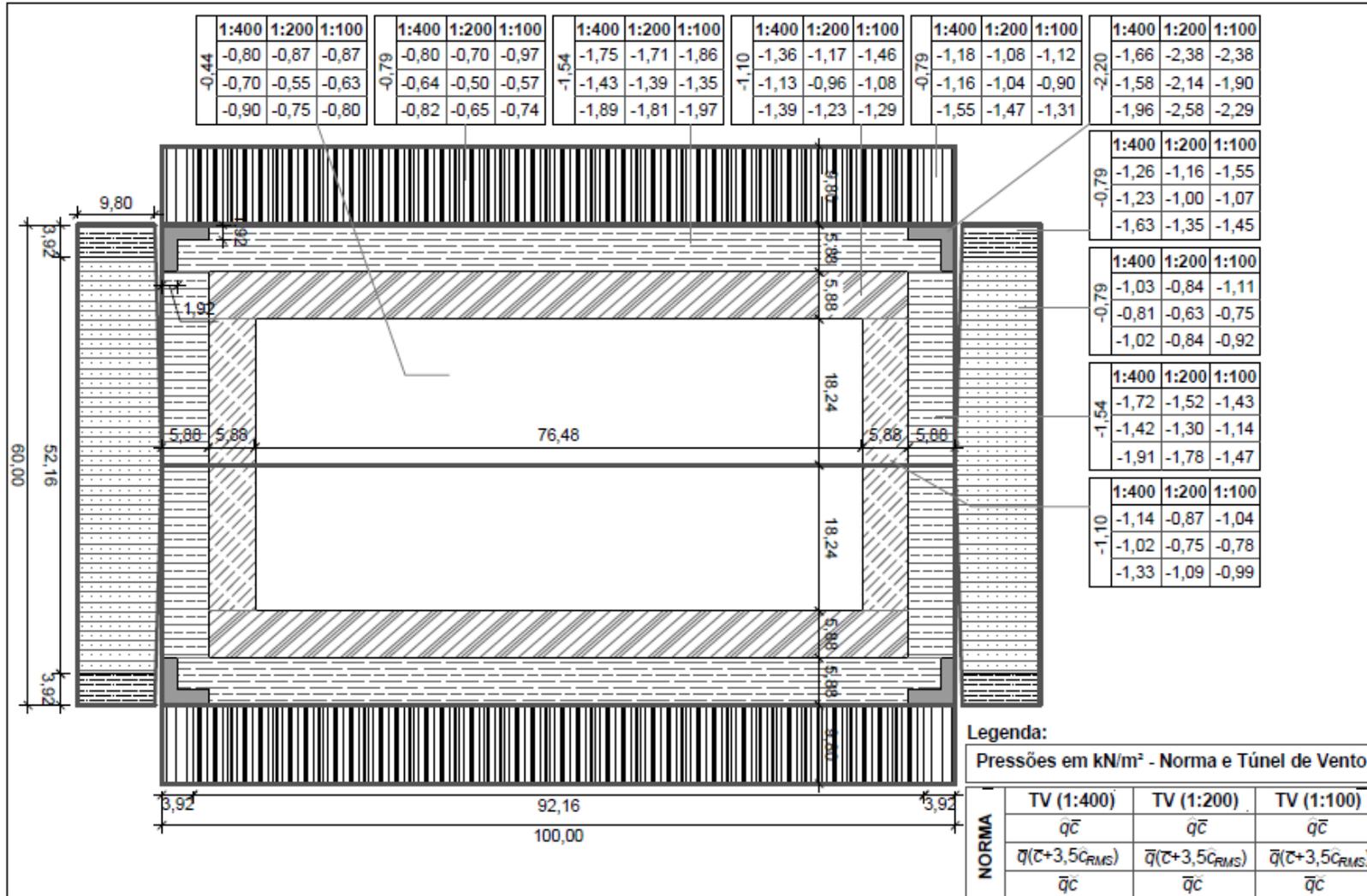
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 124 – Pressões externas locais [SUCCÕES] nas paredes e telhado – NBCC:2015 e Túnel de Vento. Dimensões em metros



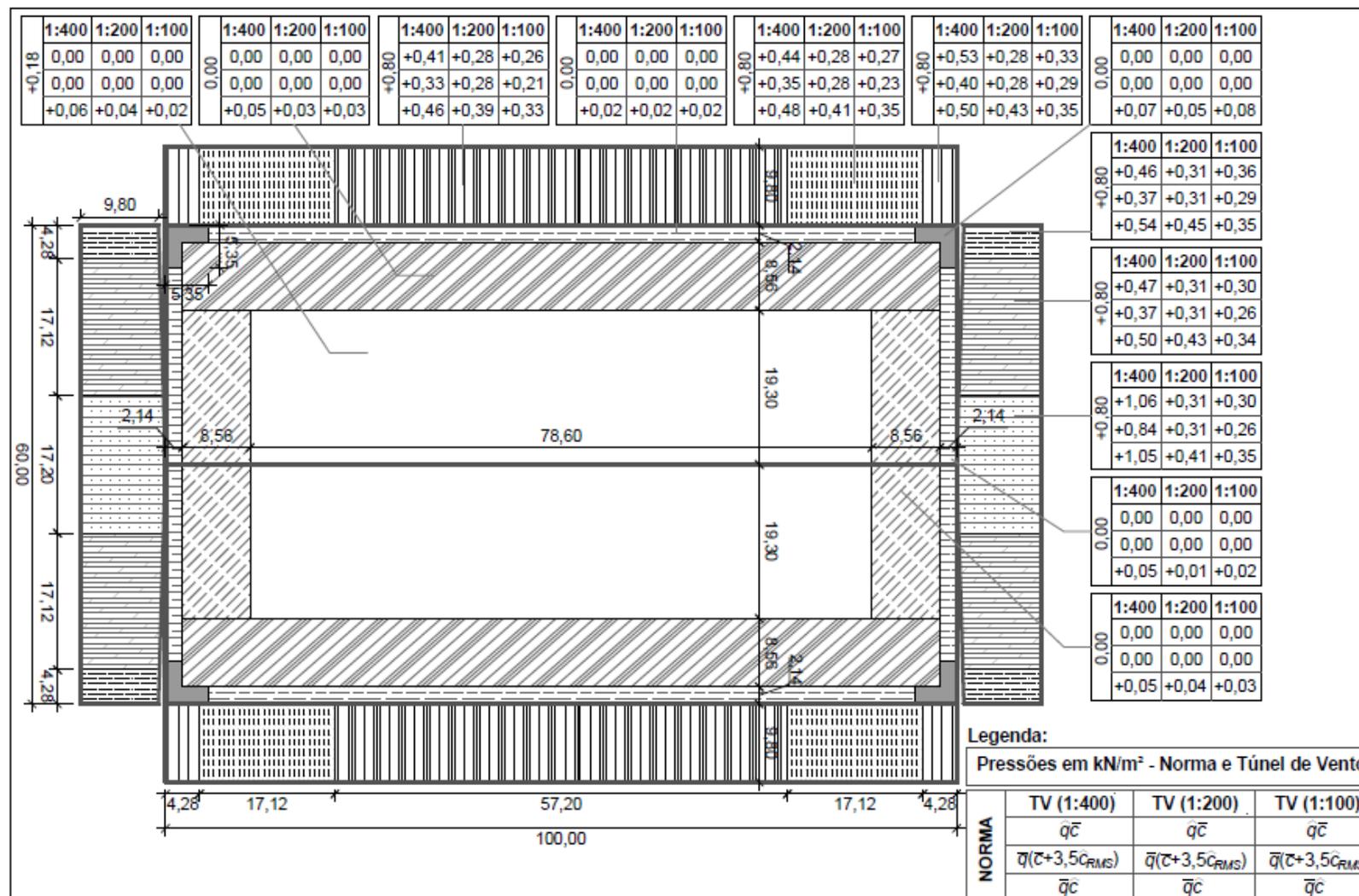
Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Figura 126 – Pressões externas locais [SUCCÕES] nas paredes e telhado – ASCE/SEI 7-16:2016 e Túnel de Vento. Dimensões em metros



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

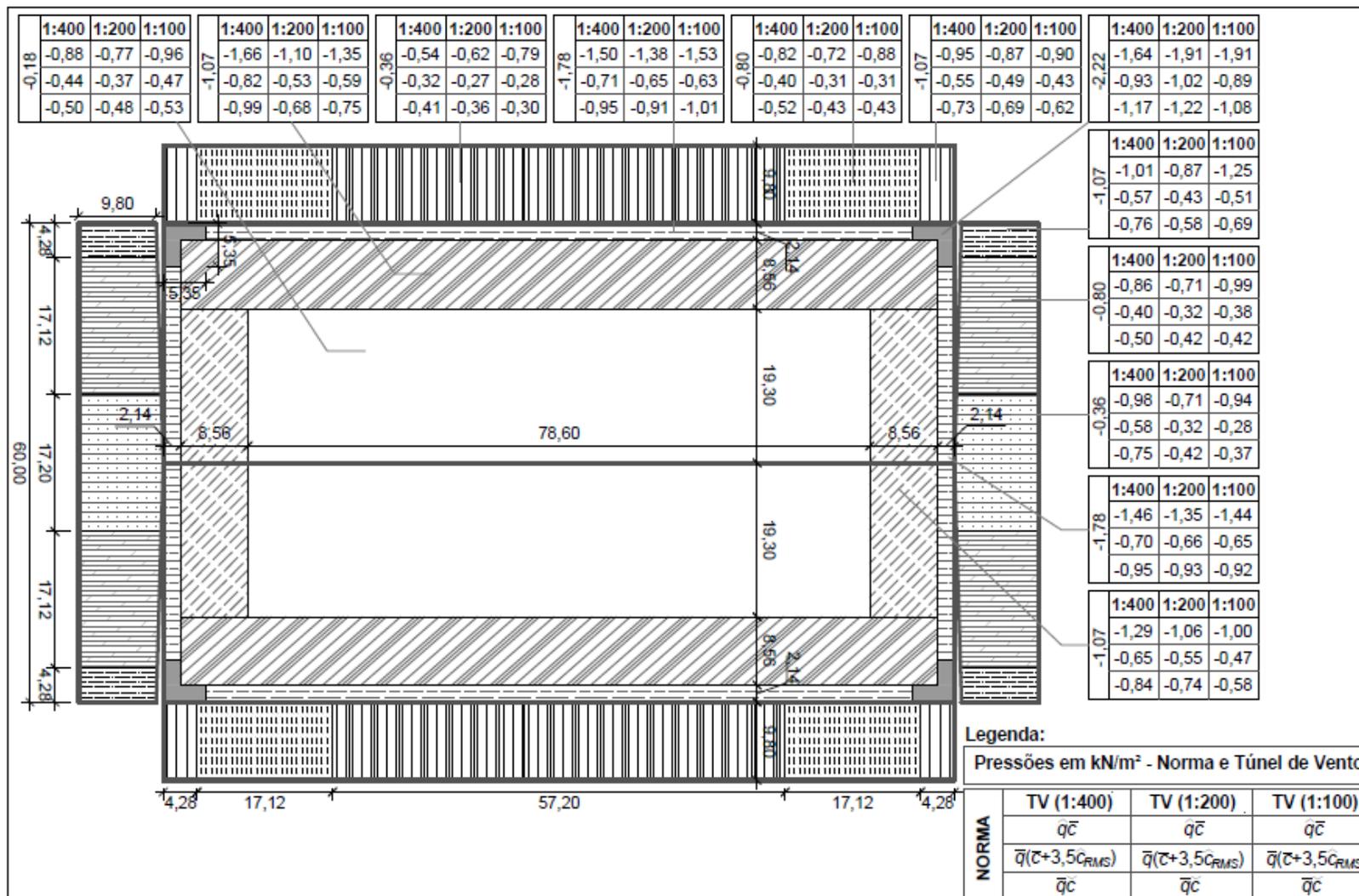
Figura 127 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES] nas paredes e telhado – EN 1991-1-4:2010 (Maior Valor) e Túnel de Vento. Dimensões em metros



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

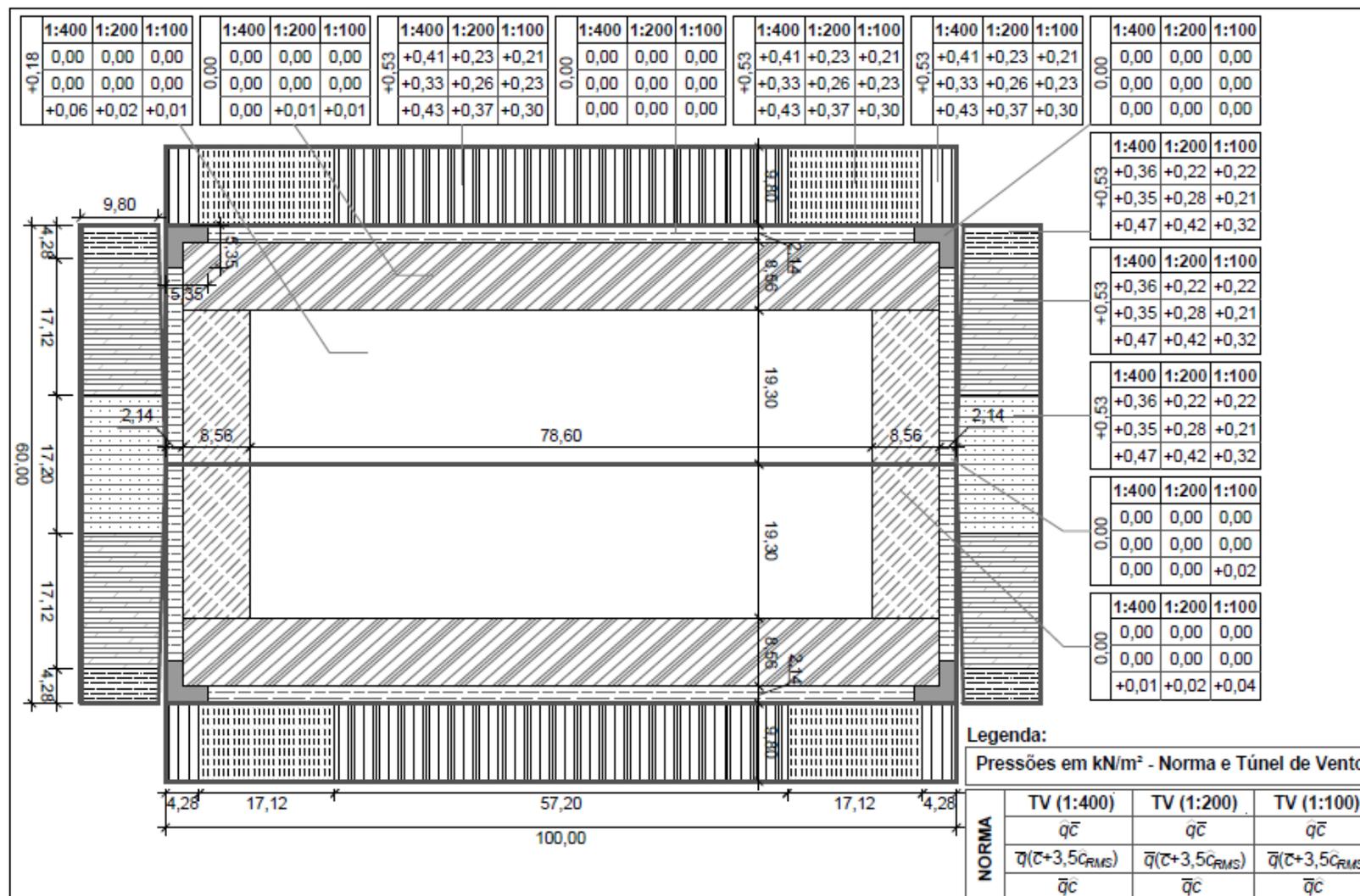
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 128 – Pressões externas locais [SUCCÕES] nas paredes e telhado – EN 1991-1-4:2010 (Maior Valor) e Túnel de Vento. Dimensões em metros



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

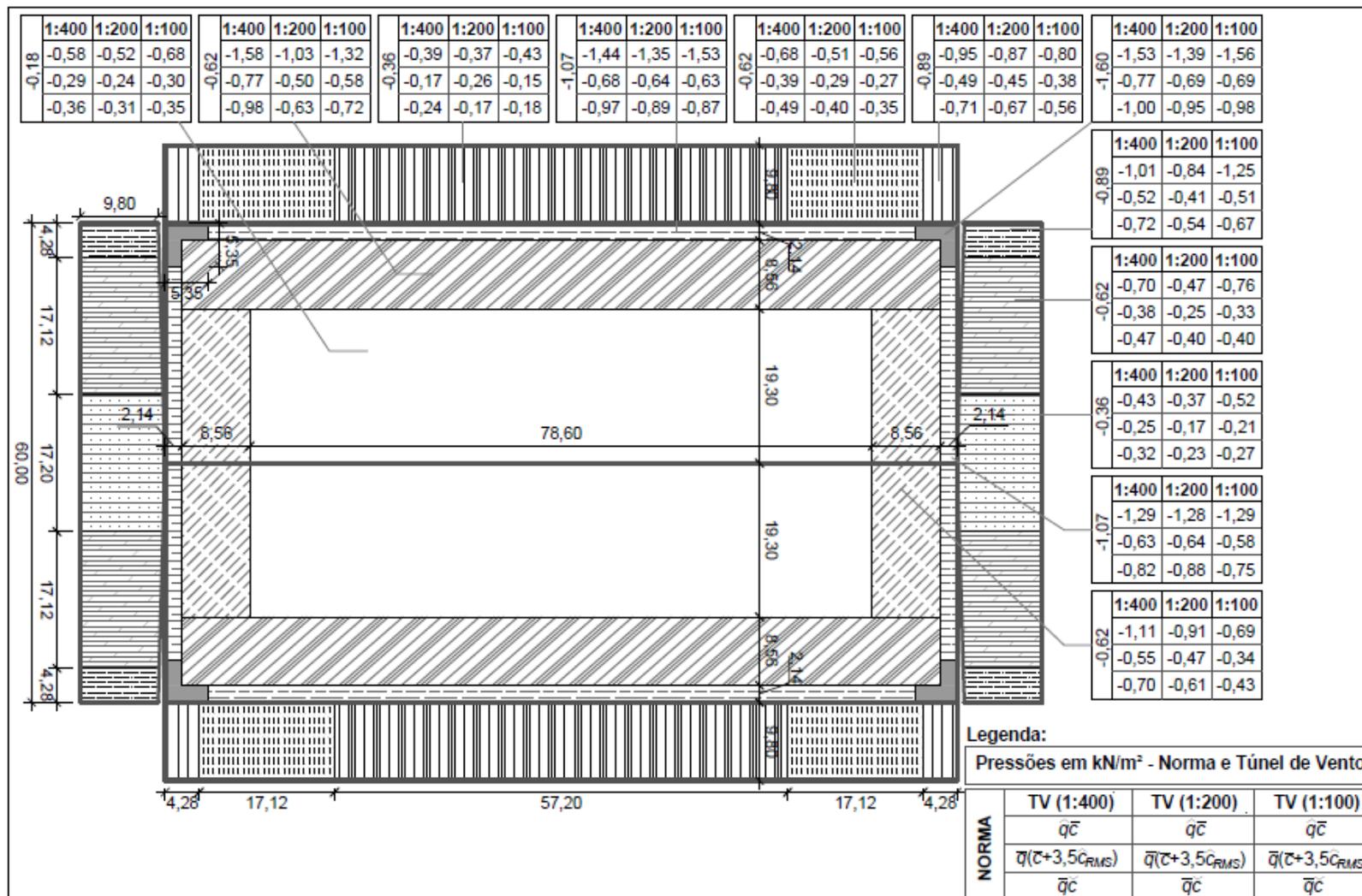
Figura 129 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES] nas paredes e telhado – EN 1991-1-4:2010 (0° e 90°) e Túnel de Vento. Dimensões em metros



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

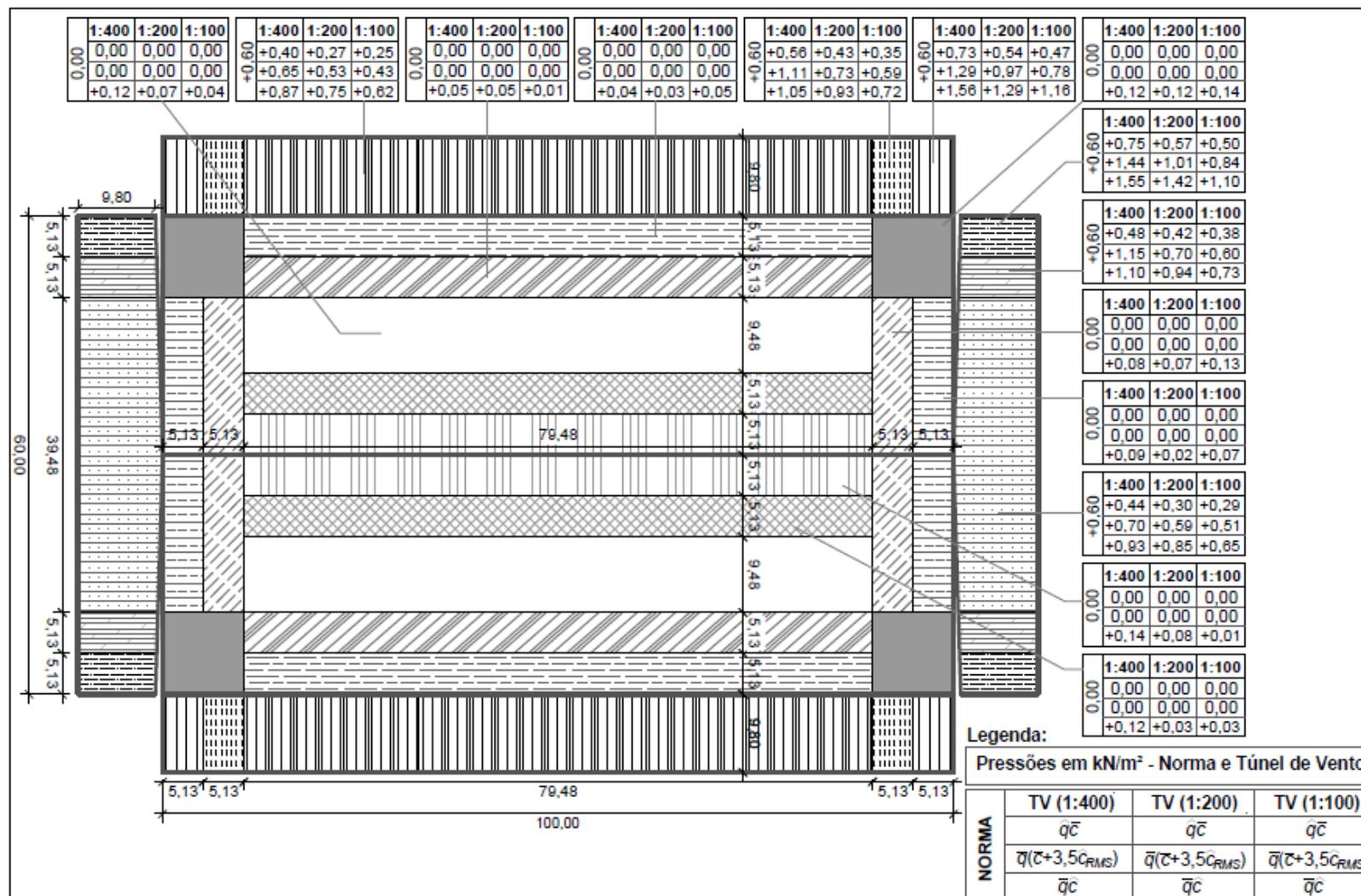
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 130 – Pressões externas locais [SUCCÕES] nas paredes e telhado – EN 1991-1-4:2010 (0° e 90°) e Túnel de Vento. Dimensões em metros



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

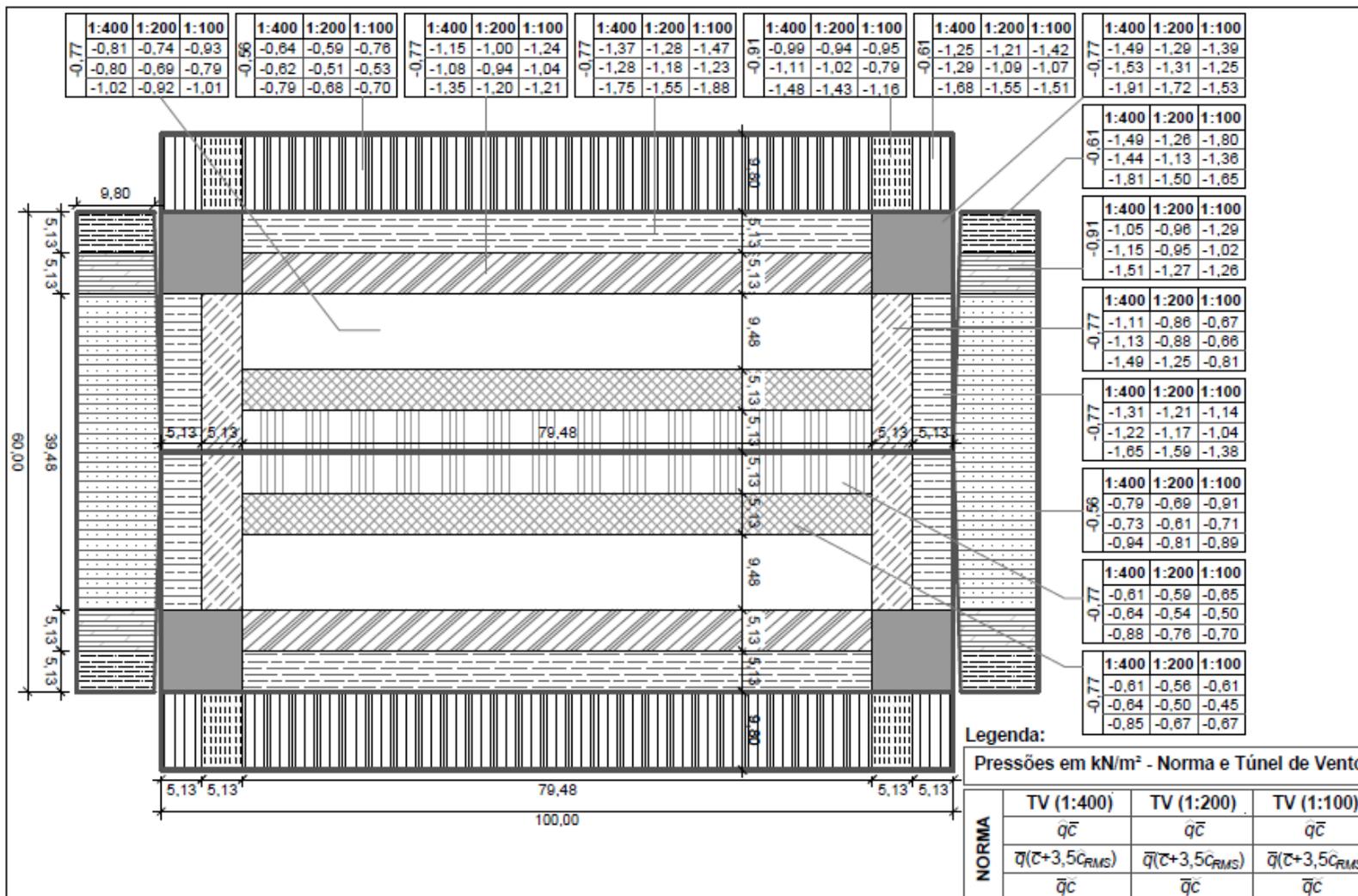
Figura 131 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES] nas paredes e telhado – AS/NZS 1170.2:2011 e Túnel de Vento. Dimensões em metros



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 132 – Pressões externas locais [SUCCÕES] nas paredes e telhado – AS/NZS 1170.2:2011 e Túnel de Vento. Dimensões em metros



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Por meio das representações das pressões locais mostradas é possível avaliar a diferença entre resultados determinados utilizando as especificações das normas e dos ensaios em túnel de vento.

5.3.2 Análise dos resultados

Avaliando-se as pressões externas locais das figuras 121 a 132 admitem-se as considerações listadas a seguir. É importante destacar que as análises foram feitas utilizando-se as pressões determinadas pelos procedimentos normativos e as pressões correspondentes aos mesmos critérios, porém com coeficientes de pressão obtidas por meio de ensaios em túnel de vento sendo:

- NBR 6123:1988, ASCE/SEI 7-16:2016 e AS/NZS 1170.2:2011: Pressões locais da norma com pressões de pico (coeficientes de pressão médios e pressão dinâmica de pico sobre 3 segundos);
- NBCC:2015: Pressões locais da norma com pressões médias (coeficiente de pico e pressão dinâmica média sobre 1 hora);
- EN 1991-1.4:2010 (Maior Valor) e EN 1991-1.4:2010 (0° e 90°): Pressões locais da norma com pressões de pico (coeficiente de pressão médio e pressão dinâmica de pico sobre 600 segundos).

De modo geral, pelos resultados mostrados nas figuras 121 a 132, observou-se que a grande maioria das normas apresentam valores de sobrepressões maiores das obtidas por túnel de vento com exceção da NBCC:2015 mostrado na figura 123 para pressões em paredes. Porém, quanto as sucções, somente a NBR 6123:1988 mostrado na figura 122 e EN 1991-1.4 (Maior Valor) apresentado na figura 128 apresentam a maior parte dos valores maiores na normativa quando comparadas com as obtidas em túnel de vento. Esse resultado assemelha-se aos estudos de Zisis e Stathopoulos (2009) onde evidenciaram grandes diferenças em coeficientes de pressão de pico (caso da NBCC:2015 deste estudo), sendo as pressões experimentais de sucções locais críticas tendendo para valores superiores comparadas as disposições da norma que havia sido avaliada, a ASCE 7-05.

Sob o aspecto de escala geométrica, os valores das pressões para a grande maioria das zonas de paredes e telhados obtidas de forma analítica utilizando-se os procedimentos prescritos por cada

padrão de norma estudado, se aproximaram dos valores das pressões obtidas experimentalmente nas escalas geométricas descritas na tabela 31.

Tabela 31 – Escalas geométricas mais comuns por tipo de pressão:sucção ou sobrepressão em paredes e telhado

Norma	Escala geométrica x pressão sobrepressão e sucção			
	Paredes		Telhado	
	Sobrepressão	Sucção	Sobrepressão	Sucção
NBR 613:1988	1:400	1:400	-	1:400
NBCC:2015	1:100	1:100	1:400	1:200 e 1:100
ASCE/SEI 7-16:2016	1:400	1:200	1:400	1:200
EN 1991-1-4 (MaiorValor)	1:400	1:400	1:400	1:200
EN 1991-1-4 (0° e 90°)	1:400	1:200	1:400	1:200
AS/NZS 1170.2:2011	1:400	1:200	-	1:200 e 1:100

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Pela tabela 31 observa-se que a grande maioria das pressões externas locais determinadas pela aplicação dos métodos normativos apresentam resultados mais próximos das pressões obtidas pelos ensaios em túnel de vento com modelos na escala geométrica 1:400 e 1:200. Entretanto, comparando-se os valores das pressões determinadas por cada norma com as pressões obtidas em função da escala geométrica de maior representatividade correspondentes a cada norma mostrado na tabela 31, existe uma discrepância entre os resultados observados nas figuras 121 a 132. As maiores diferenças destas pressões ocorrem nas sucções, que pode estar relacionado com a distribuição/configuração das zonas de pressões (grandes e pequenas áreas) bem como pela posição da medida da pressão localizada em região de borda ou central.

Para todas as escalas ensaiadas analisando-se os resultados das figuras 121 a 132, independente da norma avaliada, de acordo com o aumento da escala geométrica, ocorrem reduções das pressões de sucção e de sobrepressão, exceto grande parte dos cantos e algumas zonas para escala 1:100 que se mantêm os valores das demais escalas ou aumentam em pequena magnitude. Acréscimos nas pressões da escala 1:100 de acordo com mencionado nas análises dos coeficientes de pressão experimentais, são devidas à não realização das correções do

bloqueio que ocasionou efeitos secundários oriundos das paredes do túnel de vento junto ao modelo.

As pressões em bordas de paredes e do telhado em todas as escalas de ensaio, apresentaram através das figuras 121 a 132 valores mais elevados em relação as zonas centrais. Porém, pressões positivas de norma geralmente mantêm os mesmos valores independente da localização da zona de parede ou telhado. Portanto, sucções estimadas pela norma, exceto em zonas de paredes e telhado considerando a NBCC:2015, regiões de paredes pela ASCE/SEI 7-16:2016 e áreas do telhado pela AS/NZS 1170.2:2011, todas indicaram uma diminuição gradativa das pressões das regiões centrais em relação as bordas e cantos.

Para ensaios de grandes modelos de fator até 2, pelos estudos de Stathopoulos e Surry (1983) podem levar a erros de 10% no geral e a erros não conservadores da ordem de 20% a 30% em paredes. Isso difere dos resultados deste trabalho, onde para um fator de escala geométrica de 1,67 obteve-se diferenças percentuais entre escalas bem maiores. Contudo, reduções das pressões na escala 1:400 para 1:200 reafirmam os estudos de Stathopoulos e Surry (1983) que também obtiveram para escalas 1:500 a 1:250. Aumentos nas pressões da escala 1:100 também foram levantados em ambos estudos.

Em relação a discretização de zonas, pela figura 123 e 124 destaca-se que a NBCC:2015 é a que possui menor número de divisões das pressões e de modo geral é a que apresenta percentuais mais divergentes dos resultados normativos com os de ensaios principalmente em zonas de pressão negativas.

Pressões positivas constam em todas as normas nas paredes à barlavento, mas para o telhado somente aparecem na figura 123 para a NBCC:2015, figura 125 para a ASCE/SEI 7-16:2016 e em regiões centrais da cobertura pela norma EN 1991-1-4 (Maior Valor e 0° e 90°) através da figura 127 e 129. Enquanto sobrepressões obtidas através dos ensaios para o telhado somente são evidenciadas por meio das figuras 121, 123, 125, 127, 129 e 131, em resultados que consideram o coeficiente de pico máximo positivo, com magnitudes baixas próximos de zero.

Em zonas específica para os cantos da cobertura como na figura 124 para a NBCC:2015, figura 126 pela ASCE/SEI 7-16:2016, e figura 128 e 130 pela EN 1991-1-4 (Maior Valor e 0° e 90°) pela figura 132 para a AS/NZS 1170.2:2011, denotam-se pressões de sucção experimentais mais elevadas das demais regiões de borda, sendo comuns valores entre 1,5 a 2,5 kN/m^2 para Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

todas as escalas. No entanto, pressões negativas determinadas diretamente pelo método normativo apresentado na figura 124 pela NBCC:2015 e figura 132 pela AS/NZS 1170.2:2011 especificam valores menores que $1,0\text{kN/m}^2$ nas regiões de cantos, fato esse que merece atenção por ser uma área pequena podendo facilmente ser afetada por turbilhões de pequenas dimensões com velocidades elevadas.

5.4 DIAGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DAS PRESSÕES

Neste item aborda-se a apresentação de um diagrama de distribuições das pressões que possibilita comparar resultados estabelecidos por normas com dados experimentais.

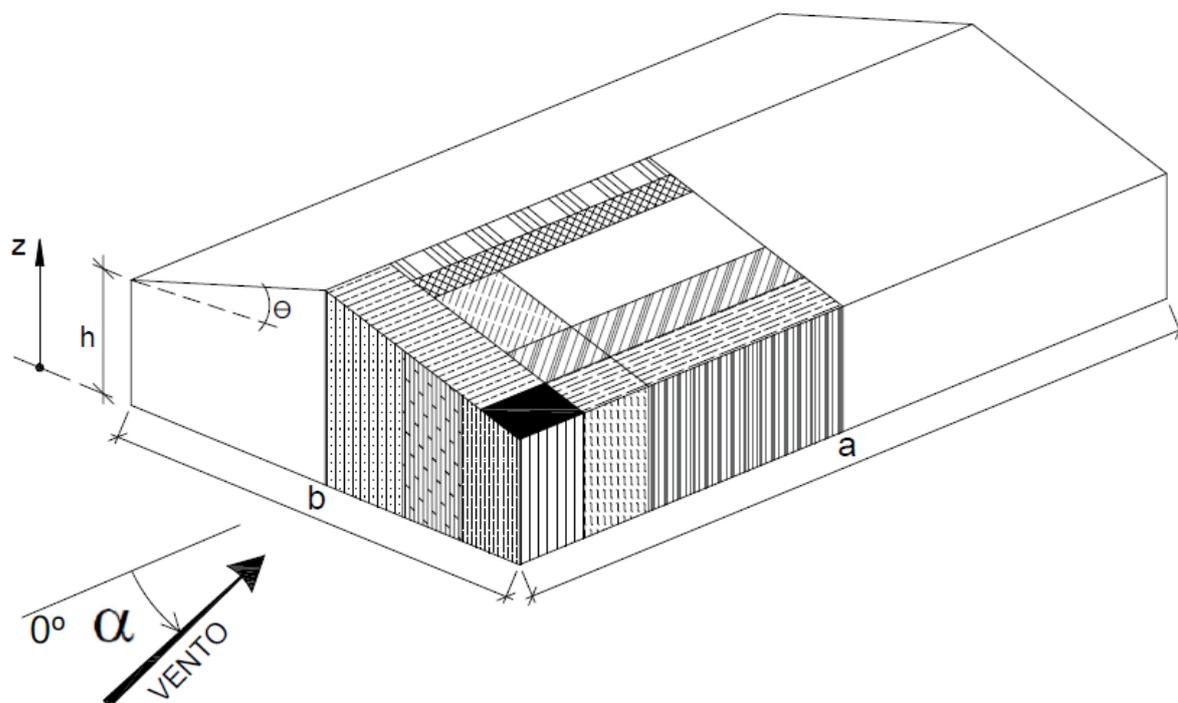
5.4.1 Discretização das zonas

Pelo fato de cada norma técnica possuir distribuições e dimensões geométricas específicas para as zonas de pressões foi elaborado um diagrama representado pela figura 133 utilizando o formato do pavilhão em estudo. Este diagrama foi setorizado de maneira que contemplasse em um único diagrama todas as zonas previstas pelas cinco normas estudadas utilizando diferentes representações tanto para fachadas como para o telhado.

Como algumas normas tem menor número de subdivisões, não dispõe de todas as zonas que constam no diagrama da figura 133. Sendo assim, normas que possuem grandes áreas, sem discretização, como por exemplo, região de cumeeira da NBCC:2015, são adotadas as pressões da zona que abrange a área da cumeeira, ou seja, da zona que sobrepõe esta região.

A figura 133 permite confrontar para uma mesma região, os resultados das pressões externas locais oriundos das metodologias normativas com as pressões obtidas por meio de modelos reduzidos ensaiados nas escalas 1:400, 1:200 e 1:100 no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann.

Figura 133 – Diagrama de distribuição das zonas de pressões externas locais de parede e telhado



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Estabelecendo um comparativo quanto a discretização das regiões das fachadas e do telhado, percebe-se que:

- a norma NBCC:2015 é a que tem menor número de discretização das zonas. Especifica uma única linha divisória, ou seja, uma região de borda em cada parede lateral e em cada parede de oitão, além das bordas de contorno e cantos do telhado. O restante das paredes constitui uma única região, prevalecendo o mesmo critério para a cobertura;
- a norma da ASCE/SEI 7-16:2016 para paredes também distingue uma borda em cada parede do restante da fachada. Todavia, para o telhado distribui somente em duas regiões de bordas e mais uma grande área central, além dos cantos.
- a NBR 6123:1988, EN 1191.1.4:2010 (Maior Valor e 0° e 90°) e AS/NZS 1170.2, subdividem as paredes em três áreas diferentes e o telhado subdividido em vários setores. Entretanto, a NBR 6123 não setoriza os cantos do telhado.

As configurações com maior número de discretização de zonas, permite identificar mais detalhadamente as zonas de sobrepressão e de sucções e também proporciona ao projetista de engenharia informações do comportamento do vento agindo sobre a construção.

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Os cantos, por exemplo são áreas onde ocorrem vórtices pela presença de ventos oblíquos. À vista disso, quanto mais distribuídas estiverem as zonas, menor tende ser o risco de efeitos que possam danificar elementos estruturais, vedações e seus parafusos de sustentação. Além disso, o diagrama com maior distribuição das pressões locais pode proporcionar maior segurança em projetos quanto aos detalhes para efeitos arquitetônicos em zonas críticas de modo a evitar falhas ao longo da sua vida útil.

5.4.2 Pressões externas locais de paredes e telhados – normas e túnel de vento

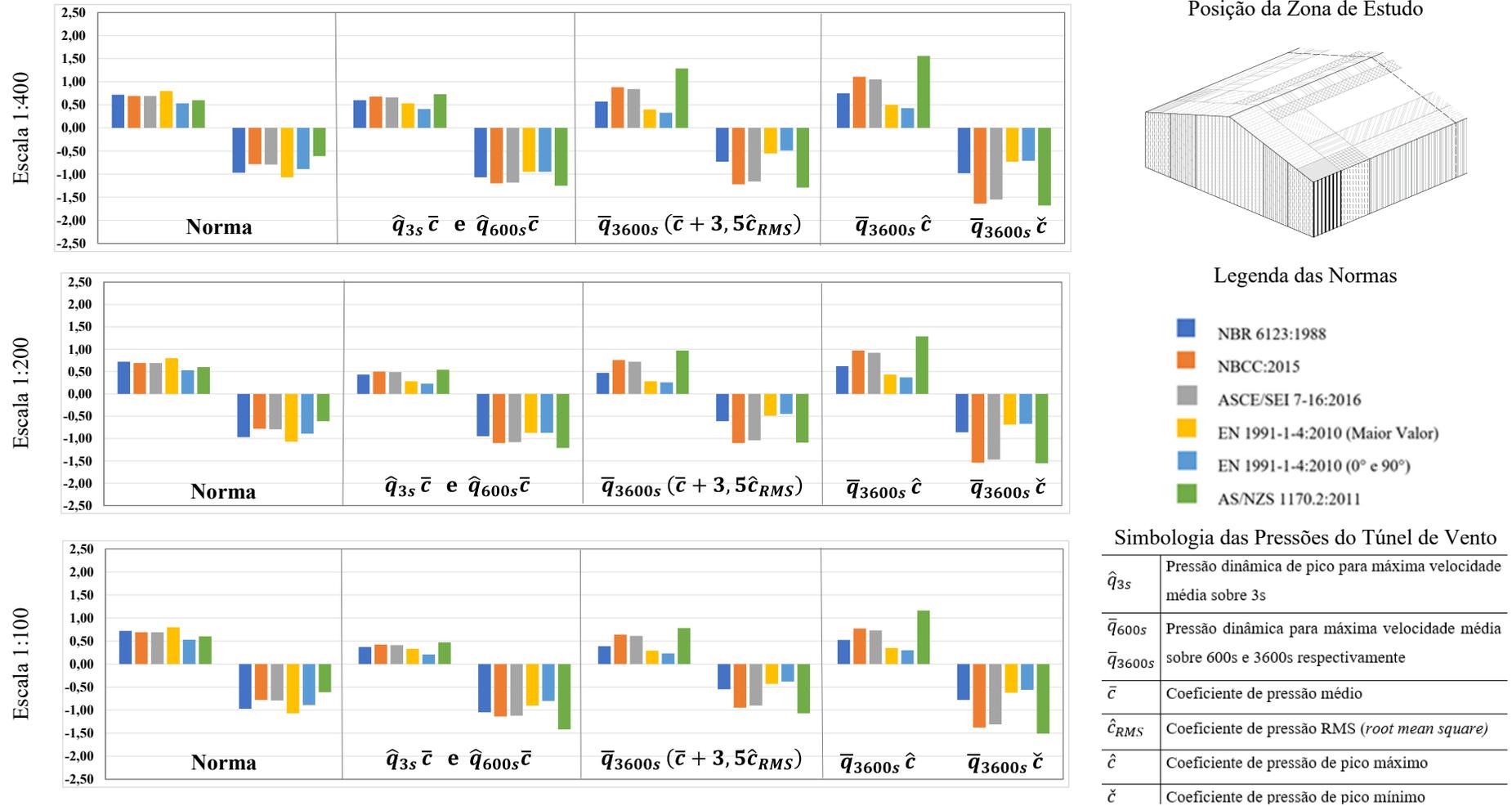
Apresentam-se nas figuras 134 a 149 as pressões externas locais de sobrepressão e de sucção incidentes em paredes e cobertura.

Estas pressões representadas graficamente para as respectivas posições das zonas de estudo destacadas no diagrama são as mesmas determinadas aplicando os métodos estabelecidos por cada padrão normativo porém, de duas maneiras: uma levando em conta os coeficientes de pressão externa locais determinados por norma e outra com coeficiente obtidos por meio de testes em túnel de vento nas escalas geométricas 1:400, 1:200 e 1:100. Portanto, as larguras das zonas e a pressão dinâmica considerada para cálculo das pressões com coeficientes obtidos via túnel de vento são as mesmas determinadas por cada um dos códigos normativos.

Nos resultados experimentais de túnel de vento constam pressões obtidas pelos conjuntos de coeficientes médios, médios + 3,5RMS, pico máximo e pico mínimo. Pressões localizadas acima da linha de eixo dos gráficos relatam pressões positivas de sobrepressão e abaixo da linha de eixo pressões negativas de sucção.

Pressões com coeficientes de pressão externa médios foram obtidas para máximas velocidades do vento sobre 3s para todas as normativas exceto a EN 1991-1-4:2010 que é sobre 600s. Pressões com origem em coeficientes de pressão externa médios + 3,5RMS, pico máximo e mínimo consideram máximas velocidades do vento sobre 3600s.

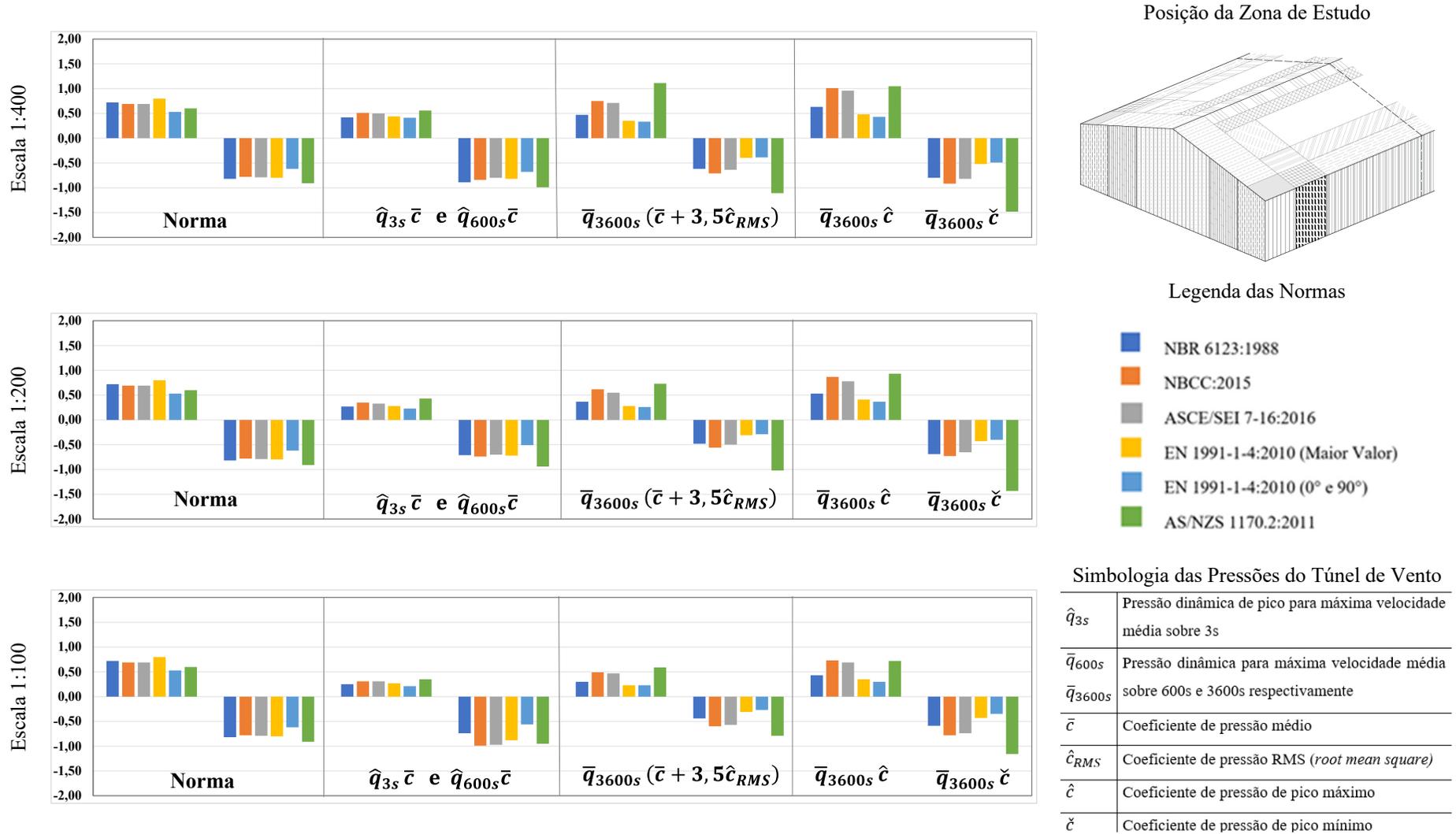
Figura 134 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCCÇÕES] nas paredes laterais (kN/m²)



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

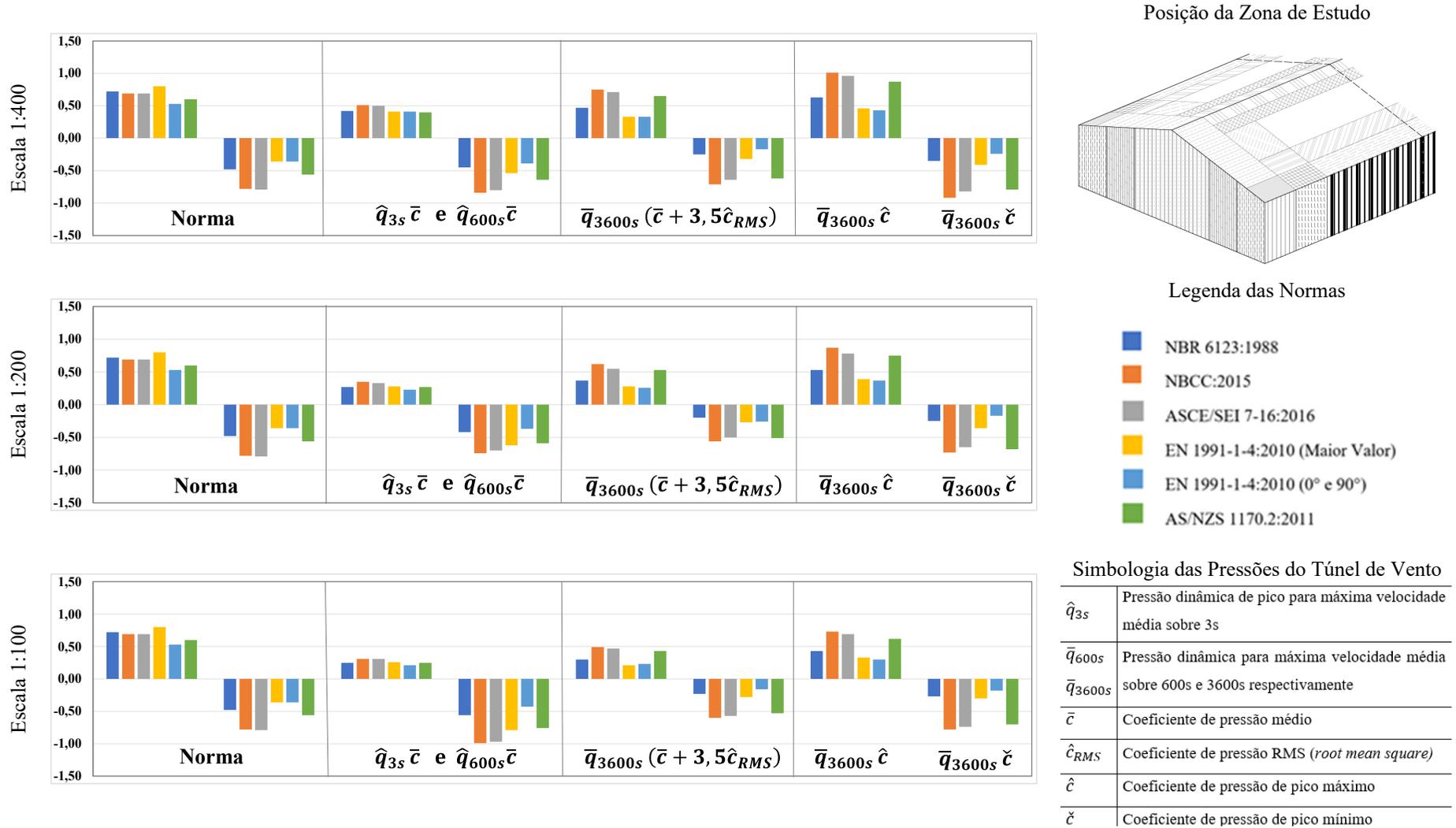
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 135 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCCÇÕES] nas paredes laterais (kN/m²)



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

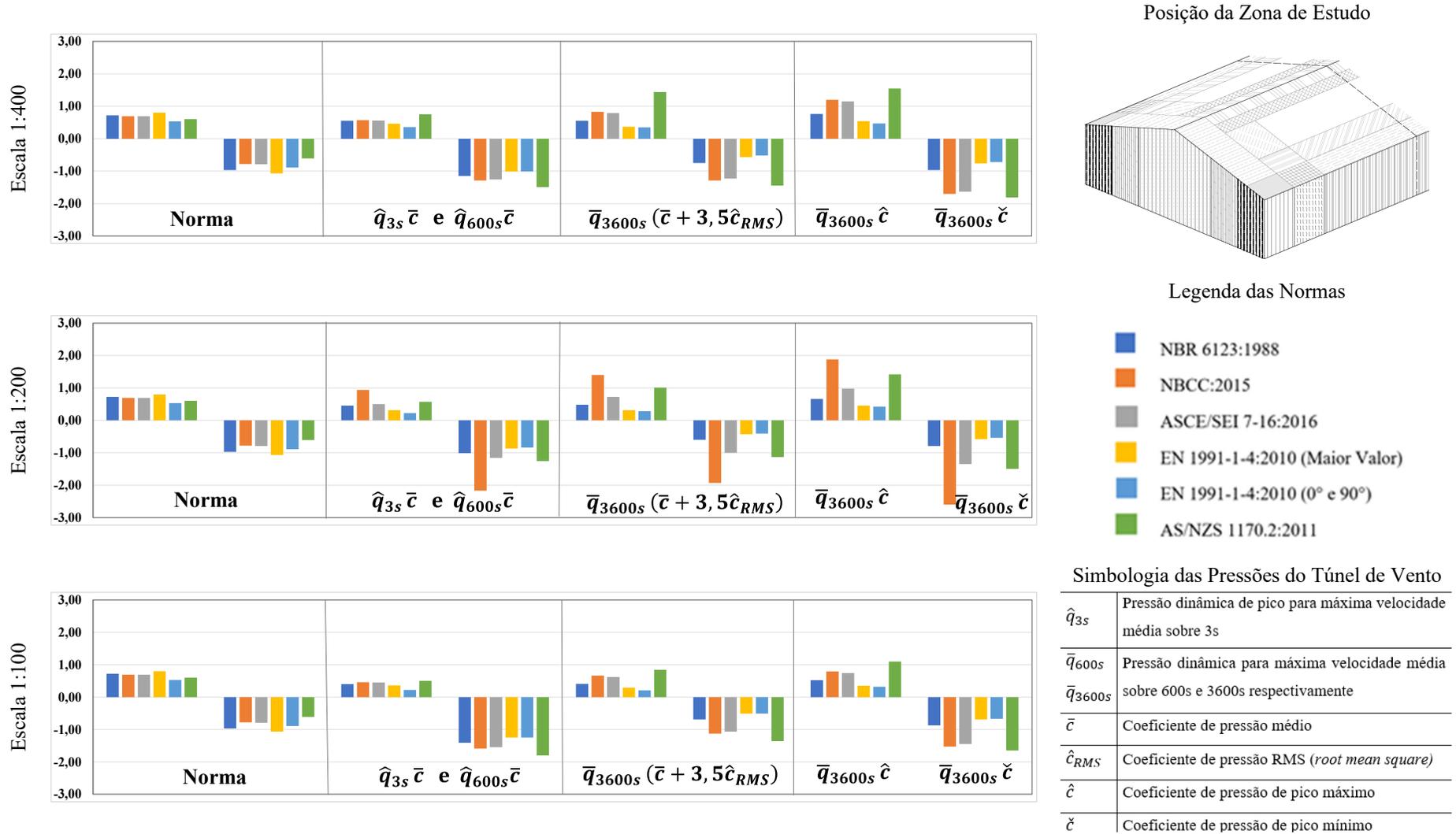
Figura 136 - Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCCÇÕES] nas paredes laterais (kN/m²)



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

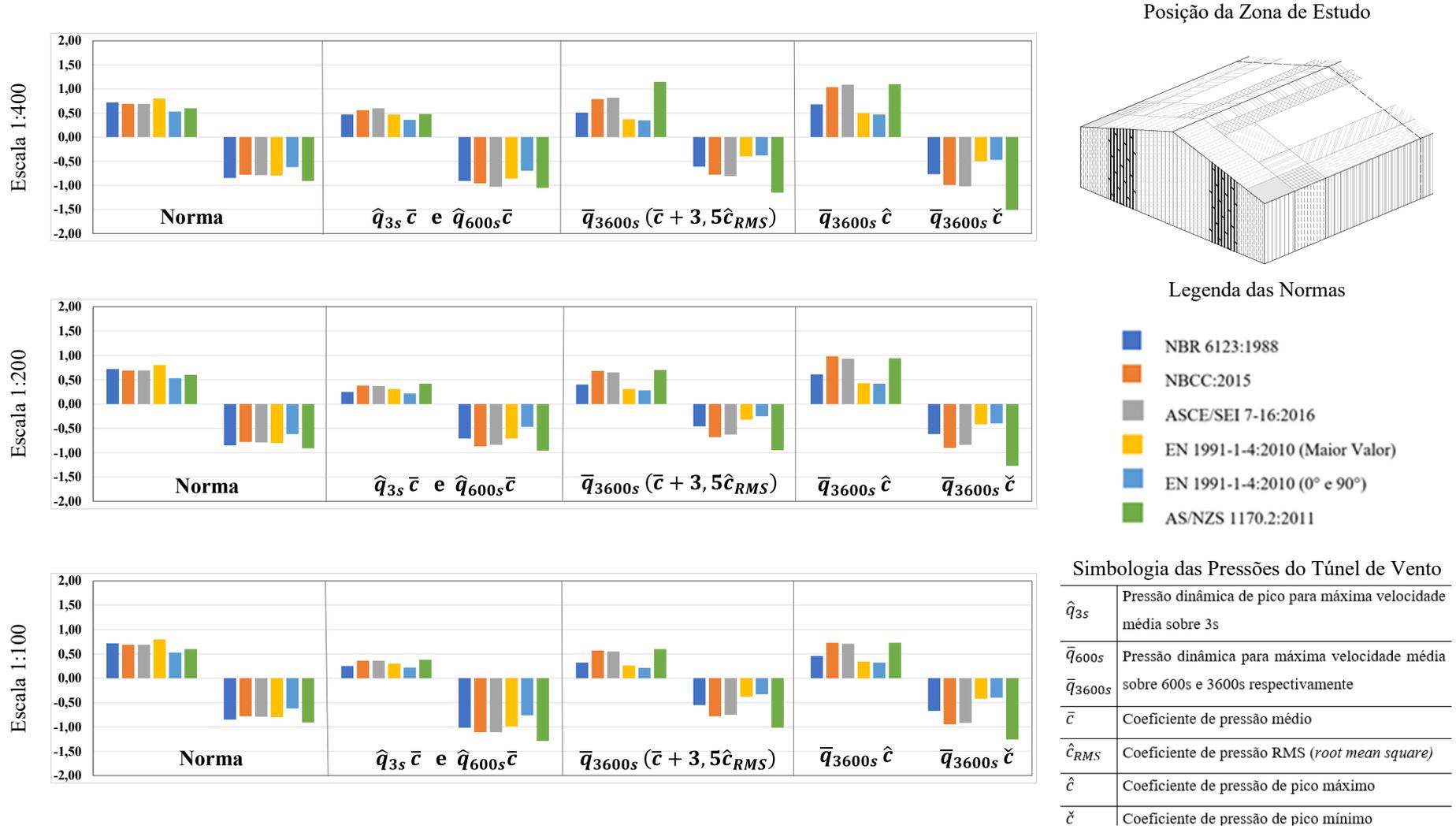
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 137 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCCÇÕES] nas paredes laterais (kN/m²)



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

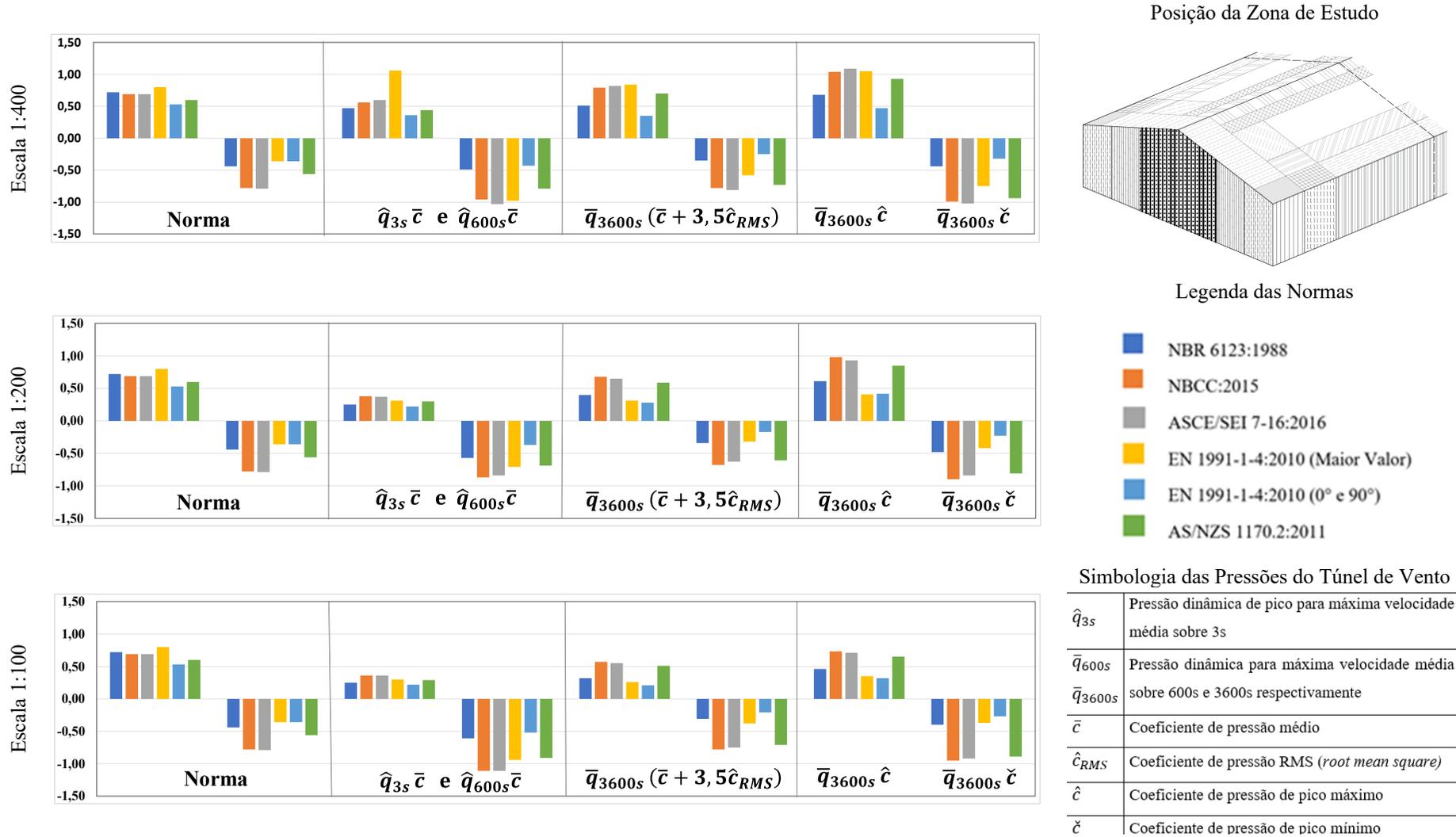
Figura 138 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCCÇÕES] nas paredes laterais (kN/m²)



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

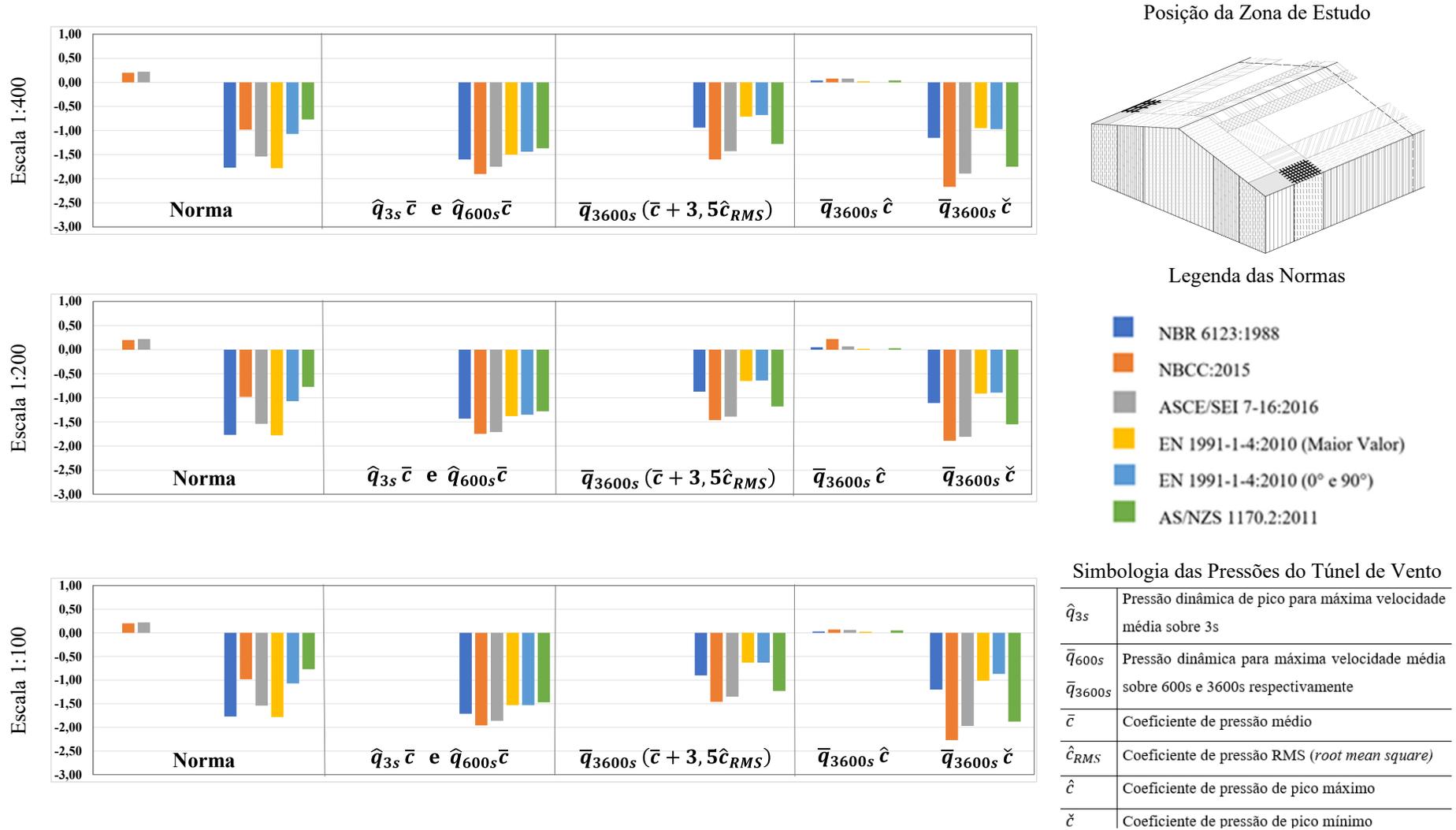
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 139 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCCÇÕES] nas paredes laterais (kN/m²)



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

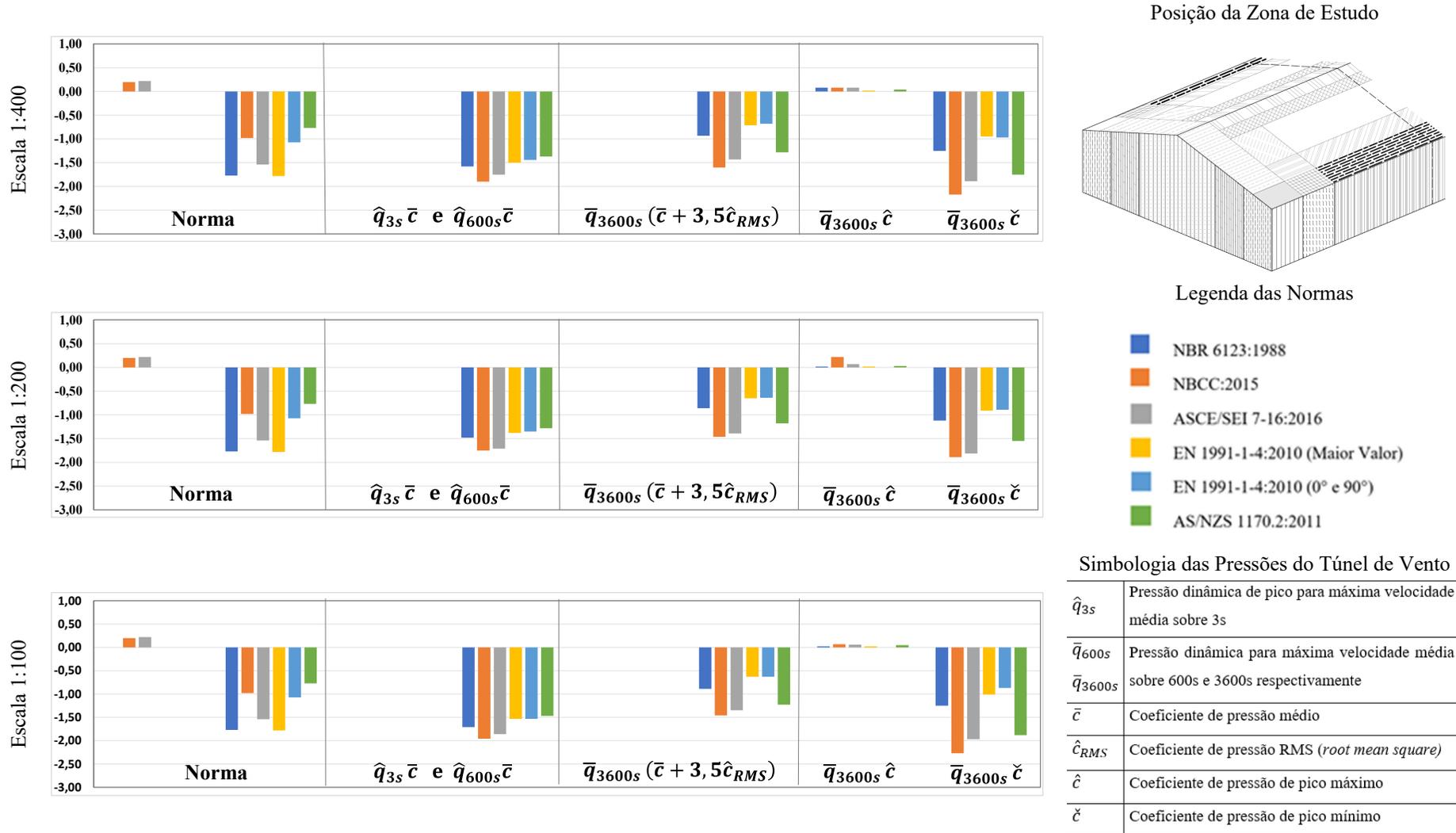
Figura 140 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCCÇÕES] no telhado (kN/m²)



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

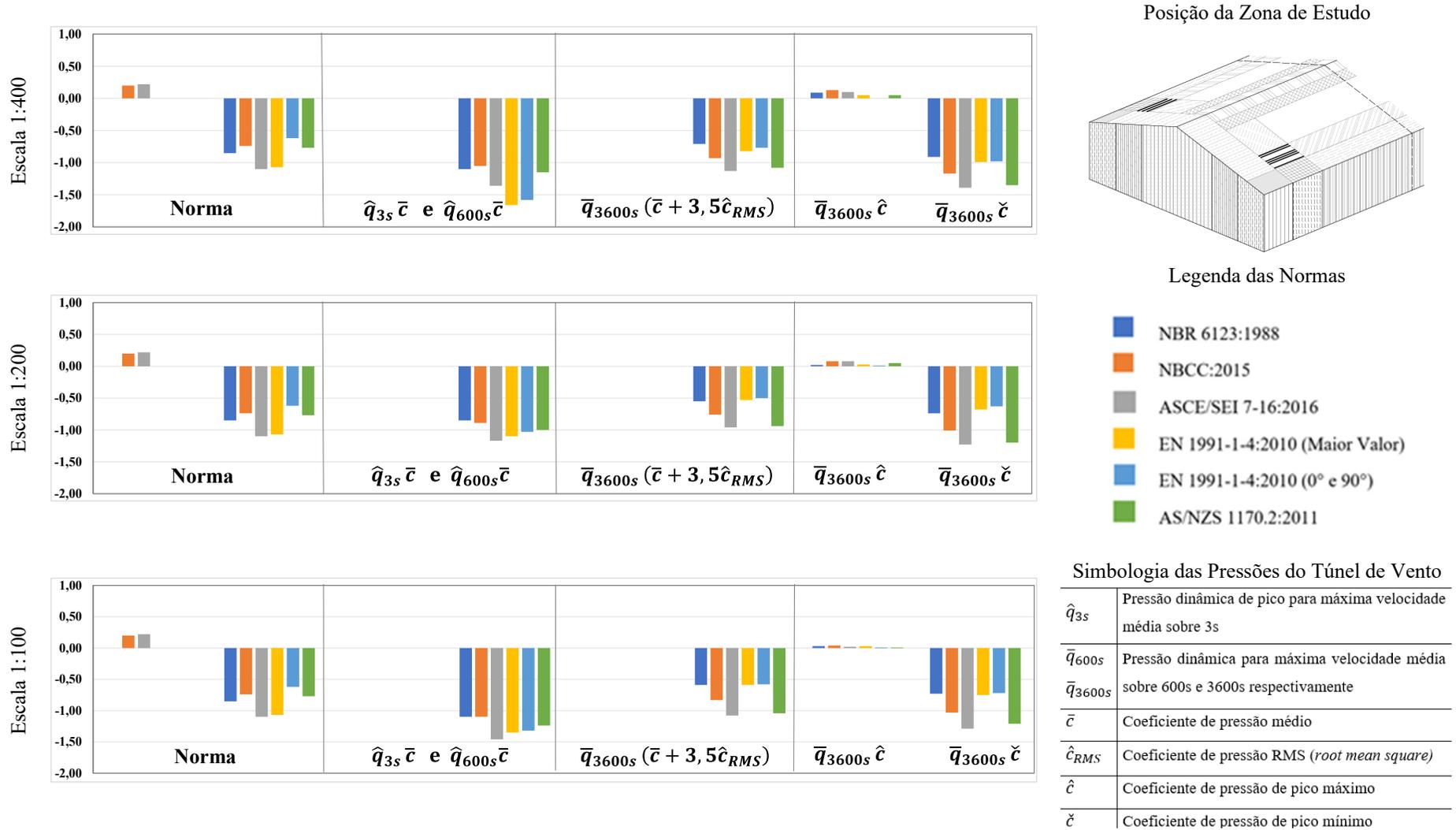
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 141 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCCÇÕES] no telhado (kN/m²)



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

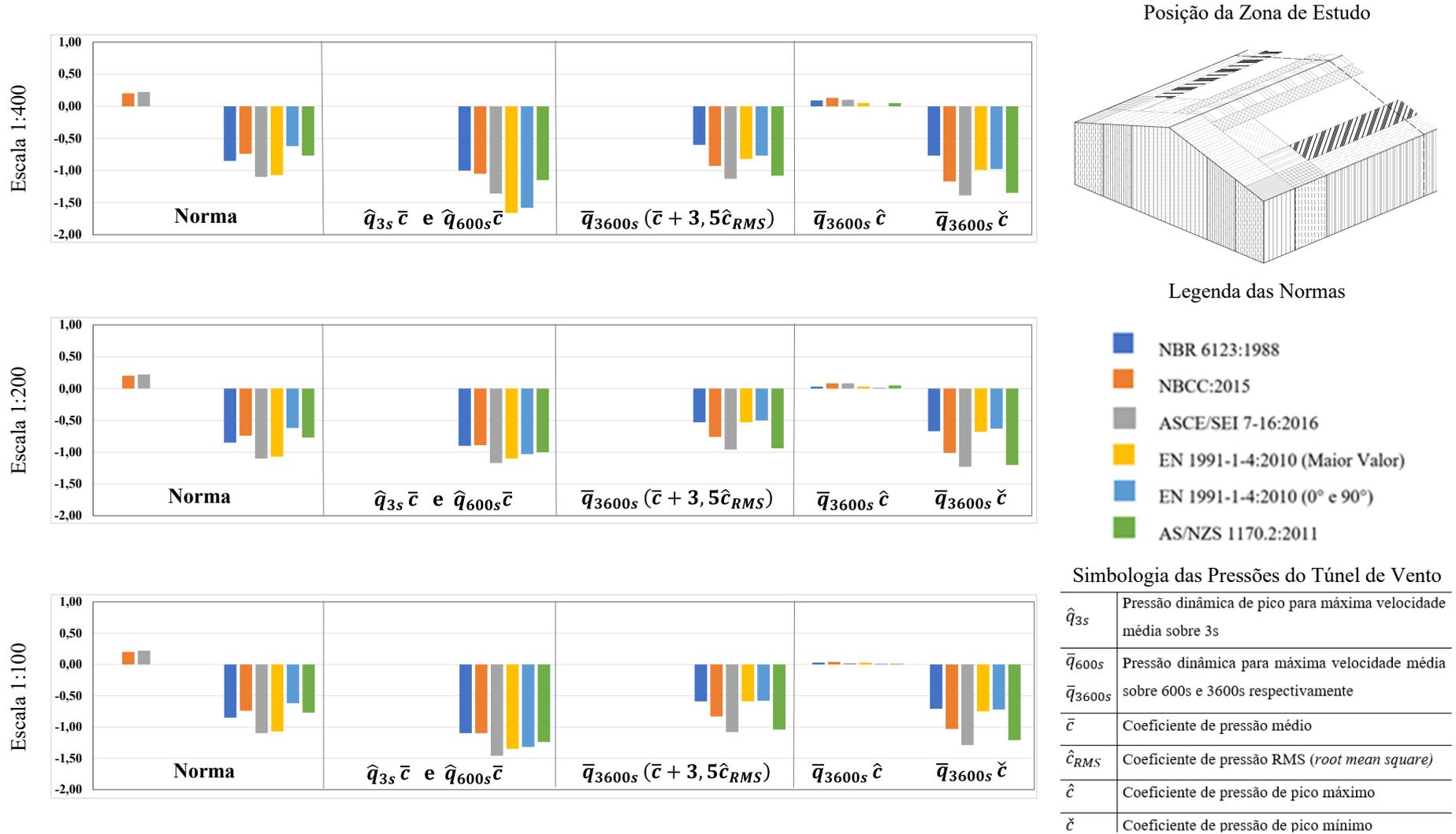
Figura 142 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCCÇÕES] no telhado (kN/m²)



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

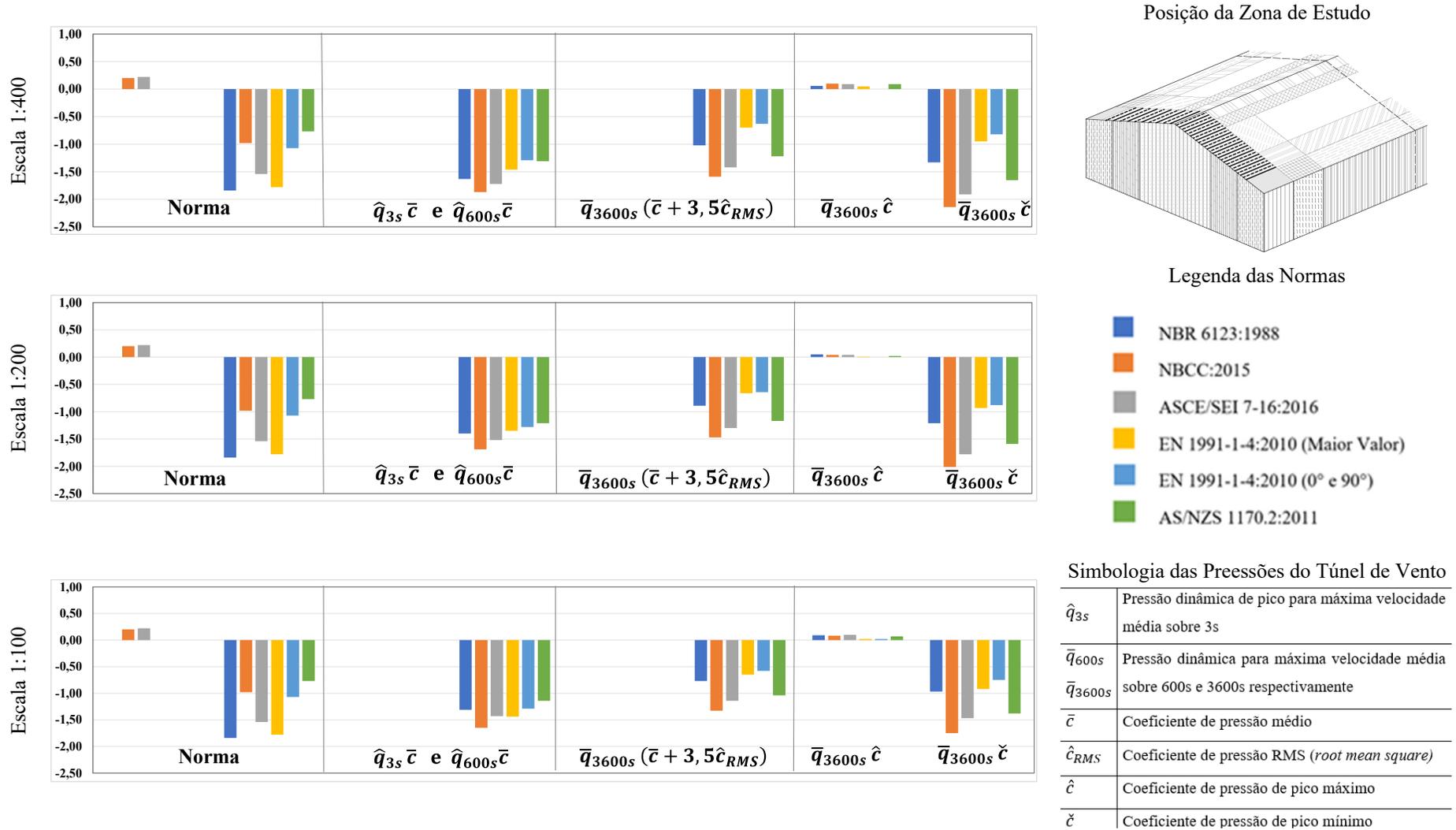
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 143 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCCÇÕES] no telhado (kN/m²)



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

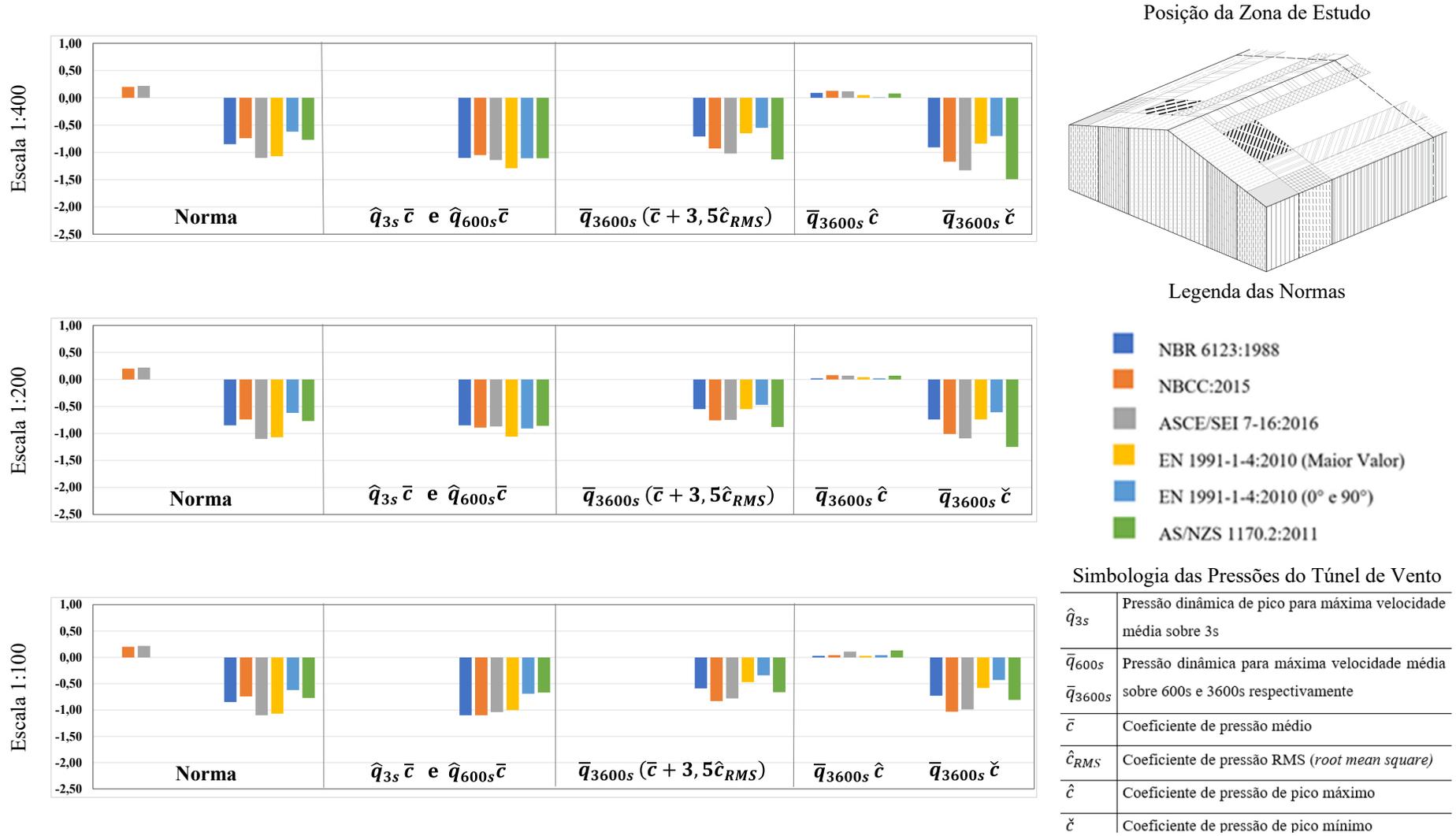
Figura 144 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCCÇÕES] no telhado (kN/m²)



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

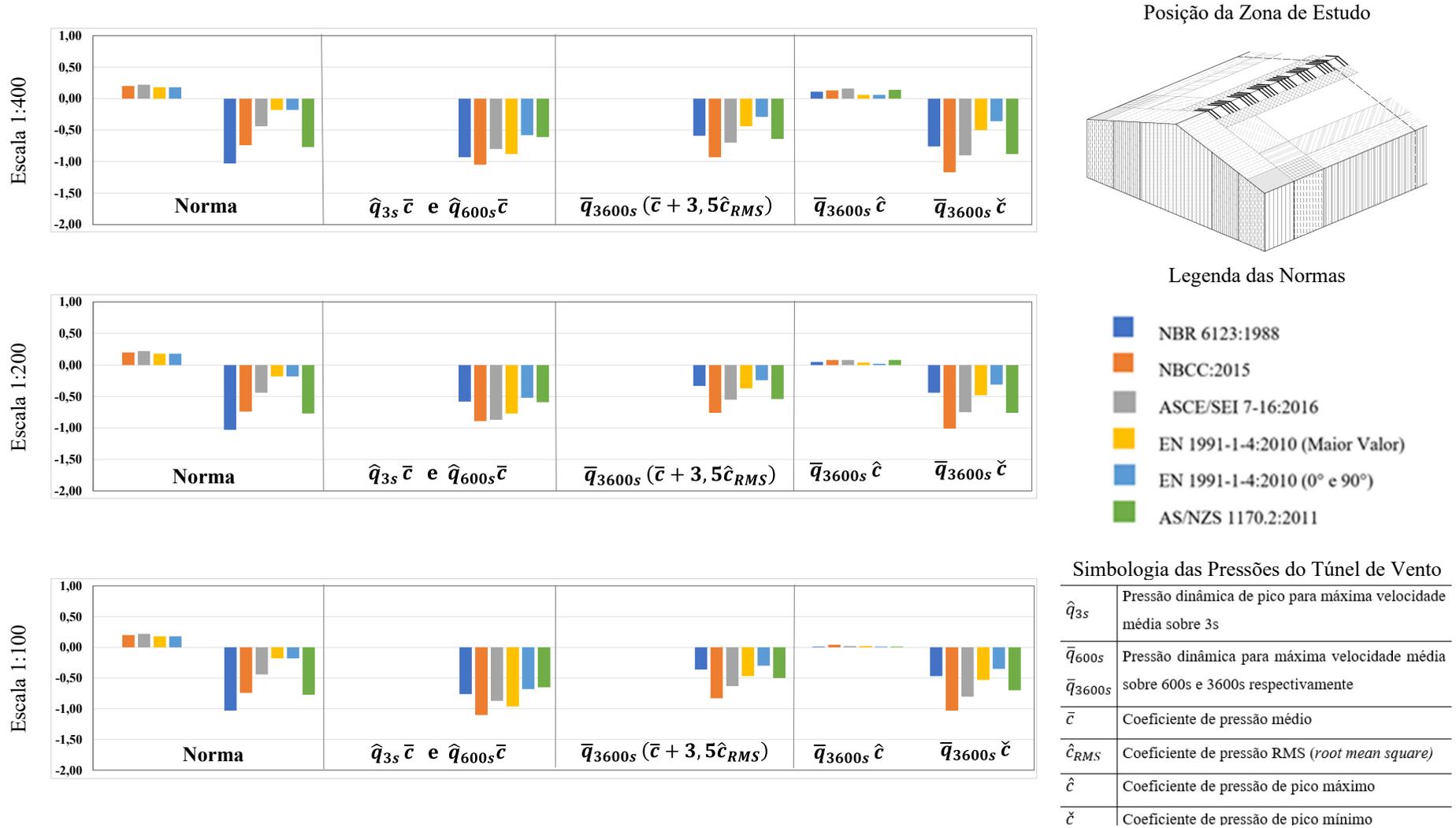
Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 145 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCCÇÕES] no telhado (kN/m²)



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

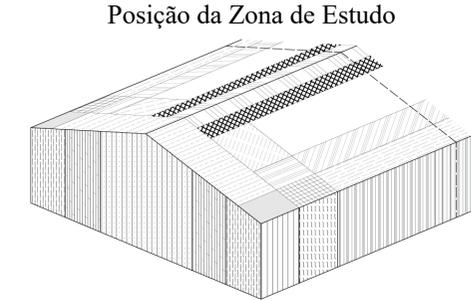
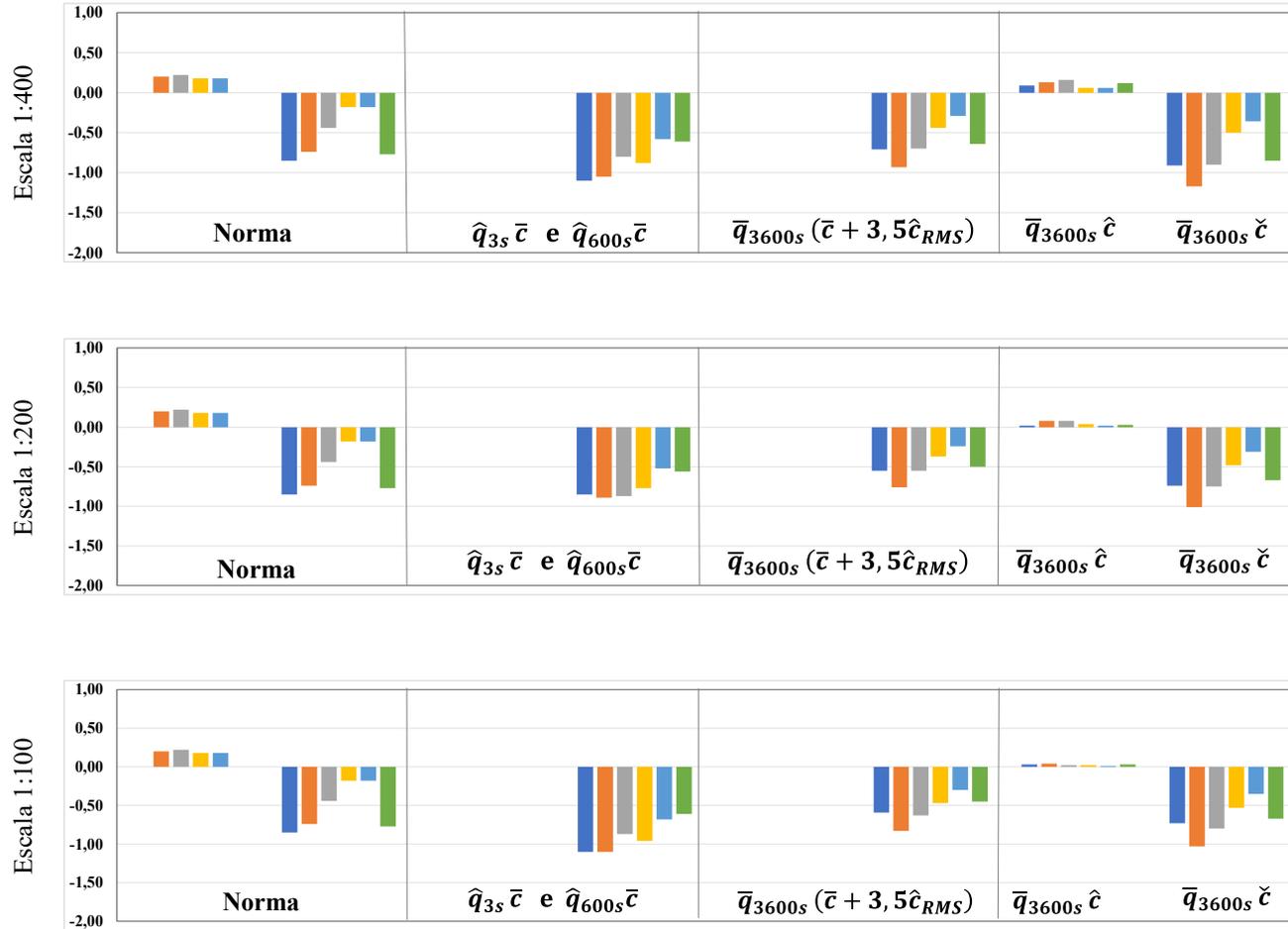
Figura 146 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCCÇÕES] no telhado (kN/m²)



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 147 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCCÇÕES] no telhado (kN/m²)



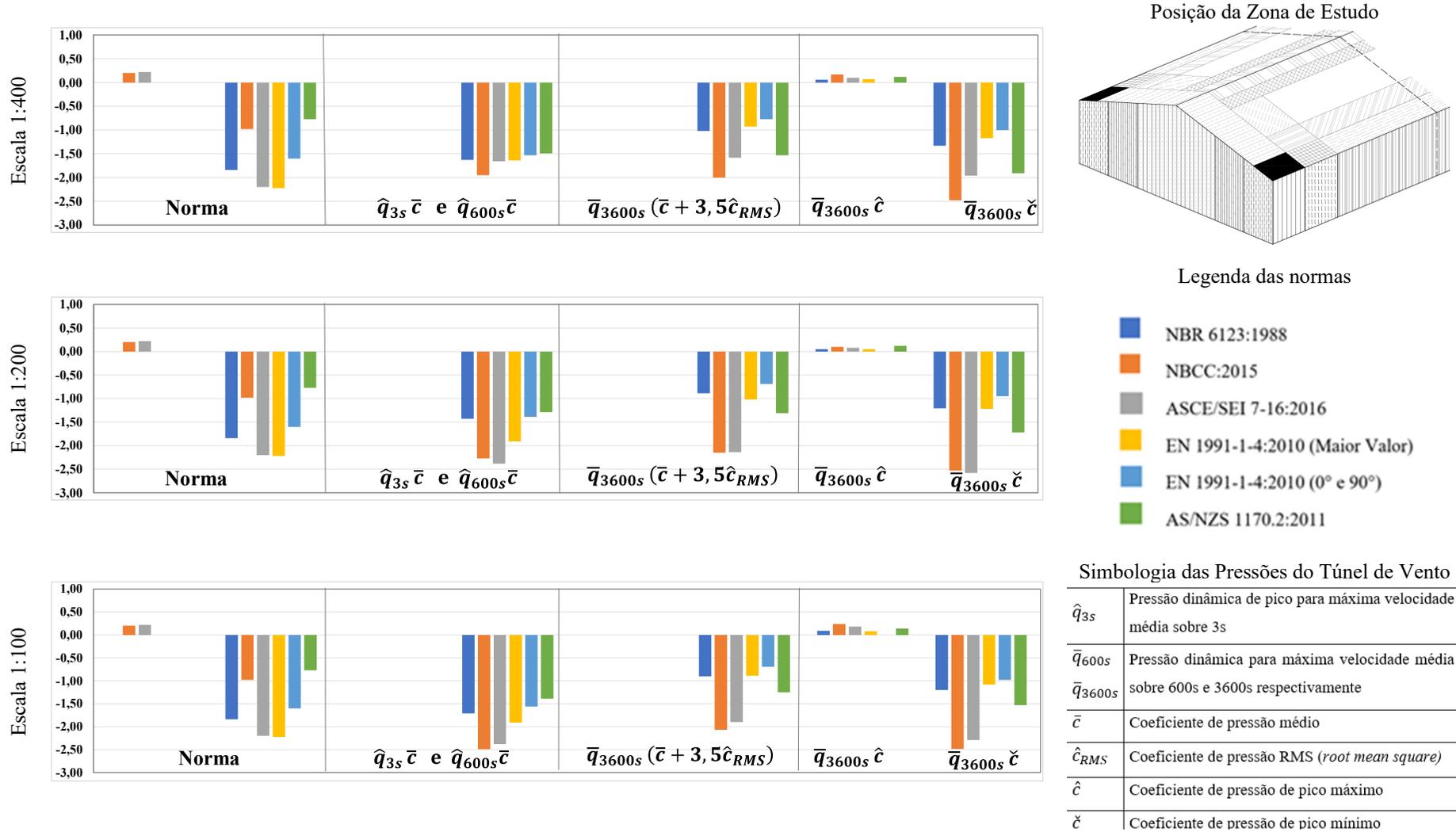
- Legenda das Normas
- NBR 6123:1988
 - NBCC:2015
 - ASCE/SEI 7-16:2016
 - EN 1991-1-4:2010 (Maior Valor)
 - EN 1991-1-4:2010 (0° e 90°)
 - AS/NZS 1170.2:2011

Simbologia das Pressões do Túnel de Vento

\hat{q}_{3s}	Pressão dinâmica de pico para máxima velocidade média sobre 3s
\bar{q}_{600s}	Pressão dinâmica para máxima velocidade média sobre 600s e 3600s respectivamente
\bar{q}_{3600s}	
\bar{c}	Coefficiente de pressão médio
\hat{c}_{RMS}	Coefficiente de pressão RMS (<i>root mean square</i>)
\hat{c}	Coefficiente de pressão de pico máximo
\check{c}	Coefficiente de pressão de pico mínimo

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

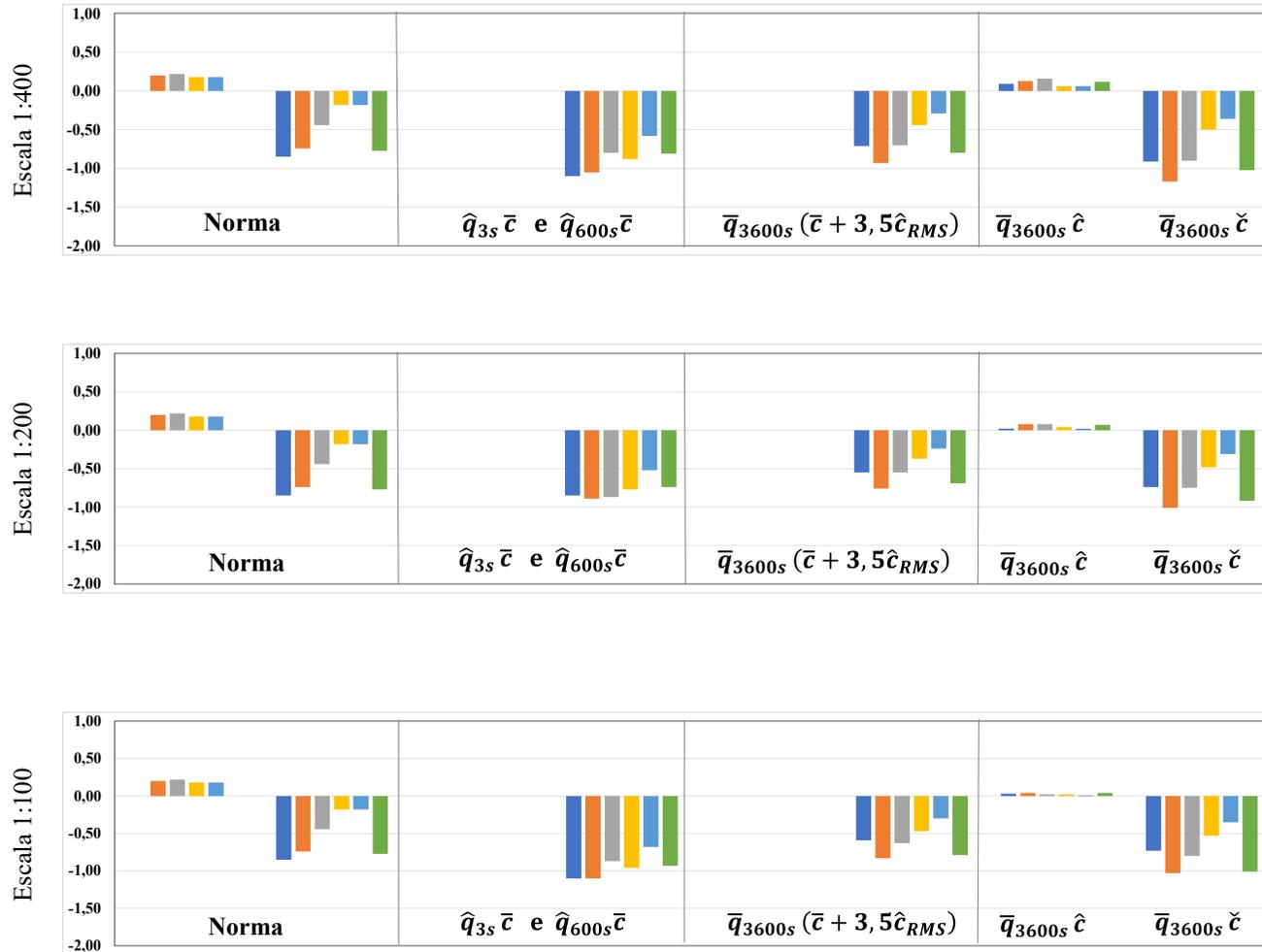
Figura 148 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCCÇÕES] no telhado (kN/m²)



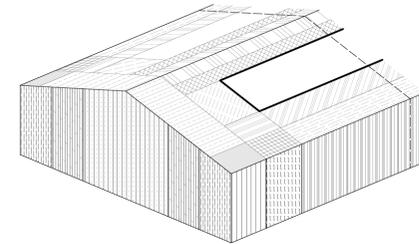
Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Figura 149 – Pressões externas locais [SOBREPRESSÕES E SUCCÇÕES] no telhado (kN/m²)



Posição da Zona de Estudo



Legenda das Normas

- NBR 6123:1988
- NBCC:2015
- ASCE/SEI 7-16:2016
- EN 1991-1-4:2010 (Maior Valor)
- EN 1991-1-4:2010 (0° e 90°)
- AS/NZS 1170.2:2011

Simbologia das Pressões do Túnel de Vento

\hat{q}_{3s}	Pressão dinâmica de pico para máxima velocidade média sobre 3s
\bar{q}_{600s}	Pressão dinâmica para máxima velocidade média sobre 600s e 3600s respectivamente
\bar{q}_{3600s}	
\bar{c}	Coefficiente de pressão médio
\hat{c}_{RMS}	Coefficiente de pressão RMS (<i>root mean square</i>)
\hat{c}	Coefficiente de pressão de pico máximo
\check{c}	Coefficiente de pressão de pico mínimo

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

5.4.3 Análise dos resultados

Através das pressões locais para paredes e telhado representadas nas figuras 134 a 149 são detalhadas a seguir as análises dos resultados.

De maneira geral, pressões positivas e negativas com coeficientes de norma e com coeficientes obtidos em túnel de vento com pressão dinâmica sobre velocidades de 3 segundos e 600 segundos para paredes, não mostram grandes divergências nos valores. Porém, quando comparadas com pressões oriundas de coeficientes do túnel (médios + 3,5RMS) e de pico máximo e mínimo, existem muitas oscilações independente da posição de zona e escala geométrica de ensaio. Dentro de uma mesma escala os resultados de conjuntos de pressões seja em paredes e ou telhado determinados com pressões dinâmicas de 3s, 600s ou 1 hora apresentam variações. Isto pode ser atribuído aos coeficientes de pico que comumente ocorrem ao longo do tempo nas medições e podem apresentar grandes variações. O mesmo acontece com as pressões das regiões do telhado, porém pequenas flutuações são notadas também nas pressões de norma.

Pressões obtidas com coeficientes médios experimentais e pressões dinâmicas sobre 3s (exceto EN 1191-1-4 que é de 600s) apresentam pequenas diferenças dentro de uma mesma escala geométrica. Entretanto, ao compará-las entre diferentes escalas, as maiores pressões estão na 1:400, as menores na 1:200 e de mesmo valor ou superiores na 1:100.

Sobrepressões na cobertura surgem com coeficientes de pico máximo obtidos em túnel de vento com valores baixos próximo de zero, não ultrapassando $0,5 \text{ kN/m}^2$. Isso reforça o prescrito em normas que a grande maioria das avaliadas não estabelece sobrepressões em telhados e quando indica são de valores baixos.

Em referência as escalas, de modo geral ocorrem reduções das pressões de sobrepressão e sucção das escalas 1:200 e 1:100 em relação a 1:400 independentes da zona de parede e cobertura. Acréscimos pontuais ocorrem na escala 1:100, mas provavelmente se devem à não correção dos efeitos de bloqueio do modelo em relação as paredes do túnel de vento. Alrawasdeh e Stathopoulos (2015) em seus estudos para pavilhões de grandes dimensões também evidenciaram mudanças nas pressões em acordo com o aumento das dimensões e características do escoamento.

Pressões de sobrepressão e de sucção em bordas de extremidade e cantos para zonas de paredes e telhado exibem valores maiores nas regiões mais centrais independente do conjunto de coeficientes avaliados (médios, médios +3,5RMS e picos máximos e mínimos) independente da escala geométrica. Essa redução é gradual ao longo do comprimento das paredes e do perímetro do telhado para regiões centrais. Entretanto, vale ressaltar que algumas das normas avaliadas como NBCC:2015, ASCE/SEI 7-16:2016 e EN 1991-1-4:2010 (Maior Valor, 0° e 90°) especificam o uso do mesmo valor de pressão positiva independente da zona ao longo de paredes e ou telhados. De maneira geral as arestas do contorno do telhado e cantos principalmente dispõem de sucções com o dobro dos valores das áreas centrais

A relação de comprimento pela largura do pavilhão estudado é de 1,67 e foram evidenciadas oscilações nas pressões quando ensaiado em diferentes escalas geométricas e entre escalas com valores decorrentes de norma. No entanto, esse resultado tem relação com as conclusões de Stathopoulos (1984), que para pequenas proporções altura-largura, o efeito comprimento é insignificante, mas para todas as proporções de comprimento-largura de 1,0 a 3,0, o efeito é considerável.

Avaliando-se tanto paredes como telhado, foram apontadas discrepâncias das pressões externas locais principalmente em sucções tanto entre normas como entre normas com ensaios experimentais e entre escalas geométricas ensaiadas. E são diferenças que variam em mais de 50%, sendo geralmente as maiores as com origem em ensaios em túnel de vento. Essa consideração também foi apresentada por Stathopoulos e Saathoff (1994) quando identificaram pressões originadas de ensaios em túnel com sucções de 20 a 50% superiores as das normas National Building Code of Canada (1990) e ANSI/ASCE 7-88 e em pressões locais positivas as diferenças não foram significativas.

As pressões tanto experimentais como por meio das normas mesmo que determinadas com velocidades médias sobre (3, 600 ou 3600) segundos não deveriam apresentar resultados com valores diferentes quando aplicadas a uma mesma geometria, caso deste estudo. Entretanto, observando os resultados apresentados existem variações para algumas regiões dentro de uma mesma escala e entre escalas. A tendência de pressões obtidas por meio de túnel e normas apresentarem valores semelhantes se deve ao fato de que ambas foram determinadas por ensaios experimentais.

Levando-se em conta as escalas de ensaio dos modelos, os resultados das pressões em algumas zonas demonstram valores com diferenças percentuais acima de 25% encontrado por Stathopoulos e Surry (1983).

5.4.4 Dimensões das zonas para paredes e telhado

As dimensões de uma superfície de paredes e telhado tem influência sobre o resultado da pressão que atua na respectiva área. Dentre as normas estudadas, são evidenciadas diferentes metodologias para definição das dimensões das zonas de atuação das pressões. Nas figuras 150 a 152 constam as dimensões determinadas utilizando os critérios estabelecidos por cada padrão normativo para zonas de paredes laterais, paredes dos oitões e regiões da cobertura.

Importante mencionar que foi utilizado o diagrama de distribuição de pressões para possibilitar o comparativo da localização da zona de referência do estudo, uma vez que, as normas não estabelecem a mesma distribuição de zonas. Em vista disso, para algumas regiões não são apresentadas dimensões das larguras.

São observadas pela figura 150 que as dimensões das bordas de extremidade das paredes tanto na dimensão de 100 metros como de 60 metros possuem dimensões próximas dentre as normas (variação de no máximo 5%), exceto a NBR 6123:1988 que estabelece maior valor em mais de 50%.

Em contrapartida, diferenças de até 40% surgem na dimensão da zona central de parede pela NBCC:2015 e ASCE/SEI 7-16:2016 sendo as normas que distribuem as pressões em apenas duas regiões. Desta forma a zona localizada entre a parte central e a de extremidade instituída pelas demais normas são evidenciadas pequenas divergências.

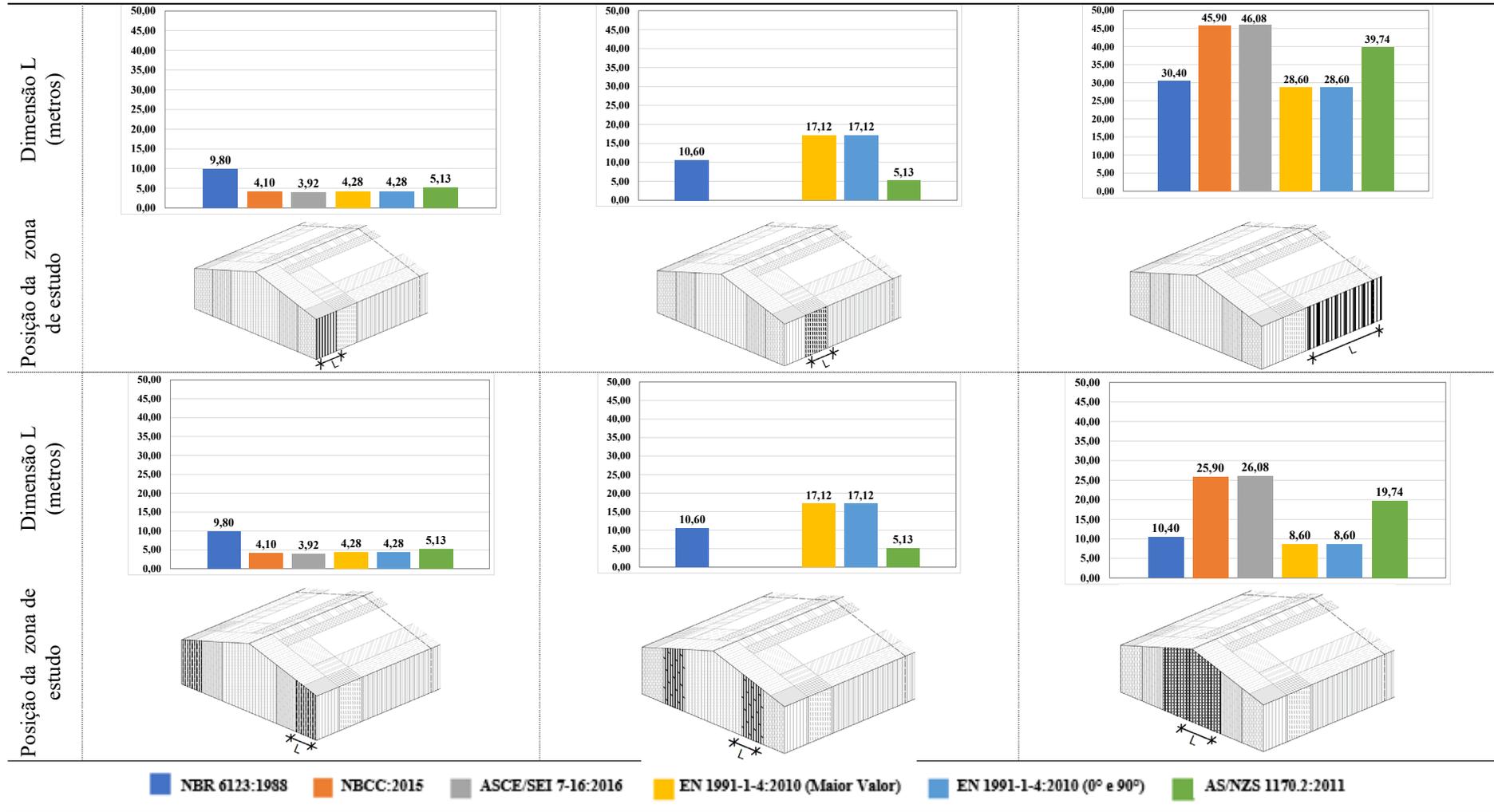
No telhado figuras 151 e 152 em bordas de contorno externo do telhado previstas em todos os procedimentos normativos ocorre o mesmo das bordas de paredes, exceto a NBR 6123:1988 com dimensão bem maior e a EN 1991-1-1:2010 (Maior Valor, 0° e 90°) dimensão muito inferior em referência as outras normas.

Zonas de canto da cobertura, somente não são estabelecidas pela norma brasileira sendo as demais com diferenças de até o dobro da dimensão, exceto a AS/NZS 1170.2:2011 que mostra uma dimensão muito maior.

Dimensão de zona para cumeeira somente é estabelecida por duas normas, a NBR 6123:1988 que apresenta dimensão maior da AS/NZS 1170.2:2011 em aproximadamente 57%. Demais bordas internas e inclusive centrais do telhado demonstram dimensões sem muitas divergências.

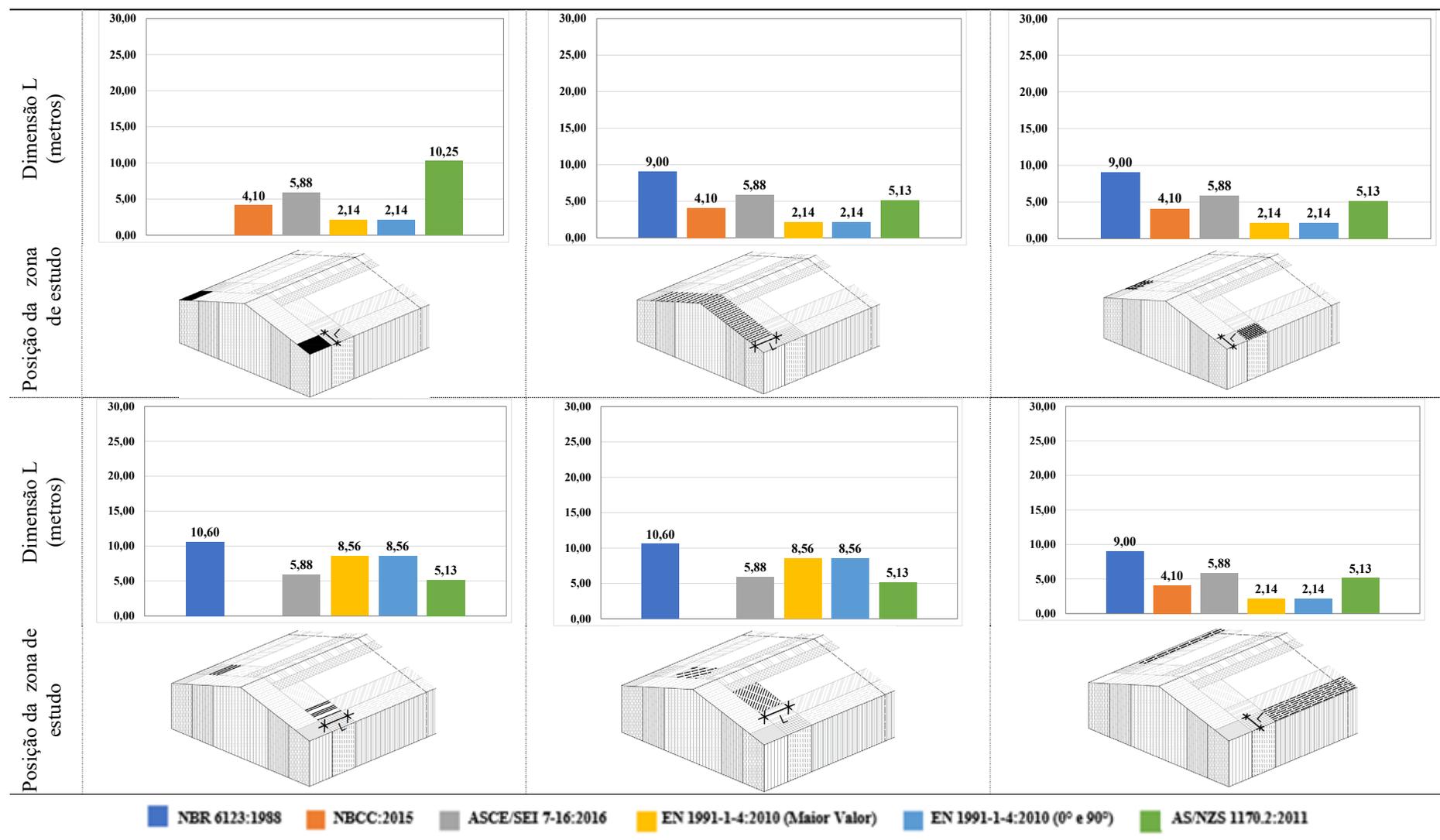
Nota-se que códigos normativos com maior discretização das zonas, apresentam menor variação das dimensões quando comparadas a outras normas. Além disso, os critérios de determinação das dimensões são diferentes por cada norma. Nesse sentido, a dimensão da zona pode ser um dos fatores que provoca variação entre pressões nas diferentes zonas, uma vez que, pelos estudos do Alrawasdeh e Stathopoulos (2015), foi identificado que as dimensões das zonas onde constavam as maiores pressões obtidas em ensaios em túnel de vento eram menores que as estabelecidas na ASCE SEI-7:2010 e NBCC:2010.

Figura 150 – Dimensão das zonas das paredes por norma



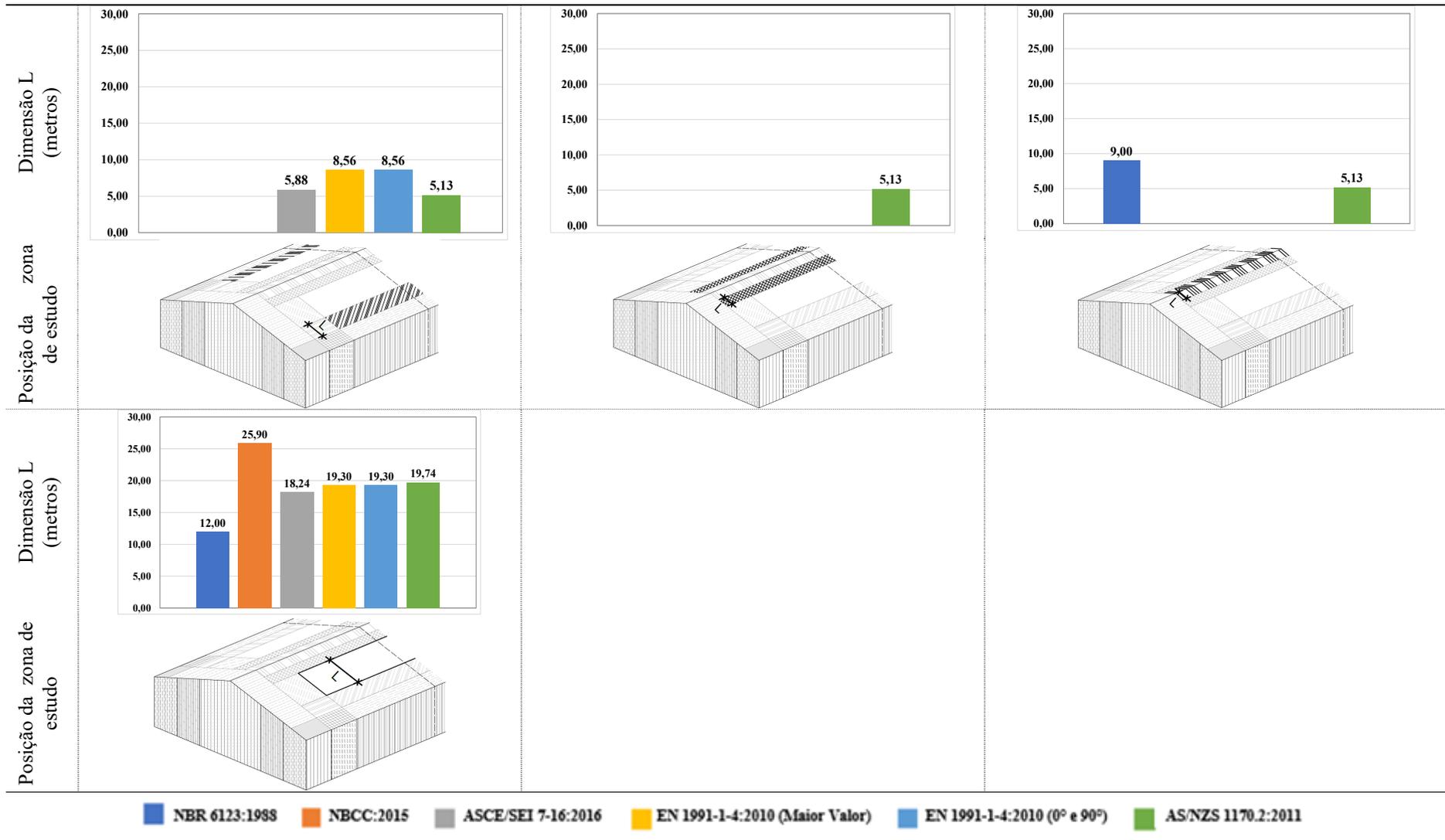
Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Figura 151 – Dimensão das zonas do telhado por norma



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Figura 152 – Dimensão das zonas do telhado por norma



Fonte: elaborado pelo autor (2020).

5.4.5 Proposta para determinação de coeficientes de pressão por zona

Baseado nos resultados desta pesquisa, propõe-se a seguir uma configuração com nova distribuição de zonas e novos conjuntos de coeficientes de pressão externa (locais) para pavilhões de duas águas. Esta nova configuração enquadra os critérios de projeto para pavilhões avaliados nesta pesquisa, sendo:

- baixa altura ≤ 20 metros;
- inclinação de telhado $\leq 3^\circ$;
- proporção de comprimento e largura: $1,5 \leq a/b \leq 2,0$, uma vez que o estudo se baseia em um pavilhão com grandes dimensões ($a = 100$ metros e $b = 60$ metros), obtendo-se relação $a/b = 1,67$;
- razão de altura e largura: $h/b \leq 0,5$.

Dentre os fatores considerados para proposição da distribuição de zonas mostradas na figura 149, destacam-se:

- as escalas geométricas de 1:400 e 1:200 dos ensaios com modelos reduzidos em túnel de vento que apresentaram pressões mais condizentes com as prescritas nas normas avaliadas NBR 6123:1988, NBCC:2015, ASCE/SEI 7-16:2016, EN 1991-1-4:2010 (Maior Valor, 0° e 90°) e AS/NZS 1170.2:2011, além de se aproximarem mais da escala do vento simulado.
- maior discretização das zonas tanto em paredes quanto no telhado, proporciona melhor distribuição das pressões de acordo com a sua magnitude em função do comportamento do vento pelo ângulo de incidência;
- Regiões de cumeeira apresentaram coeficientes de pressão externa local com valores inferiores aos das zonas das grandes áreas centrais de telhado. Isto se deve provavelmente pela baixa inclinação do telhado, podendo reduzir a intensidade dos vórtices que afetam a cumeeira, diminuindo as sucções no telhado. Importante dizer que, as normas ASCE/SEI 7-16:2016, NBCC:2015 e EN 1991-1-4:2010 (Maior Valor, 0° e 90°) também não especificam coeficientes de pressão externa específicos para cumeeiras. A NBR 6123:1988 somente estabelece coeficiente de pressão local para coberturas em duas águas quando a inclinação do telhado for maior ou igual a 5° . Além disso, esse resultado confirma o estudo de Holmes (2004), o qual indica regiões de baixa

turbulência em zonas de cumeeira quando a edificação apresenta baixa altura e baixa inclinação da cobertura.

- Regiões de borda de parede e de telhado com uma única zona apresentaram pressões muito discrepantes em relação as áreas centrais, como por exemplo a NBCC:2015 e ASCE/SEI 7-16:2016 em paredes e a NBR 6123:1988, NBCC:2015 e EN 1991-1-4:2010 (Maior Valor, 0° e 90°) para telhados. Portanto, se a parede e o telhado possuírem duas regiões de borda no contorno do telhado e uma área central, são obtidas distribuições de pressões com reduções de forma gradativa sem grandes diferenças entre as zonas. Este fato pode ser observado nas paredes por meio da NBR 6123, EN 1991-1-4:2010 (Maior Valor, 0° e 90°) e AS/NZS 1170.2:2011 e no telhado pela AS/NZS 1170.2:2011 e pela ASCE/SEI 7-16:2016. Desta forma as distribuições de pressões podem contribuir no projeto para minimizar os efeitos das altas pressões em zonas localizadas com maior tendência a ocorrer falhas.

A normativa EN 1991-1-4:2010 (Maior Valor, 0° e 90°) prevê duas zonas de borda no contorno da cobertura. Mas, para zona de contorno externo especifica um valor pequeno para a dimensão, com valores de pressões locais próximos da zona adjacente. Diante disso, pode-se classificar pelos resultados como uma única zona. Ou então, unir as duas zonas previstas e dividir pela metade de modo a obter uma redução gradativa das pressões;

- a necessidade de se prever uma zona para os cantos do telhado, que na grande maioria dos conjuntos de coeficientes de pressão obtidos em túnel de vento apresentam altas sucções. Entretanto, a norma brasileira é a única que não estabelece coeficientes específicos para região de cantos.

Quanto às dimensões das zonas de canto, pode-se considerar as mesmas dimensões da zona do perímetro do telhado (lateral $a = 100$ metros e oitão $b = 60$ metros) propostas para o contorno do telhado. Esta consideração está baseada nos resultados das normas que preveem zona para canto por mostrarem pressões maiores aos valores das bordas da cobertura.

As dimensões das zonas de borda das paredes “ZL1”, da borda da cobertura “ZC1” e dos cantos “C” representadas na figura 153 foram sugeridas com base nas especificações de cada norma técnica avaliada, como mostra a tabela 32, e nos resultados das pressões obtidas por meio das normas e dos ensaios experimentais.

Tabela 32 – Dimensões de zonas de borda e cantos por norma do pavilhão de estudo em metros

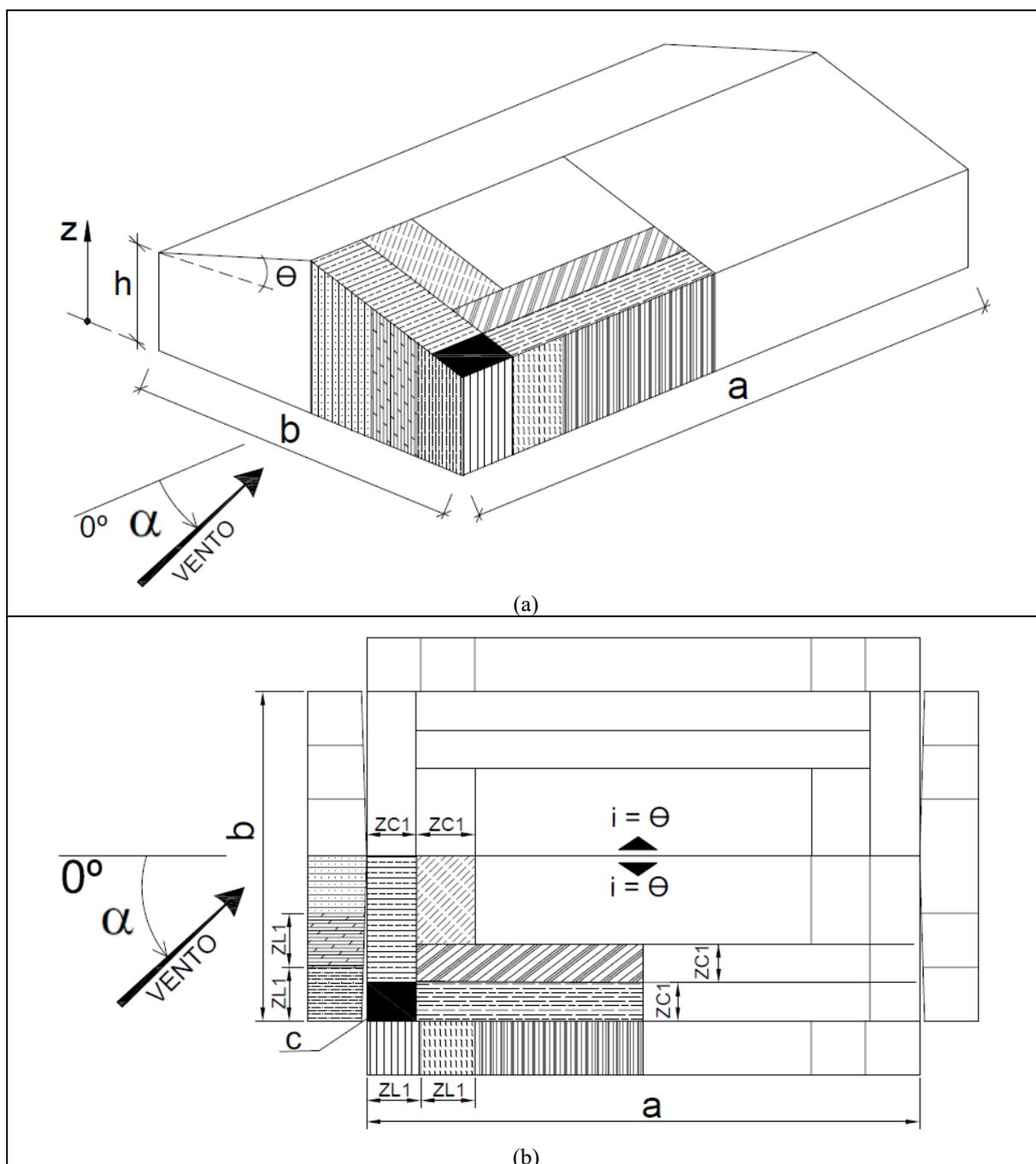
Norma	Critério da dimensão da zona		Dimensão da zona: pavilhão de estudo (m)	
	Paredes	Telhado	Paredes	Telhado
NBR 6123:1988	0,2b ou h (menor dos dois)	b ou 0,15b (menor dos dois)	9,8	9,0
AS/NZS 1170.2:2011	0,2b; 0,2a; h (menor dos três / em duas zonas)	0,2b; 0,2a; h (menor dos três / dividido em duas zonas iguais)	2 x 5,13	2 x 5,13
ASCE SEI 7-16:2016	0,10b ou 0,4h (menor dos dois/2), mas $\geq 0,04b$ ou 0,90m máximo 0,8h	0,6h (borda) e 0,2h (canto)	3,92	5,88 e 1,96
NBCC:2015	0,10b ou 0,4h (menor dos dois), mas $\geq 0,04b$ ou 1m	0,10b ou 0,4h (menor dos dois), mas $\geq 0,04b$ ou 1 metro	3,92	3,92
EN 1991-1-4:2010		[a ou 2h (menor dos dois)] /4		5,35
(Maior Valor) e (0° e 90°)	“a” ou 2h (menor dos dois / 5)	e [a ou 2h (menor dos dois)] /10	4,28	e 2,14

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Avaliando os critérios e os resultados das dimensões de zonas por norma mostrados na tabela 32 para o pavilhão em estudo existem diferenças conforme havia sido apresentado no item 5.4.4 desta pesquisa impactando nos resultados das pressões externas locais mostradas no item 5.4.2.

Diante disso, foram adotados os critérios para cálculo das dimensões de zonas para paredes e telhado que permitem redução gradativa das pressões com maior número de subdivisões e com as relações mais comumente aplicadas dentre as normas técnicas avaliadas. Sendo assim, os parâmetros sugeridos para determinar a dimensão das zonas de borda e os respectivos valores dos coeficientes de pressão locais para paredes e telhado obtidos experimentalmente são apresentados na figura 153, tabela 33 e tabela 34. Importante mencionar que todos os coeficientes mostrados nas tabelas 33 e 34 são os maiores valores dentre todas as direções de ângulos ensaiados em túnel de vento.

Figura 153 – Representação da distribuição das zonas de pressões externas locais e critérios de determinação das respectivas dimensões em metros no formato de perspectiva (a) e no formato planificado (b). Proposta para a NBR-6123.



Notas da figura 153:

- a) Para as dimensões das zonas de paredes $ZL1 = 0,1b$ ou $0,5h$ (o menor dos dois), sendo o máximo $0,8h$.
 b) Para as dimensões das zonas do telhado $ZC1 = 0,6h =$ largura do canto “C”.

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Com os coeficientes de pressão externa local das tabelas 33 e 34 e as pressões dinâmicas para 3 segundos $\hat{q}_{3s} = 1,03kN/m^2$ e para 3600 segundos $\bar{q}_{3600s} = 0,317kN/m^2$, foram Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

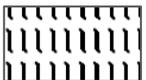
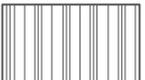
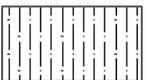
calculadas as pressões externas locais de sobrepressão e de sucção para paredes e telhado do pavilhão estudado mostradas nas tabelas 35 e 36.

Nas tabelas 37 e 38 são mostrados os valores dos coeficientes de pressão e nas tabelas 39 e 40 as pressões externas locais para paredes e cobertura respectivamente, para o pavilhão considerado neste estudo, aplicando-se os critérios estipulados na norma brasileira vigente NBR 6123:1988, porém considerando a configuração de dimensões e localização das zonas proposta por este estudo.

De modo geral, todos os coeficientes de pressão local obtidos na escala 1:400, tanto das bordas como zonas centrais de paredes e telhado, apresentam valores maiores quando comparados aos da escala 1:200. Isso mostra que a escala de ensaio tem influência sobre o comportamento e a distribuição das pressões. Destaca-se também que a geometria do pavilhão ensaiado apresenta grandes dimensões, baixa altura e pequenas inclinações de telhado, o que também influencia nos resultados das pressões.

Importante mencionar que, para todas as representações das zonas mostradas nas tabelas 33 a 42 correspondem as posições das zonas representadas na figura 153.

Tabela 33 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepressão e Sucção] obtidos em túnel de vento em paredes de edificações de planta retangular com $h \leq 20$ metros

Proporções		Escala Geométrica	Coeficientes de pressão externa locais das zonas de paredes												
h/b	a/b		Conjunto de coeficientes	Zonas das laterais a = 100m						Zona dos oitões b= 60m					
															
$\leq 0,5$	$1,5 \leq a/b \leq 2,0$	1:400	\bar{c}	+0,60	-1,06	+0,57	-1,02	+0,43	-0,68	+0,51	-1,13	+0,54	-1,07	+0,51	-0,84
			$(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$	+1,81	-2,45	+1,77	-2,18	+1,49	-1,27	+1,70	-2,56	+1,71	-2,14	+1,67	-1,53
			\hat{c}	+2,31	-2,25	+2,42	-2,18	+2,02	-1,00	+2,43	-0,41	+2,27	-0,40	+2,29	-0,30
			\check{c}	0,00	-3,28	0,00	-2,89	0,00	-1,60	0,00	-3,36	0,00	-2,70	0,00	-1,93
		1:200	\bar{c}	+0,42	-0,93	+0,39	-0,87	+0,30	-0,64	+0,45	-1,04	+0,42	-0,91	+0,31	-0,72
			$(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$	+1,46	-2,09	+1,43	-1,65	+1,23	-1,21	+1,54	-2,10	+1,50	-1,69	+1,36	-1,25
			\hat{c}	+1,88	-0,47	+1,90	-0,51	+1,76	-0,29	+2,08	-0,45	+2,07	-0,36	+1,99	-0,31
			\check{c}	0,00	-2,95	0,00	-2,32	0,00	-1,40	0,00	-2,81	0,00	-2,22	0,00	-1,70

Notas da tabela 33:

- Coeficientes com sinal positivo (+) são de sobrepressão e sinal negativo (-) são de sucção.
- Coeficiente de pressão externa local médio: \bar{c} .
- Coeficiente de pressão externa local (médio + 3,5 RMS: *root mean square*): $(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$.
- Coeficiente de pressão externa local de pico máximo: \hat{c} .
- Coeficiente de pressão externa local de pico mínimo: \check{c} .

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Tabela 34 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepressão e Sucção] obtidos em túnel de vento em telhados com duas águas, simétricos com $\theta \leq 3^\circ$ em edificações de planta retangular e $h \leq 20$ metros

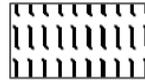
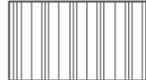
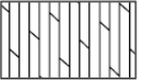
Proporções		Escala Geométrica	Coeficientes de pressão externa locais das zonas do telhado												
h/b	a/b		Conjunto de coeficientes	Zonas de borda das laterais a = 100m				Zonas de borda dos oitões b = 60m				Zonas dos Cantos		Zonas do Centro	
															
$\leq 0,5$	$1,5 \leq a/b \leq 2,0$	1:400	\bar{c}	0,00	-1,60	0,00	-1,24	0,00	-1,53	0,00	-1,41	0,00	-1,86	0,00	-0,72
			$(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$	0,00	-3,09	0,00	-2,44	0,00	-3,02	0,00	-2,66	0,00	-4,16	0,00	-1,51
			\hat{c}	+0,12	-1,06	+0,21	-1,09	+0,19	-2,76	+0,32	-2,42	+0,28	-2,93	+0,35	-1,07
			\check{c}	0,00	-4,10	0,00	-2,99	0,00	-4,04	0,00	-3,40	0,00	-5,16	0,00	-1,93
		1:200	\bar{c}	0,00	-1,47	0,00	-1,06	0,00	-1,39	0,00	-0,91	0,00	-1,82	0,00	-0,62
			$(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$	0,00	-2,81	0,00	-2,06	0,00	-2,79	0,00	-1,87	0,00	-3,89	0,00	-1,18
			\hat{c}	+0,09	-0,48	+0,15	-0,24	+0,09	-0,40	+0,17	-0,20	+0,31	-0,39	+0,17	-0,24
			\check{c}	0,00	-3,67	0,00	-2,64	0,00	-3,84	0,00	-2,71	0,00	-4,85	0,00	-1,61

Notas da tabela 34:

- Coeficientes com sinal positivo (+) são de sobrepressão e sinal negativo (-) são de sucção.
- Coeficiente de pressão externa local médio: \bar{c} .
- Coeficiente de pressão externa local (médio + 3,5 RMS: *root mean square*): $(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$.
- Coeficiente de pressão externa local de pico máximo: \hat{c} .
- Coeficiente de pressão externa local de pico mínimo: \check{c} .

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 35 – Pressões externas locais [Sobrepessão e Sucção] obtidas em túnel de vento nas paredes de edificações de planta retangular com $h \leq 20$ metros: kN/m^2

Proporções		Escala Geométrica	Pressões externas locais das zonas de paredes												
h/b	a/b		Conjunto de pressões	Zonas das laterais a = 100m						Zona dos oitões b= 60m					
															
≤ 0,5	1,5 ≤ a/b ≤ 2,0	1:400	$\hat{q}_{3s} \bar{c}$	+0,62	-1,10	+0,59	-1,05	+0,45	-0,70	+0,53	-1,17	+0,55	-1,10	+0,53	-0,87
			$\bar{q}_{3600s}(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$	+0,57	-0,78	+0,56	-0,69	+0,47	-0,40	+0,54	-0,81	+0,54	-0,68	+0,53	-0,49
			$\bar{q}_{3600s}\hat{c}$	+0,73	-0,71	+0,77	-0,69	+0,64	-0,32	+0,77	-0,13	+0,72	-0,13	+0,73	-0,09
			$\bar{q}_{3600s}\check{c}$	0,00	-1,04	0,00	-0,91	0,00	-0,51	0,00	-1,06	0,00	-0,86	0,00	-0,61
		1:200	$\hat{q}_{3s} \bar{c}$	+0,43	-0,95	+0,40	-0,90	+0,31	-0,66	+0,46	-1,07	+0,43	-0,94	+0,32	-0,74
			$\bar{q}_{3600s}(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$	+0,46	-0,66	+0,45	-0,52	+0,39	-0,38	+0,49	-0,67	+0,47	-0,54	+0,43	-0,40
			$\bar{q}_{3600s}\hat{c}$	+0,59	-0,15	+0,60	-0,16	+0,56	-0,09	+0,66	-0,14	+0,66	-0,12	+0,63	-0,10
			$\bar{q}_{3600s}\check{c}$	0,00	-0,94	0,00	-0,74	0,00	-0,44	0,00	-0,89	0,00	-0,71	0,00	-0,54

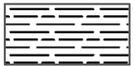
Notas da tabela 35:

- Coeficientes com sinal positivo (+) são de sobrepressão e sinal negativo (-) são de sucção.
- Coeficiente médio e pressão dinâmica de pico para máxima velocidade média sobre 3s: $\hat{q}_{3s} \bar{c}$.
- Coeficiente médio + 3,5 coeficiente RMS (*root mean square*) e pressão dinâmica média para máxima velocidade média sobre 1 hora (3600s): $\bar{q}_{3600s}(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$.
- Coeficiente de pico máximo e pressão dinâmica média para máxima velocidade média sobre 1 hora (3600s): $\bar{q}_{3600s}\hat{c}$.
- Coeficiente de pico mínimo e pressão dinâmica média para máxima velocidade média sobre 1 hora (3600s): $\bar{q}_{3600s}\check{c}$.

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

Tabela 36 – Pressões locais externas [Sobrepressão e Sucção] obtidas pelo túnel de vento em telhados com duas águas, simétricos com $\theta \leq 3^\circ$ em edificações de planta retangular e $h \leq 20$ metros: kN/m^2

Proporções		Escala Geométrica	Pressões externas locais das zonas do telhado												
h/b	a/b		Conjunto Pressões	Zonas de borda das laterais a = 100m				Zonas de borda dos oitões b = 60m				Zonas dos Cantos		Zonas do Centro	
															
$\leq 0,5$	$1,5 \leq a/b \leq 2,0$	1:400	$\hat{q}_{3s} \bar{c}$	0,00	-1,65	0,00	-1,27	0,00	-1,57	0,00	-1,45	0,00	-1,92	0,00	-0,75
			$\bar{q}_{3600s}(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$	0,00	-0,98	0,00	-0,77	0,00	-0,96	0,00	-0,84	0,00	-1,32	0,00	-0,48
			$\bar{q}_{3600s}\hat{c}$	+0,04	-0,33	+0,07	-0,35	+0,06	-0,87	+0,10	-0,77	+0,09	-0,93	+0,11	-0,34
			$\bar{q}_{3600s}\check{c}$	0,00	-1,30	0,00	-0,95	0,00	-1,28	0,00	-1,08	0,00	-1,64	0,00	-0,61
	1:200	$\hat{q}_{3s} \bar{c}$	0,00	-1,52	0,00	-1,09	0,00	-1,43	0,00	-0,93	0,00	-1,88	0,00	-0,64	
		$\bar{q}_{3600s}(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$	0,00	-0,89	0,00	-0,65	0,00	-0,89	0,00	-0,59	0,00	-1,23	0,00	-0,37	
		$\bar{q}_{3600s}\hat{c}$	+0,03	-0,15	+0,05	-0,08	+0,03	-0,13	+0,05	-0,06	+0,10	-0,12	+0,06	-0,07	
		$\bar{q}_{3600s}\check{c}$	0,00	-1,16	0,00	-0,84	0,00	-1,22	0,00	-0,86	0,00	-1,54	0,00	-0,51	

Notas da tabela 36:

- a) Coeficientes com sinal positivo (+) são de sobrepressão e sinal negativo (-) são de sucção.
- b) Coeficiente médio e pressão dinâmica de pico para máxima velocidade média sobre 3s: $\hat{q}_{3s} \bar{c}$.
- c) Coeficiente médio + 3,5 coeficiente RMS (*root mean square*) e pressão dinâmica média para máxima velocidade média sobre 1 hora (3600s): $\bar{q}_{3600s}(\bar{c} + 3,5\hat{c}_{RMS})$.
- d) Coeficiente de pico máximo e pressão dinâmica média para máxima velocidade média sobre 1 hora (3600s): $\bar{q}_{3600s}\hat{c}$.
- e) Coeficiente de pico mínimo e pressão dinâmica média para máxima velocidade média sobre 1 hora (3600s): $\bar{q}_{3600s}\check{c}$.

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 37 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepressão e Sucção] para paredes de edificações de planta retangular com $h \leq 20$ metros determinadas pela NBR 6123:1988

Proporções		Coeficientes de pressão externa locais das zonas de paredes											
h/b	a/b	Zonas das laterais a = 100m			Zona dos oitões b= 60m								
$\leq 0,5$	$1,5 \leq a/b \leq 2,0$	+0,70	-0,93	+0,70	-0,93	+0,70	-0,55	+0,70	-0,93	+0,70	-0,93	+0,70	-0,53

Notas da tabela 37:

a) Coeficientes com sinal positivo (+) são de sobrepressão e sinal negativo (-) são de sucção.

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 38 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepressão e Sucção] para telhados com duas águas, simétricos com $\Theta \leq 3^\circ$ em edificações de planta retangular e $h \leq 20$ metros determinadas pela NBR 6123:1988

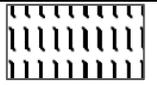
Proporções		Coeficientes de pressão externa locais das zonas do telhado									
h/b	a/b	Zonas de borda das laterais a = 100m		Zona de borda dos oitões b= 60m		Zonas dos cantos	Zonas de Centro				
$\leq 0,5$	$1,5 \leq a/b \leq 2,0$	0,00	-1,72	0,00	-1,72	0,00	-1,79	0,00	-1,79	0,00	-1,01

Notas da tabela 38:

a) Coeficientes com sinal positivo (+) são de sobrepressão e sinal negativo (-) são de sucção.

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 39 – Pressões externas locais [Sobrepressão e Sucção] para paredes de edificações de planta retangular com $h \leq 20$ metros, determinadas pela NBR 6123:1988: kN/m^2

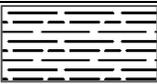
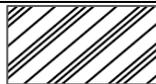
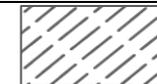
Proporções		Pressões externas locais das zonas de paredes											
h/b	a/b	Zonas das laterais a = 100m			Zona dos oitões b= 60m								
													
$\leq 0,5$	$1,5 \leq a/b \leq 2,0$	+0,72	-0,96	+0,72	-0,96	+0,72	-0,57	+0,72	-0,96	+0,72	-0,96	+0,72	-0,55

Notas da tabela 39:

- a) Coeficientes com sinal positivo (+) são de sobrepressão e sinal negativo (-) são de sucção.
b) As pressões consideram coeficiente médio e pressão dinâmica de pico para máxima velocidade média sobre $3s$: $\hat{q}_{3s} \bar{c}$.

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 40 – Pressões externas locais [Sobrepressão e Sucção] para telhados com duas águas, simétricos com $\theta \leq 3^\circ$ em edificações de planta retangular e $h \leq 20$ metros determinadas pela NBR 6123:1988: kN/m^2

Proporções		Pressões externas locais das zonas do telhado									
h/b	a/b	Zonas de borda das laterais a = 100m		Zona de borda dos oitões b= 60m		Zonas dos cantos	Zonas de Centro				
											
$\leq 0,5$	$1,5 \leq a/b \leq 2,0$	0,00	-1,77	0,00	-1,77	0,00	-1,84	0,00	-1,84	0,00	-1,04

Notas da tabela 40:

- a) Coeficientes com sinal positivo (+) são de sobrepressão e sinal negativo (-) são de sucção.
b) As pressões consideram coeficiente médio e pressão dinâmica de pico para máxima velocidade média sobre $3s$: $\hat{q}_{3s} \bar{c}$.

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 41 – Coeficientes de pressões externas locais [Sobrepressão e Sucção] para paredes de edificações de planta retangular com $h \leq 20$ metros

Proporções		Pressões externas locais das zonas de paredes											
h/b	a/b	Zonas das laterais a = 100m			Zona dos oitões b = 60m								
$\leq 0,5$	$1,5 \leq a/b \leq 2,0$	+0,71	-1,07	+0,75	-1,02	+0,62	-0,68	+0,75	-1,14	+0,70	-1,07	+0,71	-0,84

Notas da tabela 41:

a) Coeficientes com sinal positivo (+) são de sobrepressão e sinal negativo (-) são de sucção.

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Tabela 42 – Coeficientes de pressão externa locais [Sobrepressão e Sucção] para telhados com duas águas, simétricos com $\Theta \leq 3^\circ$ em edificações de planta retangular e $h \leq 20$ metros

Proporções		Coeficientes de pressão externa locais das zonas do telhado											
h/b	a/b	Zonas de borda das laterais a = 100m		Zona de borda dos oitões b = 60m		Zonas dos cantos	Zonas de Centro						
$\leq 0,5$	$1,5 \leq a/b \leq 2,0$	+0,04	-1,60	+0,06	-1,23	+0,05	-1,52	+0,10	-1,41	+0,10	-1,86	+0,11	-0,73

Notas da tabela 42:

a) Coeficientes com sinal positivo (+) são de sobrepressão e sinal negativo (-) são de sucção.

Fonte: elaborado pelo autor (2020).

Pela proposta de nova distribuição de zonas e novos valores de coeficientes de pressão externa local apresentados na figura 153 e tabelas 33 e 34, quando avaliados os coeficientes médios das bordas para paredes nas escalas 1:400 e 1:200, mostram valores muito próximos, mas na grande maioria com valores maiores aos especificados na versão atual da norma brasileira (tabelas 37 e 38). Entretanto, para o telhado, verifica-se que os coeficientes obtidos experimentalmente nas escalas 1:400 e 1:200 também são próximos aos determinados pela NBR 6123:1988, mas com valores menores comparados aos da norma brasileira, com exceção das zonas de canto que mostram valores maiores. Já os valores dos coeficientes das regiões centrais das paredes obtidos no túnel de vento são maiores em relação à norma brasileira, fato esse que não ocorre no telhado.

A subdivisão em três regiões das paredes e do telhado, mostrou uma redução gradativa dos coeficientes sendo possível identificar esse efeito com maior impacto no telhado. Nas paredes, entre as duas bordas, os coeficientes de pressão médios mantêm seus valores praticamente iguais. Porém, entende-se que a redução gradativa possibilita uma melhor distribuição dos esforços de acordo com o comportamento da ação do vento.

Nas zonas de canto da cobertura são identificadas as regiões com os maiores valores de coeficientes de pressão negativos. São as zonas de altas sucções, que provavelmente são decorrentes dos vórtices de topo, regiões que necessitam de maior atenção na fase de projeto e não estão contempladas na versão atual da norma brasileira para determinação da ação do vento. No entanto, estão inclusos na nova configuração de coeficientes de pressão local propostos neste trabalho.

Quando realizados ensaios em túnel de vento e com o processamento dos dados experimentais, foram obtidos coeficientes médios, os coeficientes de pico de sobrepressão e de sucção, bem como os coeficientes (médios +3,5 RMS) para qualquer uma das zonas das superfícies do telhado e das paredes. No entanto, como pode ser visto nas propostas tabela 41 e 42, os resultados finais são apresentados em termos de **coeficientes de pressão externa médios**, os quais foram obtidos dividindo-se as maiores pressões obtidas através dos ensaios em túnel de vento, para as escalas de 1:200 e 1:400, pela pressão dinâmica de pico, com velocidades medidas sobre 3 segundos (\hat{q}_{3s}) para os valores de coeficientes médios e (\bar{q}_{3600s}) para os coeficientes: médios + 3,5RMS, picos máximos e picos mínimos.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

As conclusões descritas a seguir são válidas para edificações de grandes dimensões a duas águas, baixa altura e pequena inclinação de telhado.

As normas avaliadas no estudo apresentam diferentes métodos de cálculo para determinação das pressões externas locais em função do vento. Por adotarem diferentes critérios para considerações de rugosidade do terreno, tempo de retorno, percentual de probabilidades de excedência das velocidades, tempo de medição das velocidades do vento, dentre outros fatores, mesmo fazendo-se a equivalência entre parâmetros dentre as normas avaliadas, foram identificadas discrepâncias nos valores das pressões dinâmicas superiores a 20%. Com isso, fica evidente a forte influência destes parâmetros na especificação das pressões externas locais.

Divergências foram encontradas também entre os coeficientes de pressão externa local dentre os procedimentos normativos avaliados, sendo menores entre sobrepessões e maiores nas sucções. De modo geral, foram identificados coeficientes de pressão locais muito diferentes dentro de uma mesma zona entre as normas técnicas tanto em paredes como no telhado, observando-se as maiores distorções em coeficientes negativos. Entretanto, destaca-se que, essas diferenças surgem em grande parte quando avaliado o coeficiente de pressão local de “forma isolada”, sem considerar a pressão dinâmica que possui em sua definição o uso do critério da máxima velocidade com medições realizadas sobre 3, 600, e 3600 segundos, dependendo da normativa. Critério este que tem como finalidade, a equalização das pressões entre as normas, na medida do possível.

Pelas avaliações dos resultados experimentais verificou-se que para todos os conjuntos de coeficientes de pressões médios, médios +3,5 RMS, picos máximos e picos mínimos para os ângulos de incidência do vento ensaiados ocorrem reduções tanto nas sucções como sobrepessões de telhados e sucções de paredes para as escalas geométricas 1:400 em relação a 1:200 e 1:100. As sobrepessões em paredes independem do ângulo de atuação do vento, porém também se evidenciou uma pequena redução na medida que são consideradas escalas geométricas maiores como 1:200 e 1:100.

Entretanto, foram identificados pequenos acréscimos graduais dos coeficientes de pressão para algumas direções de ângulos ensaiados de acordo com o aumento da escala geométrica utilizada para o modelo. Em alguns casos, mais especificamente em coeficientes médios e (médios + 3,5RMS), os coeficientes da escala 1:200 e 1:100 mantiveram os valores da escala 1:400. No entanto, é importante mencionar que o acréscimo destes coeficientes na escala 1:100 ocorreu devido efeitos secundários das paredes do túnel, por não ter sido feita a correção do bloqueio.

Como o vento simulado no túnel de vento tem escala entre 1:200 a 1:400, as escalas geométricas 1:400 e 1:200 servem para comparar os coeficientes de pressão dos modelos ensaiados. Por estas duas escalas, foram afirmados estudos mostrados neste trabalho que em vento atuando sobre superfícies de edificações de paredes e telhados em pavilhões de grandes dimensões podem ocorrer redução das magnitudes de pressões ao longo do comprimento da edificação.

Pelas comparações dos resultados determinados pelos procedimentos normativos em relação aos obtidos por ensaios em túnel de vento utilizando-se as mesmas configurações de distribuições de zona das normas, para maior parte das zonas, as sobrepressões se mostram maiores por meio das normas do que experimentalmente. Contudo, em relação as sucções, com exceção da NBR 6123:1988 e EN 1991-1-4:2010 (Maior Valor), as pressões experimentais apresentaram os maiores valores.

Nas pressões tanto experimentais como por meio das normas mesmo que determinadas com velocidades máximas sobre 3, 600 ou 3600 segundos, apresentaram variações em algumas regiões dentro de uma mesma escala e entre escalas.

Através dos ensaios em túnel de vento dos modelos reduzidos deste estudo com relação de comprimento/largura de 1,67 obteve-se diferenças entre os conjuntos das pressões externas locais e entre diferentes escalas superiores a 20% e 30%.

Diante de todos resultados avaliados foi possível propor uma nova configuração de zonas para distribuição das pressões de paredes e telhados simétricos para pavilhões em duas águas, com altura $h \leq 20$ metros, ângulos de inclinação da cobertura $\leq 3^\circ$, grandes dimensões com geometrias retangulares em planta, com relação $1,5 \leq a/b \leq 2,0$, e razão de $h/b \leq 0,5$.

A nova proposta levou em conta fatores como as escalas geométricas de ensaio com maior número de zonas com valores de pressões próximos aos das normativas avaliadas; número de

discretizações de zonas, comportamento aerodinâmico da edificação, valores das pressões por zona, zonas atualmente não previstas na norma brasileira vigente e a necessidade de se padronizar um método de determinação das dimensões das regiões de borda e cantos.

Pode-se verificar que a escala de ensaio tem forte influência sobre o comportamento e distribuição das pressões devidas ao vento, além das grandes dimensões da geometria, da baixa altura e pequena inclinação do telhado.

A partir deste estudo, obteve-se um melhor detalhamento da distribuição, além de estimativa das magnitudes, das pressões em pavilhões de grandes dimensões e baixas alturas, propondo-se inclusive alterações para aprimoramento do procedimento de projeto da força devida ao vento estabelecido na norma brasileira.

Recomenda-se dar continuidade aos ensaios em túnel de vento para determinar as pressões externas locais de outras proporções incluindo-se os pavilhões de grandes comprimentos muito comuns atualmente na construção civil brasileira, conforme mostrado no decorrer deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALRAWASHDEH, H.; STATHOPOULOS, T. **Wind pressures on large roofs of low buildings and wind codes and standards**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 147, p. 212-225, 2015. Elsevier Ltda, 2015.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCE, Standard ASCE/SEI 7-16**. Structural Engineering Institute. Reston, Virginia, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6123:1988. Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO METÁLICAS – ABCEM e ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO EM AÇO - CBCA. **Cenário dos fabricantes de estruturas de aço**. 2017.
- ATLAS BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS: 1991 A 2012**. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2. ed. rev. ampl. – Florianópolis: CEPED UFSC, 2013. 126 p.: il. color.; 22 cm.
- BARLOW, J. B.; RAE, W. H.; POPE, A. **Low speed wind tunnel testing**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1999. 724 p.
- BLESSMANN, J. **Introdução as ações dinâmicas do vento**. 2° Ed. da Universidade / UFRGS. Porto Alegre, 2005.
- BLESSMANN, J. **Ação do vento em telhados**. 2. Ed. ver. Ampl. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.
- BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das construções**. 3. Ed. Fac-similar. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2011.
- BLESSMANN, J. **O vento na engenharia estrutural**. 2. Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2013a.
- BLESSMANN, J. **Pressão interna**. 3 Ed. Rev. Ampl. Porto Alegre. Ed: UFRGS, 2013b. 104 p.
- CASE, P. C.; ISYUMOV, N. **Wind loads on low buildings with 4: 12 gable roofs in open country and suburban exposures**. Ed. Elsevier Science Ltda, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, N° 77&78, 1998.
- DAVENPORT, A. G. **On the assessment of the reliability of wind loading on low building**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam – Printed The Netherlands, 1983.
- ELSHARAWY, M.; STATHOPOULOS, T.; GALAL, K. **Wind-Induced torsional loads on low buildings**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 104-106, p. 40-48. Elsevier Ltda, 2012.
- ENGINEERING SCIENCES DATA UNIT – ESDU. **Characteristics of atmospheric turbulence near the ground: Part 1 – definitions and general information**. Data item 73030. London. Engineering Sciences Data Unit, 1974.
- EUROPEAN STANDARD NORME EUROPÉENNE EUROPAISCHE NORM. **EN 1991-1-4:2005+A1:2010. Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-4: general actions – Wind**

actions. European Committee for Standardization Comité Européen de Normalization Europäisches Komitee für Normung. Brussels, 2010.

EUROCODE 1, **Basis of design and actions on structure** - Part 2.7: Wind Loads; Draft (1992).

FLAGA, A.; KLAPUT, R.; KOCON, A. **Wind tunnel tests of wind pressure distribution for four different tent halls.** Technical Transactions 3/2018, Czasopismo Techniczne 3/2018, Civil Engineering. Institute of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering, Wind Engineering Laboratory, Cracow University of Technology, 2018.

G1. **Tubarão decreta calamidade pública por danos causados por vendaval.** 2016. Disponível em: < <http://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2016/10/tubarao-decreta-calamidade-publica-por-danos-causados-por-vendaval.html>>. Acesso em: 14 nov. 2020.

G1. **Galpão de reciclagem desaba sobre quatro pessoas após ventania em GO.** 2017. Disponível em: < <http://g1.globo.com/goias/noticia/2017/02/galpao-de-reciclagem-desaba-sobre-quatro-pessoas-apos-ventania-em-go.html>>. Acesso em: 14 nov. 2020.

GAZETA DO POVO. **Tempestade destrói centro automotivo em São José dos Pinhais.** 2016. Disponível em: < <https://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/tempestade-destrui-centro-automotivo-em-sao-jose-dos-pinhais-c4ik4348wo05yz6nc362kai8/>>. Acesso em: 14 nov. 2020.

GAÚCHAZH. **Uma visita ao epicentro da destruição causada pela tempestade em Coxilha.** 2018. Disponível em: < <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2018/06/uma-visita-ao-epicentro-da-destruicao-causada-pela-tempestade-em-coxilha-cjidbfffq0csv01paomd6tiif.html>>. Acesso em: 05 de nov. de 2020.

GAVANSKI, E.; UEMATSU, Y. **Local wind pressures acting on walls of low-rise buildings and comparisons to the Japanese and US wind loading provisions.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 132, p. 77-91. Elsevier Ltd, 2014.

GEURTS, C. P.; KOPP, G. A.; MORRISON, M. J. **A review of the wind loading zones for flat roofs in code provisions.** In: Conference Paper: 6th European and African Conference on Wind Engineering, (EACWE 2013), Cambridge. 2013. p. 1-9.

GIERSON, M. L.; PHILLIPS, B. M.; DUTHINH, D.; AYYUB, B. M. **Wind-pressure coefficients on low-rise building enclosures using modern wind-tunnel data and Voronoi diagrams.** ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, v. 3 (4). American Society of Civil Engineers, 2017.

GINGER, J.; HENDERSON, D.; HUMPHREYS, M.; KONTHESINGHE, C.; STEWART, M. G. **Wind loads on the frames of industrial buildings.** Australian Journal of Structural Engineering Vol. 16, No. 2, April, pp. 169-177 - Institution of Engineers Australia, 2015.

GINGER, J. D.; HOLMES, J. D. **Effect of building length on wind loads on low-rise building with a steep roof pitch.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 91. Ed Elsevier Ltda, 2003.

GONÇALVES, R. M.; SALES, J. J. De; MALITE, M.; NETO, J. M. **Ação do vento nas edificações: Teoria e exemplos.** São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2004. 67 p.

HO, T. C. E.; SURRY, D.; DAVENPORT, A. G. **Variability of low building wind loads due to surroundings**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, V. 38. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam – Printed in The Netherlands, 1991.

HOLMES, J. D. **Wind Loading of Structures**. Londres, 2001. Reimpressão: 2003. Taylor e-Library Ed., 2004.

HONG, E. S. **Wall Pressure Coefficients for Low-to High-Rise Buildings**. Graduated Program in Civil Environment Engineering – Thesis of Master of Engineering Science. The University of Western Ontario, 2017

HUANG, G.; HE, H.; MEHTA, C. K.; LIU, X. **Data-based probabilistic damage estimation for asphalt shingle roofing**. Journal of Structural Engineering, v. 141, n. 12, p. 04015065. American Society Civil Engineer, 2015.

JANAJREH, I.; SIMIU, E. **Large eddy simulation of wind loads on a low-rise structure and comparison with wind tunnel results**. Mechanics Engineering and Materials Vols: 152-154. Trans Tech Publications, Switzerland, 2012

JENDZELOVSKY, N.; ANTAL, R.; KONECNA, L. **Investigation of the external pressure coefficients on the façade of the triangular high-rise structure with curved corners**. Procedia Engineering 190, 398 – 405. ScienceDirect. Structural and Physical Aspects of Construction Engineering. STU in Bratislava, Faculty of Civil Engineering, Radlinskeho 11, Bratislava, Slovak Republic. Elsevier, 2017.

JING, Xiao-kun; LI, Yuan-qi. **Wind tunnel tests for wind pressure distribution on gable roof buildings**. The Scientific World Journal, v. 2013. Hindawi Publishing Corporation, 2013.

KASPERSKI, M. **Design wind load for low-rise buildings: a critical review of wind load specifications for industrial buildings**. Ed. Elsevier Science B.V. N° 61. Journal of Wind Engineering and Industrial. Bochum, Germany, 1996.

KIND, R. J. **Worst Suctions Near Edges Of Flat Rooftops On Low-Rise Buildings**. Journals of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Ed Elsevier Science Publishers B. V. Amsterdam – Printed in the Netherlands, 1986.

KUMAR, K. S.; STATHOPOULOS, T. **Power spectro of wind pressures on low building roofs**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, V. 74-76. Elsevier Science Ltda, 1998.

KUMAR, N.; DAYAL, V.; SARKAR, P. P. **Failure of wood-framed low-rise buildings under tornado wind loads**. Journal Engineering Structures, v. 39, p. 79-88. Elsevier Ltda, 2012.

KUMAR, K. S.; STATHOPOULOS, T. **Wind Loads on Low Building Roofs: A Stochastic Perspective**. Journal of Structural Engineering, 2000.

LABORATÓRIO DE AERODINÂMICA DAS CONSTRUÇÕES – LAC. **Túnel de vento**. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/lac/tunel.htm>. Acesso em 29 nov. 2020.

LABORATÓRIO DE AERODINÂMICA DAS CONSTRUÇÕES – LAC. **Registros fotográficos de estudos técnicos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019.

LI, R.; CHOWDHURY, A. G.; BITSUAMLAK, G.; GURLEY, K. R. **Wind effects on roofs with high-profile tiles: experimental study**. Journal of Architectural Engineering of American Society of Civil Engineers, 2014

LIN, J – X, SURRY, D., TIELEMAN, H.W. **The distribution of pressure near roof corners of flat roof low buildings**. Ed Elsevier Science B. V. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 56, 1995.

LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. **Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. Turbulência: Capítulo 5**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas-ABCM, v. 4, p. 137-163.1. Coleção Cadernos de Turbulência, 4, 2004

LOREDO-SOUZA, A. M. **Após 30 anos, norma de vento entra em revisão**: depoimento [06 set. 2016]. Entrevistador: Altair Santos. São Paulo: Cimento Itambé. Entrevista concedida ao Cimento Itambé. Disponível em: < <http://www.cimentoitambe.com.br/norma-de-vento-em-revisao/>>. Acesso em: 26 fev. 2018.

MAKOWSKI, D. G. **Ação do vento em coberturas isoladas**, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

MARCELINO, I. P. V. de O. **Análise De Episódios De Tornado Em Santa Catarina: CARACTERIZAÇÃO SINÓTICA E MINERAÇÃO DE DADOS**. 2003. 223 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. – (INPE-12145-TDI/969).

MEECHAM, D.; SURRY, D.; DAVENPORT, A.G. **The magnitude and distribution of wind-induced pressures on hip and gable roofs**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, Printed in the Netherlands, 1991.

MENSAH, A. F.; DATIN, P.L; PREVATT, D. O.; GUPTA, R.; LINDT, J. W. Van de. **Database-assisted design methodology to predict wind-induced structural behavior of a light-framed wood building**. Journal Engineering Structures, v. 33, n. 2, p. 674-684. Elsevier Ltda, 2011.

MORRISON, M. J. **Response of a Two-Story Residential House Under Realistic Fluctuating Wind Loads**. Graduate Program in Civil Environmental Engineering – Doctor Thesis. The University of Western Ontario, 2010.

MORIYAMA, H.; SASE, S.; UEMATSU, Y.; YAMAGUCHI, T. **Wind tunnel study of the interaction of two or three side-by-side pipe-framed greenhouses on wind pressure coefficients**. Transactions of the ASABE. American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 53, n. 2, p. 585-592, 2010.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA. ASSOCIATE COMMITTEE ON THE NATIONAL BUILDING CODE. **National building code of Canada**. Associate Committee on the National Building Code, National Research Council, 2015.

New Zealand Standards AS/NZS 1170.2:2011. **Structural Design Actions part 2 – Wind actions**. New Zealand, 2011.

New Zealand Standards AS/NZS 1170.0:2011. **General Principles part 0**. New Zealand, 2011.

PITTA, J. A. A. **Acidentes em edificações devidos à ação do vento**. São Carlos: EdUFSCar, 2014, 39 p. – (Série apontamentos).

POPE, A. **Low-Speed Wind Tunnel Testing. “A Wiley – Interscience Publication”. Included Index. I. Wind tunnels. I. Era, William H. II. Title**. Library of Congress Cataloging in publication Data. Canadá, 1984.

Avaliação experimental em túnel de vento dos efeitos de escala na determinação das pressões externas locais nas paredes e coberturas de um pavilhão industrial

ROCHA, D. H.; BOTEGA, R. R. **Estudos de acidentes em galpões ocorridos pela ação do vento: Avaliação dos danos ocasionados pela tempestade de 16 de outubro de 2016 em Tubarão SC.** 2017. 96 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão - SC, 2017.

SARKAR, P. P.; HAAN, Jr. F. L. **Next generation wind tunnels for simulation of straight-line thunderstorm-and tornado-like winds.** Wind Simulation and Testing Laboratory, Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics, Iowa State University, USA. Nist Special Publication SP, 141-158, 2002.

SARKAR, P. P.; HAAN, Jr. F. L.; BALARAMUDU, V.; SENGUPTS, A. **Laboratory Simulatin of Tornado and Microburst to acess Wind Loads on Buildings.** Iowa State University. Structures Congress, Ascelibrary, 2006.

STATHOPOULOS, T. **Fluctuating Wind Pressures on Low Building Roofs.** Journal of Structural Engineering. Vol. 109, N°. 1. Centre for Building Studies, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, 1983.

STATHOPOULOS, T; SURRY, D. **Scale effects in wind tunnel testing of low building.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam – Printed The Netherlands, 1983

STATHOPOULOS, T. **Wind loads on low-rise buildings: a review of the state of the art.** Journal of Structures Engineering, Vol. 6. Centre Building Studies, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, 1984.

STATHOPOULOS, T; MOHAMMADIAN, A. R. **Wind Loads on low with mono-sloped roofs.** Ed. Elsevier Ltda. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 1986.

STATHOPOULOS, T.; SAATHOFF, P. **Wind pressure on roofs of various geometries.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 38. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam – Printed The Netherlands, 1991.

STATHOPOULOS, T.; SAATHOFF, P. **Codification of Wind-Pressure Coefficients for Multispan Gable Roofs.** Journal of Structural Engineering, Vol. 120. N° 8, 1994.

STATHOPOULOS, T.; WANG, K.; WU, H. **Proposed new Canadian wind provisions for the design of gable roof.** Journal Civil Engineering, Vol. 27. Canada, 2000

SUARIS, W.; IRWIN, P. **Effect of roof-edge parapets on mitigating extreme roof suction.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 98, n. 10-11, p. 483-491, 2010.

UEMATSU, Y.; ISYUMOV, N. **Wind pressures acting on low-rise buildings.** Ed. Elsevier Science Ltda. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, N° 82, 1999.

ZISIS, L.; STATHOPOULOS, T. **Wind-Induced cladding and Structural Loads on Low - Wood Building.** Journal of Structural Engineering, Vol. 135, 2009.