

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

AVALIAÇÃO DE COEFICIENTES AERODINÂMICOS DE  
PRESSÃO EM TELHADOS QUATRO ÁGUAS

William de Oliveira Pol

Passo Fundo

2022



CIP – Catalogação na Publicação

---

P762a Pol, William de Oliveira  
Avaliação de coeficientes aerodinâmicos de pressão em  
telhados quatro águas / William de Oliveira Pol. – 2022.  
109 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Zacarias Chamberlain Pravia.  
Dissertação (Mestre em Engenharia Civil e Ambiental) –  
Universidade de Passo Fundo, 2022.

1. Telhados. 2. Telhados - Projetos e construção. 3. Pressão  
do vento - Aerodinâmica. I. Chamberlain Pravia, Zacarias,  
orientador. II. Título.

CDU: 624.042.4

---

Catalogação: Bibliotecário Luís Diego Dias de S. da Silva – CRB 10/2241

William de Oliveira Pol

AVALIAÇÃO DE COEFICIENTES AERODINÂMICOS DE  
PRESSÃO EM TELHADOS QUATRO ÁGUAS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre, sob a orientação do Prof. Dr. Zacarias Martim Chamberlain Pravia.

Zacarias Martin Chamberlain Pravia, Dr.

Orientador

Phd. Dr. Acir Mércio Loredo Souza

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Dr. Gustavo Prates Mezzomo

Universidade de Passo Fundo – UPF

Dr. Moacir Kripka

Universidade de Passo Fundo – UPF

Passo Fundo

2022

“Eles pensam que a maré vai, mas nunca volta. Até agora eles estavam comandando o meu destino e eu fui, fui, fui, fui recuando, recolhendo fúrias. Hoje eu sou onda solta e tão forte quanto eles me imaginam fraca. Quando eles virem invertida a correnteza, quero saber se eles resistem à surpresa, quero ver como eles reagem à ressaca.” (Bibi Ferreira)

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer ao meu orientador professor Dr. Zacarias Chamberlain Pravia por toda troca de conhecimento e experiência, pela paciência e conselhos, bem como pela parceria construída.

Agradeço à minha amiga e professora Dra. Marinês Silvani Novello por todo o apoio prestado e auxílio na interpretação das normas internacionais.

Agradeço aos meus pais, por todo o suporte, amparo, zelo e muita motivação para que mais um ciclo fosse concluído, além de compreender a minha ausência em tantos momentos especiais.

## RESUMO

Toda edificação está sujeita a ação do vento condizente com sua zona de imersão, ou seja, dependendo das condições do entorno e sua geometria será a magnitude da força a ela imposta. A pressão externa, importante para desenvolver projetos estruturais, é essencialmente dependente das propriedades da turbulência do escoamento e, sobretudo, da velocidade. São os coeficientes de pressão externas que relacionam a força atuante no sólido imerso ao fluxo, com a força dinâmica do vento a barlavento da edificação sendo este fadado a rugosidade, incidência de vento e forma da edificação. Logo, através dos coeficientes de pressão que se determina o quanto da pressão dinâmica do vento será tomada como esforço na análise estrutural. Os telhados quatro águas começaram a serem estudados após análises pós furacão revelarem que algumas residências menos danificadas ou intactas possuem este tipo de cobertura. Doravante, esta tipologia ficou conhecida pela sua resistência comprovada defronte a ventos extremos, sendo comumente utilizado na construção civil. No Brasil, a norma ABNT NBR 6123:1988 que preconiza o cálculo das ações devidas ao vento em edificações, não contempla telhado quatro águas em suas premissas. Logo, objetiva-se, a partir de simulações *computational fluid dynamics* (CFD) avaliando diferentes proporções geométricas e inclinações de coberturas variadas pode-se mapear o comportamento do vento determinar subsídios de cálculo para seu adequado dimensionamento. Para tal, foram reproduzidos ensaios de estudos consolidados afim de validar a metodologia numérica e em contrapartida compara-la com códigos ASCE-7:2022, *National Building Code of Canada 2005*, EUROCODE-1991-1-4:2010 e AS/NZS 1170.2:2011:2017 detentores de grande renome internacional. Ao findar do processo propõem-se uma contribuição inicial de ábaco de coeficientes de pressão externa para cobertura quatro águas para auxiliar engenheiros estruturais na determinação de ações do vento junto a essa tipologia de cobertura.

**Palavras-chave:** Telhado quatro águas; coeficientes de pressão; CFD; ABNT NBR 6123:1988; ASCE-7:2022; National Building Code of Canada 2005; AS/NZS 1170.2:2017; EUROCODE-1991-1-4:2010; Ação do vento.

## ABSTRACT

Every building is subject to wind action consistent with its immersion zone, that is, depending on the surrounding conditions and its geometry will be the magnitude of the force imposed on it. The external pressure, important for developing structural projects, is essentially dependent on the flow turbulence properties and, above all, on the velocity. They are the external pressure coefficients that relate the force acting on the solid immersed to the flow, with the dynamic force of the wind to the windward side of the building, which is bound to the roughness, wind incidence and shape of the building. Therefore, through the pressure coefficients it is determined how much of the dynamic pressure of the wind will be taken as effort in the structural analysis. The hip roofs began to be studied after post-hurricane analyzes revealed that some less damaged or intact homes had this type of coverage. Henceforth, this typology became known for its proven resistance to extreme winds, being commonly used in civil construction. In Brazil, the ABNT NBR 6123:1988 standard, which recommends the calculation of actions due to wind in buildings, does not include a hipped roof in its premises. Therefore, the objective is, from computational fluid dynamics (CFD) simulations, evaluating different geometric proportions and slopes of different roofs, it is possible to map the wind behavior to determine calculation subsidies for its adequate sizing. To this end, essays from consolidated studies were reproduced in order to validate the numerical methodology and, on the other hand, compare it with codes ASCE-7:2022, National Building Code of Canada 2005, EUROCODE-1991-1-4:2010 and AS/NZS 1170.2 .2011:2017 holders of great international reputation. At the end of the process, an initial contribution of an abacus of external pressure coefficients for hip roofs is proposed to assist structural engineers in the determination of wind actions with this roof typology.

**Keywords:** Hip roof; pressure coefficients; CFD; ABNT NBR 6123:1988; ASCE-7:2022; National Building Code of Canada 2005; AS/NZS 1170.2:2017; EUROCODE-1991-1-4:2010; Wind action.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE QUADROS.....	11
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA.....	13
1.2 JUSTIFICATIVAS.....	13
1.3 OBJETIVOS.....	14
1.3.1 Objetivo geral.....	14
1.3.2 Objetivos específicos.....	14
<b>2 FUNDAMENTOS DA ENGENHARIA DO VENTO.....</b>	<b>15</b>
2.1 ESTADO DA ARTE.....	15
2.1.1 Simulação do vento natural.....	15
2.1.2 Simulação de telhado quatro águas.....	17
<b>3 AÇÃO DO VENTO NAS EDIFICAÇÕES.....</b>	<b>21</b>
3.1.1.1 <i>Inclinação do telhado</i> .....	23
3.1.1.2 <i>Forma e proporção do telhado</i> .....	25
3.1.2 <b>Efeitos Dinâmicos e Edificações Esbeltas e Flexíveis</b> .....	<b>26</b>
3.2 CONCEITOS TEÓRICOS BÁSICO DE FLUIDODINÂMICA.....	28
3.2.1 <b>Compressibilidade do ar</b> .....	<b>28</b>
3.2.2 <b>Conceito de fluido perfeito ou ideal</b> .....	<b>28</b>
3.2.3 <b>Viscosidade</b> .....	<b>28</b>
3.2.4 <b>Teorema da conservação da massa</b> .....	<b>29</b>
3.2.5 <b>Teorema da Conservação de Energia ou Teorema de Bernoulli</b> .....	<b>30</b>
3.2.6 <b>Pressão Estática</b> .....	<b>31</b>
3.2.7 <b>Pressão Total</b> .....	<b>31</b>
3.2.8 <b>Pressão de Obstrução</b> .....	<b>32</b>
3.2.9 <b>Turbulência ou pressões flutuantes</b> .....	<b>32</b>
3.2.10 <b>Coefficientes de pressão, de forma e de atrito</b> .....	<b>33</b>
3.2.11 <b>Modelo de Turbulência k-ε Padrão</b> .....	<b>35</b>
3.3 CRITÉRIOS NORMATIVOS.....	36



3.3.1	ABNT NBR 6123:1988.....	36
3.3.2	NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA (2011).....	39
3.3.3	ASCE/SEI 7-22 (2022) .....	40
3.3.4	EUROCODE-1991-1-4 (2010) .....	43
3.3.5	AS/NZS 1170.2:2017 (2017).....	45
3.4	LEIS DE SEMELHANÇA E NÚMERO DE REYNOLDS .....	47
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA DE PESQUISA .....</b>	<b>49</b>
4.1	MÉTODO ANALÍTICO.....	51
4.2	MÉTODO NUMÉRICO .....	52
4.2.1	Características do fluxo .....	52
4.2.2	Modelagem.....	52
4.2.3	Malha .....	53
4.2.4	Condições de contorno.....	55
4.2.5	Método de solução .....	56
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>61</b>
5.1	RESULTADOS MÉTODO ANALÍTICO.....	61
5.2	RESULTADOS MÉTODO NUMÉRICO .....	72
5.3	MÉTODO ANALÍTICO X MÉTODO NUMÉRICO .....	81
5.4	PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO .....	95
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>97</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>100</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Linhas de fluxo para edificação construída com cobertura tipo duas águas.....	21
<b>Figura 2</b> - Perfil de velocidade média (em km/h) proposto por Davenport.....	22
<b>Figura 3</b> – Influência da inclinação do telhado. ....	23
<b>Figura 4</b> – Influência da inclinação do telhado na formação de vórtices. ....	24
<b>Figura 5</b> – Efeito de recolamento do escoamento devido a profundidade do pavilhão.....	25
<b>Figura 6</b> - Desprendimento de Vórtices.....	26
<b>Figura 7</b> - Efeito de Golpe. ....	26
<b>Figura 8</b> - Galope: movimento da edificação e forma - Maiores que os dos vórtices. ....	27
<b>Figura 9</b> - Drapejamento: acoplamento de vibrações em diferentes graus de liberdade - Ocorre em estruturas esbeltas (seção alongada). ....	27
<b>Figura 10</b> - Contorno de um tubo de corrente de um fluido.....	29
<b>Figura 11</b> - Tubo de Pitot para medição da pressão total. ....	32
<b>Figura 12</b> - Definição do coeficiente de pressão.....	33
<b>Figura 13</b> - Linhas de fluxo no entorno de um objeto não maciço com abertura. ....	34
<b>Figura 14</b> – Coeficientes de pressão externa para paredes e telhados – método direcional...	40
<b>Figura 15</b> – Esquema telhado 4 águas: (a) Quadrantes do telhado; (b) Detalhe beiral. ....	49
<b>Figura 16</b> - Proporções do sólido prismático típico: (a) Vista lateral da seção típica do volume de controle; (b) Vista superior típica do volume de controle. ....	53
<b>Figura 17</b> – Diagrama de qualidade de malha.....	54
<b>Figura 18</b> – Esquema de cálculo da ortogonalidade da malha. ....	54
<b>Figura 19</b> – Malha lançada junto ao volume de controle. ....	55
<b>Figura 20</b> – Corte no plano – Malha lançada junto ao modelo da edificação.....	55
<b>Figura 21</b> – Modelo junto ao Fluent para atribuição de condições de contorno.....	56
<b>Figura 22</b> – Volume de controle usado para ilustrar a discretização de uma equação de transporte escalar.....	57
<b>Figura 23</b> – Processo da simulação numérica computacional.....	60
<b>Figura 24</b> – Comparativo direto método numérico x túnel de vento x método analítico – Vento 0° - Meechan (1991). ....	82
<b>Figura 25</b> – Comparativo direto método numérico x túnel de vento x método analítico – Vento 90° - Meechan (1991). ....	84
<b>Figura 26</b> – Comparativo direto método numérico x túnel de vento x método analítico – Vento 0° - Xu et. al. (1998).....	87

<b>Figura 27</b> – Comparativo direto método numérico x túnel de vento x método analítico – Vento 90° - Xu et. al. (1998).....	90
<b>Figura 28</b> – Comparativo direto método numérico x túnel de vento x método analítico – Vento 0° - Gavanski et. al. (2013). .....	94

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> – Dimensões de edificações com telhados quatro águas ensaiados em túnel de vento ou em simulação CFD oriunda do estado da arte.....	19
<b>Quadro 2</b> – ABNT NBR 6123:1988 - Coeficientes de pressão para paredes.....	37
<b>Quadro 3</b> - ABNT NBR 6123:1988 - Coeficientes de pressão para telhados.....	38
<b>Quadro 4</b> – NBCC:2012 - Coeficientes de pressão-rajada de pressão externos de pico, CpCg.....	39
<b>Quadro 5</b> – ASCE/SEI 7-22 – Método direcional - Coeficiente de pressão para paredes e telhado.....	41
<b>Quadro 6</b> - ASCE/SEI 7-22 – Método envelope - Coeficientes de pressão externa para paredes e telhado. .....	42
<b>Quadro 7</b> - EUROCODE-1991-1-4 - Coeficientes de pressão externa para paredes verticais.....	43
<b>Quadro 8</b> – EUROCODE-1991-1-4 - Coeficientes de pressão externa para telhado quatro águas.....	44
<b>Quadro 9</b> – AS/NZS 1170.2:2017 – Coeficientes de pressão para parede.....	45
<b>Quadro 10</b> – AS/NZS 1170.2:2017 – Coeficientes de pressão para telhado.....	46
<b>Quadro 11</b> – Relação de estudo que apresentam condições de serem reproduzidos. ....	50
<b>Quadro 12</b> – Coeficientes de pressão externa – Método analítico – Meechan (1991).....	62
<b>Quadro 13</b> – Coeficientes de pressão externa – Método analítico – Xu et. al. (1998) – $i = 15^\circ$ .....	64
<b>Quadro 14</b> – Coeficientes de pressão externa – Método analítico – Xu et. al. (1998) – $i = 20^\circ$ .....	66
<b>Quadro 15</b> – Coeficientes de pressão externa – Método analítico – Xu et. al. (1998) – $i = 30^\circ$ .....	68
<b>Quadro 16</b> - Coeficientes de pressão externa – Método analítico – Gavanski et. al. (2013) – $i = 18,41^\circ$ . .....	70
<b>Quadro 17</b> – Resultados de Meechan (1991) x Simulação numérica - Campo aberto.....	73
<b>Quadro 18</b> – Resultados de Meechan (1991) x Simulação numérica – Suburbano.....	74
<b>Quadro 19</b> – Resultados de Xu et. al. (1998) x Simulação numérica – $i = 15^\circ$ .....	76
<b>Quadro 20</b> – Resultados de Xu et. al. (1998) x Simulação numérica – $i = 20^\circ$ .....	77
<b>Quadro 21</b> – Resultados de Xu et. al. (1998) x Simulação numérica – $i = 30^\circ$ .....	79
<b>Quadro 22</b> – Resultados de Gavanski et. al. (2013) x Simulação numérica – $i = 18,41^\circ$ .....	81
<b>Quadro 23</b> – Parâmetros de dimensionamento propostos pelo estudo.....	95

## 1 INTRODUÇÃO

Embora aqueça a terra, o sol, não a faz de maneira simétrica. A radiação solar ao incidir na superfície não se dispõe de forma igualitária, criando porções atmosféricas quentes e frias. As massas de ar quente, por serem menos densas e leves, sobem para as camadas extrínsecas da atmosfera tendo o seu espaço remanescente preenchido por massas de ar de menor temperatura. A esse deslocamento atribui-se a formação dos ventos.

O controle das ações dinâmicas do vento é tão jovem quanto o próprio estudo da aerodinâmica de edificações. Historicamente, em meados do século XIX, as edificações eram executadas em alvenaria, com paredes espessas, robustas, gerando uma edificação excessivamente rígida.

Contudo, com o decorrer das décadas, o surgimento de novas tecnologias de materiais como aço, concreto armado, conexões soldadas que viabilizaram a rigidez do conjunto, além da demanda súbita por habitações e por espaços comerciais tornaram as estruturas mais esbeltas, flexíveis e leves. Desta forma, pode-se perceber que ao obstruírem o escoamento do vento, as edificações são submetidas a ações estáticas e dinâmicas que, por sua vez, geram esforços solicitantes de cálculo que perturbam a sua estrutura.

A consideração da interação fluido-estrutura se dá pelo método de equivalência, ou seja, os efeitos dinâmicos do vento são comutados por ações estáticas equivalentes, o que dentro dos princípios da aerodinâmica é comumente denominado coeficientes aerodinâmicos de pressão. São estes coeficientes de pressão que relacionam a força atuante em um corpo sólido disposto em um fluxo de ar, com a força dinâmica do vento em sua região de escoamento a barlavento da edificação. Logo, a concepção da edificação, os seus vértices, adornos e elementos sobressalentes, bem como, a própria inclinação do telhado, propiciam o surgimento de grandes sobrepressões externas, que podem gerar instabilidade global na estrutura, e grandes sucções, que por sua vez, causam o arrancamento de coberturas e vedações.

Atualmente, um dos maiores problemas envolvendo a ação dos ventos, acontece em edificações baixas, geralmente, edifícios industriais ou pavilhões de uso geral. Essas edificações por se constituírem de estruturas leves, possuírem vão livres amplos e serem altamente permeáveis ao vento externo, são afetados facilmente por este tipo de ação.

Além disso, por se tratarem de edificações modestas perante aos arrojados e esguios edifícios e arranha céus, muitas vezes, os esforços de vento em pavilhões industriais são negligenciados causando acidentes devido ao mal dimensionamento e deformações excessivas. Tal fato pode

ser correlato a limitação geométrica imposta pelos textos normativos da ABNT NBR 6123:1988.

Destarte, os efeitos do vento no Brasil se caracterizam como o esforço horizontal mais relevante imposto as edificações. A importância deste tema aumenta à medida que o conceito de construção diverge da forma paralelepípedica. Torna-se mais que necessário a busca por parâmetros técnicos que permita a indústria da construção civil a projetarem estruturas mais esbeltas, sem desdenhar do apelo a segurança, afim de garantir o desempenho das edificações.

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Um das características notáveis de edificações baixas e horizontais é a diversidade de formas de coberturas. Essa característica, ocasionara, ao delongar das décadas, em diferenças significativas nas especificações das ações do vento a nível mundial. No Brasil, a norma ABNT NBR 6123:1988, fixa as condições exigíveis na consideração das ações devidas à ação estática e dinâmica do vento. Contudo, a normativa não contempla tipologias de coberturas tidas como usuais na construção civil, tal como telhados em quatro águas.

Logo, ao considerar a carga de vento junto a concepção estrutural de cobertura em quatro águas, os engenheiros estruturais ficam à mercê de seu bom senso em procurar bibliografias especializadas, quando o fazem. Como consequência, são geradas estruturas que podem vir a falhar estruturalmente devido a consideração errônea.

Destarte, com base em padrões internacionais de carga de vento e simulação numérica de ensaios de túnel de vento, indaga-se, que metodologia de cálculo deve ser empregada para o dimensionamento de cobertura em quatro águas perante a ação do vento, a qual possa garantir sua integridade estrutural, especificamente na obtenção de coeficientes de pressão.

## 1.2 JUSTIFICATIVAS

O advento de novas tecnologias construtivas tornara as edificações mais susceptíveis a ação do vento devido à redução de seu peso próprio e rigidez. Avaliações simplificadas ou desconsideração de tal ação podem ocasionar desde patologias até a colapso da estrutura. Tais consequências são agravadas ao tratar-se de fenômenos de ventos extremos, como tornados e *downbursts*, eventos que porventura das mudanças climáticas tiveram sua incidência aumentada no Brasil, sobretudo na região sul, que segundo mapeamentos globais faz parte do segundo maior corredor de formação de tornados do mundo (CANDIDO, 2012).

Quando se trata de ventos extremos, coberturas em quatro águas, em investigações pós-desastres, apresentam drástica redução de efeitos danosos devido ao vento defronte a coberturas em arcos ou duas águas (MEECHAM, 1992). Todavia, os estudos dessa tipologia de cobertura são limitados, carecendo de informações sobre seu desempenho e subsídios para projeto (ROY *et al.*, 2018). Porventura de tais limitações, muitas normativas não contemplam coberturas quatro águas, como é o caso da ABNT NBR 6123:1988 (SINGH; ROY, 2019).

Este trabalho justifica-se, ao proporcionar rever as simplificações das ações dinâmicas do vento por meio de coeficientes de pressão além do comportamento de coberturas quatro águas defronte as mesmas. Esse processo possibilita o desenvolvimento de parâmetros de cálculo, que podem ser usados no desenvolvimento de projetos seguros e com possibilidade de serem otimizados.

### 1.3 OBJETIVOS

A falta de revisões normativas periódicas, falta de abrangência metodológica para cálculo de tipologias usuais de coberturas torna-se um fator potencial de acidentes estruturais. Neste contexto, o presente trabalho fora regido pelos objetivos almejados ao término do estudo.

#### 1.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho focar-se-á na obtenção de um conjunto de coeficientes aerodinâmicos (de forma e pressão) externa de coberturas quatro águas, usando mecânica computacional de fluídos.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos serão:

- a) Avaliar as prescrições analíticas e verificar a adequação dos processos normativos estabelecidos pela ASCE/SEI-7:2022, NBCC:2005, EN-1991-4:2010 e AS/NZS 1170.2:2017 conforme as variações geométricas da edificação;
- b) Avaliar as diferenças de simulações numéricas de ensaio de túnel de vento perante a resultados de ensaios convencionais de túnel vento já publicados;
- c) Produzir parâmetros de dimensionamento para cobertura quatro águas.

## 2 FUNDAMENTOS DA ENGENHARIA DO VENTO

A revisão bibliográfica tem por intuito de apresentar o estado da arte para os métodos utilizados para embasar o estudo da dissipação da ação do vento em coberturas quatro águas. Afim de delimitar a fronteira do conhecimento discretiza-se a revisão em duas áreas:

- Engenharia do vento;
- Análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos.

Por conseguinte, a visão geral da problemática é mostrada sob a óptica de cada área.

### 2.1 ESTADO DA ARTE

Nessa seção apresenta-se a fase atual do conhecimento dentro das duas fronteiras contempladas pela problemática: telhado quatro águas e simulação do vento natural.

#### 2.1.1 Simulação do vento natural

Contudo, o advento de recursos tecnológicos em meados da década de 1960 propiciaram o surgimento das simulações computacionais em contingência a modelagem física em túnel de vento, dando início a *Computational Wind Engineering (CWE)*. Em termos de aplicabilidade a *CWE* pode ser definida principalmente pelo uso da *Computational Fluid Dynamics (CFD)* em abordagens de modelagem atmosférica e de ensaios de túnel de vento.

Joseph Smagorinsky (1963) desenvolveu e propunha o método *Large Eddy Simulation (LES)* tal método é empregado na simulação de grandes turbilhões computacionalmente sendo ainda utilizado nos dias atuais. Para tal, a principal frente de pesquisa de Smagorinsky fora a Numerical Weather Prediction (NWP) aplicada a escala de ventos sinóticas ou marco-escala meteorológica. Tal procedimento, tido como previsão numérica do tempo, utilizava o estado instantâneo da atmosfera como parâmetros de entrada do modelo matemático.

Em âmbito geral a década de 1960 fora marcada pela aplicação contínua do *NWP* em estudos (KASAHARA; WASHINGTON, 1967; PHILLIPS, 1960; SHUMAN; HOVERMALE, 1968; SMAGORINSKY, 1969). Tais pesquisas, com o surgimento das análises de mesoescala, foram voltadas ao estudo de fenômenos de tal magnitude como efeito da brisa do mar sem a influência de ventos predominantes (ESTOQUE, 1962; FISHER, 1961; PEARCE, 1955), movimentos convectivos sobre cumes e montanhas (FOSBERG, 1967, 1969) e ilhas de calor



com e sem a consideração de ventos predominantes (DELAGE; TAYLOR, 1970; ESTOQUE; BHUMRALKAR, 1969; MERONEY; YAMADA, 1971, 1972).

Já na década de 1970, estudos numéricos voltaram-se para o fluxo em microescala e a interação com os obstáculos junto a superfície. Logo, foram simulados fluxos de vento tendo como obstáculo desde edifícios (FROST; MAUS; FICHTL, 1974; HIRT; COOK, 1972; MERONEY; YAMADA, 1972) a terrenos complexos (DEAVES, 1975; DERICKSON; MERONEY, 1977; HIRT; COOK, 1972). Ainda na década de 1970, começara a utilização da abordagem híbrida que consiste na comparação sistemática de simulações numéricas e ensaios de túnel de vento (DERICKSON; MERONEY, 1977; MERONEY; YAMADA, 1971, 1972).

Devido às experiências satisfatórias, os esforços posteriores dentro do estudo da *CWE* na determinação e análise dos campos de velocidade e pressão no entorno de edifícios (BAETKE; WERNER; WENGLER, 1990; BASKARAN; STATHOPOULOS, 1989, 1992; MOCHIDA *et al.*, 1993; MURAKAMI, S., 1990c, 1990a, 1990b, 1993; MURAKAMI, S. *et al.*, 1992; MURAKAMI, S., 1993; MURAKAMI, Shuzo; MOCHIDA, 1988, 1989; MURAKAMI, Shuzo; MOCHIDA; HAYASHI, 1990; MURAKAMI, Shuzo; MOCHIDA; HIBI, 1987; NICHOLLS; PIELKE; MERONEY, 1993; PATERSON, D.A.; APELT, 1989; PATERSON, David A.; APELT, 1986, 1990; STATHOPOULOS, T.; BASKARAN, 1990; SUMMERS; HANSON; WILSON, 1986; VASILIC-MELLING, 1976; WU; HIGUCHI; MERONEY, 1992). Contudo, a aplicação de *CFD* para a velocidade do vento e campos de pressão entorno dos edifícios possui limitações no que diz respeito ao escoamento entorno de terrenos íngremes e arestas agudas os quais não são encontrados em simulações numéricas em fluxo simples (FERZIGER, 1990; LESCHZINER, 1990, 1993; MURAKAMI, S., 1998; STATHOPOULOS, 1997).

Murakami (1998) pontuara as limitações às quais deparara-se durante simulações computacionais:

- Simulações de fluxo com elevado número de Reynolds necessitando malhas complexas exigindo recursos computacionais elevados, sobretudo, em regiões próximas a paredes sujeitas a formação de vórtices;
- A complexidade dos campos de escoamento de vento 3D em relação a incidência, separação e desprendimento de vórtices;
- Dificuldade em simular o comportamento do escoamento do vento em arestas e cantos vivos quanto a discretização das zonas de coeficientes de pressão;
- Condições de contorno de entrada e saída do fluxo.

Tais dificuldades remetem as limitações na modelagem física e nas condições computacionais da época, todavia, muitas destas limitações ainda são presentes na atualidade. Entretanto, ressalta-se que as simulações numéricas possuem vantagens particulares perante a ensaios experimentais, como por exemplo, o fornecimento de informações detalhada do comportamento das variáveis do escoamento em todo o domínio do cálculo.

Atualmente, a utilização e estudo munidos de simulações *CFD* tem aumentado consideravelmente, não só pela reputação e êxito já elucidados, bem como, ser uma alternativa barata em relação aos ensaios experimentais em túnel de vento. Tais estudos têm-se voltado sobretudo a três nichos específicos. O primeiro voltado a simulações a níveis de pedestre visando mensurar o conforto defronte a vibrações em estruturas causadas pelo vento (BLOCKEN, B.; GUALTIERI, 2012; BLOCKEN, B.; PERSON, 2009; BLOCKEN, Bert *et al.*, 2011; CONAN; VAN BEECK; AUBRUN, 2012; JANSSEN; BLOCKEN; VAN HOOFF, 2013; MONTAZERI *et al.*, 2013; RICHARDS *et al.*, 2002; STATHOPOULOS, T.; BASKARAN, 1996; TOMINAGA *et al.*, 2008; TSANG; KWOK; HITCHCOCK, 2012; YOSHIE *et al.*, 2007). O segundo voltado a simulações de ventilação natural e mensuração de coeficientes de pressão interna (BJERG *et al.*, 2013; CHEN, 2009; ETHERIDGE, 2012; HEISELBERG; PERINO, 2010; RAMPONI; BLOCKEN, 2012; VAN HOOFF; BLOCKEN, 2010, 2012, 2013). O terceiro voltado a determinação da ação do vento em fachadas, bem como, a determinação de coeficientes aerodinâmicos de pressão externa (FRAGOS; NTINAS; KATERIS, 2014; HUBOVA *et al.*, 2017; JENDZELOVSKY; ANTAL; KONECNA, 2017; MAHMOUD; NASR; NOURHAN, 2017; MONTAZERI; BLOCKEN, 2013; NTINAS *et al.*, 2017; VINCENT, 2017). Em suma, ensaios de túnel de vento e simulações são recursos complementares. O uso de ambos permite uma aferição da assertividade podendo conferir agilidade e precisão tanto em fase preliminar quanto na determinação das ações derradeira da estrutura.

### **2.1.2 Simulação de telhado quatro águas**

Os primeiros ensaios publicados sobre estudos de telhados quatro águas foram realizados por Darley (1928) junto ao *Kansas State University, Manhattan, Kansas - EUA*. Os estudos de Darley foram realizados em túnel de vento aerodinâmico de seção 3,20 x 4,17m, onde ensaiara modelos de grandes dimensões em planta (1,37 x 0,90m). Darley obtivera a força de arrasto global avaliada para a incidência de vento a 0° e 90° simulada em três ocasiões: apenas a estrutura, modelo coberto com portas e janelas abertas e modelo coberto com portas e

janelas fechadas. Como conclusão o estudo revelara a influência das aberturas na magnitude do coeficiente de arrasto, uma vez que, a simulação com portas e janelas abertas o arrasto fora um pouco maior do que a simulação com ambas fechadas.

Giovannozzi (1935) pesquisara a ação do vento em telhado quatro águas através de simulações em túnel aerodinâmico. Tal túnel possuía seção transversal de 600 x 400 mm sendo o comprimento da câmara de ensaio de 600 mm. Fora simulada as incidências do vento a cada 22,5° para um modelo de 180 x 140 x 100 mm tendo como inclinação das águas de cobertura de 23,2° e beiral de 15 mm. Como resultado das medições, os ensaios renderam, medições negativas em quase toda a cobertura tendo os picos de sucção próximos a cumeeira. Todavia, os ensaios de Darley e Gionannozzi foram realizados em túneis aerodinâmico. Tais túneis possuem corrente de ar uniforme e baixa turbulência, logo, não houvera simulação de vento natural.

O interesse pelo estudo aprofundado da dissipação da ação do vento em telhados quatro águas surgira defronte constatação de sua boa performance perante a ventos extremos. Manuel Font (1932) desenvolvera estudo de caracterização de edificações após danos causados por furações em Porto Rico. Avaliando o grau de destruição das estruturas, Font concluíra que telhados quatro águas possuíam maior resistência a ação do vento do que telhados duas águas.

Martin Jensen e Niels Franck (1965) em seus estudos realizaram os primeiros ensaios com simulação de vento natural, ou seja, os primeiros ensaios de túnel de vento. Tais estudos contemplara tanto modelos de telhados quatro águas como telhado duas águas para as proporções de 2 x 1 x 1 e 2 x 1 x 0,50, com inclinação de telhado de 5,7° e 10°, dispostos em escoamentos de baixa e média turbulência. Como resultado, ao comparem as duas tipologias de cobertura para as mesmas condições de fluxo, proporção e inclinação de telhado, fora constatado uma redução nos picos de sucção na incidência de vento a 45° e 60°. Sendo a maior redução obtida para vento de baixa turbulência, onde para a incidência de vento 45°, a sucção no canto do telhado reduzira, em módulo, de 2,85 (telhado duas águas) para 2,16 (telhado quatro águas).

Sachs (1978) também estudara o comportamento de telhados duas águas e telhado quatro águas. Em seus estudos, Sachs comparara modelos reduzidos com as mesmas proporções geométricas, 2 x 1 x 1,5, e mesma inclinação de telhado (20° e 40°) para tipologias de coberturas diferentes. Como resultado, para uma inclinação de 20° os telhados duas águas apresentaram picos de sucções 50% maiores em comparação a telhados quatro águas.

Para fins de simulação de telhados quatro águas fora realizada a revisão de estado da arte da qual deriva a Tabela 1 que apresenta a relação de modelos ensaiados.

**Quadro 1** – Dimensões de edificações com telhados quatro águas ensaiados em túnel de vento ou em simulação CFD oriunda do estado da arte.

DIMENSÕES DOS MODELOS REDUZIDOS COM TELHADOS QUATRO ÁGUAS ENSAIADOS								
Autor (s)	Comprimento	Largura	Altura	Beiral	Escala do modelo	Proporção	Inclinação	Tipo de ensaio
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]			[°]	
Darley (1928)	1370	900	650	63,5	N.A.	1,52 – 1,0 – 0,72	46,2°	T.A.
Giovanozzi (1935)	180	140	100	15	N.A.	1,28 – 1,0 – 0,71	23,2°	T.A.
Jensen e Frank (1965)	140	70	70	N.A.	1:100	2,0 – 1,0 – 1,0	5,7° e 10°	T.V.
	140	70	35	N.A.	1:100	2,0 – 1,0 – 0,5	10°	T.V.
Sachs (1978)	600	300	450	19	N.A.	2,0 – 1,0 – 1,5	20° e 40°	T.V.
Sparks <i>et al.</i> (1988)	300	150	60	10	1:48	2,0 – 1,0 – 0,40	18°, 27°, 34° e 45°	T.V.
Surry <i>et al.</i> (1989)	146	73	27	N.A.	1:100	2,0 – 1,0 – 0,37	18° e 34°	T.V.
Meecham, Surry, Davenport (1991)	200	100	30	N.A.	1:100	2,0 – 1,0 – 0,30	18°	T.V.
Meecham (1992)	200	100	30	N.A.	1:100	2,0 – 1,0 - 0,30	18°	T.V.
Xu e Reardon (1998)	280	140	58	22	1:50	2,0 – 1,0 - 0,4	10°, 20° e 30°	T.V.
Uematsu e Isyumov (1999)	133	70	50	N.A.	1:100	1,9 – 1,0 - 0,7	18°	T.V.
	241	129	41	N.A.	1:100	1,9 – 1,0 - 0,3	18°	T.V.
	137	91	40	N.A.	1:100	1,5 – 1,0 - 0,4	18°	T.V.
Ahmad e Kumar (2001)	280	140	58	22	1:50	2,0 – 1,0 - 0,4	30°	T.V.
Ahmad e Kumar (2002)	280	140	58	22	1:50	2,0 – 1,0 - 0,4	30°	T.V.
Blessmann (2009)	320	160	60	12	1:100	2,0 – 1,0 - 0,4	15° e 30°	T.V.
	320	160	120	12	1:100	2,0 – 1,0 - 0,8	15° e 30°	T.V.
	320	160	180	12	1:100	2,0 – 1,0 - 1,1	15° e 30°	T.V.

Fonte: Própria do autor.

**Quadro 1** – Dimensões de edificações com telhados quatro águas ensaiados em túnel de vento ou em simulação CFD oriunda do estado da arte – Continuação.

DIMENSÕES DOS MODELOS REDUZIDOS COM TELHADOS QUATRO ÁGUAS ENSAIADOS								
Autor (s)	Comprimento	Largura	Altura	Beiral	Escala do modelo	Proporção	Inclinação	Tipo de ensaio
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]			[°]	
Gavanski <i>et al.</i> (2013)	100	90	36	6	1:100	1,11 – 1,0 – 0,40	18°; 23°; 27°; 30°; 37°; 45°	T.V.
	100	90	67	6	1:100	1,11 – 1,0 – 0,74	18°; 23°; 27°; 30°; 37°; 45°	T.V.
	100	90	91	6	1:100	1,11 – 1,0 – 1,00	18°; 23°; 27°; 30°; 37°; 45°	T.V.
Henderson, Morrison e Nasr (2013)	90	89	80	6	1:100	1,0 – 1,0 - 0,9	18°	T.V.
Sari (2015)	90	40	60	N.A.	1:100	2,3 – 1,0 - 1,5	20°; 30°; 40°; 50°	C.F.D.
Habte <i>et al.</i> (2017)	3400	2400	2000	300	N.A.	1,4 – 1,0 – 0,83	18°	T.V.
Huang, Tao, Gu e Quan (2017)	300	180	165	15	1:40	1,66 – 1,0 - 0,92	14°;18°;22°;27°30°;35°;45°	T.V.
	360	300	240	15	1:40	1,2 – 1,0 - 0,8	14°;18°;22°;27°30°;35°;45°	T.V.
	540	300	315	15	1:40	1,8 – 1,0 - 1,1	14°;18°;22°;27°30°;35°;45°	T.V.
Moravej <i>et al.</i> (2017)	2470	1950	180	N.A.	N.A.	1,3 – 1,0 - 0,1	18°	T.V.
	2470	1950	300	N.A.	N.A.	1,3 – 1,0 - 0,2	18°	T.V.
	2470	1950	610	N.A.	N.A.	1,3 – 1,0 - 0,3	18°	T.V.
	2470	1950	910	N.A.	N.A.	1,3 – 1,0 - 0,5	18°	T.V.
Shan <i>et al.</i> (2018)	450	210	250	22	1:50	2,14 – 1,0 – 1,19	22°; 32°; 47°	T.V.
Xing, Mohotti e Chauham (2018)	500	250	200	N.A.	1:20	2,0 – 1,0 - 0,8	11,3°; 21,8°; 31°	T.V./C.F.D.
Shao, Tian, Yang e Li (2019)	200	100	50	N.A.	1:100	2,0 – 1,0 - 0,5	18°	T.V./C.F.D.
	150	100	50	N.A.	1:100	1,5 – 1,0 - 0,5	18°	T.V./C.F.D.
Singh e Roy (2019)	225	225	95	N.A.	1:100	1,0 – 1,0 – 0,42	0°; 10°; 20°; 30°	C.F.D.

Notas:

T.A.: ensaio de túnel aerodinâmico.

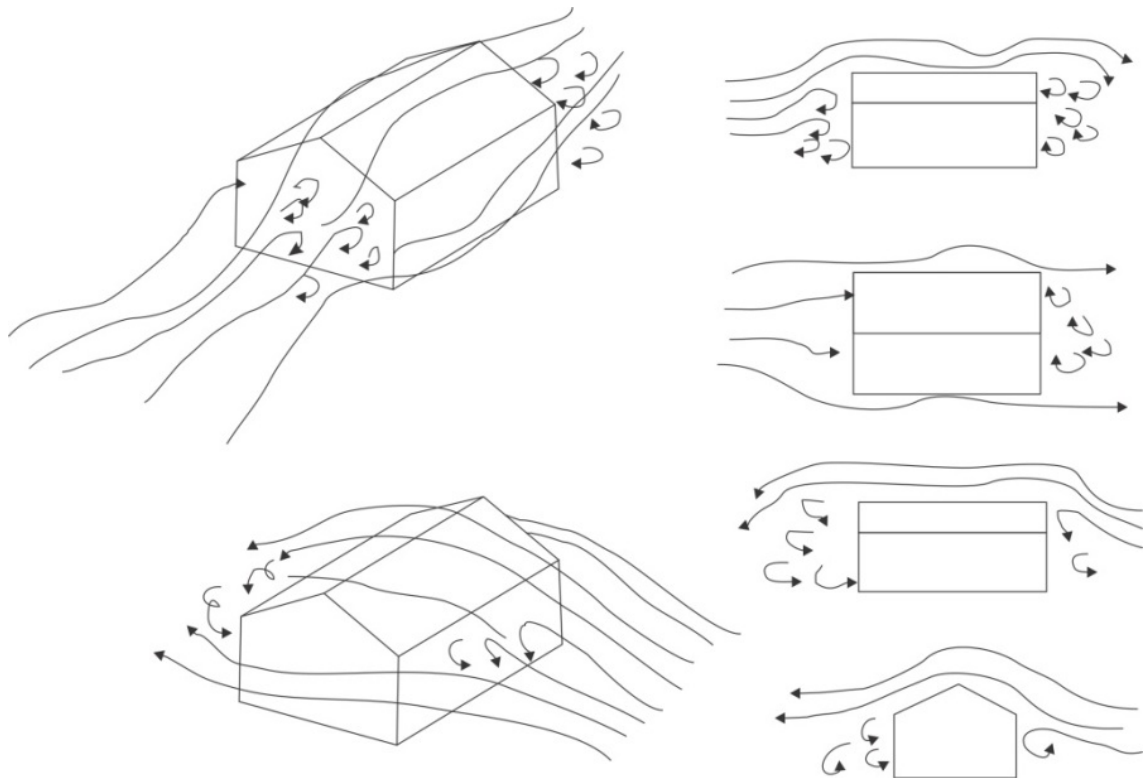
T.V.: ensaio de túnel de vento;

C.F.D.: *computational fluid dynamics*.**Fonte:** Própria do autor.

### 3 AÇÃO DO VENTO NAS EDIFICAÇÕES

Gonçalves et al. (2004) argumenta que a ação do vento em edificações depende necessariamente de dois aspectos: Meteorológicos e aerodinâmicos. Os meteorológicos vão depender do local da edificação, tipo de terreno, altura da edificação, rugosidade do terreno e tipo de ocupação. Já os aspectos aerodinâmicos dependem basicamente da forma da edificação, Gonçalves et al. (2004) exemplifica que o vento ao incidir sobre um telhado tipo duas águas, um arco ou um edifício de múltiplos andares terá sua “trajetória” alterada em função das formas diferentes destas edificações. Através das linhas de fluxo podemos visualizar estas alterações da trajetória conforme vemos na Figura 1.

**Figura 1** - Linhas de fluxo para edificação construída com cobertura tipo duas águas.

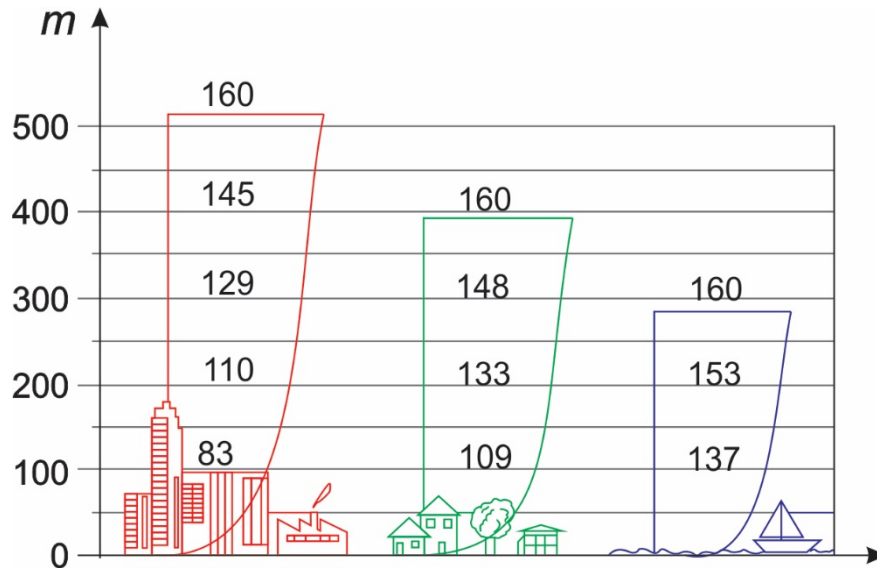


**Fonte:** Baseado em Gonçalves et al. (2004).

Segundo Gonçalves et al. (2004) a variação da velocidade do vento com a altura é outro aspecto importante a ser observado.

Davenport (1963) propôs uma variação exponencial. A Figura 2 mostra os perfis de velocidade média propostos para três tipos de terrenos: Região com grandes obstruções; Regimes com obstruções uniformes com obstáculos com altura media igual a 10m; região com poucos obstáculos.

**Figura 2** - Perfil de velocidade média (em km/h) proposto por Davenport.



**Fonte:** Baseado em Blessmann (2004).

Gonçalves et al. (2004) observa que os perfis de velocidade média, apresentados na Figura 2, permitem concluir a existência de uma velocidade limite denominada velocidade gradiente. Esta velocidade é associada a uma altura, por analogia denominada altura gradiente, acima da qual não ocorrerão alterações significativas da velocidade. Gonçalves et al. (2004) Salienta também que, para as edificações, esta altura é suficientemente elevada e varia em função da rugosidade do terreno. Porém o caráter localizado do vento e os efeitos das rajadas serão os responsáveis pela velocidade do ar que atingem uma dada edificação. Desta forma Gonçalves et al. (2004) propõe a Equação 1.

$$V_{(t)} = Vm_{(t)} + \Delta V_{(t)}$$

**Equação 1**

Onde:

$V_{(t)}$  = velocidade num dado instante t;

$Vm_{(t)}$  = velocidade média do fluxo de ar neste mesmo instante;

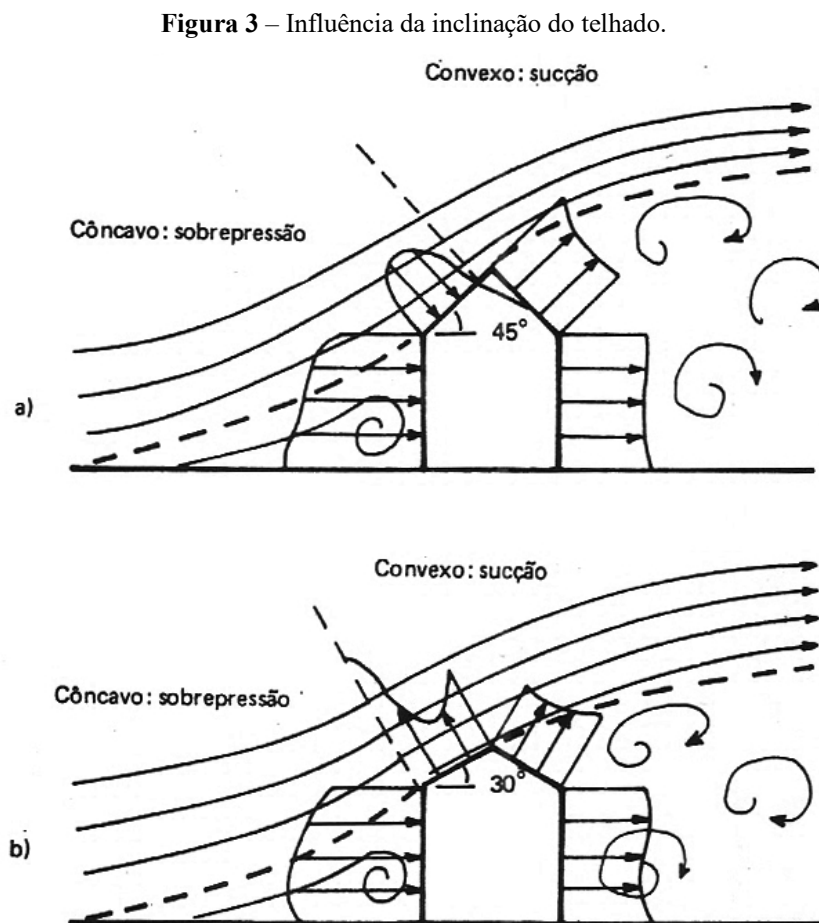
$\Delta V_{(t)}$  = variação da velocidade média (o efeito de rajada ou turbulência).

A NBR 6123:1988 instrui para cálculo da velocidade do vento, rajadas com intervalos de tempo com valores iguais a 3, 5 e 10s que definem então três classes de edificações A, B e C em função das dimensões frontais de incidência do vento.

### 3.1.1.1 Inclinação do telhado

Nas águas localizadas a barlavento, a inclinação do telhado, influi tanto nas sucções locais, para incidência de vento oblíqua, quanto para incidência perpendicular à cumeeira, nos valores médios e máximos de sobrepressão e sucção.

Em experimentos, Blessmann (2009), verificou que à medida que a inclinação do telhado diminui o mesmo fica mais propenso a sucções elevadas. Subsequentemente, ainda de acordo com o Blessmann (2009), inclinações de  $8^\circ$  a  $12^\circ$  apresentam sucções de grande magnitude, sendo que as mesmas vão diminuindo à medida que a inclinação do telhado vai aumentando, e acima de  $35^\circ$  já começa a surgir sobrepressões em parte da cobertura. A influência pode ser observada na Figura 3, onde os sinais são representados por côncavo para sobrepressão e convexo para sucção.



Fonte: Adaptado de Blessmann (2009).

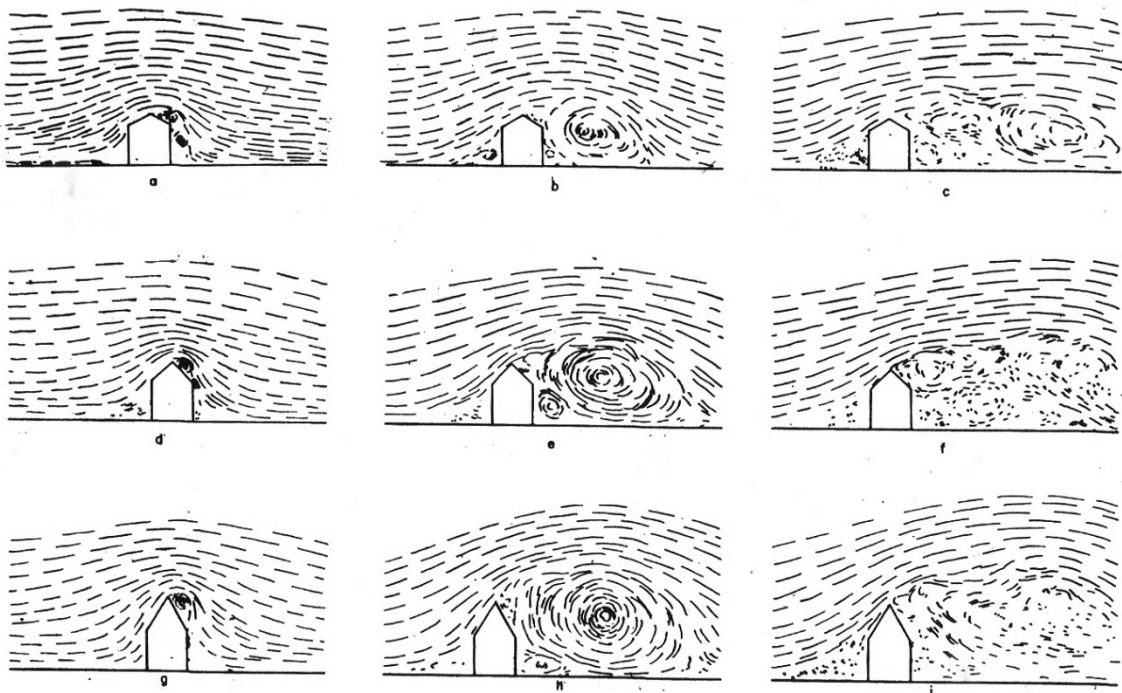
No que diz respeito a Figura 4, pode-se observar duas zonas distintas a barlavento, uma a qual o escoamento é vigorosamente regido pela rugosidade e pelo campo de sobrepressão



presente junto a parede, onde dependendo da permeabilidade surgem vórtices de base. A outra conceituada zona de escoamento livre, onde as linhas de corrente oriundas do fluxo, ao incidir na edificação, são desviadas pela mesma e pelo vórtice de base. A delimitação entre as duas zonas é dada pela superfície de separação. Se a tangente a essa superfície ao entrar em contato a cobertura, possuir inclinação menor em relação ao telhado, a água a barlavento estará sujeita a sobrepressão, entretanto, se a tangente possuir inclinação excedente a do telhado, a água a barlavento estará sujeita a sucção (BLESSMANN, 2009). Cabe salientar que para a água a sotavento não manifesta influência sendo que a mesma permanece succionada em ambos os casos.

Para pavilhões industriais o uso de inclinações baixas agrega sucções na cobertura, que se estabelecem como as maiores ações providas do vento impostas a essas edificações. Portanto, muitas vezes, deve-se verificar a flambagem nas barras de treliça de cobertura, pois devido a leveza da estrutura em contrapartida a magnitude de esforço pode ocorrer a inversão de esforços na estrutura, ocasionando a compressão nas mesmas (BLESSMANN, 2009). A Figura 4 exemplifica a incidência do escoamento inicial, médio e turbulento do vento, respectivamente, em coberturas de  $30^\circ$  (4.a, 4.b, 4.c),  $45^\circ$  (4.d, 4.e, 4.f) e  $60^\circ$  (4.g, 4.h, 4.i), bem como, a formação de vórtices.

**Figura 4** – Influência da inclinação do telhado na formação de vórtices.



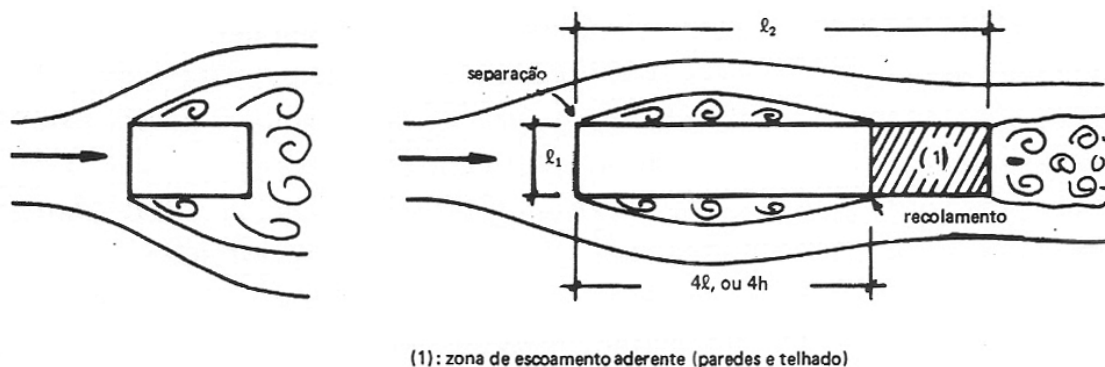
**Fonte:** Adaptado de Blessmann (2009).

### 3.1.1.2 Forma e proporção do telhado

A concepção geométrica é outro fator que agrega sucções elevadas não só na cobertura, mas na edificação como um todo. Tal fato eclode quando o fluxo do vento se encontra paralelo a linha do cume da edificação, o que gera de imediato tanto ao telhado quanto as paredes a barlavento sucções de  $C_{pe}$  na ordem de -1,00 (Blessmann, 2009). Desta forma, Blessmann (2009) ainda cita que, se o pavilhão for excessivamente profundo, o bulbo de altas sucções sofre uma rápida baixa para valores que tendem a zero e em certas condições pode surgir sobrepensões baixas em seu extremo. Sendo que esta distribuição de pressão é, única e exclusivamente, dependente das proporções da edificação e não da inclinação da cobertura.

Além do mais, (Blessmann, 2009), destaca que, estando o vento soprando junto ao eixo longitudinal do pavilhão e dependendo de sua profundidade, ocorre o processo de recolamento do escoamento que separou nas arestas a barlavento, ou seja, a porção de fluxo desviada pela edificação ao tentar retornar ao seu escoamento congênito acaba incidindo novamente na edificação (Figura 5).

**Figura 5** – Efeito de recolamento do escoamento devido a profundidade do pavilhão.



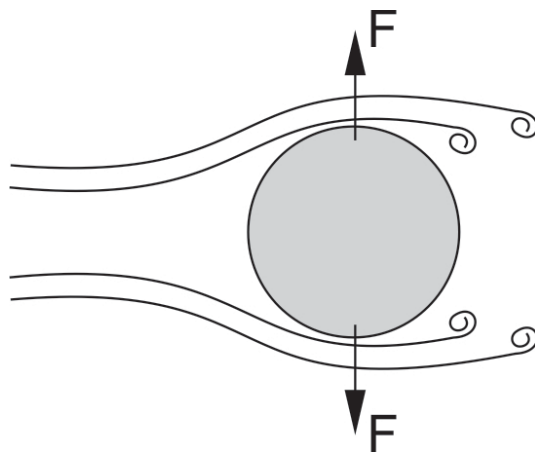
**Fonte:** Adaptado de Blessmann (2009).

Nesta área de realocamento não se pode simplesmente desconsiderar a ação dessas forças tangenciais a cobertura e parede pois as mesmas agregam esforços na edificação. Logo, pavilhões industriais de pequena profundidade, submetido a vento axial, necessitam de maior contraventamento na direção do vento, visto que, está sujeito a uma força de arrasto mais elevada comparado aos de profundidade média (Blessmann, 2009).

### 3.1.2 Efeitos Dinâmicos e Edificações Esbeltas e Flexíveis

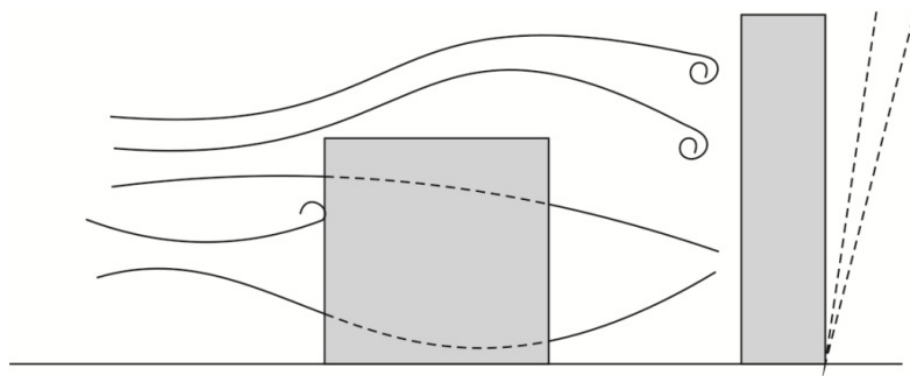
Para Chamberlain (2011) os efeitos do vento são de caráter dinâmico, porém na maioria das construções esses efeitos podem ser substituídos por ações estáticas equivalentes. Em edificações esbeltas e flexíveis, principalmente aquelas com baixas frequências naturais de vibração ( $f < 1,0$  Hz), os efeitos dinâmicos devem ser considerados.

**Figura 6** - Desprendimento de Vórtices.



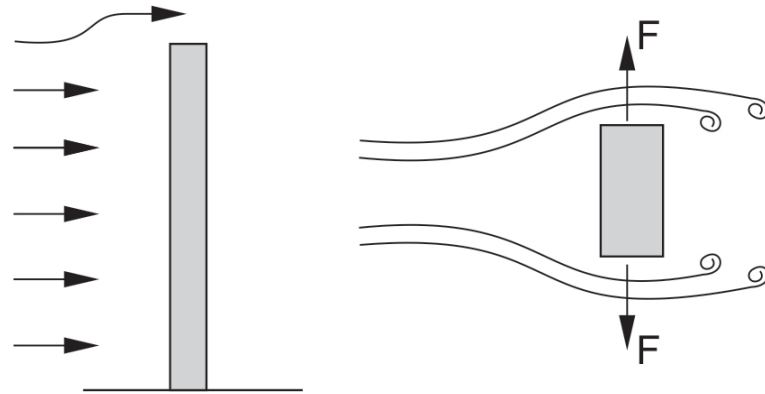
**Fonte:** Baseado em Chamberlain (2011).

**Figura 7** - Efeito de Golpe.



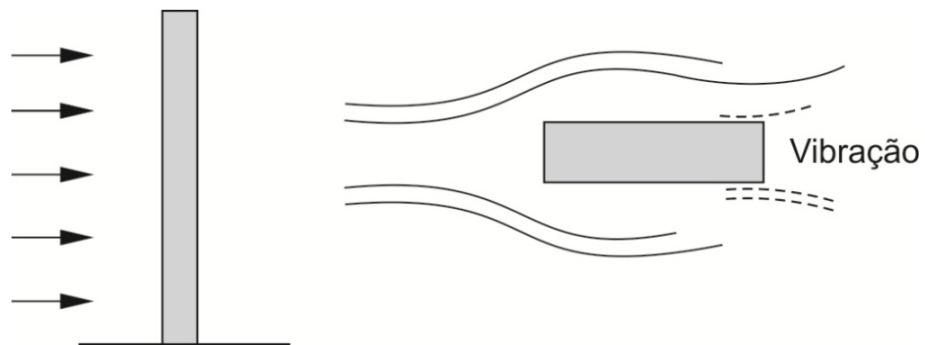
**Fonte:** Baseado em Chamberlain (2011).

**Figura 8** - Galope: movimento da edificação e forma - Maiores que os dos vórtices.



Fonte: Baseado em Chamberlain (2011).

**Figura 9** - Drapejamento: acoplamento de vibrações em diferentes graus de liberdade - Ocorre em estruturas esbeltas (seção alongada).



Fonte: Baseado em Chamberlain (2011).

## 3.2 CONCEITOS TEÓRICOS BÁSICO DE FLUIDODINÂMICA

A dinâmica dos fluidos estuda o comportamento dos fluidos em movimento. A resolução de um problema fluidodinâmico geralmente envolve a resolução de equações complexas para o cálculo de diferentes propriedades de fluidos.

### 3.2.1 Compressibilidade do ar

Em Blessmann (1983) temos que o coeficiente de compressibilidade isentrópica é inversamente proporcional à pressão; quanto maior a pressão, menor a compressibilidade. A pressão atmosférica sofre uma variação de 1,90% e a massa específica do ar varia 1,35% para uma alteração de 200kgf/m<sup>2</sup> na pressão atmosférica, variação está perfeitamente tolerável sem que seja necessário levar em conta a compressibilidade do ar. Blessmann (1983) adianta que uma pressão de 200kgf/m<sup>2</sup> é a máxima sobrepressão causada por um vento com velocidade de 203km/h, nas condições normais de pressão e temperatura de 15°C.

### 3.2.2 Conceito de fluido perfeito ou ideal

Blessmann (1983) traz o seguinte conceito de fluido perfeito ou Ideal: é um fluido incompressível e sem viscosidade. Para o caso do ar, dentro do âmbito de velocidade que interessam à engenharia civil, podemos desprezar os efeitos da compressibilidade, portanto quanto a compressibilidade, nenhuma correção será necessária para passar do fluido ideal para o fluido real. Porém quanto à viscosidade, nas proximidades dos contornos sólidos, sua influência ocasiona o aparecimento de diversos fenômenos importantes, tanto do ponto de vista teórico quanto do ponto de vista prática.

### 3.2.3 Viscosidade

Para Blessmann (1983), A viscosidade é a capacidade do fluido que controla sua velocidade de deformação, então um fluido, sob a ação de uma força tão pequena quanto se quera, atuando por um tempo suficiente, apresenta uma variação de forma da magnitude que se desejar.

Nos gases a viscosidade recebe a influência da temperatura que ao subir, aumenta também o coeficiente de viscosidade, isto se deve-se principalmente ao movimento caótico das moléculas; este sobe com o crescer da temperatura. Blessmann (1983) ainda diz que para os gases, a viscosidade pode ser considerada como independente da pressão, no âmbito de

aplicação de Boyle-Mariotte. Em muitos casos o coeficiente de viscosidade aparece ligado à massa específica pela Equação 2.

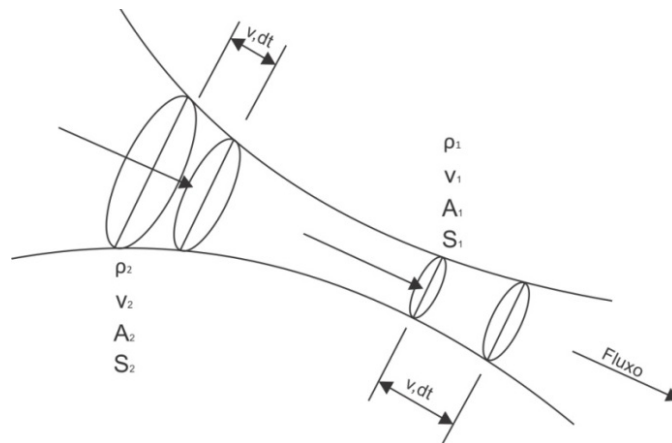
$$V = \frac{\mu}{\rho}$$

**Equação 2**

### 3.2.4 Teorema da conservação da massa

Basicamente Gonçalves et al. (2004), explica que para um fluido incompressível e em regime de escoamento permanente, o volume que passa em qualquer seção de um tubo de corrente é constante. Ou seja, a massa de um fluido que entra em um volume é igual à massa que sai. Torres Manfrim (2006) diz que quando as partículas de um fluido têm a mesma velocidade num mesmo ponto em uma mesma trajetória e este fluido não depende do tempo, é dito então que o fluxo é permanente.

**Figura 10** - Contorno de um tubo de corrente de um fluido.



**Fonte:** Adaptado em Pitta (1991).

Onde:

A = área de uma superfície plana;

v = velocidade médio do fluido;

ρ = massa específica do fluido.

Considerando-se o volume limitado pelo tubo de corrente da Figura 10 pelas seções S<sub>1</sub> e S<sub>2</sub> em um regime permanente com intervalo de tempo dt, tem-se a Equação 3 para a massa de fluido que entra e a Equação 4 para a massa do fluido que sai.

$$\rho_1(A_1 v_1 dt_1)$$

**Equação 3**

$$\rho_2(A_2 v_2 dt_2)$$

**Equação 4**

Sendo a situação em regime descrita pela Equação 5.

$$\rho_1(A_1 v_1 dt_1) = \rho_2(A_2 v_2 dt_2)$$

**Equação 5**

Logo, considerando o fluido como incompressível,  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ , têm-se a conservação de massa determinada pela Equação 6.

$$A_1 * v_1 = A_2 * v_2$$

**Equação 6****3.2.5 Teorema da Conservação de Energia ou Teorema de Bernoulli**

Gonçalves et al. (2004) de maneira sucinta, traz uma breve recordação do Teorema de Bernoulli. Para um fluido incompressível e um fluxo em regime permanente, pode-se dizer que a soma das pressões dinâmicas, estáticas e piezométrica é constante, expressa pela Equação 7.

$$\frac{1}{2} \rho V^2 + P + \rho g z = \text{constante}$$

**Equação 7**

Pode-se reescrever a Equação 7, em correspondência a Figura 10, originando a Equação 8.

$$\frac{1}{2} \rho V_1^2 + P_1 + \rho g_1 z_1 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 + P_2 + \rho g_2 z_2$$

**Equação 8**

Onde:

$P$  = pressão estática;

$V$  = velocidade;

$g$  = aceleração da gravidade;

$\rho$  = massa específica do ar;

$z$  = cota do ponto considerado.

Gonçalves et al. (2004) ainda diz que no caso da ação do vento em edificações é possível desprezar a pressão piezométrica, o que permite então dizer que a soma da pressão dinâmica com a pressão estática será constante. Neste caso pode-se reescrever a Equação 8 na forma simplificada (Equação 9).

$$\frac{1}{2}\rho V_1^2 + P_1 = \frac{1}{2}\rho V_2^2 + P_2$$

**Equação 9**

### 3.2.6 Pressão Estática

Blessmann (1983) define pressão estática considerando o fluido em repouso, havendo vários dispositivos que permitem sua medida, porém se o fluido estiver em movimento e o aparelho medidor acompanhar este movimento também será medida a pressão estática. A pressão estática é expressa pela Equação 10 sendo que  $\Delta N$  é a força exercida normalmente a uma superfície plana da área  $\Delta A$ .

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta A}$$

**Equação 10**

### 3.2.7 Pressão Total

Segundo Blessmann (1983) a pressão total acontece no ponto onde a velocidade é nula, ou seja, no ponto de estagnação do fluido. São chamados pontos de estagnação aqueles em que toda a pressão dinâmica foi transformada em estática e esta pode ser medida através de um orifício feito no ponto de estagnação, ligado a um manômetro.

Considerando  $p$  e  $u$  respectivamente, a pressão e a velocidade em um ponto do fluxo não afetado pelo obstáculo e a barlavento deste. Seja respectivamente  $p_e$  e  $u_e$  a pressão e a velocidade no ponto de estagnação e tendo o Teorema de Bernoulli a temos a Equação 11.

$$\frac{1}{2}\rho u_0^2 + p_0 = \frac{1}{2}\rho u_e^2 + p_e$$

**Equação 11**

E considerando  $u_e = 0$  temos a Equação 12.

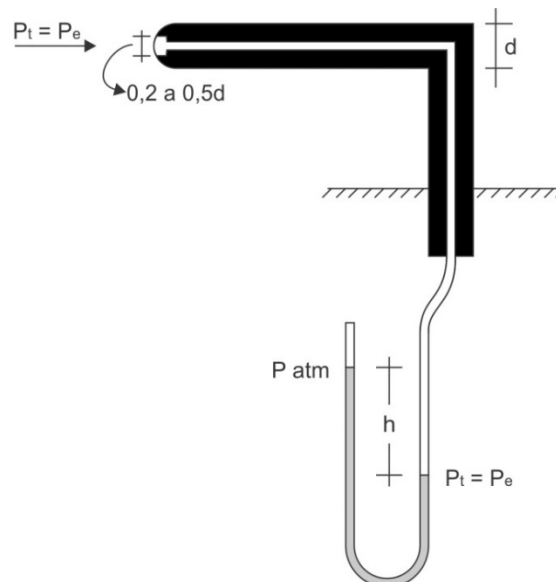


$$\frac{1}{2}\rho u_0^2 + p_0 = p_e = p_t$$

Equação 12

Portanto, o orifício efetuado no ponto de estagnação, medindo a pressão estática neste ponto, nos dá a pressão total em um ponto das correntes permanente e uniforme não afetados pelo obstáculo. Essa técnica de medição foi realizada pela primeira vez em 1732 por Henri Pitot que utilizou um tubo de vidro de pequeno diâmetro, com uma curva em ângulo reto e a frente voltada para barlavento. Por essa razão este é chamado de tubo de Pitot.

**Figura 11** - Tubo de Pitot para medição da pressão total.



**Fonte:** Adaptado em Blessmann (1983).

### 3.2.8 Pressão de Obstrução

Blessmann (1983) explica que a pressão de obstrução denominada  $q$  nada mais é do que a diferença das pressões estáticas já citadas acima na Equação 13.

$$p_e - p_0 = \frac{1}{2}\rho u_0^2 = q$$

Equação 13

### 3.2.9 Turbulência ou pressões flutuantes

Para Blessmann (1983) a turbulência tem sua origem em movimentos circulatorios da atmosfera, causados por transformações termodinâmicas e pela rotação da terra, e através da

rugosidade, constituída por obstáculos naturais ou criados pelo homem como florestas, montanhas, edificações, etc.

Blessmann (1983) cita que com a turbulência, parte da energia do fluxo é retirada do movimento e que os gradientes de velocidade então resultantes fazem com que apareçam os efeitos da viscosidade, que tendem a diminuir a intensidade destes distúrbios. Esta energia retirada do fluxo aparece em forma de calor, sendo muito maior o aumento de entropia no regime turbulento do que no laminar.

### 3.2.10 Coeficientes de pressão, de forma e de atrito

Blessmann (1983) fala que para uma tomada de pressão estática situada em um ponto  $m$  da superfície de um sólido, sendo  $p_m$  o valor desta pressão,  $u_m$  a velocidade do fluido junto ao corpo no ponto  $m$ ,  $p_0$  e  $u_0$  como anteriormente, o Teorema de Bernoulli fornece a Equação 14.

$$\frac{1}{2}\rho u_0^2 + p_0 = \frac{1}{2}\rho u_m^2 + p_m$$

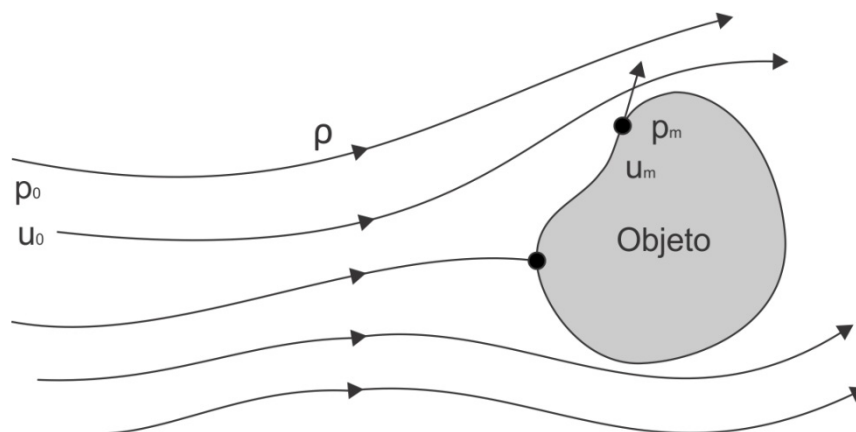
**Equação 14**

Logo, a variação de pressão pode ser expressa pela Equação 15.

$$\Delta p_e = p_m - p_0 = \frac{1}{2}\rho u_0^2 - \frac{1}{2}\rho u_m^2$$

**Equação 15**

**Figura 12** - Definição do coeficiente de pressão.



**Fonte:** Adaptado em Pitta (1991).

Por conseguinte, o coeficiente de pressão pode ser expresso pela Equação 16.

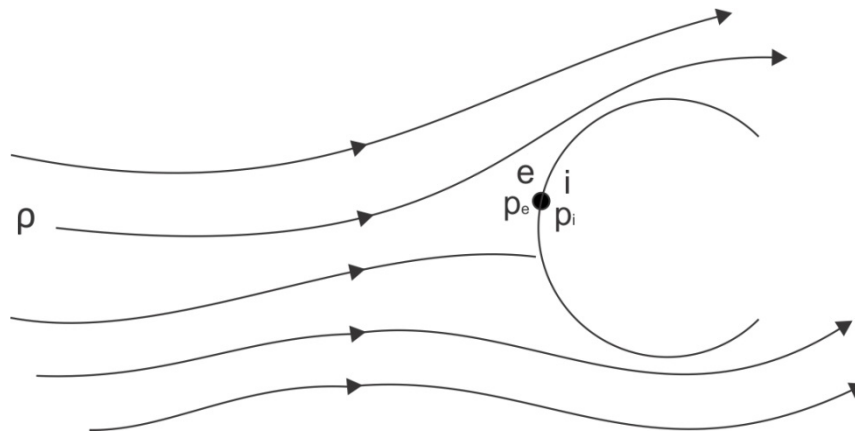
$$c_p = 1 - \left(\frac{u_m}{u_0}\right)^2$$

**Equação 16**

Torres Manfrim (2006) fala que quando  $c_p > 0$  ocorre uma sobrepressão e quando  $c_p < 0$  ocorre uma sucção. Manfrim ainda ressalta que o valor máximo que pode ocorrer de sobrepressão em uma estrutura é igual ao valor de obstrução, ou seja, de  $c_p = 1$ . Já no caso das sucções, em certas regiões ela pode ser muito elevada chegando a atingir de 6 a 8 vezes a pressão de obstrução.

Quando o objeto tiver alguma abertura, onde possa entrar o fluido, como no caso de uma edificação, ocorrerá tanto pressão externa como interna não importando qual seja a posição desta abertura como mostra a Figura 13.

**Figura 13** - Linhas de fluxo no entorno de um objeto não maciço com abertura.



**Fonte:** Adaptado em Pitta (1991).

Já o coeficiente de forma externo, Blessmann (1983) fala que é somente aplicável a uma superfície plana de área  $A$  conhecida e é definido pela Equação 17, onde  $F_e$  é a resultante das pressões externas sobre a superfície plana.

$$C_e = \frac{F_e}{qA}$$

**Equação 17**

Por fim, Blessmann (1983) demonstra que as forças de atrito tangentes à superfície permitem definir os seguintes coeficientes:

- Coeficiente de atrito local:

$$C_{at} = \frac{\tau}{q}$$

**Equação 18**

- Coeficiente de atrito:

$$C_{at} = \frac{F_{at}}{qA}$$

**Equação 19**

Sendo  $F_{at}$  a resultante das tensões tangenciais sobre a superfície plana de área  $A$ .

### 3.2.11 Modelo de Turbulência k- $\epsilon$ Padrão

Em mecânica dos fluidos, entende-se por escoamento turbulento o escoamento de um fluido em que as partículas se misturam de forma não linear ou caótica com turbulência e redemoinhos em oposição ao fluxo laminar. O modelo k- $\epsilon$  padrão é um modelo de viscosidade turbulenta no qual se assume que os tensores de Reynolds são proporcionais aos gradientes de velocidade média, com a constante de proporcionalidade sendo caracterizada pela viscosidade turbulenta,  $\mu_t$ , que é dada pela Equação 20, sendo  $C_\mu$  uma constante, que pode assumir os seguintes valores: 1,44, 1,92 e 0,09.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

**Equação 20**

No caso de modelo de turbulência k- $\epsilon$  padrão, o valor de  $C_\mu$  é 0,09. O modelo é dado pela Equação 21, Equação 22 e Equação 23 de transporte para a energia cinética de turbulência ( $k$ ) e a taxa de sua dissipação turbulenta ( $\epsilon$ ).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon$$

**Equação 21**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma \epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon}{k}$$

**Equação 22**

$$G_k = -\rho \overline{v_i v_j} \frac{\partial v_j}{\partial x_i}$$

**Equação 23**

Nestas equações,  $G_k$  representa a geração da energia cinética de turbulência resultante da média dos gradientes de velocidades;  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  são constantes sendo que  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  são os números de Prandtl turbulentos para  $k$  e  $\varepsilon$ , respectivamente. A viscosidade de turbulência é dada pela equação 4. As constantes  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  assumem os seguintes valores:  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ;  $C_{2\varepsilon} = 1,92$ ;  $\sigma_k = 1,0$  e  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ .

### 3.3 CRITÉRIOS NORMATIVOS

Com a globalização da indústria, o desenvolvimento de normativas e surgimento de padrões internacionais unificados, torna-se iminente a necessidade de compreender os principais padrões internacionais de carga de vento e suas diferenças, afim de garantir a compreensão adequada dos seus efeitos (BASHOR; KAREEM; MORAN, 2009). Conceitua-se como código ou norma, o conjunto de especificações técnicas que regem os mais importantes detalhes de análise, execução e projeto de edificações. Habitualmente, as normativas visam obter estruturas econômicas e seguras, protegendo os usuários de projetos inadequados de baixa qualidade (LEET; UANG; GILBERT, 2010).

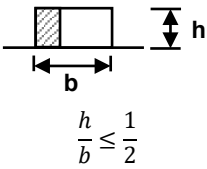
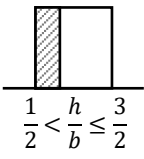
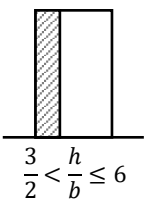
De acordo com Holmes (2004), o crescimento do comércio mundial irá, gradativamente, reduzir a quantidade de normas de carregamento em uso e, conseqüentemente, forçar o desenvolvimento de maior consistência tanto em seu formato quanto em seu conteúdo. Ainda segundo Holmes (2004), as normativas mais avançadas na determinação da ação do vento possuem características imutáveis sendo elas:

- Especificação da velocidade característica do vento fazendo referência as particularidades das zonas dentro de uma jurisdição. Comumente, a altura adotada como referência para a medição é de 10 metros;
- Consideração de fatores que influenciam no efeito do vento tal como tipo de terreno, altura e, as vezes para topografia, direção do vento e mudança de terreno;
- Coeficientes de pressão e forma para geometrias específicas de edificações;
- Algumas considerações do efeito dinâmico em estruturas flexíveis.

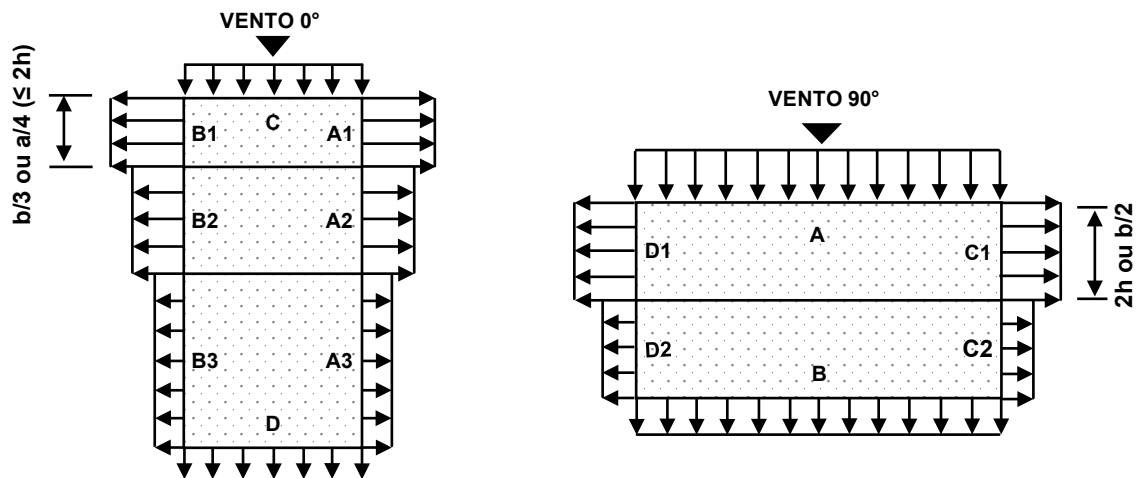
#### 3.3.1 ABNT NBR 6123:1988

Os coeficientes de pressão externas para paredes e telhados determinados pela ABNT NBR 6123:1988, podem ser obtidos através do Quadro 2 e Quadro 3 respectivamente.

**Quadro 2 – ABNT NBR 6123:1988 - Coeficientes de pressão para paredes.**

ALTURA RELATIVA		VALORES DE $C_e$								C <sub>pe</sub> Médio
		$\alpha = 0^\circ$				$\alpha = 90^\circ$				
		A1 e B1	A2 e B2	C	D	A	B	C1 e D1	C2 e D2	
 $1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$ $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-0,8	-0,5	+0,7	-0,4	+0,7	-0,4	-0,8	-0,4	-0,9
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-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
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-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
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-1,0	-0,5	+0,8	-0,3	+0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-1,2

**DISPOSIÇÃO DOS COEFICIENTES**





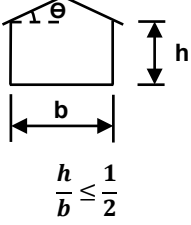
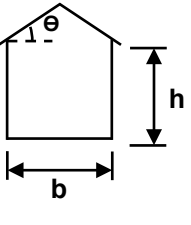
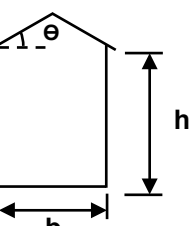
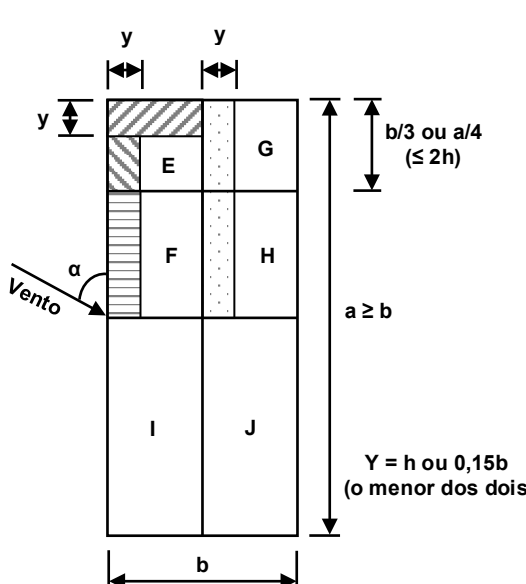


Notas:

- Para  $a/b$  entre  $3/2$  e  $2$ , interpolar linearmente.
- Para vento a  $0^\circ$ , nas partes A3 e B3, o coeficiente de forma  $C_e$  tem os seguintes valores:
  - para  $a/b = 1$ : mesmo valor das partes A2 e B2;
  - para  $a/b \geq 2$ :  $C_e = -0,2$ ;
  - para  $1 < a/b$ : interpolar linearmente.
- Para cada uma das duas incidências do vento ( $0^\circ$  e  $90^\circ$ ), 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.
- Para determinar o coeficiente de arrasto,  $C_a$ , deve ser usado o gráfico da figura 4 (vento de baixa turbulência) ou figura 5 da ABNT NBR 6123:1988 (vento de alta turbulência).

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6123 (1988).

Quadro 3 - ABNT NBR 6123:1988 - Coeficientes de pressão para telhados.

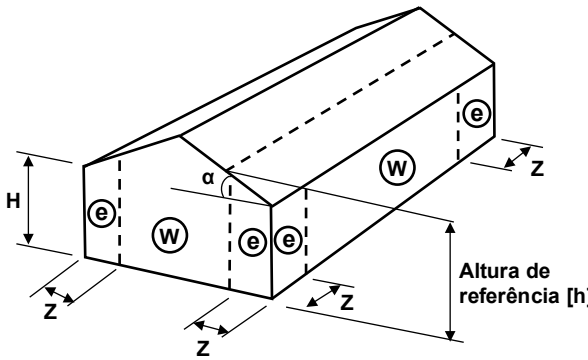
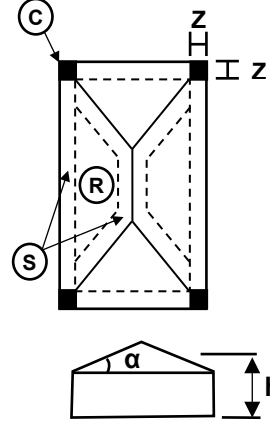
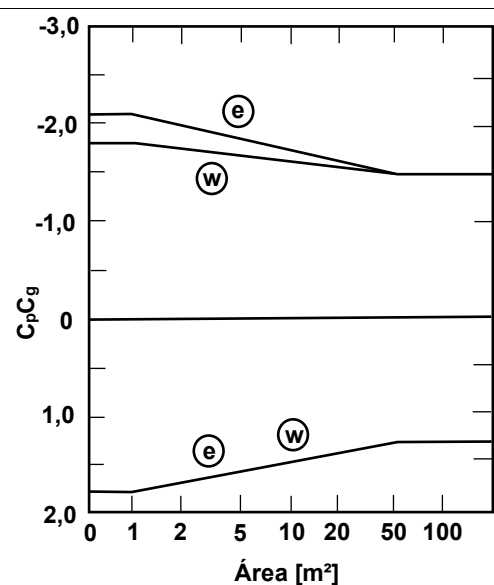
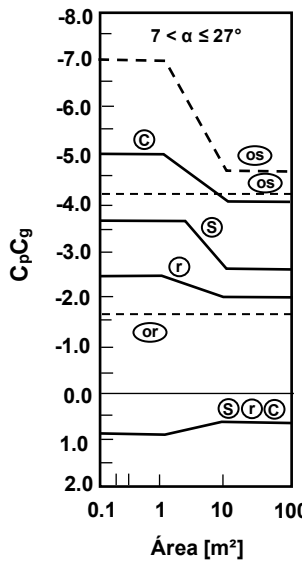
ALTURA RELATIVA	$\theta$	VALORES DE $C_e$				$C_{pe}$ MÉDIO			
		$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 0^\circ$					
		E F	G H	E G	F H				
 $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	0	-0,80	-0,40	-0,80	-0,40	-2,00	-2,00	-2,00	-1,00
	5	-0,90	-0,40	-0,80	-0,40	-1,40	-1,20	-1,20	-1,00
	10	-1,20	-0,40	-0,80	-0,60	-1,40	-1,40	-1,20	-1,20
	15	-1,00	-0,40	-0,80	-0,60	-1,40	-1,20	-1,20	-1,20
	20	-0,40	-0,40	-0,70	-0,60	-1,00	-1,20	-1,20	-1,20
	30	0,00	-0,40	-0,70	-0,60	-0,80	-1,20	-1,20	-1,10
	45	0,30	-0,50	-0,70	-0,60	-0,80	-1,20	-1,20	-1,10
	60	0,70	-0,60	-0,70	-0,60	-0,80	-1,20	-1,20	-1,10
 $\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	0	-0,80	-0,60	-1,00	-0,60	-2,00	-2,00	-2,00	-1,00
	5	-0,90	-0,60	-0,90	-0,60	-2,00	-2,00	-1,50	-1,00
	10	-1,10	-0,60	-0,80	-0,60	-2,00	-2,00	-1,50	-1,20
	15	-1,00	-0,60	-0,80	-0,60	-1,80	-1,50	-1,50	-1,20
	20	-0,70	-0,50	-0,80	-0,60	-1,50	-1,50	-1,50	-1,00
	30	-0,20	-0,50	-0,80	-0,80	-1,00	-1,50	-1,50	-1,00
	45	0,20	-0,50	-0,80	-0,80	-1,00	-1,50	-1,50	-1,00
	60	0,60	-0,50	-0,80	-0,80	-1,00	-1,50	-1,50	-1,00
 $\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6,00$	0	-0,80	-0,90	-0,90	-0,70	-2,00	-2,00	-2,00	-1,00
	5	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80	-2,00	-2,00	-1,50	-1,00
	10	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80	-2,00	-2,00	-1,50	-1,20
	15	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80	-1,80	-1,80	-1,50	-1,20
	20	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80	-1,50	-1,50	-1,50	-1,20
	30	-1,00	-0,70	-0,80	-0,70	-1,50	-1,50	-1,50	-1,20
	40	-0,20	-0,70	-0,80	-0,70	-1,00	-1,50	-1,50	-1,20
	50	0,20	-0,70	-0,80	-0,70	-1,00	-1,50	-1,50	-1,20
	60	0,50	-0,70	-0,80	-0,70	-1,00	-1,50	-1,50	-1,20
<b>DISPOSIÇÃO DOS COEFICIENTES</b>									
					<p>Notas:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>O coeficiente de forma <math>C_e</math> na face inferior do beiral é igual ao da parede correspondente.</li> <li>Nas zonas em torno de partes de edificações salientes ao telhado (chaminé, reservatórios, torres, etc.), deve ser considerado um coeficiente de forma <math>C_e = 1,2</math>, até uma distância igual à metade da dimensão diagonal da saliência vista em planta.</li> <li>Na cobertura de lanternins, <math>C_{pe \text{ médio}} = -2,0</math>.</li> <li>Para vento a <math>0^\circ</math>, nas paredes I e J o coeficiente de forma <math>C_e</math> tem os seguintes valores: <ul style="list-style-type: none"> <li>- para <math>a/b = 1</math>: mesmo valor das partes F e H;</li> <li>- para <math>a/b \geq 2</math>: <math>C_e = -0,2</math>;</li> <li>- para <math>1 &lt; a/b</math>: interpolar linearmente.</li> </ul> </li> </ol>				

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6123 (1988).

### 3.3.2 NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA (2011)

Os coeficientes de pressão externos para o projeto de edifícios baixos de cobertura quatro águas de acordo com o *National Building Code of Canada* (2011), são apresentados no Quadro 4. Os coeficientes são baseados nas pressões máximas de rajada com duração de aproximadamente 1s, para uma área associada ao elemento ou membro particular sobre o qual incide a pressão do vento.

**Quadro 4** – NBCC:2012 - Coeficientes de pressão-rajada de pressão externos de pico,  $C_p C_g$ .

COEFICIENTES DE PRESSÃO	
PAREDE	COBERTURA
 <p>Diagrama de um edifício com telhado de quatro águas. Mostra as áreas de referência (e) e (w) nas paredes e a altura de referência [h]. O ângulo do telhado é <math>\alpha</math>.</p>	 <p>Diagrama de um telhado de quatro águas com áreas de referência (c, r, s) e a altura de referência [h]. O ângulo do telhado é <math>\alpha</math>.</p> <p><math>7 &lt; \alpha \leq 27^\circ</math></p>
 <p>Gráfico de <math>C_p C_g</math> versus Área [<math>m^2</math>] para paredes. O eixo Y varia de -3,0 a 2,0 e o eixo X varia de 0 a 100. Curvas para áreas (e) e (w) são mostradas.</p>	 <p>Gráfico de <math>C_p C_g</math> versus Área [<math>m^2</math>] para cobertura. O eixo Y varia de -8,0 a 2,0 e o eixo X varia de 0,1 a 100. Curvas para áreas (c, r, s, or, os) são mostradas.</p> <p><math>7 &lt; \alpha \leq 27^\circ</math></p>
<p>Notas:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) A largura <math>z</math> da zona final é menor que 10% da menor dimensão horizontal e 40% da altura, <math>H</math>, mas não menor que 4% da menor dimensão horizontal ou 1 m.</li> <li>(2) Combinações de pressões externas e internas devem ser avaliadas para obter o carregamento mais severo.</li> <li>(3) Para telhados de quatro águas com <math>7^\circ &lt; \alpha &lt; 27^\circ</math>, as faixas de borda / cumeeira e coeficientes de rajada de pressão para cumes de telhados de duas águas aplicam-se ao longo de cada quadril.</li> </ol>	

**Fonte:** Adaptado de National Building Code of Canada (2005).



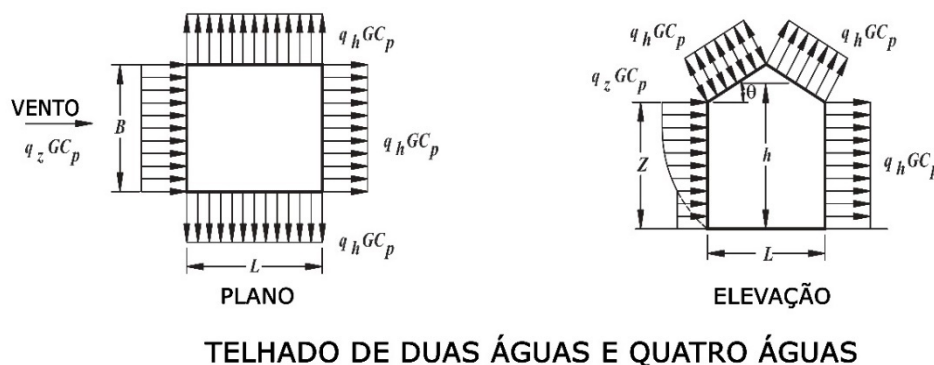
### 3.3.3 ASCE/SEI 7-22 (2022)

A ASCE/SEI 7-22 (2022) em suas provisões de carga de vento permite a utilização de mais de um método para o cálculo das cargas principais do sistema de resistência à força do vento (MWFRS) para edifícios baixos e rígidos. Assim, em seu método teórico as definições e setorizações as quais resultam na determinação dos coeficientes de pressão externa, pode ser norteado tanto pelo método direcional quanto pelo método de envelope.

#### a) Método Direcional

Para serem enquadradas neste método as edificações necessitam possuir forma regular, ou seja, não apresentar irregularidades geométricas. Além disso, não devem possuir características que as tornem objeto de toda a carga de vento, vórtices, instabilidade devido ao galope ou local de canalização a barlavento que a induza a totalidade da ação. Os coeficientes apresentados na Figura 14 podem ser determinados junto o Quadro 5.

**Figura 14** – Coeficientes de pressão externa para paredes e telhados – método direcional.



Notação:

B: Dimensão horizontal do edifício, em pés (metro), medida normal à direção do vento.

L: Dimensão horizontal do edifício, em pés (metro), medida paralelamente à direção do vento.

h: Altura média do teto em pés (metros), exceto que a altura do beiral deve ser usada para  $\theta \leq 10$  graus.

z: Altura acima do solo, em pés (metros).

G: Fator de efeito de rajada.

$q_z, q_h$ : Pressão de velocidade, em libras por pé quadrado (N/m<sup>2</sup>), avaliada na respectiva altura.

$\theta$ : Ângulo do plano do telhado da horizontal, em graus.

**Fonte:** Adaptado de ASCE/SEI 7-22 (2022).

**Quadro 5 – ASCE/SEI 7-22 – Método direcional - Coeficiente de pressão para paredes e telhado.**

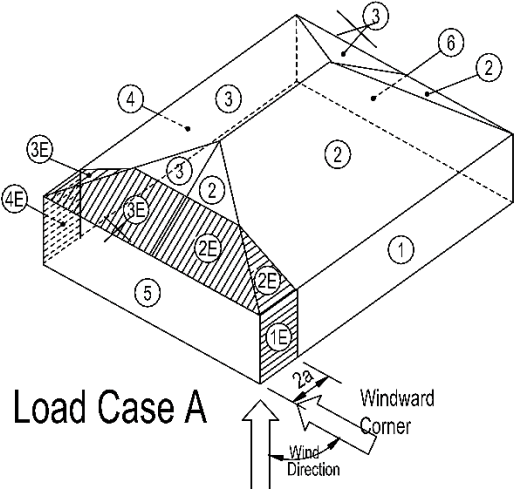
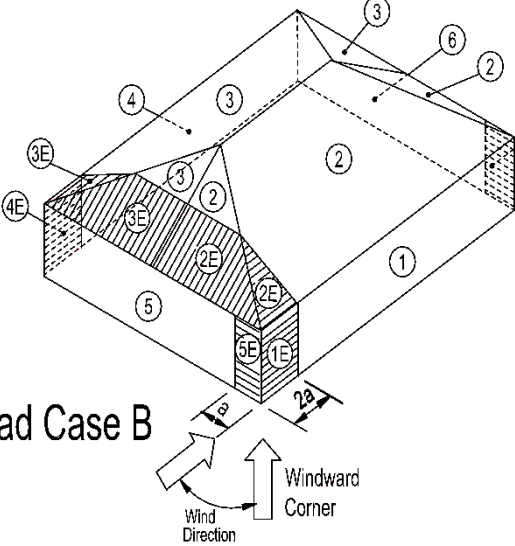
<b>COEFICIENTE DE PRESSÃO PARA PAREDES – <math>C_p</math></b>											
Superfície		L/B							$C_p$	Usada com	
Parede à barlavento		Todos os valores							0,80	$q_z$	
Paredes à sotavento		0 – 1							-0,50	$q_h$	
		2							-0,30	$q_h$	
		$\geq 4$							-0,20	$q_h$	
Paredes laterais		Todos os valores							-0,70	$q_h$	
<b>COEFICIENTE DE PRESSÃO PARA TELHADOS – <math>C_p</math></b>											
<i>Normal à cumeeira para <math>\theta \geq 10^\circ</math></i>											
h/L	Barlavento								Sotavento		
	10°	15°	20°	25°	30°	35°	45°	$\geq 60^\circ$	10°	15°	$\geq 20^\circ$
$\leq 0,25$	-0,70	-0,50	-0,30	-0,20	-0,20	0,00 <sup>a</sup>	0,40	0,01 $\theta$	-0,3	-0,5	-0,6
	-0,18	0,00 <sup>a</sup>	0,20	0,30	0,30	0,40					
0,50	-0,90	-0,70	-0,40	-0,30	-0,20	-0,20	0,00 <sup>a</sup>	0,01 $\theta$	-0,5	-0,5	-0,6
	-0,18	-0,18	0,00 <sup>a</sup>	0,20	0,20	0,30	0,40				
$\geq 1,00$	-1,30 <sup>b</sup>	-1,00	-0,70	-0,50	-0,30	-0,20	0,00 <sup>a</sup>	0,01 $\theta$	-0,7	-0,6	-0,6
	-0,18	-0,18	-0,18	0,00 <sup>a</sup>	0,20	0,20	0,30				
<i>Normal à cumeeira para <math>\theta &lt; 10^\circ</math></i>											
h/L		Distância da borda a barlavento						$C_p$			
$\leq 0,50$		0 a h/2						-0,90		-0,18	
		h/2 a h						-0,90		-0,18	
		h a 2h						-0,50		-0,18	
		$> 2h$						-0,30		-0,18	
$\geq 1,00$		0 a h/2						-1,30 <sup>b</sup>		-0,18	
		$> h/2$						-0,70		-0,18	
<sup>a</sup> O valor é fornecido para fins de interpolação.											
<sup>b</sup> O valor pode ser reduzido linearmente com a área que é aplicável da seguinte forma:											
<sup>c</sup> Para inclinações de telhado maiores que $80^\circ$ , use $C_p = 0,8$ .											
<b>REDUÇÃO DE ÁREA</b>											
Área (ft <sup>2</sup> )		Área (m <sup>2</sup> )				Fator de redução					
$\leq 100$		$\leq 9,30$				1,00					
250		23,20				0,90					
$\geq 1000$		$\geq 92,9$				0,80					
Notas:											
1. Sinais de mais e menos significam pressões agindo para e longe das superfícies, respectivamente.											
2. A interpolação linear é permitida para valores de LB, h/L e $\theta$ diferentes dos mostrados. A interpolação só deve ser realizada entre valores do mesmo sinal. Onde nenhum valor do mesmo sinal é dado, suponha 0.0 para fins de interpolação.											
3. Quando dois valores de $C_p$ são listados, isto indica que a inclinação do telhado de barlavento está sujeita a pressões positivas ou negativas e que a estrutura do telhado deve ser projetada para ambas as condições. A interpolação para proporções intermediárias de h / L, neste caso, só deve ser realizada entre valores de $C_p$ de sinal semelhante.											
4. Para telhados de uma água, toda a superfície do telhado é uma superfície de barlavento ou de sotavento.											
5. Com exceção do MWFRS no telhado, que consiste em estruturas resistentes a momentos, o cisalhamento horizontal total não deve ser menor do que o determinado pela negligência das forças do vento nas superfícies dos telhados.											

**Fonte:** Adaptado de ASCE/SEI 7-22 (2022).

## b) Método de envelope

Na metodologia envelope o fator de rajada combinado com os coeficientes de pressão externos para prédios baixos ( $GC_{pf}$ ) não podem ser separados. Os coeficientes de pressão externa para paredes e telhados podem ser determinados pelo Quadro 6.

**Quadro 6 - ASCE/SEI 7-22 – Método envelope - Coeficientes de pressão externa para paredes e telhado.**

<b>CASO A</b>		SUPERFÍCIE DA EDIFICAÇÃO						
		0°	5°	20°	30°	45°	90°	
		1	0,40	0,40	0,53	0,56	0,56	0,56
2	-0,69	-0,69	-0,69	0,21	0,21	0,56		
3	-0,37	-0,37	-0,48	-0,43	-0,43	-0,37		
4	-0,29	-0,29	-0,43	-0,37	-0,37	-0,37		
1E	0,61	0,61	0,80	0,69	0,69	0,69		
2E	-1,07	-1,07	-1,07	0,27	0,27	0,69		
3E	-0,53	-0,53	-0,69	-0,53	-0,53	-0,48		
4E	-0,43	-0,43	-0,64	-0,48	-0,48	-0,40		
<b>CASO B</b>		SUPERFÍCIE DA EDIFICAÇÃO						
		0°	5°	20°	30°	45°	90°	
		1	-0,45	-0,45	-0,45	-0,45	-0,45	-0,45
2	-0,69	-0,69	-0,69	-0,69	-0,69	-0,69		
3	-0,37	-0,37	-0,37	-0,37	-0,37	-0,37		
4	-0,45	-0,45	-0,45	-0,45	-0,45	-0,45		
5	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40		
6	-0,29	-0,29	-0,29	-0,29	-0,29	-0,29		
1E	-0,48	-0,48	-0,48	-0,48	-0,48	-0,48		
2E	-1,07	-1,07	-1,07	-1,07	-1,07	-1,07		
3E	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53		
4E	-0,48	-0,48	-0,48	-0,48	-0,48	-0,48		
5E	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61		
6E	-0,43	-0,43	-0,43	-0,43	-0,43	-0,43		

Notas:

- Adapte as cargas mostradas na Figura 28.4-1 para edifícios com telhado de quatro águas conforme mostrado acima. Para uma determinada inclinação do telhado de quadril, use os coeficientes do telhado da tabela do Caso A para o Caso de carga A e o Caso de carga B.
- O cisalhamento horizontal total não deve ser inferior ao determinado desconsiderando as forças do vento nas superfícies do telhado.

Fonte: Adaptado de ASCE/SEI 7-22 (2022).

### 3.3.4 EUROCODE-1991-1-4 (2010)

Os coeficientes de pressão externas determinados pelo EUROCODE-1991-1-4 (2010), podem ser obtidos através do Quadro 7, para paredes e Quadro 8 para telhados sendo os valores  $C_{pe,1}$ , para coeficientes locais e  $C_{pe,10}$ , para coeficientes globais.

**Quadro 7 - EUROCODE-1991-1-4 - Coeficientes de pressão externa para paredes verticais.**

COEFICIENTE DE PRESSÃO EXTERNA										
		$e = b$ ou $2h$ , o que for menor		$b$ : dimensão transversal à direção do vento		<b>Elevação para <math>e &lt; d</math></b>				
		<b>Elevação para <math>e \geq d</math></b>				<b>Elevação para <math>e \geq 5d</math></b>				
ZONAS DE COEFICIENTES										
$h/d$	A		B		C		D		E	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	-0,5	+0,8	+1,0	-0,7	-0,7
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	-0,5	+0,8	+1,0	-0,5	-0,5
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	-0,5	+0,7	+1,0	-0,3	-0,3

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

**Quadro 8 – EUROCODE-1991-1-4 - Coeficientes de pressão externa para telhado quatro águas.**

COEFICIENTE DE PRESSÃO EXTERNA																			
Vento 0°										Vento 90°									
ZONAS DE COEFICIENTES																			
θ	F		G		H		I		J		K		L		M		N		
	C <sub>pe 10</sub>	C <sub>pe 1</sub>	C <sub>pe 10</sub>	C <sub>pe 1</sub>	C <sub>pe 10</sub>	C <sub>pe 1</sub>	C <sub>pe 10</sub>	C <sub>pe 1</sub>	C <sub>pe 10</sub>	C <sub>pe 1</sub>	C <sub>pe 10</sub>	C <sub>pe 1</sub>	C <sub>pe 10</sub>	C <sub>pe 1</sub>	C <sub>pe 10</sub>	C <sub>pe 1</sub>	C <sub>pe 10</sub>	C <sub>pe 1</sub>	
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,3	-0,3	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,4	-0,4	
	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0	-0,3	-0,3	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,4	-0,4	
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3	-0,3	-0,5	-0,5	-1,0	-1,5	-1,2	-2,0	-1,4	-2,0	-0,6	-1,2	-0,3	-0,3	
	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	-0,5	-0,5	-1,0	-1,5	-1,2	-2,0	-1,4	-2,0	-0,6	-1,2	-0,3	-0,3	
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2	-0,2	-0,4	-0,4	-0,7	-1,2	-0,5	-0,5	-1,4	-2,0	-0,8	-1,2	-0,2	-0,2	
	+0,5	+0,5	+0,7	+0,7	+0,4	+0,4	-0,4	-0,4	-0,7	-1,2	-0,5	-0,5	-1,4	-2,0	-0,8	-1,2	-0,2	-0,2	
45°	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0	-0,3	-0,3	-0,6	-0,6	-0,3	-0,3	-1,3	-2,0	-0,8	-1,2	-0,2	-0,2	
	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	+0,6	+0,6	-0,3	-0,3	-0,6	-0,6	-0,3	-0,3	-1,3	-2,0	-0,8	-1,2	-0,2	-0,2	
60°	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7	-0,3	-0,3	-0,6	-0,6	-0,3	-0,3	-1,2	-2,0	-0,4	-0,4	-0,2	-0,2	
75°	+0,8	+0,8	+0,8	+0,8	+0,8	+0,8	-0,3	-0,3	-0,6	-0,6	-0,3	-0,3	-1,2	-2,0	-0,4	-0,4	-0,2	-0,2	

Notas:

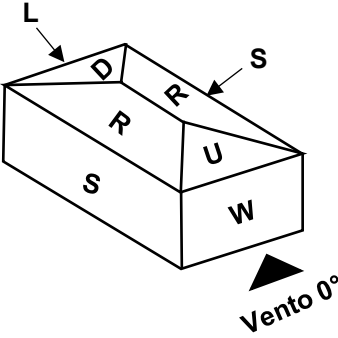
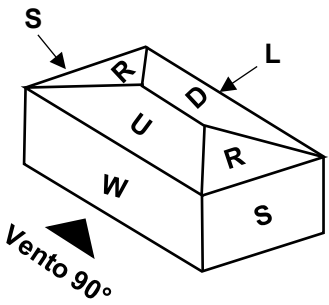
- Legenda:
  - e = menor valor de entre b e 2h;
  - b = dimensão transversal à direcção do vento.
- Com  $q = 0^\circ$  e para inclinações entre  $a = +5^\circ$  e  $a = +45^\circ$ , a pressão varia rapidamente entre valores positivos e negativos na vertente virada a barlavento, razão pela qual são fornecidos valores positivos e negativos. Para estas coberturas deverão ser considerados dois casos: um com todos os valores positivos e um outro com todos os valores negativos.
- Para ângulos intermédios de inclinação da vertente, poderá ser efetuada uma interpolação linear entre valores com o mesmo sinal. Os valores iguais a 0,0 são fornecidos para efeitos de interpolação.
- Os valores dos coeficientes de pressão são sempre regidos pela inclinação da vertente virada a barlavento.

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

### 3.3.5 AS/NZS 1170.2:2017 (2017)

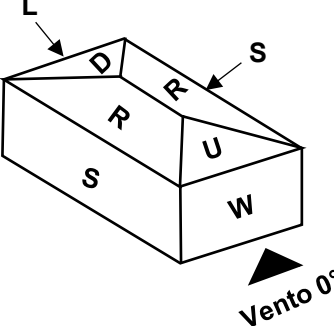
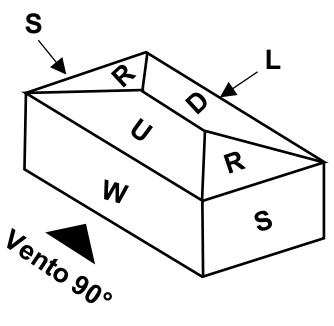
Os coeficientes de pressão externas determinados pela AS/NZS 1170.2:2017 podem ser obtidos através do Quadro 9, para paredes e Quadro 10.

**Quadro 9 – AS/NZS 1170.2:2017 – Coeficientes de pressão para parede.**

COEFICIENTE DE PRESSÃO EXTERNA PAREDES				
VENTO 0°		VENTO 90°		
				
PAREDE BARLAVENTO -W				
Altura (h)	Condição		Cpe	
> 25,0 m	Velocidade do vento varia com a altura		0,80	
≤ 25,0 m	Para construções no chão:		-	
	• Velocidade do vento varia com a altura		0,80	
	• Velocidade é calculada para z = h		0,70	
	Para edifícios elevados:		-	
	• Velocidade do vento é para h		0,80	
PAREDE SOTAVENTO - L				
Direção do vento	Inclinação do telhado (°)	Dimensões (d/b) <sup>b</sup>	Cpe	
Vento 0°	< 10	≤ 1	-0,50	
		2	-0,30	
		≥ 4	-0,20	
	10 15 20	Todos os valores	-	-0,30
			-	-0,30
			-	-0,40
≥ 25	Todos os valores	≤ 0,10	-0,75	
		≥ 0,30	-0,50	
Vento 90° <sup>a</sup>	Todos os valores	≤ 1	-0,50	
		2	-0,30	
		≥ 4	-0,20	
PAREDE LATERAL - S				
Distância horizontal para borda de barlavento		Cpe		
0 a 1h		-0,65		
1h a 2h		-0,50		
2h a 3h		-0,30		
> 3h		-0,20		
Notas:				
a) Para telhados quatro águas use os valores para $\Theta = 0^\circ$ ;				
b) Para valores intermediários de d/b utilize interpolação linear.				

Fonte: Adaptado da AS/NZS 1170.2 (2017).

**Quadro 10** – AS/NZS 1170.2:2017 – Coeficientes de pressão para telhado.

COEFICIENTE DE PRESSÃO EXTERNA TELHADO														
VENTO 0°							VENTO 90°							
														
COEFICIENTE DE PRESSÃO A BARLAVENTO (U)														
<i>Inclinação a barlavento <math>\alpha &lt; 10^\circ</math></i>														
Inclinação lateral (R)	Inclinação barlavento (U)	Distância horizontal da borda de barlavento do telhado	Coeficiente de pressão externa											
			$h/d \leq 0,5$ (Nota 01)		$h/d \geq 1,0$ (Nota 01)									
Todos os casos	$\alpha < 10^\circ$	0 até 0,5h	-0,90	-0,40	-1,30	-0,60								
		0,5 até 1h	-0,90	-0,40	-0,70	-0,30								
		1h até 2h	-0,50	0	(-0,70)	(-0,30)								
		2h até 3h	-0,30	0,10	Nota 02									
		> 3h	-0,20	0,20										
<i>Inclinação a barlavento <math>\alpha \geq 10^\circ</math></i>														
Inclinação barlavento	h/d	Inclinação do telhado												
		10°	15°	20°	25°	30°	35°	$\geq 45^\circ$						
$\alpha \geq 10^\circ$	$\leq 0,25$	-0,7	-0,3	-0,5	0,0	-0,3	0,2	-0,2	0,3	-0,2	0,4	0,0	0,5	0,0.8 sin $\alpha$
	0,50	-0,9	-0,4	-0,7	-0,3	-0,4	0,0	-0,3	0,2	-0,2	0,3	-0,2	0,4	
	$\geq 1,0$	-1,3	-0,6	-1,0	-0,5	-0,7	-0,3	-0,5	0,0	-0,3	0,2	-0,2	0,3	
COEFICIENTE DE PRESSÃO A SOTAVENTO (D) E LATERIAS (R)														
Inclinação água lateral - R	Inclinação água sotavento - D	h/d (Nota 01)	Inclinação do telhado											
			10°	15°	20°	$\geq 25^\circ$								
$\alpha \geq 10^\circ$	$\alpha \geq 10^\circ$	$\leq 0,25$	-0,3	-0,5	-0,6	$b/d \leq 3$	-0,60							
		0,5	-0,5	-0,5	-0,6	$3 < b/d \leq 8$	-0,6 (7 + b/d)							
		$\geq 1,0$	-0,7	-0,6	-0,6	$b/d \geq 8$	-0,90							
Notas:														
1. Para valores intermediários de inclinações do telhado e taxas de cobertura, deve ser usada interpolação linear. A interpolação deve ser realizada apenas em valores do mesmo sinal.														
2. Os valores dados entre parênteses são fornecidos para fins de interpolação.														

Fonte: Adaptado da AS/NZS 1170.2 (2017).

### 3.4 LEIS DE SEMELHANÇA E NÚMERO DE REYNOLDS

Ao executar a conferência dos parâmetros regidos pela ação do vento por método experimental a performance do modelo da edificação é elementar. Para esses estudos, uso de modelos em escala natural é de raríssima incidência. Comumente, o estudo é executado em modelos reduzidos favorecendo a rapidez na obtenção dos resultados, economia, estudo de viabilidade de projeto, verificação dos efeitos de mudança na forma exterior (BLESSMANN, 2011).

As leis de semelhança foram desenvolvidas no século XIX e são a base dos protótipos reais até os dias atuais (FERNANDES, 2013). Para Blessmann (2011) o comportamento do modelo reflete com segurança o comportamento do protótipo quando as três condições de semelhança são atendidas:

*1º Semelhança geométrica ou semelhança dos corpos:* Do ponto de vista físico, as formas análogas devem ser colocadas em orientação equivalente para os dois escoamentos. A semelhança de formas se estende detalhes e rugosidade da superfície dos sólidos, ou seja, escala geométrica imposta aos corpos deve prevalecer para a rugosidade e detalhes. Matematicamente, para ambos os escoamentos deve-se admitir uma relação constante entre os comprimentos, conforme Equação 24.

$$\frac{l_1}{l_2} = \text{constante}$$

**Equação 24**

*2º Semelhança cinemática ou semelhança de escoamentos:* Fisicamente, as características da turbulência, assim como, a distribuição das velocidades médias deve ser semelhante. Em outras palavras a camada limite e o capô de velocidades deve ser fidedigno ao real. Do ponto de vista matemático, para os dois escoamentos deve-se admitir uma relação constante entre os módulos de velocidade em todos os pares de pontos, conforme Equação 25.

$$\frac{U_1}{U_2} = \text{constante}$$

**Equação 25**



3º *Semelhança dinâmica ou semelhança de forças*: Do ponto de vista físico, para os dois escoamentos as forças, além de serem paralelas, estabelecem uma proporção constante. Do ponto de vista matemático, para ambos os escoamentos deve-se admitir uma relação constante entre os módulos de forças, conforme Equação 26.

$$\frac{F1}{F2} = constante$$

**Equação 26**

Dentro do contexto da semelhança dinâmica há alguns aspectos levantados por Theodore von Kármán para que a mesma seja alcançada (HOLMES, 2004). Em um fluxo a força da gravidade, viscosidade, pressão e inércia são as forças tidas como agentes. Em termos de aerodinâmica tanto a força da gravidade quanto a pressão são obedecidas, visto que, a primeira é desconsiderada pois o peso de volume não tem relevância significativa no modelo e a segunda ao considerar o fluido como incompressível gera-se uma reação passiva fazendo ligar a outras forças agentes por meio de equilíbrio mútuo (BLESSMANN, 2011).

Portanto, a força de inércia e viscosidade sobeja para a análise. Assim o número de Reynolds, estudado por Osborne Reynolds em 1883, tomado como a razão entre as forças de inércia e viscosas do fluido (Equação 27), é o parâmetro utilizado para avaliar a estabilidade de um fluxo indicando se o mesmo é turbulento ou lamelar (HOLMES, 2004).

$$Re = \frac{uL}{\nu} = \frac{\text{forças de inércia}}{\text{forças de viscosidade}}$$

**Equação 27**

Onde:

$u$  = velocidade do fluido;

$L$  = comprimento escolhido para caracterizar o corpo em estudo;

$\nu$  = viscosidade cinemática do fluido.

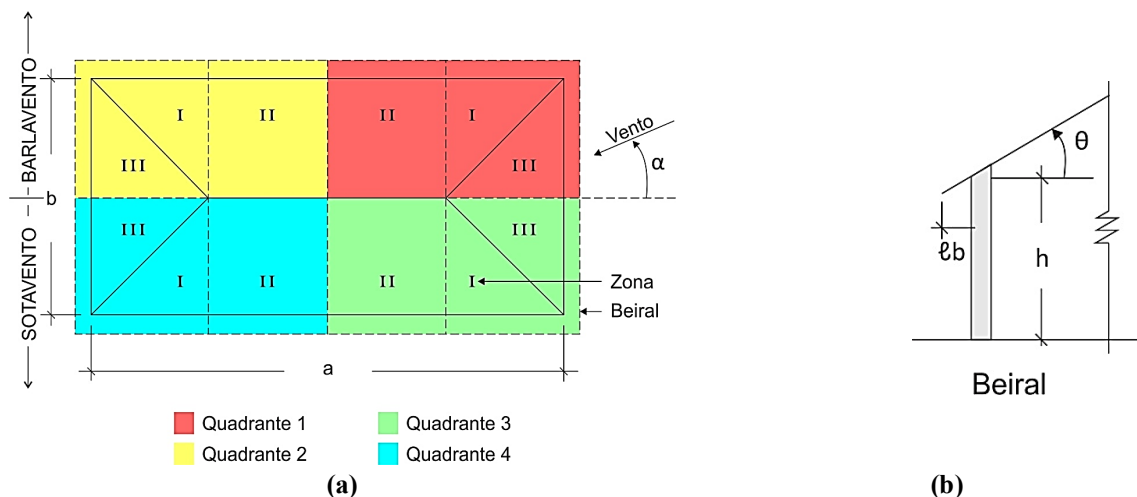
#### 4 METODOLOGIA DE PESQUISA

Para o desenvolvimento da pesquisa, em prol dos objetivos estabelecidos, houveram três momentos distintos. Primeiro, paralelo com a revisão de estado da arte, fora realizado o mapeamento de modelos reduzidos utilizados em estudos para a determinação de geometrias usuais junto a construção civil. Segundo, os estudos foram separados visando os quais apresentavam todas as informações necessária para reprodução do estudo (Quadro 11), sendo que, após a determinação de um procedimento padrão de simulação numérica, estes foram utilizados para calibração do túnel de vento numérico. O Quadro 11 também apresenta os parâmetros usados construção do volume de controle e propriedades do fluxo.

Para que estudo possa ser reproduzido numericamente das como sendo: velocidade básica, coeficiente da lei de potência, medidas completas do modelo reduzido e gráfico de curvas isobáricas de coeficientes de pressão externa. Após a construção do modelo numérico, ao delongar do processo de calibração, fora avaliada a correspondência de magnitude dos coeficientes de pressão obtidos com o resultado de estudos consolidados. Outro fator avaliado fora a localização das zonas de dissipação dos coeficientes de pressão que remete ao comportamento, sendo que ao findar do processo a metodologia fora aprovada.

Tendo o procedimento numérico correspondido ao levantamento bibliográfico, foram simuladas relações geométricas complementares sendo limitadas pela relação  $h/b = 0,50$ . Tal relação fora fixada com base nas premissas da ABNT NBR 6123:1988 com intuito de limitar a amostragem geométrica. Além disso, como o estado da arte revelara, estruturas com telhado quatro águas são geralmente térreas. A Figura 15 apresenta a simbologia utilizada, os quadrantes, as zonas e a orientação do vento.

**Figura 15** – Esquema telhado 4 águas: (a) Quadrantes do telhado; (b) Detalhe beiral.



Fonte: Blessmann (2004).

Quadro 11 – Relação de estudo que apresentam condições de serem reproduzidos.

Autores	Ano	Escala	Geometria						Volume de controle			Fluxo		Recurso			
			a [mm]	b [mm]	h [mm]	lb [mm]	$\Theta$ [°]	Área [m <sup>2</sup> ]	H [mm]	5H [mm]	15H [mm]	V <sub>0</sub> [m/s]	$\alpha$				
Meecham, Surry e Davenport	1991	1:100	200	100	30	0	18,4	0,020	46,63	233,16	699,49	6,00	0,19; 0,32	T.V.			
Xu e Reardon	1998	1:50	280	140	58	22	15	0,039	82,65	413,26	1.239,77	10,10	0,14	T.V.			
			280	140	58	22	20	0,039	91,49	457,43	1.372,28	10,10	0,14	T.V.			
			280	140	58	22	30	0,039	111,12	555,58	1.666,74	10,10	0,14	T.V.			
Ahmad e Kumar	2002	1:50	280	140	58	22	30	0,039	111,12	555,58	1.666,74	10,70	0,15	T.V.			
Blessmann	2009	1:50	320	160	60	12	15	0,051	84,65	423,26	1.269,77	30,00	0,11;0,23	T.V.			
			320	160	60	12	30	0,051	113,12	565,58	1.696,74	30,00	0,11;0,23	T.V.			
			320	160	120	12	15	0,051	144,65	723,26	2.169,77	30,00	0,11;0,23	T.V.			
			320	160	120	12	30	0,051	173,12	865,58	2.596,74	30,00	0,11;0,23	T.V.			
			320	160	180	12	15	0,051	204,65	1.023,26	3.069,77	30,00	0,11;0,23	T.V.			
			320	160	180	12	30	0,051	233,12	1.165,58	3.496,74	30,00	0,11;0,23	T.V.			
Gavanski, Kordi, Kopp e Vickery	2012	1:50	200	180	72	10	18,41	0,036	105,28	526,42	1.579,27	13,70	0,15	T.V.			
			200	180	72	10	22,61	0,036	113,65	568,23	1.704,70	13,70	0,15	T.V.			
			200	180	72	10	26,61	0,036	122,10	610,49	1.831,47	13,70	0,15	T.V.			
			200	180	72	10	30,31	0,036	130,46	652,29	1.956,88	13,70	0,15	T.V.			
			200	180	134	10	18,41	0,036	167,28	836,42	2.509,27	13,70	0,15	T.V.			
			200	180	134	10	22,61	0,036	175,65	878,23	2.634,70	13,70	0,15	T.V.			
			200	180	134	10	26,61	0,036	184,10	920,49	2.761,47	13,70	0,15	T.V.			
			200	180	134	10	30,31	0,036	192,46	962,29	2.886,88	13,70	0,15	T.V.			
			200	180	182	10	18,41	0,036	215,28	1.076,42	3.229,27	13,70	0,15	T.V.			
			200	180	182	10	22,61	0,036	223,65	1.118,23	3.354,70	13,70	0,15	T.V.			
			200	180	182	10	26,61	0,036	232,10	1.160,49	3.481,47	13,70	0,15	T.V.			
			200	180	182	10	30,31	0,036	240,46	1.202,29	3.606,88	13,70	0,15	T.V.			
			Jameel, Irtaza e Javed	2015	1:50	280	140	58	22	30	0,039	111,12	555,58	1.666,74	10,10	0,14	C.F.D.
			Baha e Osman	2017	1:40	900	450	225	0	10	0,405	264,67	1.323,37	3.970,10	40,00	0,15	C.F.D.
900	450	225				0	25	0,405	329,92	1.649,60	4.948,79	40,00	0,15	C.F.D.			
Moravej, Zisis, Chowdhury e Hajra	2017	1:10	2470	1950	180	0	18,41	4,817	504,53	2.522,64	7.567,93	20,00	0,154	T.V.			
			2470	1950	300	0	18,41	4,817	624,53	3.122,64	9.367,93	20,00	0,154	T.V.			
			2470	1950	610	0	18,41	4,817	934,53	4.672,64	14.017,93	20,00	0,154	T.V.			
			2470	1950	910	0	18,41	4,817	1.234,53	6.172,64	18.517,93	20,00	0,154	T.V.			

Fonte: Própria do autor.

Notas do Quadro 11:

- a: comprimento das paredes do modelo;
- b: largura das paredes do modelo;
- c: altura das paredes do modelo;
- lb: comprimento do beiral em todos o contorno do modelo;
- $\Theta$ : inclinação do telhado em graus;
- V0: velocidade básica do vento;
- $\alpha$ : coeficientes da lei da potência;
- $\beta$ : intensidade de turbulência longitudinal
- T.V.: ensaio de túnel de vento de camada limite;
- C.F.D.: *computational fluid dynamics*.

#### 4.1 MÉTODO ANALÍTICO

O método analítico é composto pela norma brasileira de vento ABNT NBR 6123 (1988) e por normativas internacionais, as quais passam por revisões periódicas e possuem metodologia pra telhado quatro águas, sendo:

- ASCE-7-2022 (2022);
- *National Building Code of Canada* (2012);
- EN 1991-1-4:2005 (2010);
- AS/NZS 1170.2:2017 (2017).

A análise das normativas será feita de forma pelos procedimentos de cálculo segundo o procedimento metodológico de cada norma já elucidado junto ao capítulo 3. Ressalta-se que as normas americanas e canadense trabalham com coeficientes de pressão-rajada ( $C_p C_g$ ) enquanto a norma europeia e australiana trabalham com coeficiente de pressão ( $C_{pe}$ ). Logo, os coeficientes de pressão externas obtidos por essas normas precisam ser corrigidos para poder comparar todas as normas diretamente. Tal correção se dá dividindo os valores pelos coeficientes de rajada padrão, preconizados pelas normativas, para elementos estruturais rígidos sendo:

- Para ASCE-7-2022 (2022):  $C_g = 0,85$ ;
- Para *National Building Code of Canada 2012* (2012):  $C_g = 2,00$ .

## 4.2 MÉTODO NUMÉRICO

O método numérico é composto por simulação computacional com auxílio do software ANSYS 2020 R2. Através deste será possível reproduzir um túnel de vento numérico, onde, modelar-se-á a câmara de ensaio de um túnel de vento.

### 4.2.1 Características do fluxo

O fluido onde os modelos estarão imersos, tem por características:

- Incompressibilidade;
- Fluido isotérmico;
- Densidade de  $1,185\text{kg/m}^3$ ;
- Viscosidade de  $1,83\text{e-}05\text{ kg/m.s}$ , (valor para temperatura ambiente de  $25^\circ\text{C}$ ).

Quando a turbulência, utiliza-se o modelo de turbulência  $k - \epsilon$  padrão onde a viscosidade turbulenta assumindo que os tensores de Reynolds são proporcionais aos gradientes de velocidade média tendo a constante de proporcionalidade caracterizada pela viscosidade turbulenta. O modelo  $k - \epsilon$  usado varia com o estudo reproduzido.

### 4.2.2 Modelagem

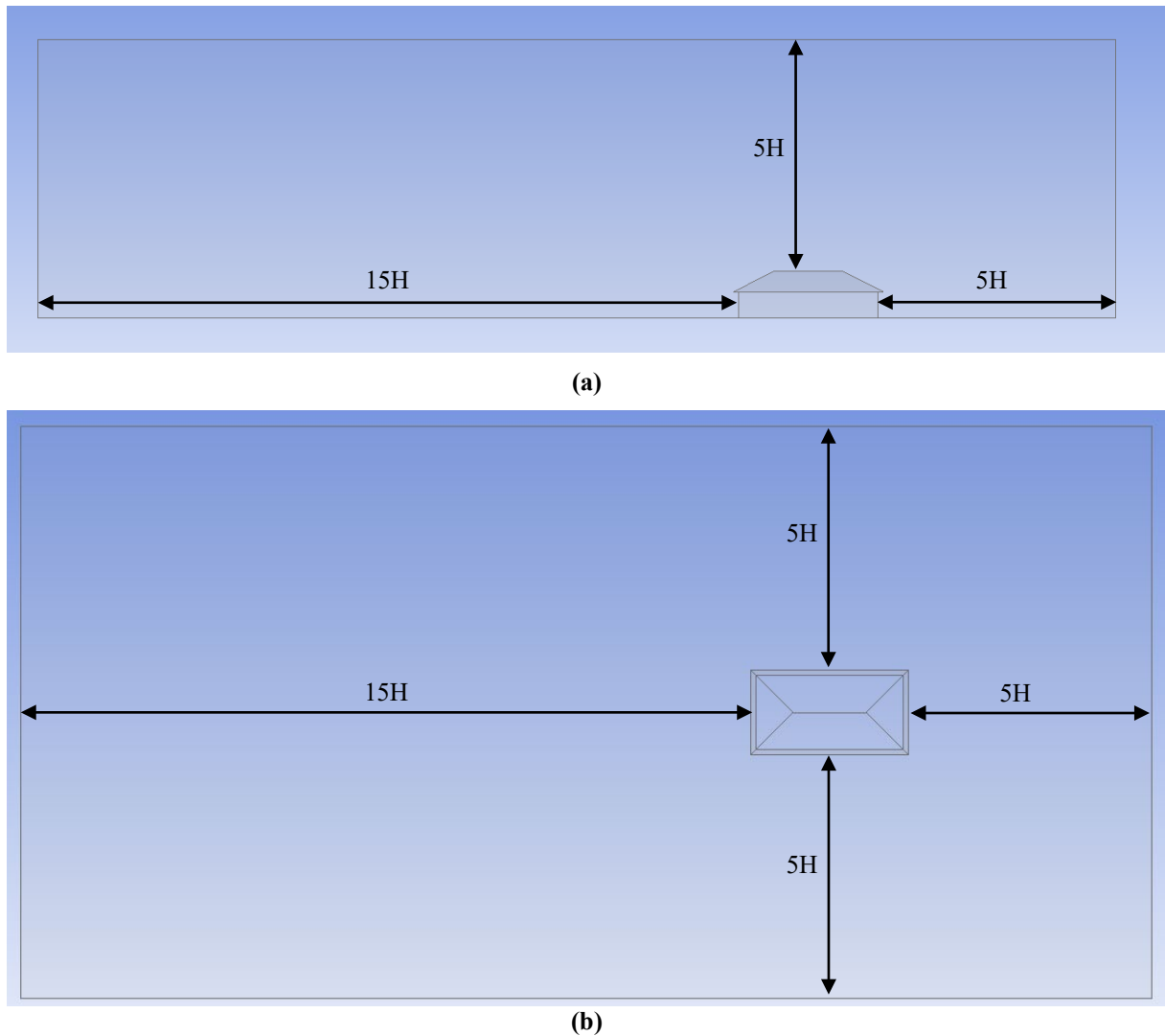
Os modelos reduzidos são reproduzidos em sólidos tridimensionais com auxílio de software de modelagem 3D e importados para o *Ansys*. A simulação numérica de um ensaio de túnel de vento se dá ao introduzir o modelo reduzido dentro de um sólido prismático o qual será o corpo do túnel. Para tal deve-se, manter a proporção da seção do túnel que garanta o escoamento sem restringir a dissipação do fluxo e convergência tangencial do mesmo.

Dentre as metodologias já consolidadas pela bibliografia, no estudo da engenharia do vento, destaca-se as recomendações de Franke et al. (2007) e Singh e Roy (2019), nas quais a dimensão do prisma (volume de controle) é obtido através da proporção da altura total da edificação (H), sendo:

- Entre a entrada do fluido até o modelo  $5H$ ;
- Entre a saída do fluido até o modelo  $15H$ ;
- Entre as laterais do prisma até o modelo  $5H$ ;
- Entre a parte superior do prisma até o modelo  $5H$ .

A Figura 16 apresenta o modelo reduzido junto a seção do túnel regido pelas proporções elucidadas. Ressalta-se que as dimensões do prisma de cada modelo constam no Quadro 11.

**Figura 16** - Proporções do sólido prismático típico: (a) Vista lateral da seção típica do volume de controle; (b) Vista superior típica do volume de controle.



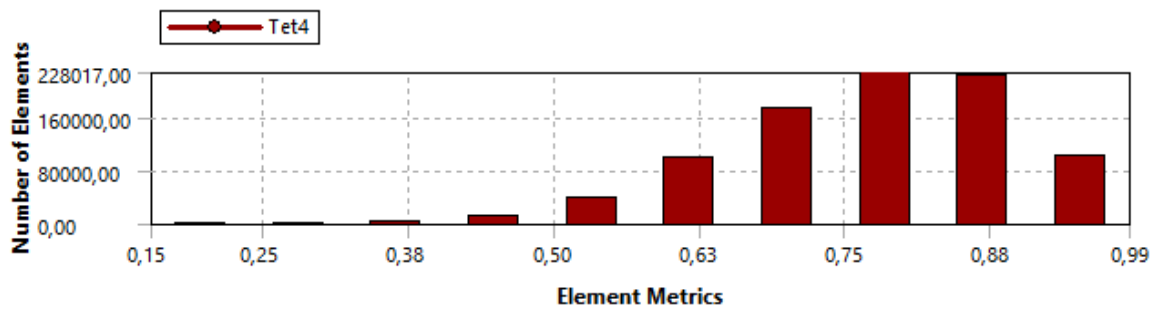
Fonte: Própria do autor.

### 4.2.3 Malha

A metodologia usada para a geração da malha fora a composição tetraédrica que modula sua estrutura de malha para ajustar-se as arestas e faces de vértices existentes na geometria. Para fins de qualidade métrica da malha utilizou-se a procedimento de ortogonalidade, que está relacionado com a proximidade dos ângulos entre as faces dos elementos adjacentes de algum ângulo ideal. Destarte, pode-se docilizar os valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão da estrutura da malha criada. Além disso, o gráfico de qualidade da malha (Figura 19) apresenta

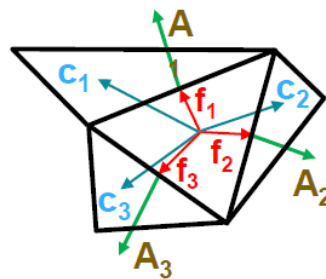
a dispersão das várias métricas de malha de acordo com o número de elementos. Cabe ressaltar, que a ortogonalidade da malha é calculada por mecânica vetorial usando o vetor normal da face e o vetor do centroide da célula para o centroide de cada uma das células adjacentes e o vetor do centroide da célula para cada uma das faces (Figura 18).

**Figura 17** – Diagrama de qualidade de malha.



Fonte: Própria do autor.

**Figura 18** – Esquema de cálculo da ortogonalidade da malha.

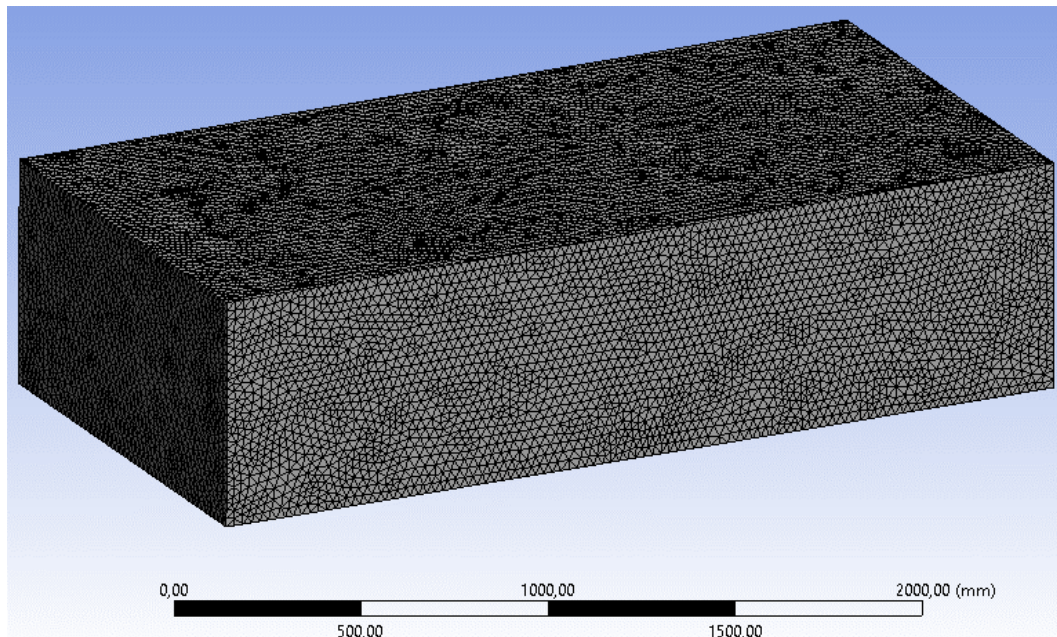


$$\min \left( \frac{A_i \cdot f_i}{|\vec{A}_i| |\vec{f}_i|}, \frac{A_i \cdot c_i}{|\vec{A}_i| |\vec{c}_i|} \right)$$

Fonte: Própria do autor.

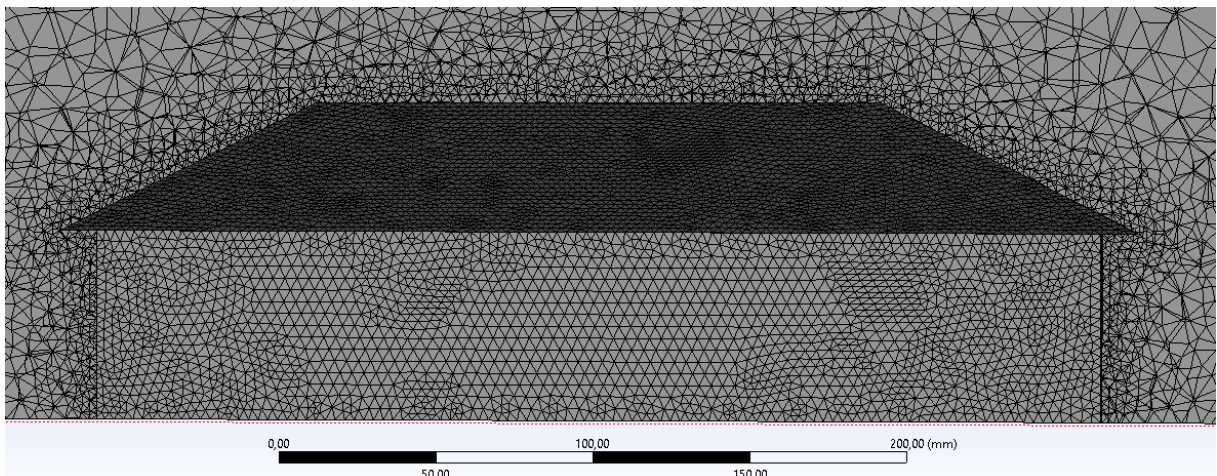
Quando o tamanho da malha como tamanho de elementos 25mm para o volume de controle e 3mm para as nove faces do modelo. Tais valores foram determinados iterativamente regidas pelo tempo de processamento defronte a qualidade e distribuição dos coeficientes, tomando como critério de parada os valores cujo sua alteração não mudara mais aos resultados. A Figura 19 e Figura 20 apresentam o lançamento da malha junto ao volume de controle e o modelo reduzido da edificação respectivamente.

**Figura 19** – Malha lançada junto ao volume de controle.



**Fonte:** Própria do autor.

**Figura 20** – Corte no plano – Malha lançada junto ao modelo da edificação.



**Fonte:** Própria do autor.

#### 4.2.4 Condições de contorno

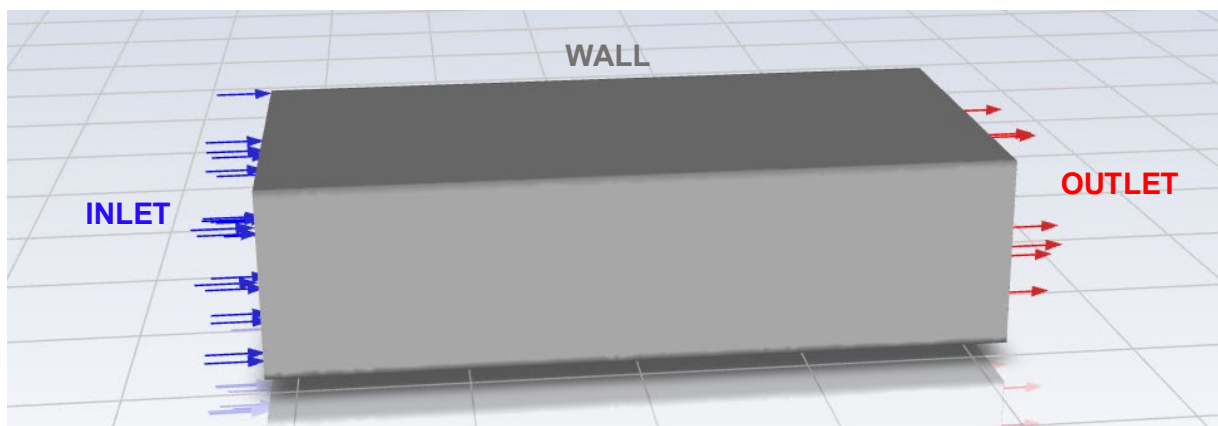
Para a análise computacional de fluídos dinâmica, as velocidades são obtidas do princípio de conservação de energia enquanto a pressão é obtida do princípio de conservação de massa. A atribuição das condições de contorno trata-se do momento em que as características do fluxo são dadas ao túnel. Por conseguinte, têm-se as condições como sendo:



- Na face a montante do modelo, entrada do túnel (*inlet*), a velocidade de entrada do fluxo;
- Na face inferior do túnel de vento numérico, região onde simulação a superfície terrestre, bem como, todas as faces do modelo atribuir-se-á a condição de não deslizamento ( $V_x = V_z = 0$ );
- Nas faces laterais e superior, bem como, na face de saída do túnel (*outlet*) numérico a jusante do modelo a pressão é considerada nula.

A Figura 21 mostra o túnel no momento de aplicação das condições de contorno junto ao *Ansys Fluent*.

**Figura 21** – Modelo junto ao Fluent para atribuição de condições de contorno.



**Fonte:** Própria do autor.

#### 4.2.5 Método de solução

Para obtenção de uma solução coesa é necessário a escolha de um método de acoplamento pressão-velocidade que norteará o cálculo. Devido ao fato, de não haver módulos adicionais além da turbulência, a convergência é limitada pelo acoplamento pressão-velocidade. O algoritmo de cálculo usa a relação entre as correções de velocidade e pressão para impor a conservação de massa e obter o campo de pressão.

Dentro desse conceito a solução é dada baseada em pressão para fazer a discretização das equações de quantidade de movimento e continuidade considerando as equações de continuidade e quantidade de movimento em estado estacionário na forma integral,

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0$$

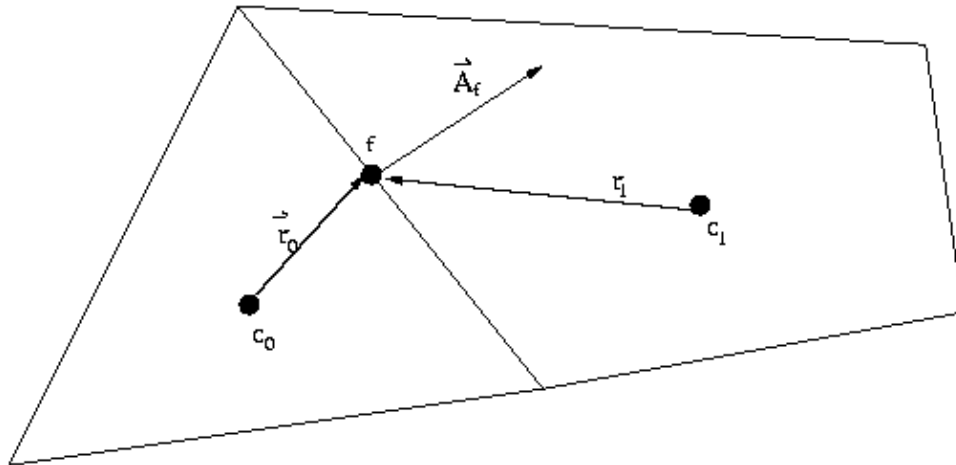
**Equação 28**

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = - \oint p \vec{I} \cdot d\vec{A} + \oint \vec{\tau} \cdot d\vec{A} + \int_V \vec{F} dV$$

Equação 29

A Equação 28 pode ser integrada sobre o volume de controle, Figura 22, originando a equação discreta, Equação 30, onde  $J_f$  é o fluxo de massa através da face  $f$ ,  $\rho v_n$ .

**Figura 22** – Volume de controle usado para ilustrar a discretização de uma equação de transporte escalar.



Fonte: Própria do autor.

$$\sum_f^{N_{faces}} J_f \cdot A_f = 0$$

Equação 30

Por conseguinte, o valor nominal da velocidade não é calculado linearmente, em vez disso, é realizada a média ponderada pelo momento, usando os fatores de ponderação baseados no  $\alpha_p$ , coeficiente da Equação 31. Usando este procedimento, o fluxo facial,  $J_f$ , pode ser expresso pela Equação 32.

$$\alpha_p u = \sum_{nb} \alpha_{nb} u_{nb} + \sum p_f A \cdot \hat{i} + S$$

Equação 31

$$J_f = \rho_f \cdot \frac{\alpha_{p,c_0} v_{n,c_0} + \alpha_{p,c_1} v_{n,c_1}}{\alpha_{p,c_0} + \alpha_{p,c_1}} + d_f \left( (p_{c_0} + (\nabla p)_{c_0} \cdot \vec{r}_0) - (p_{c_1} + (\nabla p)_{c_1} \cdot \vec{r}_1) \right) = \hat{J}_f + d_f (p_{c_0} - p_{c_1})$$

Equação 32

Onde:

$p_{c_0}$  e  $p_{c_1}$  = são as pressões dentro das duas células de cada lado da face;

$v_{n,c_0}$  e  $v_{n,c_1}$  = são as velocidades normais dentro das duas células de cada lado da face;  
 $\hat{J}_f$  = influência das velocidades nas células estudadas;  
 $d_f$  = função  $\bar{\alpha}_p$  média dos coeficientes da equação de momento  $\alpha_p$  para as células em ambos os lados da face  $f$ .

Se a equação do momento for resolvida com um campo de pressão,  $p^*$ , o fluxo de face resultante,  $J_f^*$ , calculado a partir da Equação 32 é dada pela Equação 33.

$$J_f^* = \hat{J}_f^* + d_f(p_{c_0}^* - p_{c_1}^*)$$

**Equação 33**

Como a Equação 33 não satisfaz a equação da continuidade, conseqüentemente, uma correção  $J_f'$  é adicionada ao fluxo facial  $J_f^*$  para que o fluxo facial corrigido,  $J_f$ , satisfaça a equação da continuidade (Equação 34).

$$J_f = J_f^* + J_f'$$

**Equação 34**

Logo, a correção do fluxo pode ser dada pela Equação 35 onde  $p'$  é a correção da pressão na célula.

$$J_f' = d_f(p'_{c_0} - p'_{c_1})$$

**Equação 35**

Assim, a solução do software substitui as equações de correção de fluxo (Equação 34 e Equação 35) na equação de continuidade discreta (Equação 30) para obter uma equação discreta, Equação 36, para a correção de pressão  $p'$  na célula.

$$\alpha_p p' = \sum_{nb} \alpha_{nb} p'_{nb} + b$$

**Equação 36**

Onde o termo  $b$  é a taxa de fluxo líquida para a célula é dada Equação 37.

$$b = \sum_f^{N_{faces}} J_f^* A_f$$

**Equação 37**

A equação de correção de pressão (Equação 36) pode ser resolvida usando o método algébrico multigrid de modo a acelerar a convergência dos métodos iterativos de soluções de sistemas de equações algébricas lineares e ou não-lineares. Uma vez que a solução é obtida, a pressão da célula e o fluxo de face são corrigidos usando o fator de sub-relaxamento para pressão originando a Equação 38 e Equação 39.

$$p = p^* + \alpha_p p'$$

**Equação 38**

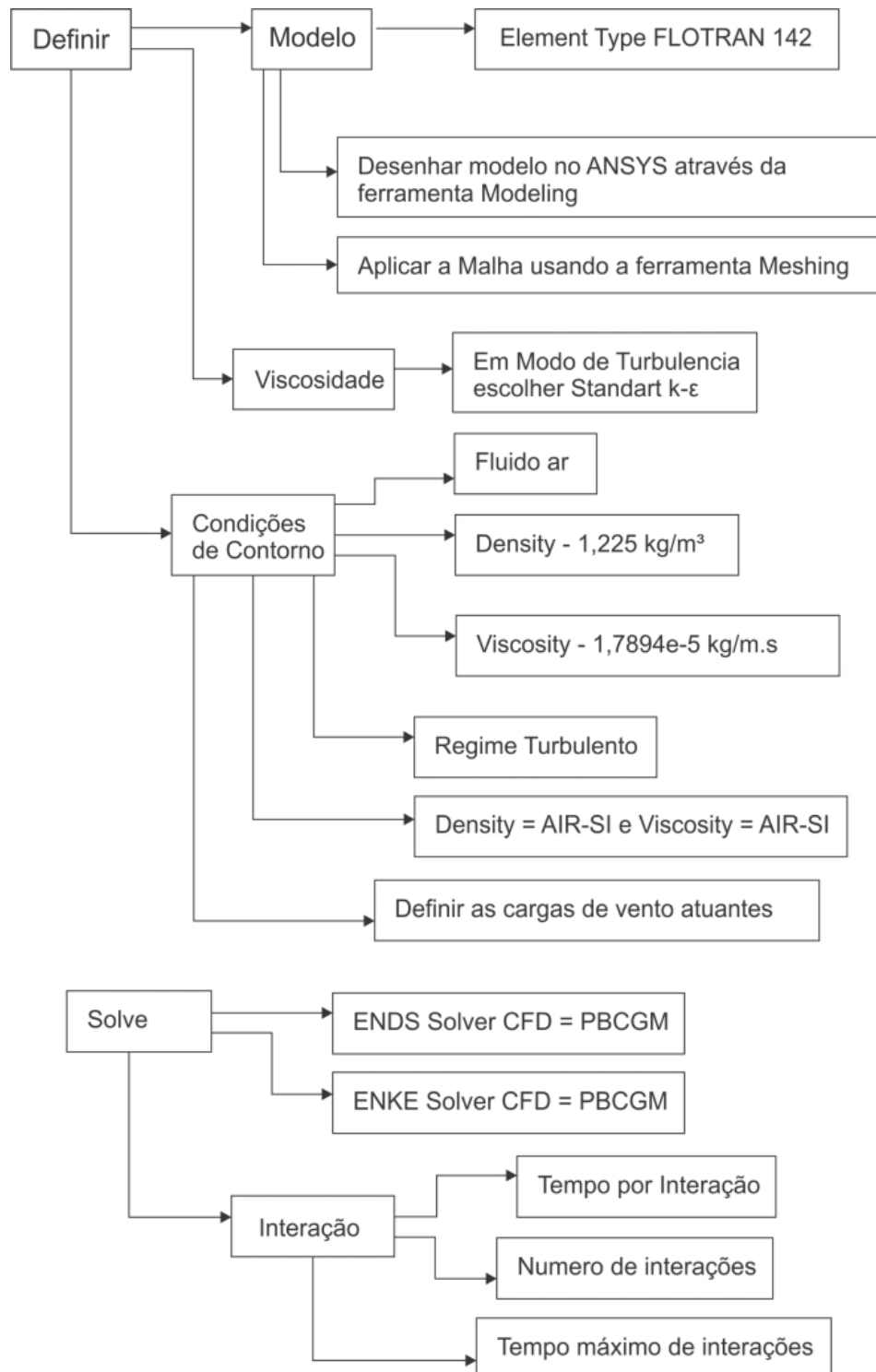
$$J_f = J_f^* + d_f (p'_{c_0} - p'_{c_1})$$

**Equação 39**

O fluxo de face corrigido,  $J_f$ , satisfaz a equação de continuidade discreta identicamente durante cada iteração. Quanto ao número de iterações, toma-se como procedimento padrão o uso de 80 iterações, tal número fora definido com base em testes de modelos comparando a média de iterações necessárias até a convergência dos parâmetros e tempo de processamento necessário.

Por conseguinte, o processo de simulação numérica computacional pode ser resumido no um fluxograma da Figura 23:

**Figura 23** – Processo da simulação numérica computacional.



**Fonte:** Própria do autor.

## 5 RESULTADOS

Embora os estudos de Blessmann (2009) tenham sido de grande importância no auxílio e modulação da metodologia, sua bibliografia possui apenas gráficos de curvas isobáricas de pressão para telhados com platibanda. Logo, como o escopo deste trabalho não contempla platibanda a comparação direta com os resultados fora inviável. Da mesma forma, Moravej et. al. (2017), apresenta mapas de vulnerabilidade de tipologias de coberturas. Usando pontos críticos de cada ângulo de incidência e findando em curvas isobáricas, o mesmo, avaliou a performance e vantagens das coberturas mediante a ação do vento. Destarte, reitera-se que, mesmo não comparando diretamente os resultados destes autores, seus trabalhos contribuíram para as definições e ajustes de método, por isso permanecem listados no Quadro 11.

Cabe salientar que os trabalhos simulados estão interligados entre si. Após Meechan (1991) fazer seu estudo, seu trabalho serviu de base para Xu et. al. (1998) comparar seus ensaios. Já em 2002, Ahmad e Kumar (2002) reproduziram os ensaios de Xu et. al. (1998) complementando-o, mais tarde, Gavanski et. al. (2013) após realizar seus estudos, os compararam com os trabalhos de Meechan (1991) e Xu et. al. (1998). Posteriormente, Jamel et. al. (2015) reproduz numericamente os ensaios de Xu et. al. (1998) fazendo uma ponte entre estes e os realizados por Ahmad e Kumar (2002).

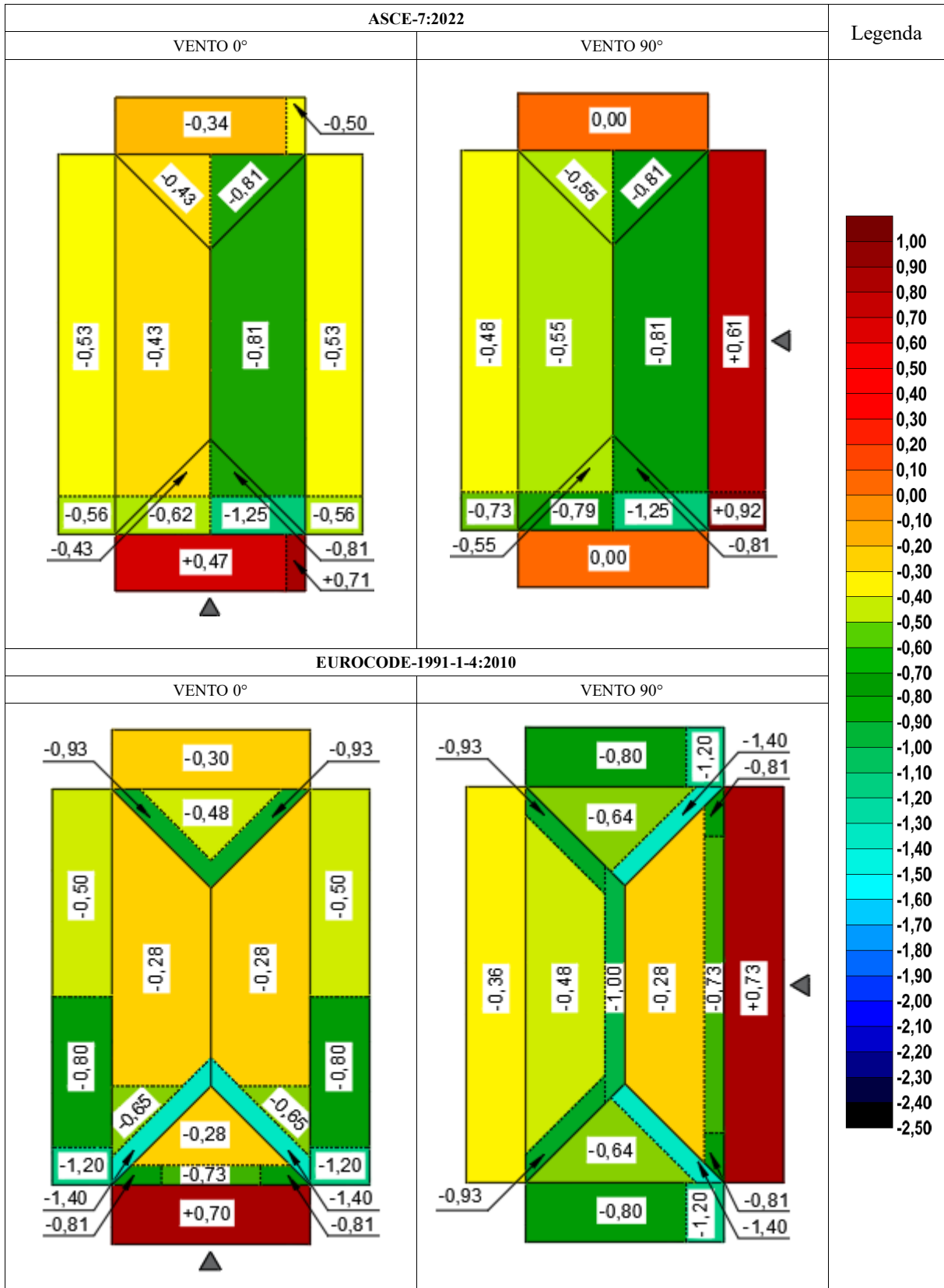
Dentro do contexto da simulação numérica, o fato de não haver uma correlação entre o coeficiente da lei de potência usado em ensaios de túnel de vento e a intensidade de turbulência atribuída junto ao modelo computacional revelou-se um entrave. Para contorná-lo, a intensidade de turbulência foi determinada de forma iterativa.

### 5.1 RESULTADOS MÉTODO ANALÍTICO

Nesta seção são apresentados os resultados do método analítico levantados a partir dos ensaios de Meechan (1991), Xu et. al. (1998) e Gavanski et. al. (2013):

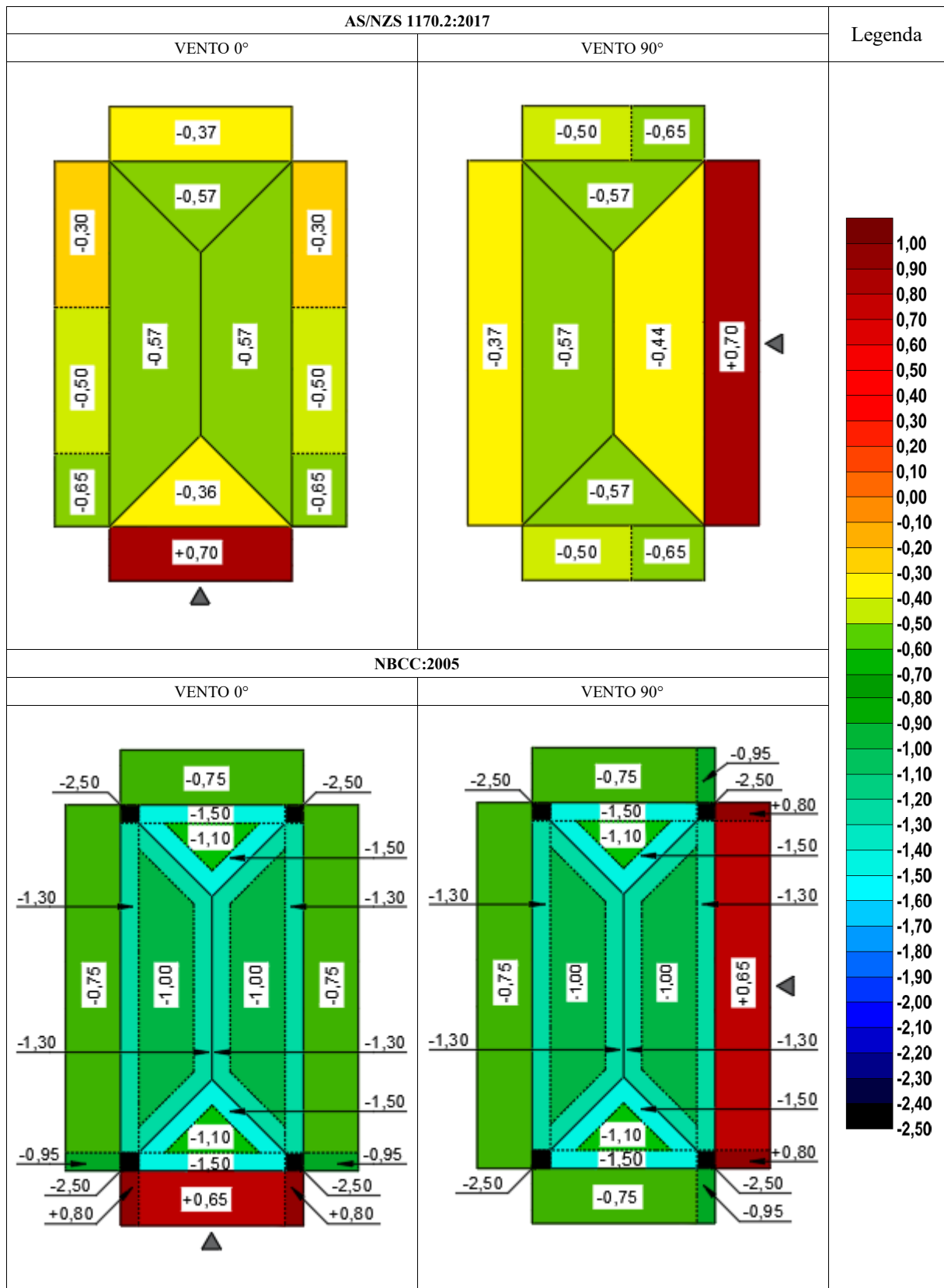
- Quadro 12 apresenta os resultados para Meechan (1991);
- Quadro 13 ( $i = 15^\circ$ ), Quadro 14 ( $i = 20^\circ$ ) e Quadro 15 ( $i = 30^\circ$ ) apresentam os resultados para Xu et. al. (1998);
- Quadro 16 apresenta os resultados para Gavanski et. al. (2013).

**Quadro 12** – Coeficientes de pressão externa – Método analítico – Meechan (1991).



Fonte: Própria do autor.

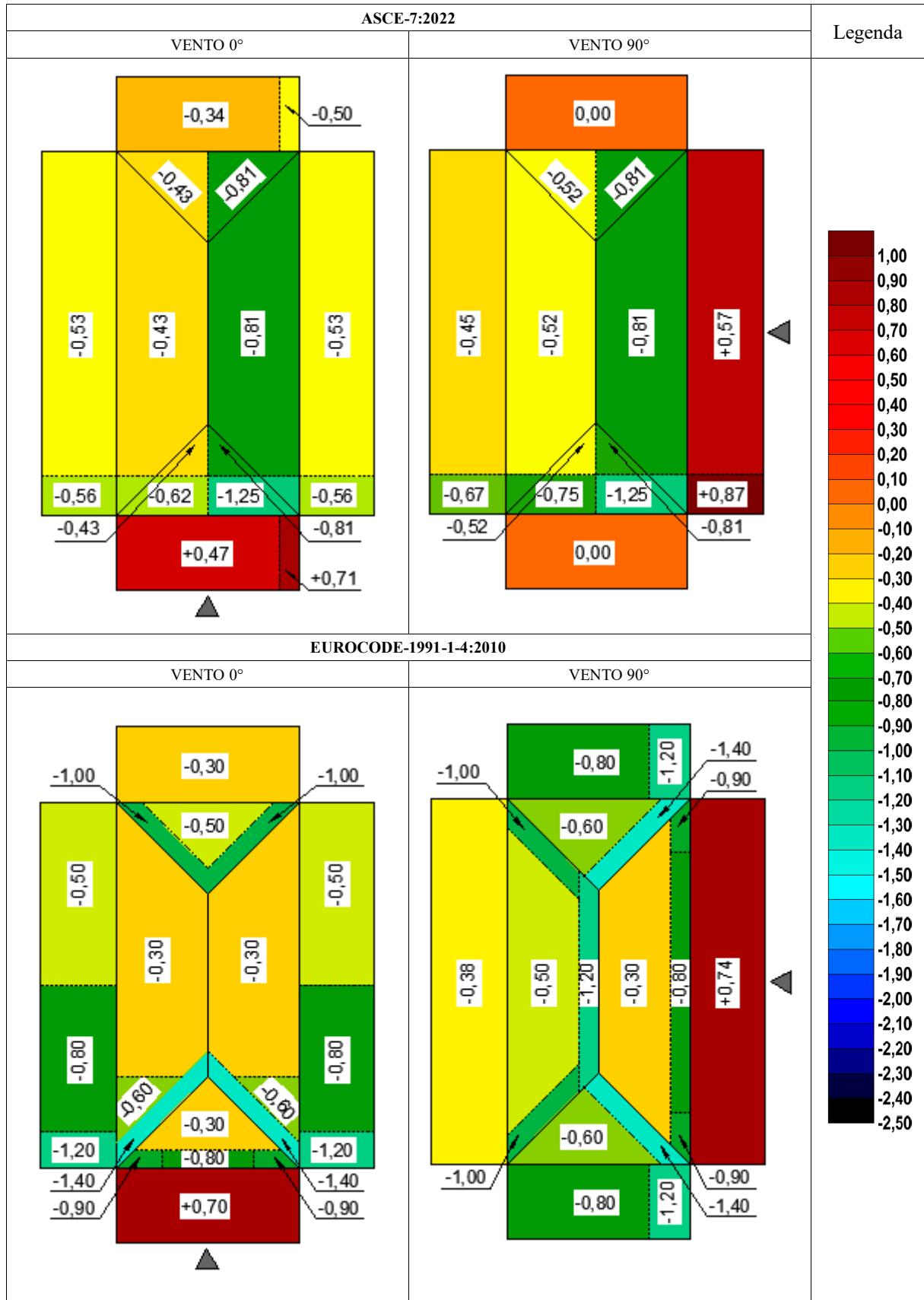
**Quadro 12** – Coeficientes de pressão externa – Método analítico – Meechan (1991) – Continuação.



Fonte: Própria do autor.

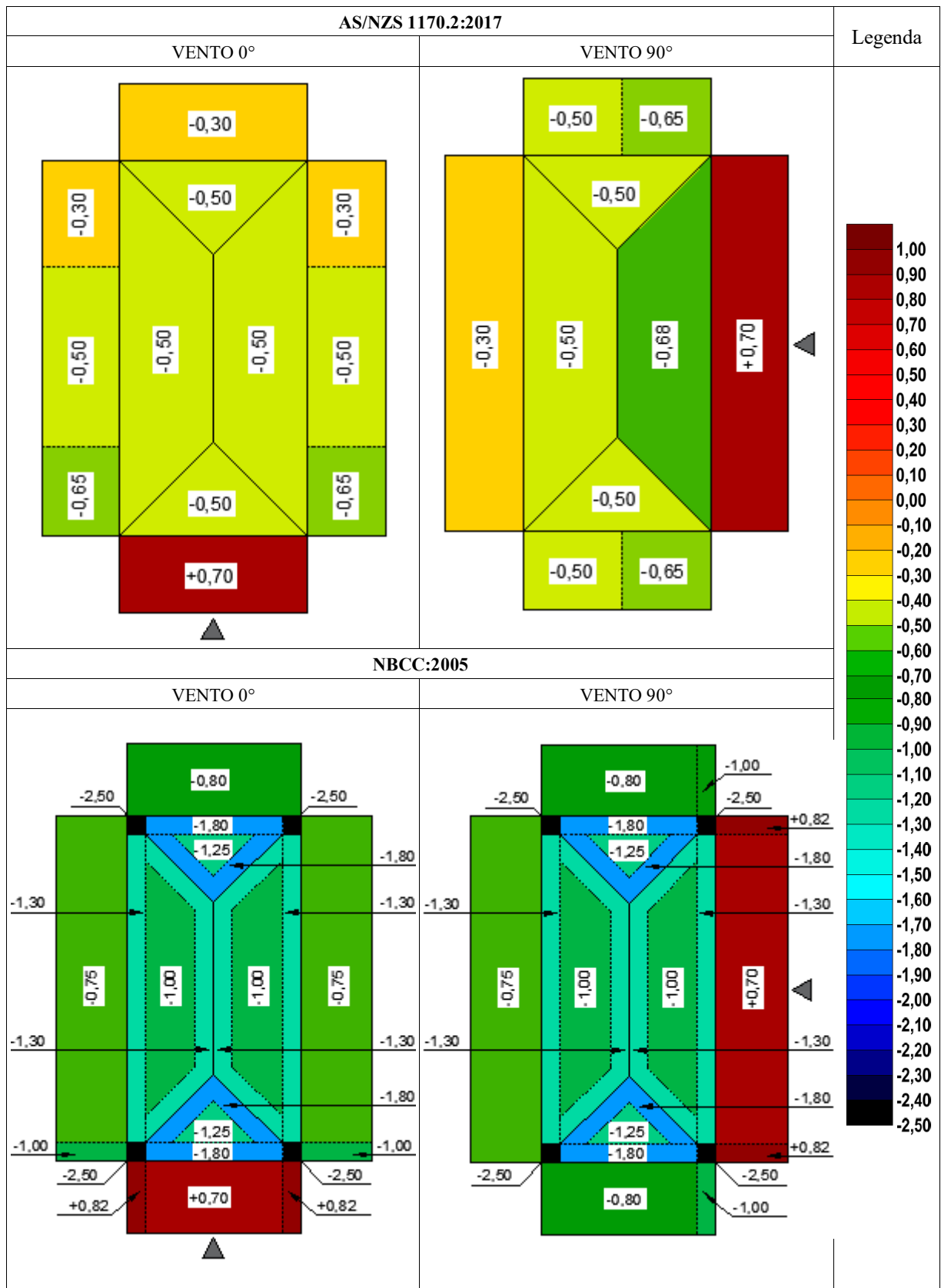


**Quadro 13**– Coeficientes de pressão externa – Método analítico – Xu et. al. (1998) –  $i = 15^\circ$ .



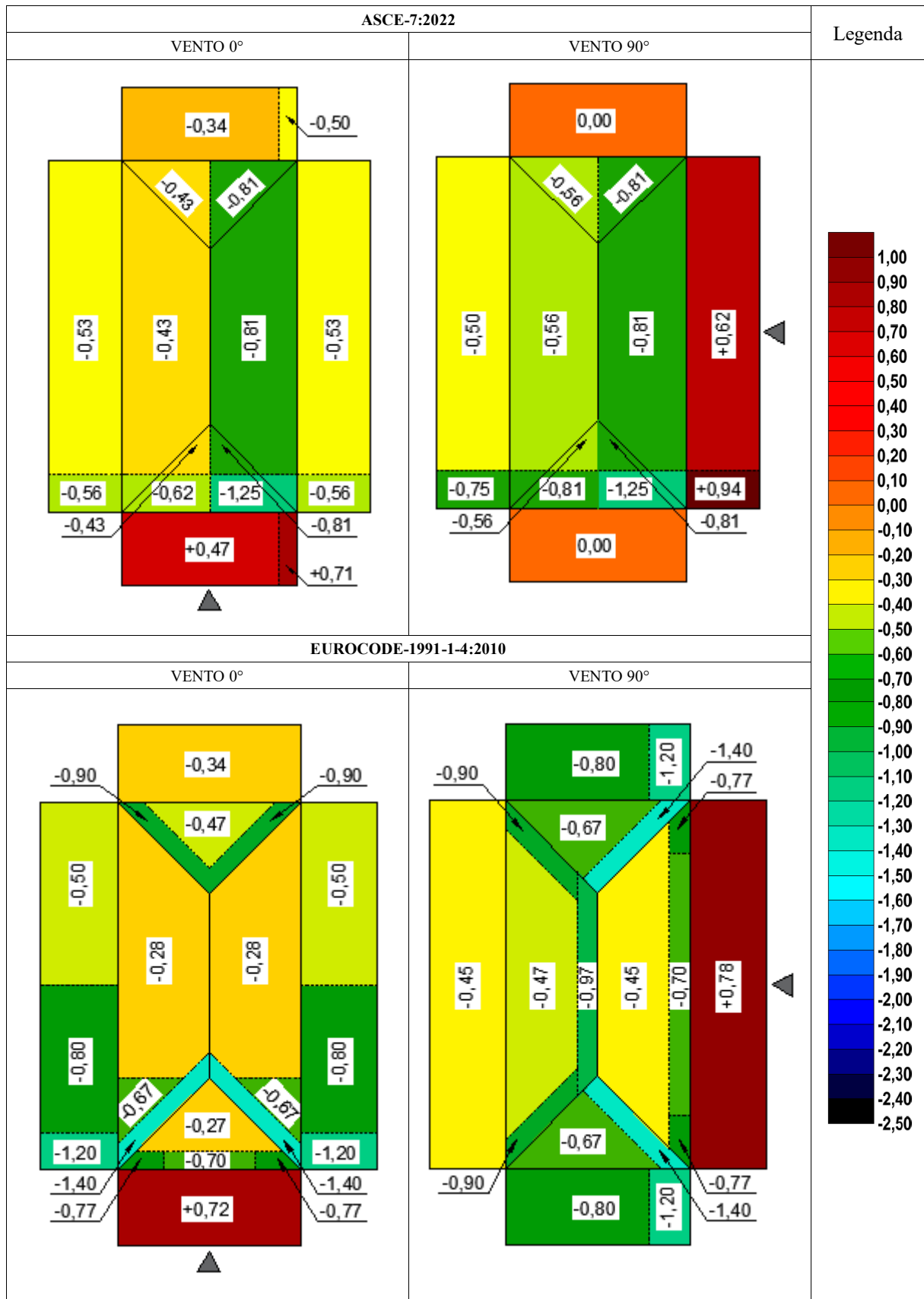
Fonte: Própria do autor.

**Quadro 13** – Coeficientes de pressão externa – Método analítico – Xu et. al. (1998) –  $i = 15^\circ$  – Continuação.



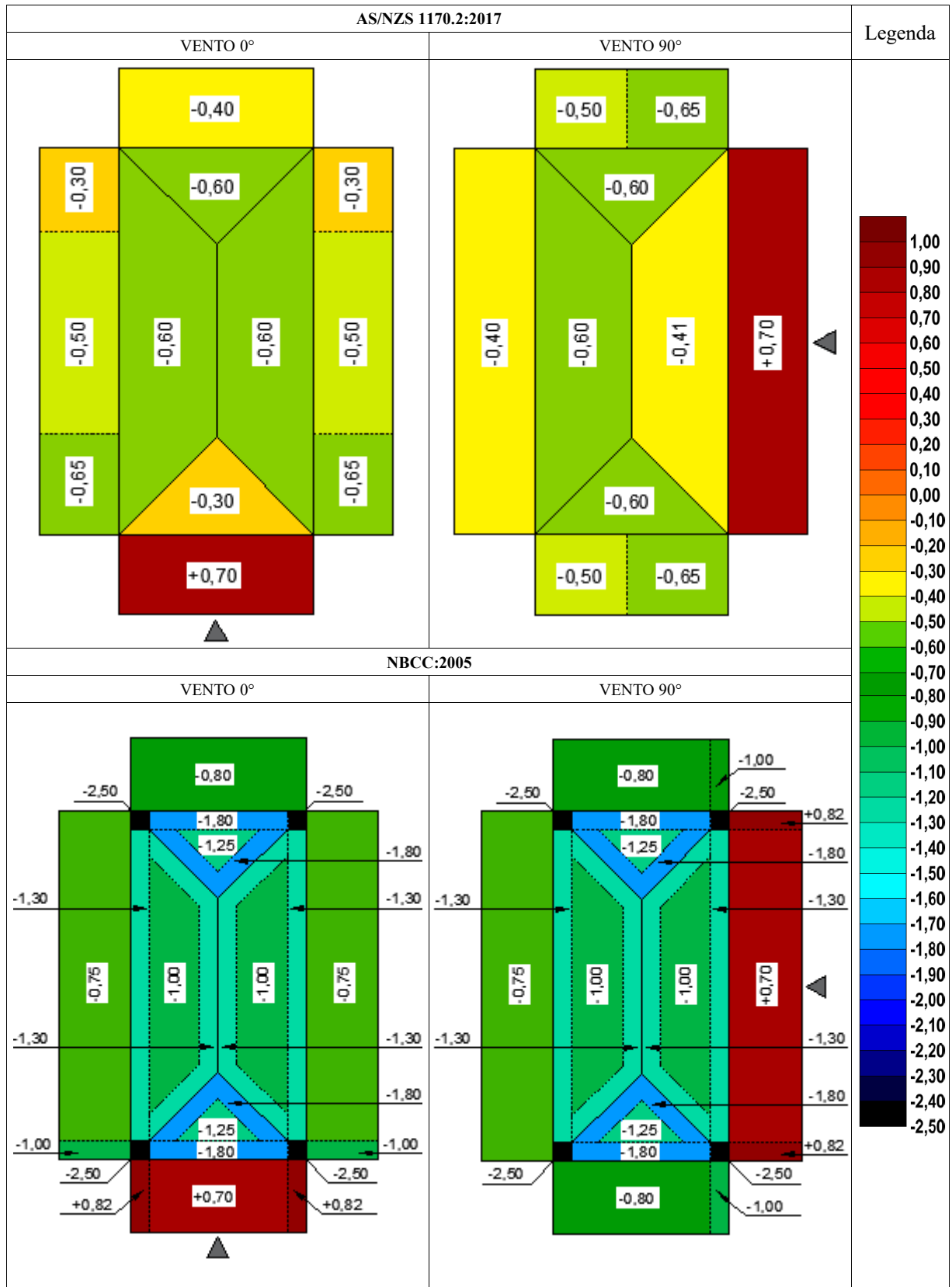
Fonte: Própria do autor.

**Quadro 14** – Coeficientes de pressão externa – Método analítico – Xu et. al. (1998) –  $i = 20^\circ$ .



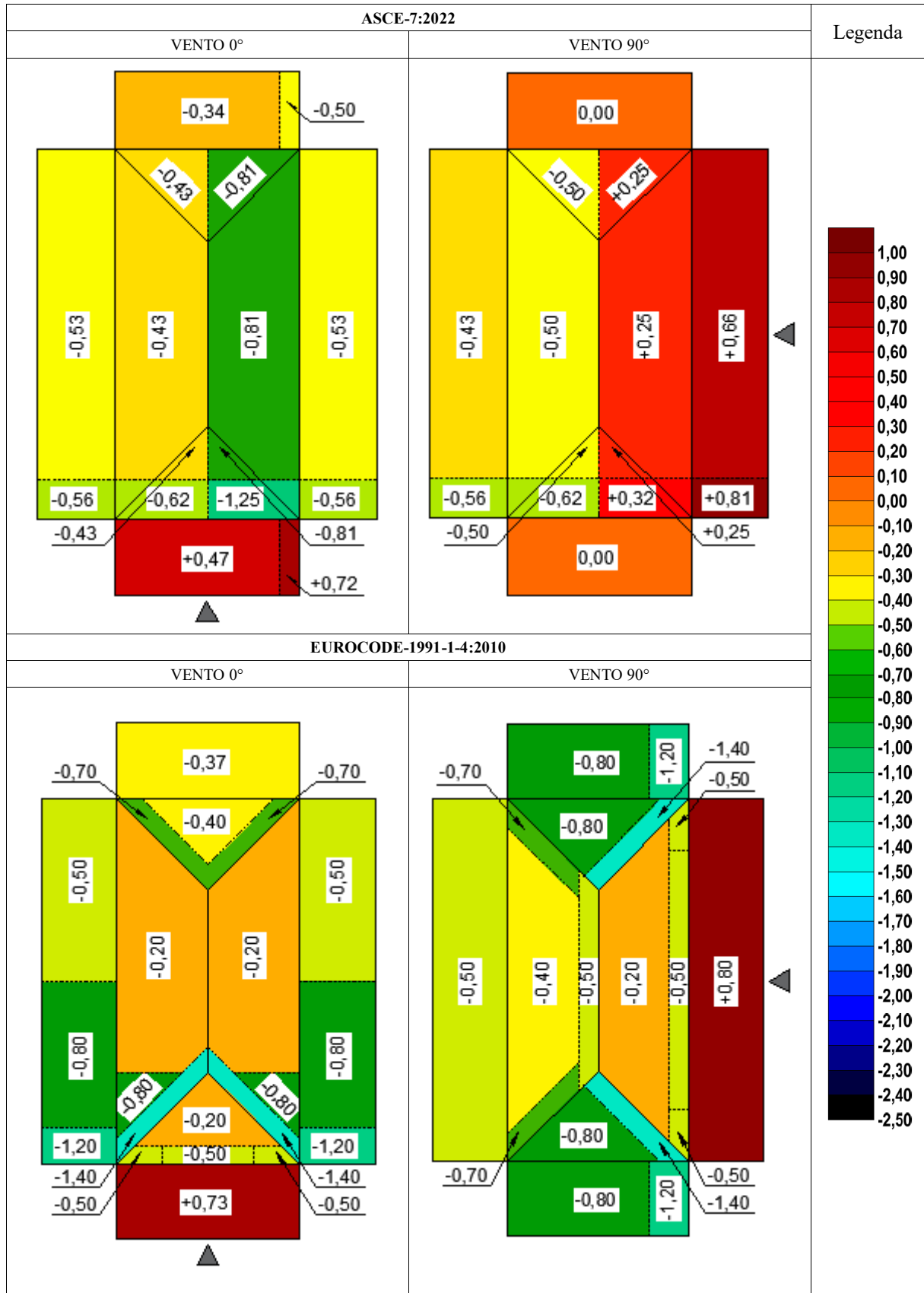
Fonte: Própria do autor.

**Quadro 14** – Coeficientes de pressão externa – Método analítico – Xu et. al. (1998) –  $i = 20^\circ$  - Continuação.



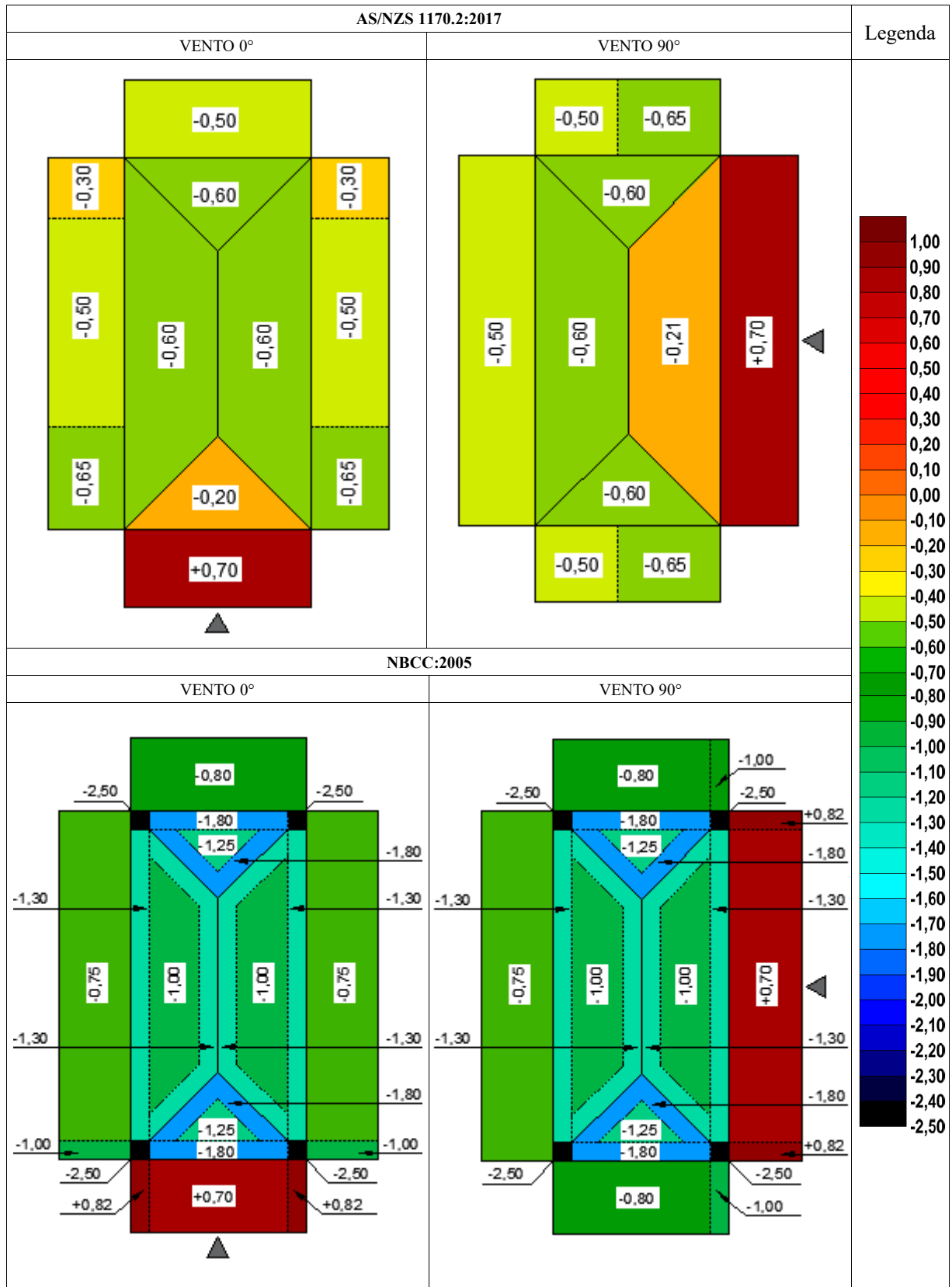
Fonte: Própria do autor.

**Quadro 15** – Coeficientes de pressão externa – Método analítico – Xu et. al. (1998) –  $i = 30^\circ$ .



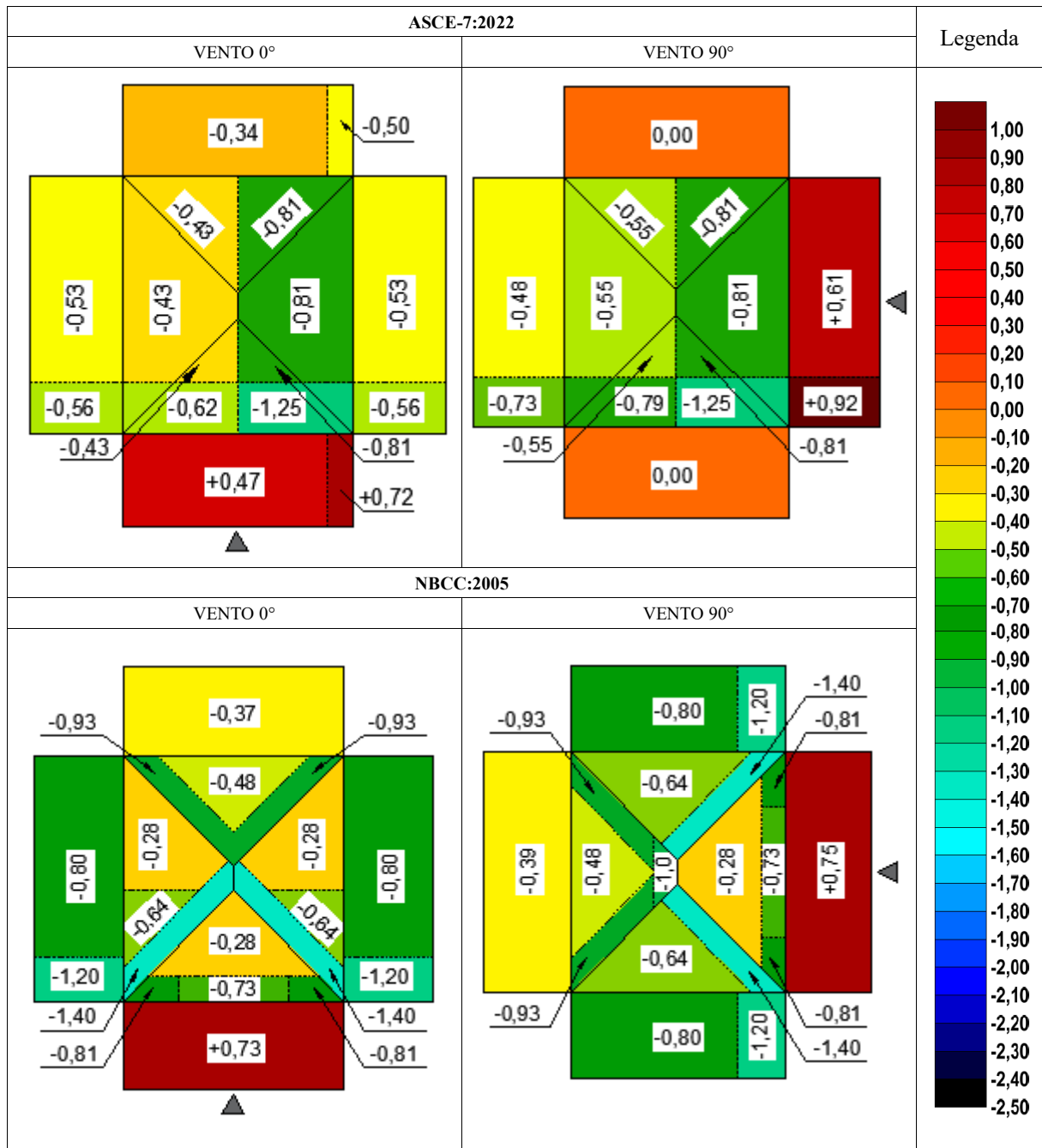
Fonte: Própria do autor.

**Quadro 15** – Coeficientes de pressão externa – Método analítico – Xu et. al. (1998) –  $i = 30^\circ$  - Continuação.



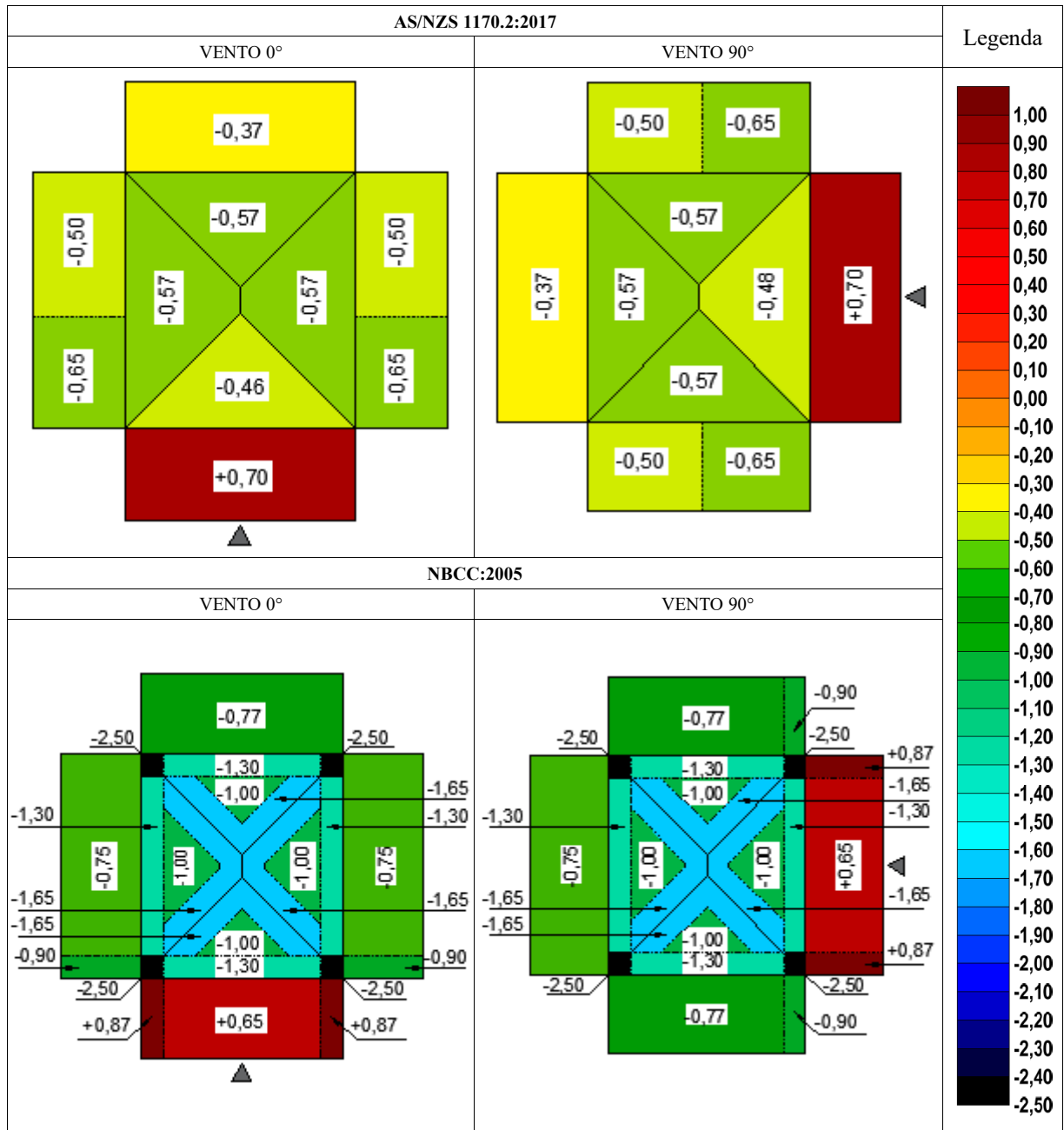
Fonte: Própria do autor.

**Quadro 16** - Coeficientes de pressão externa – Método analítico – Gavanski et. al. (2013) –  $i = 18,41^\circ$ .



Fonte: Própria do autor.

**Quadro 16** – Coeficientes de pressão externa – Método analítico – Gavanski et. al. (2013) –  $i = 18,41^\circ$  -  
Continuação.



Fonte: Própria do autor.

Como pode ser observado nos diagramas analíticos, cada normativa tem sua paginação das zonas vulneráveis da cobertura, o que acarreta em uma disparidade do dimensionamento da possível estrutura. Referente a localização das zonas de pressão, pode-se perceber nitidamente a localização das zonas e a sua correspondência com as normativas, sobretudo em relação ao EUROCODE-1991-1-4 (2010) e o *National Building Code of Canada* (2005). Além disso, as simulações evidenciam a importâncias das zonas de pressão junto aos cantos, espigões e cumeeira, devido a sua magnitude díspar as demais sendo nelas que se localizam os picos de



suções da cobertura. Algumas normativas como a ASCE-7 (2022) e a AS/NZS 1170.2:2017 (2017) não contemplam tais zonas, sendo que a exemplo da norma americana, os coeficientes para coberturas de duas águas são adaptados para um *layout* de cobertura quatro águas.

## 5.2 RESULTADOS MÉTODO NUMÉRICO

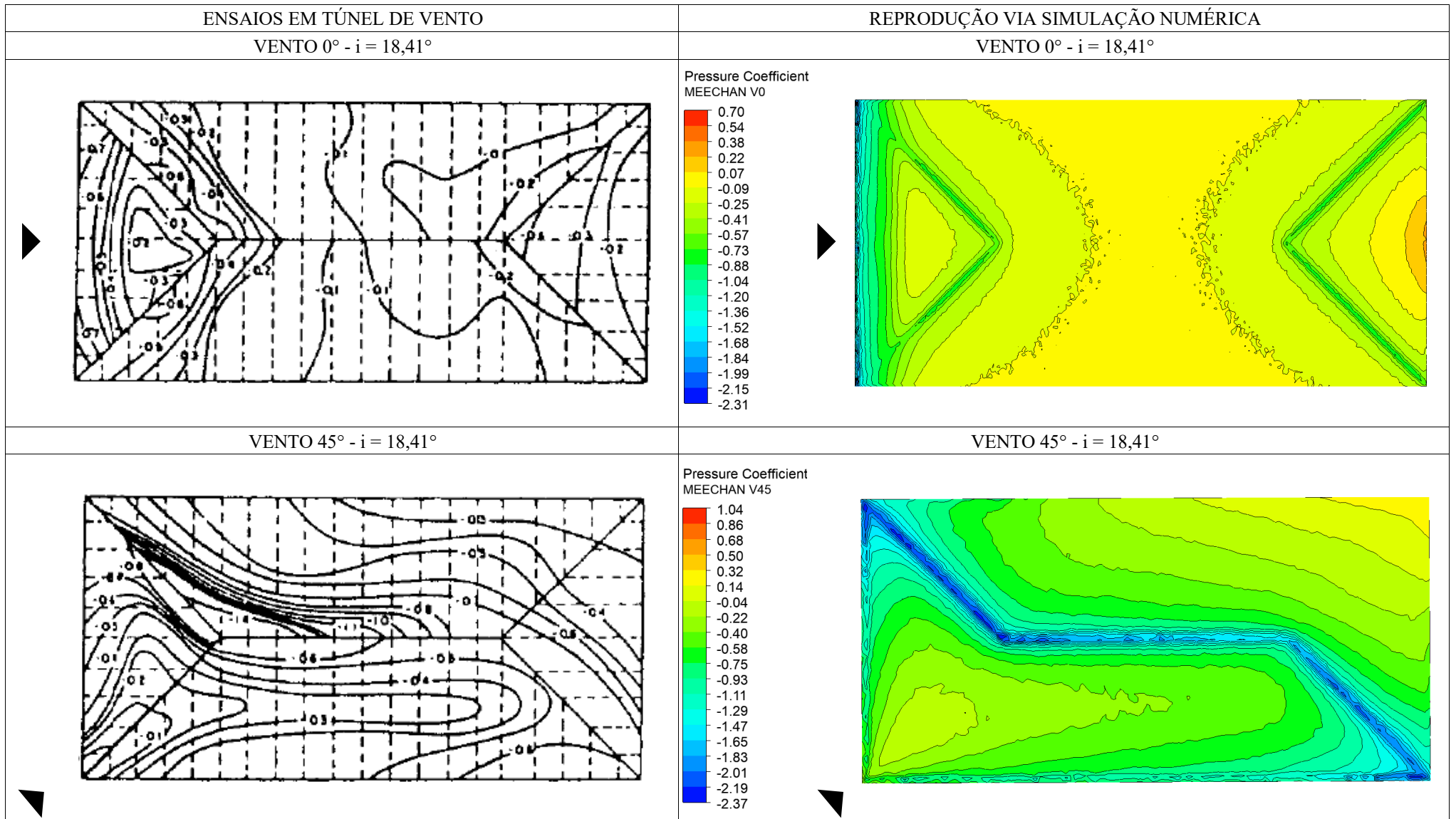
Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através das simulações numérica realizadas a partir dos ensaios de Meechan (1991), Xu et. al. (1998) e Gavanski et. al. (2013):

- Quadro 17 e Quadro 18 apresentam os resultados para Meechan (1991);
- Quadro 19 ( $i = 15^\circ$ ), Quadro 20 ( $i = 20^\circ$ ) e Quadro 21 ( $i = 30^\circ$ ) apresentam os resultados para Xu et. al. (1998);
- Quadro 16 apresenta os resultados para Gavanski et. al. (2013).

Nas comparações dos resultados de Meechan (1991), algumas zonas de coeficientes de pressão não são vistas nitidamente como regiões de cantos, espigões, regiões próximas aos beirais e posterior a cumeeira.

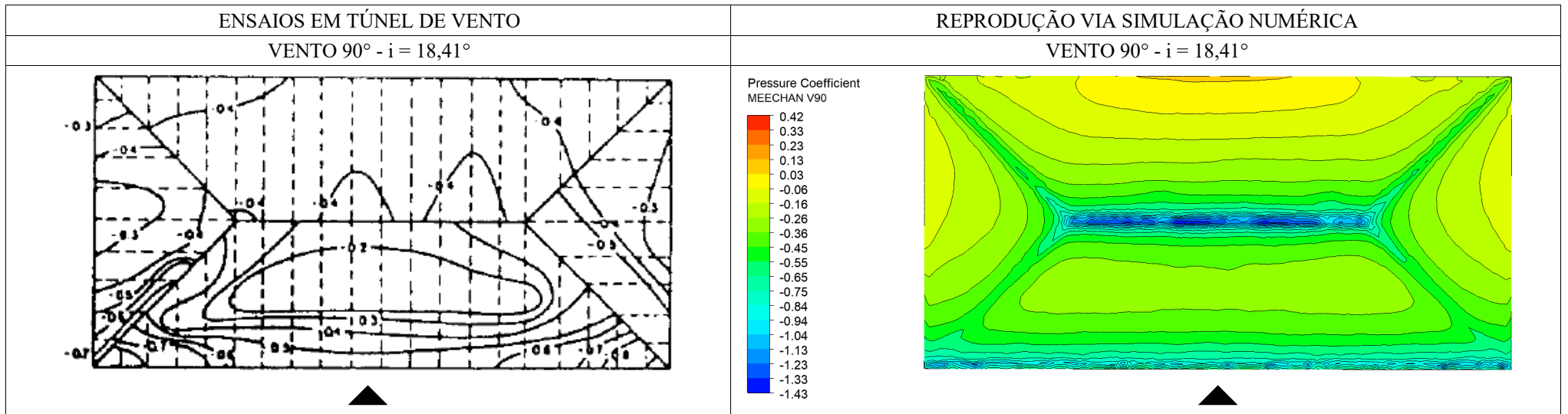
Nos estudos de Xu et.al. (1998), o qual compara seus resultados com Meechan (1991), as zonas, junto à elementos salientes, são mais definidas, executando a incidência de vento  $90^\circ$  para inclinação de cobertura igual a  $20^\circ$ . Uma particularidade a reproduzir os estudos de Xu et. al. (1998) fora as sobrepressões à barlavento em todos os ângulos de incidência para inclinação de cobertura  $30^\circ$ . É sabido que as sucções dos planos inclinados localizados à barlavento tendem a reduzir ao distanciarem-se da região de beirais e cumeeira, meio do plano. O Quadro 19, Quadro 20 e Quadro 21 apresentam as reproduções numéricas dos ensaios de Xu et. al. (1998) defronte os dados levantados pelos mesmos para inclinação de cobertura de  $15^\circ$ ,  $20^\circ$  e  $30^\circ$  respectivamente. Por fim, Gavanski et. al. (2013), desenvolveu uma extensa pesquisa em modelos reduzidos de bases aproximadamente quadradas dos quais para a inclinação de  $18,41^\circ$  fora feito gráfico de curvas isobáricas afim de comparar com os trabalhos anteriormente citados. O Quadro 22 apresenta as reproduções dos ensaios de Gavanski et. al. (2013).

Quadro 17 – Resultados de Meechan (1991) x Simulação numérica - Campo aberto.



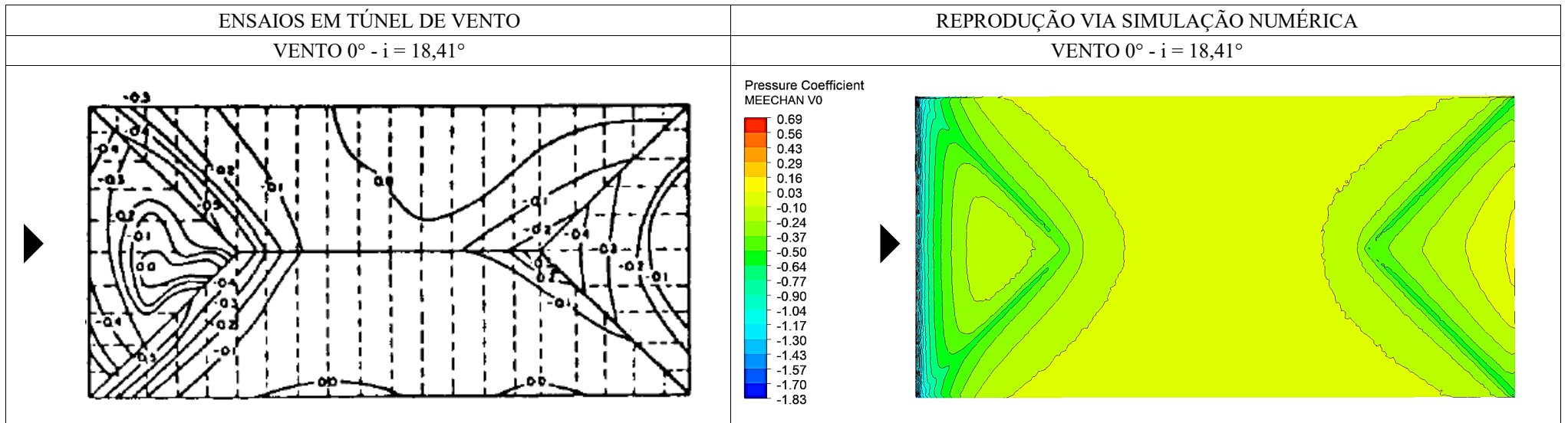
Fonte: Própria do autor.

**Quadro 17** – Resultados de Meechan (1991) x Simulação numérica - Campo aberto – Continuação.



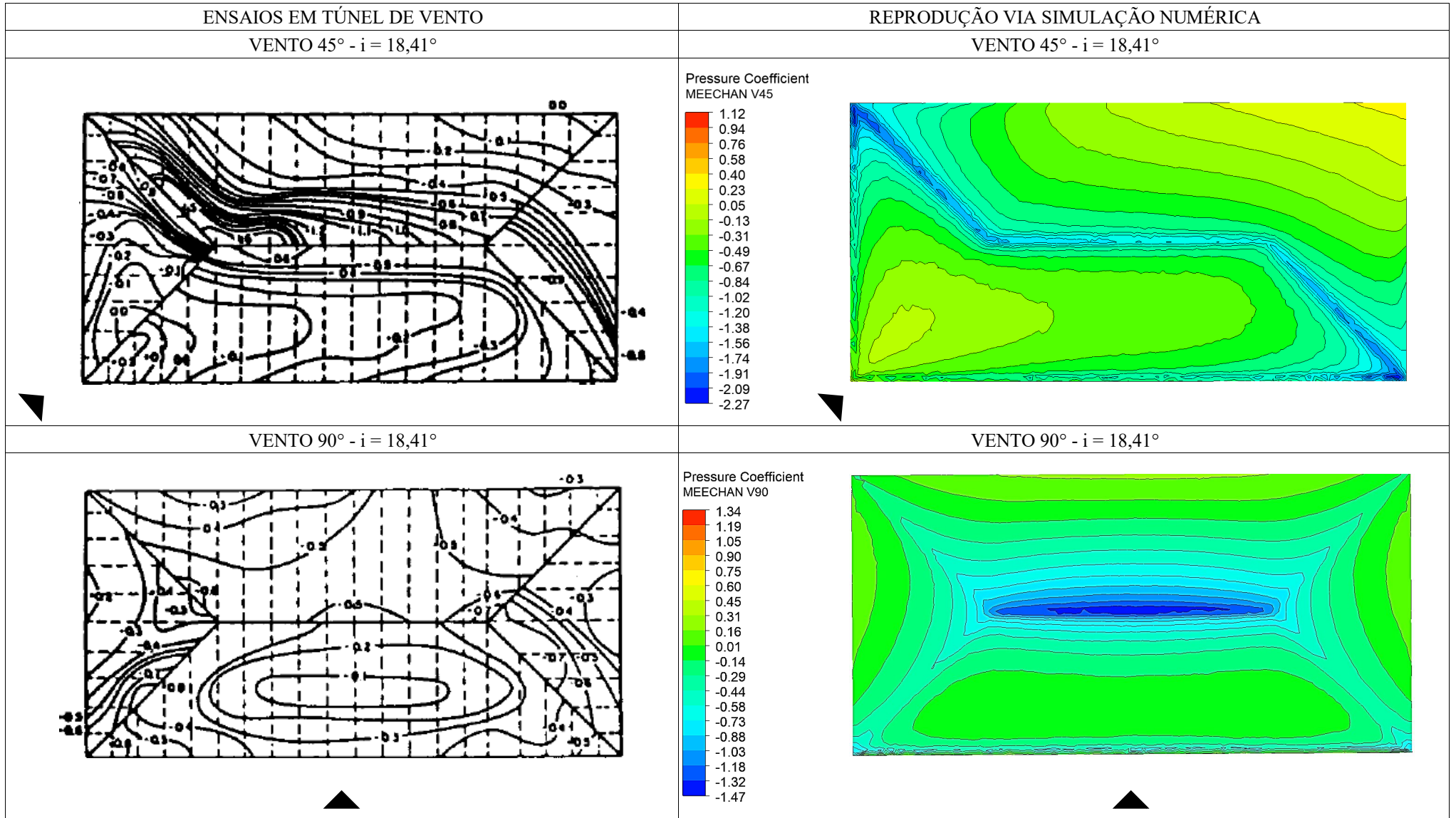
Fonte: Própria do autor.

**Quadro 18** – Resultados de Meechan (1991) x Simulação numérica – Suburbano.



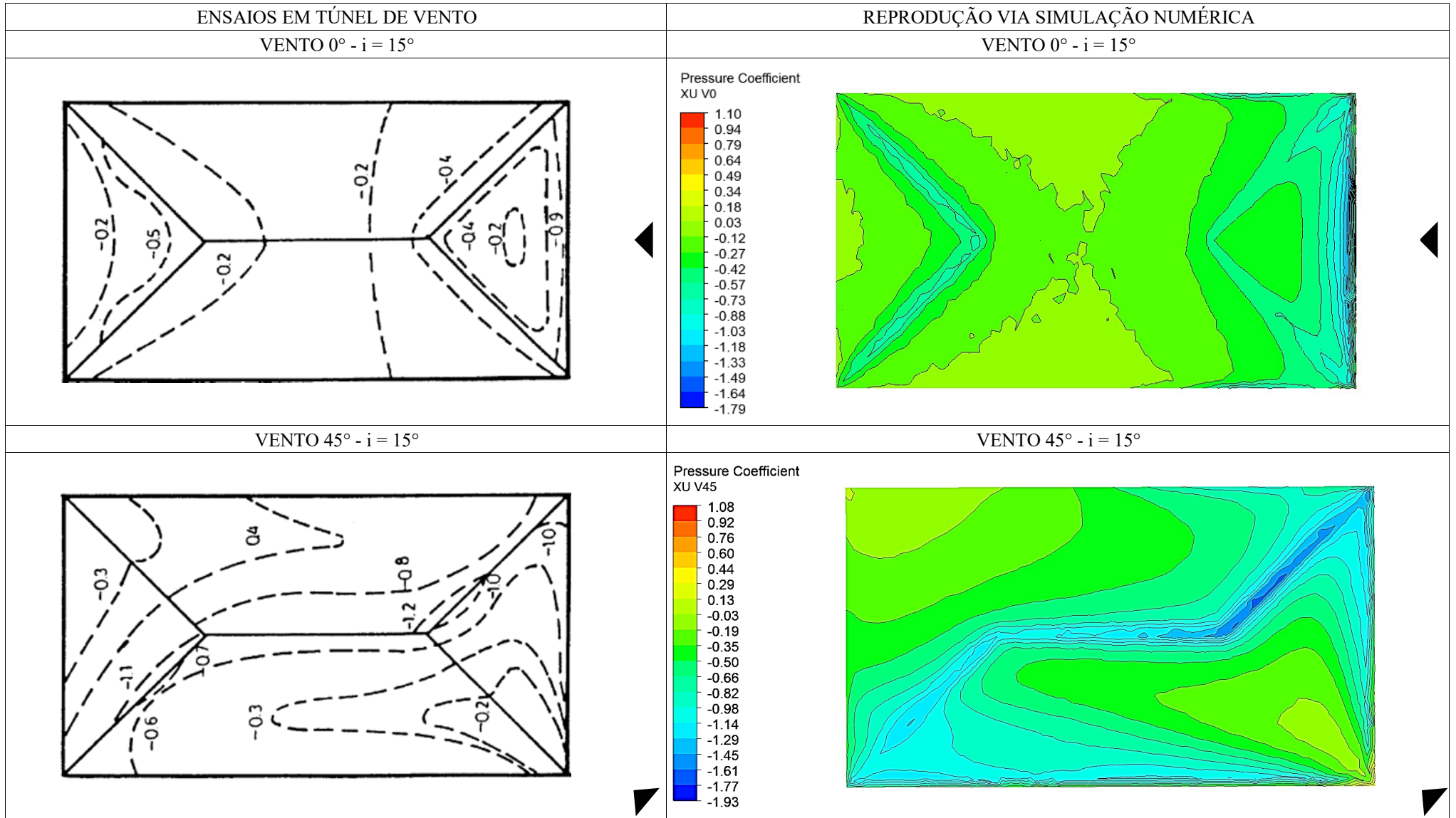
Fonte: Própria do autor.

Quadro 18 – Resultados de Meechan (1991) x Simulação numérica – Suburbano – Continuação



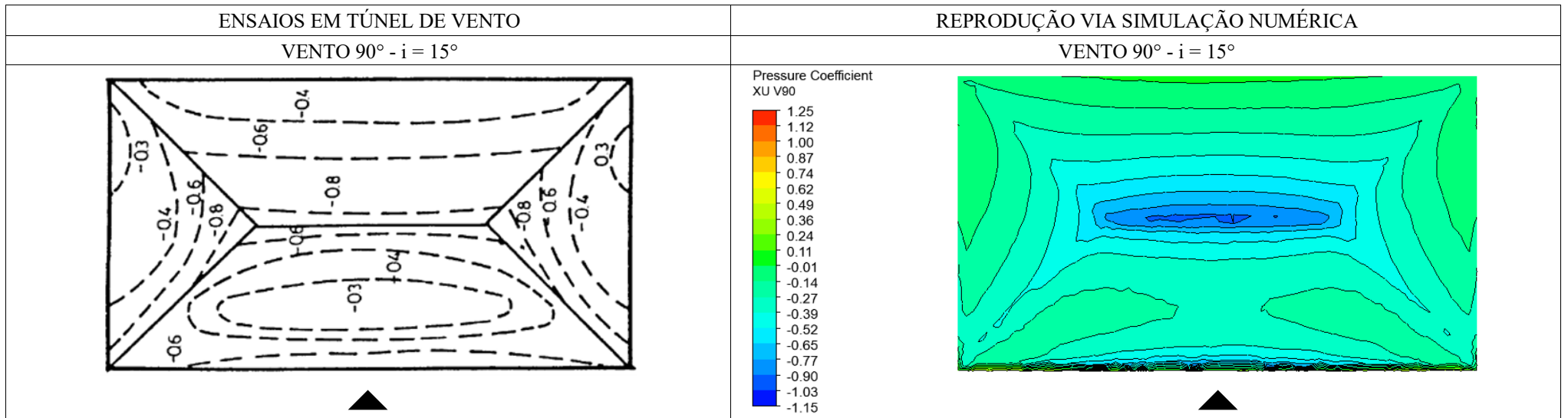
Fonte: Própria do autor.

**Quadro 19** – Resultados de Xu et. al. (1998) x Simulação numérica –  $i = 15^\circ$ .



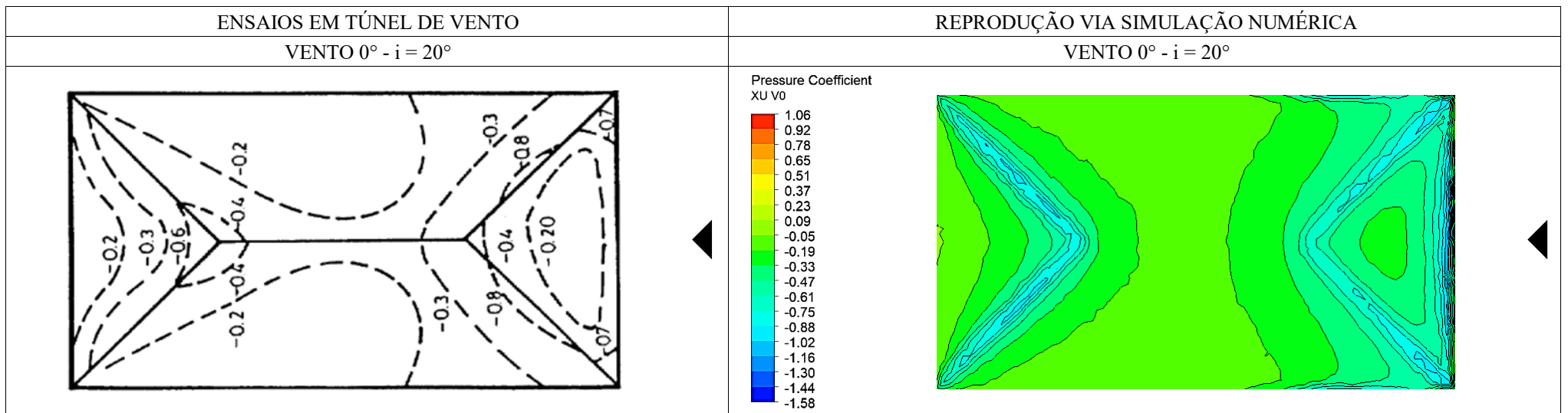
Fonte: Própria do autor.

**Quadro 19** – Resultados de Xu et. al. (1998) x Simulação numérica –  $i = 15^\circ$  - Continuação.



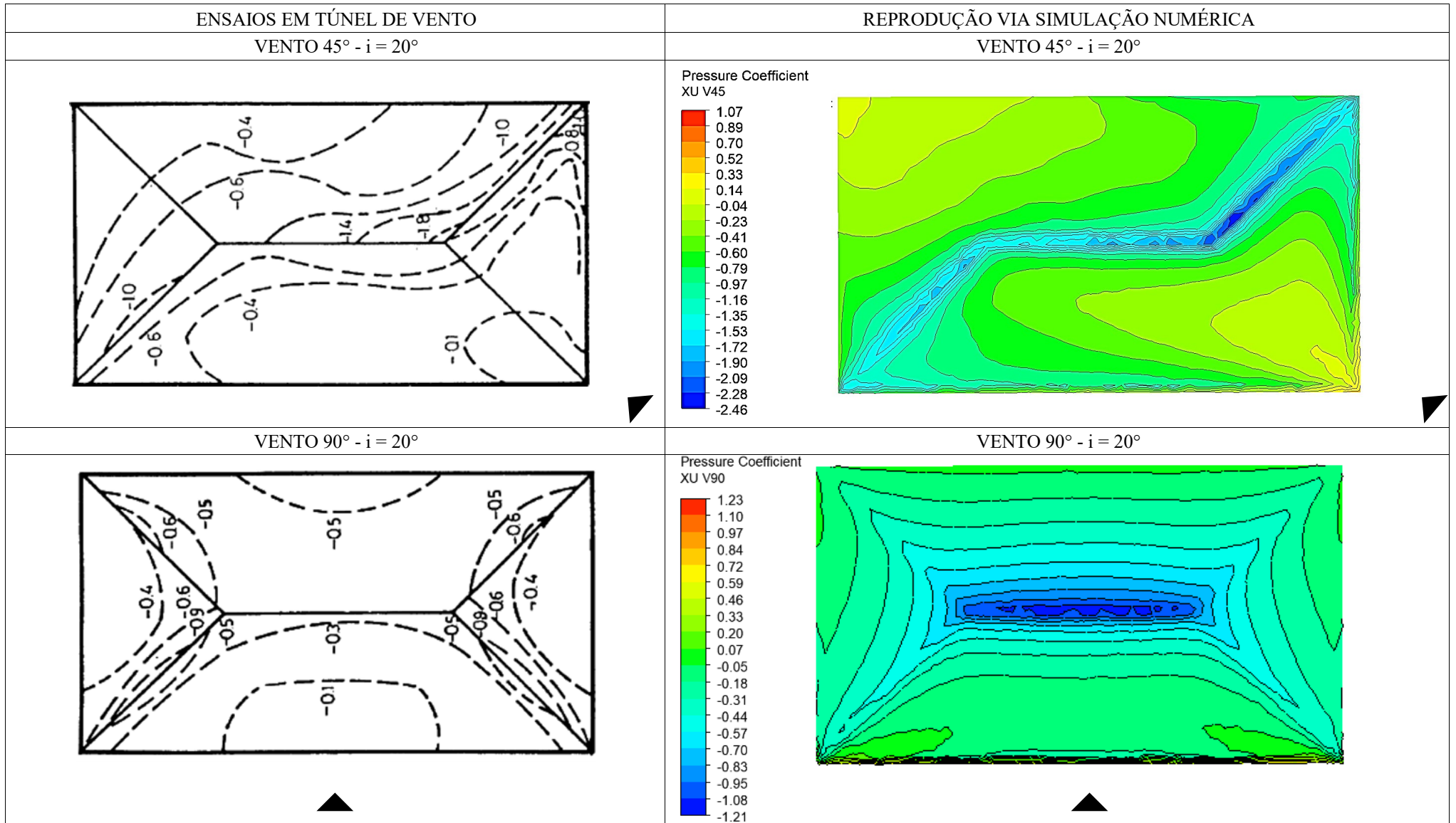
Fonte: Própria do autor.

**Quadro 20** – Resultados de Xu et. al. (1998) x Simulação numérica –  $i = 20^\circ$ .



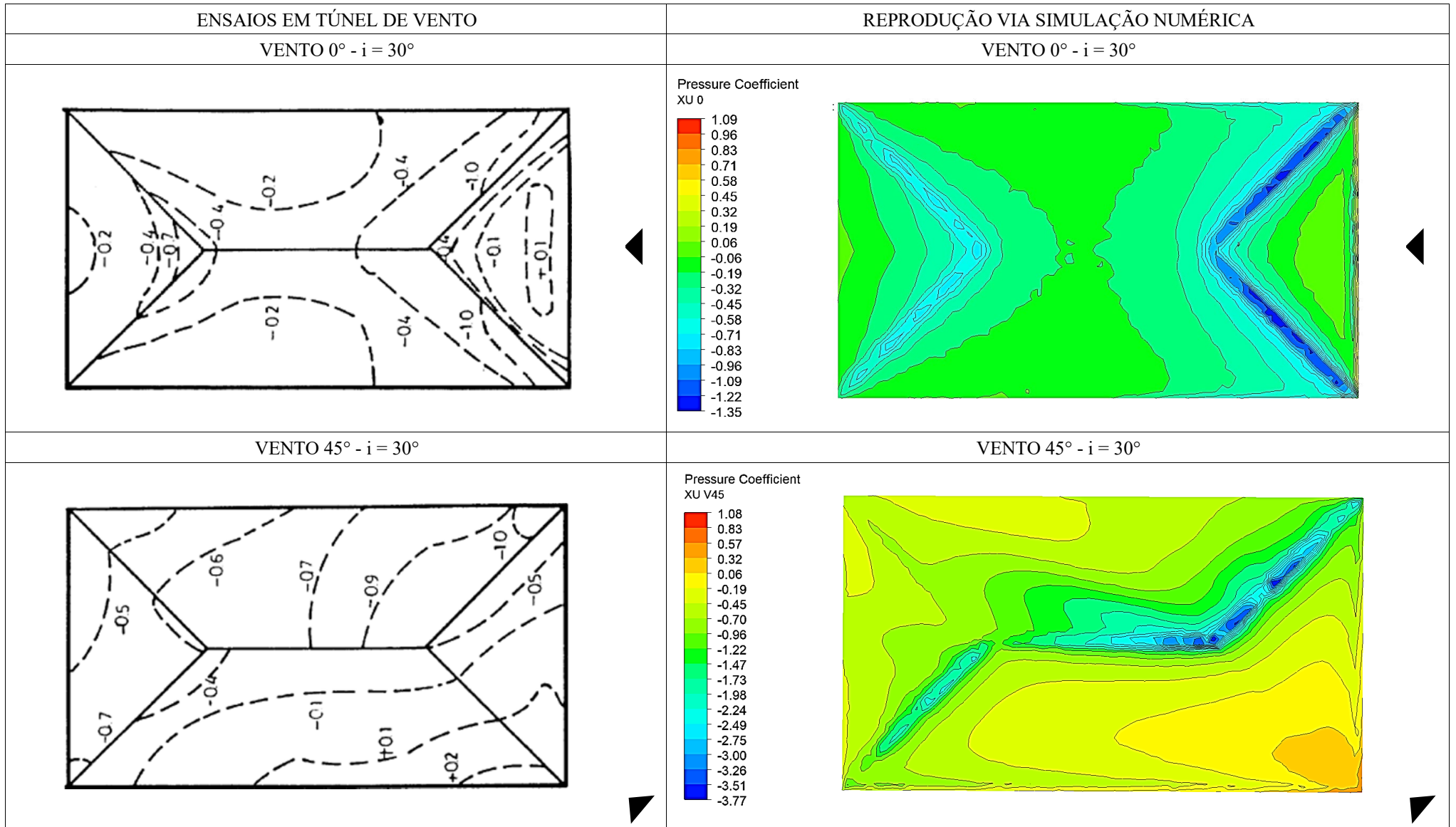
Fonte: Própria do autor.

**Quadro 20** – Resultados de Xu et. al. (1998) x Simulação numérica –  $i = 20^\circ$  - Continuação.



Fonte: Própria do autor.

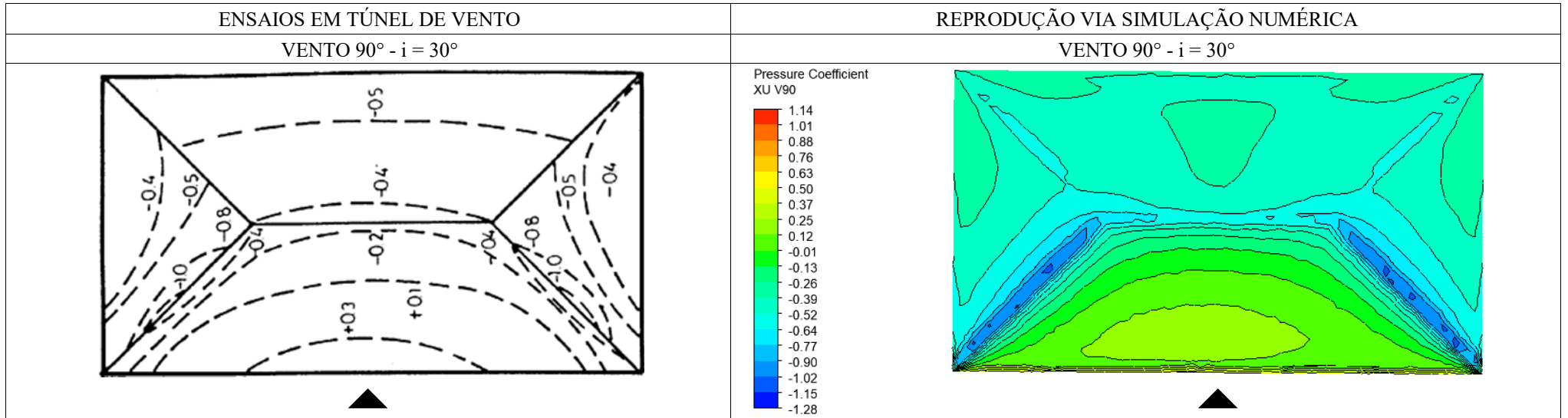
**Quadro 21** – Resultados de Xu et. al. (1998) x Simulação numérica –  $i = 30^\circ$ .



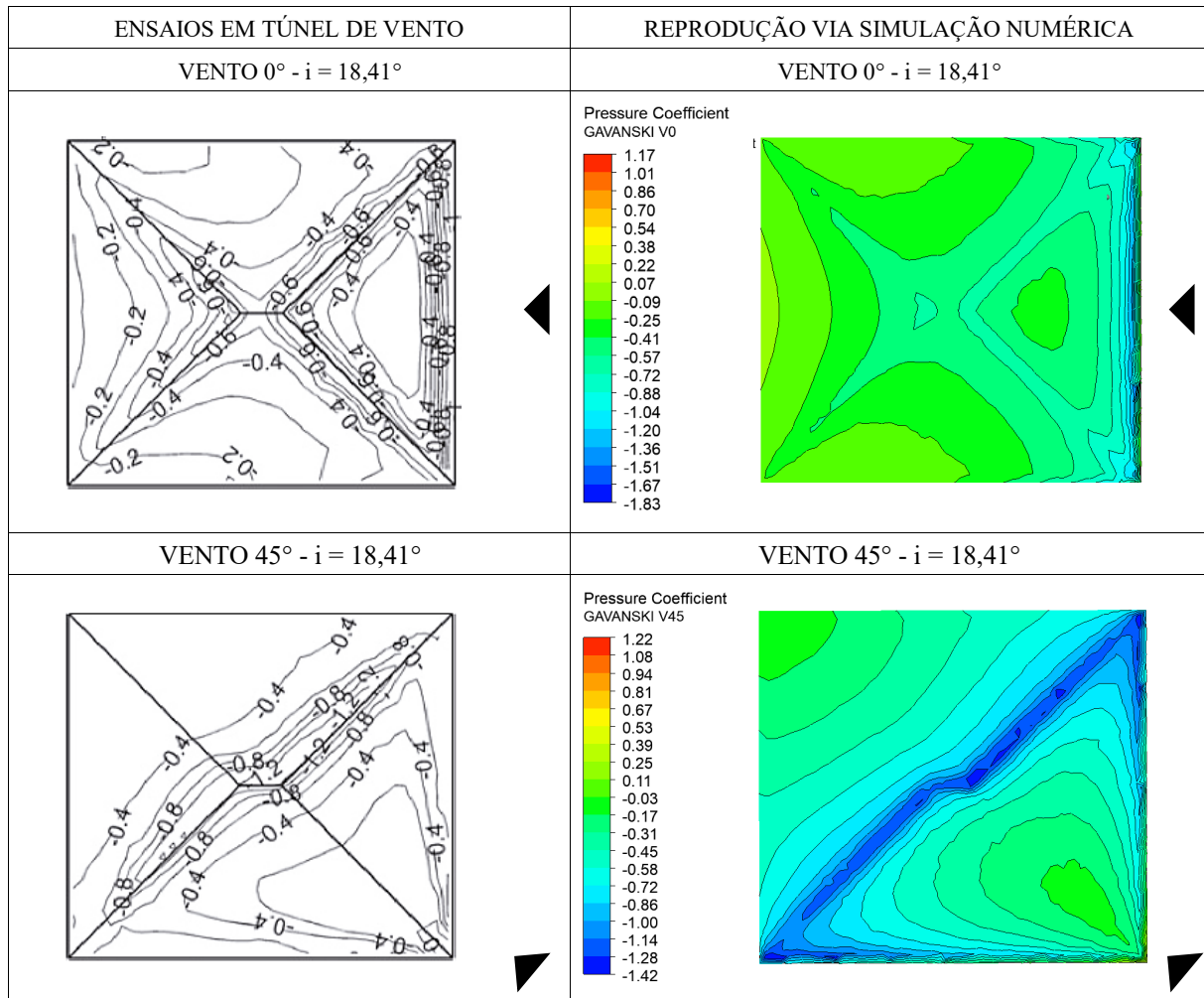
Fonte: Própria do autor.



**Quadro 21** – Resultados de Xu et. al. (1998) x Simulação numérica –  $i = 30^\circ$  - Continuação.



Fonte: Própria do autor.

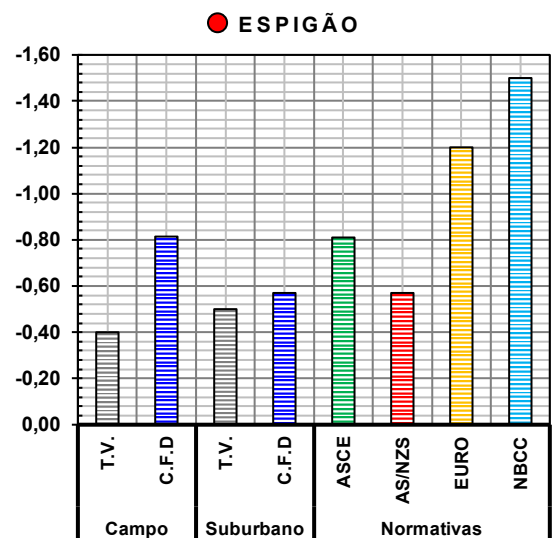
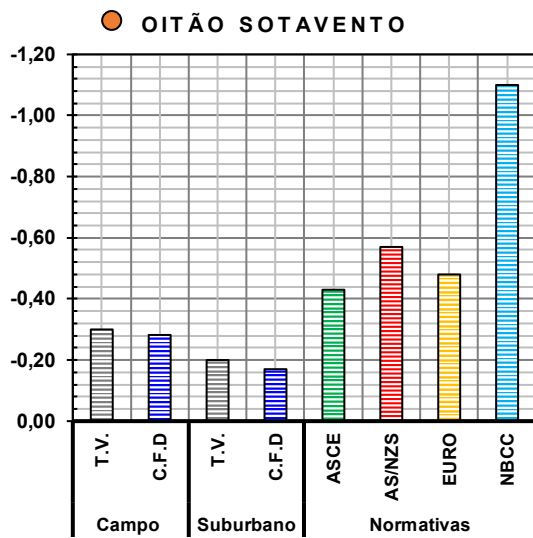
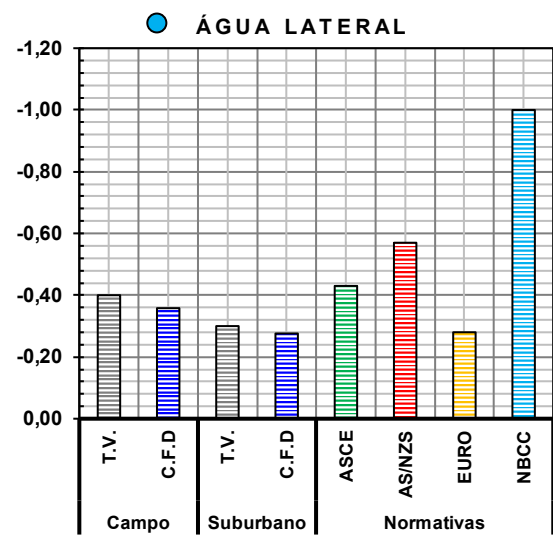
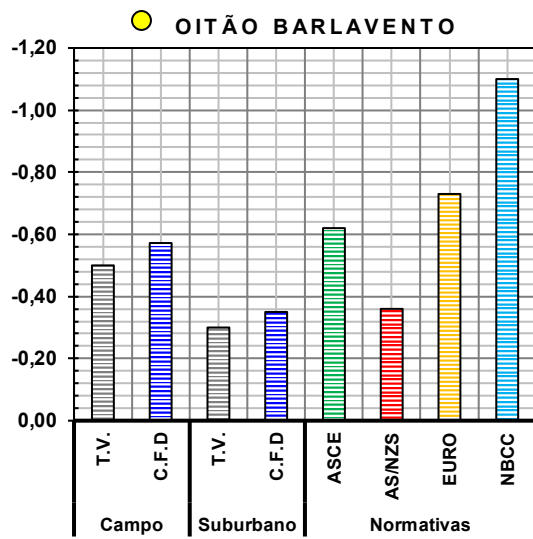
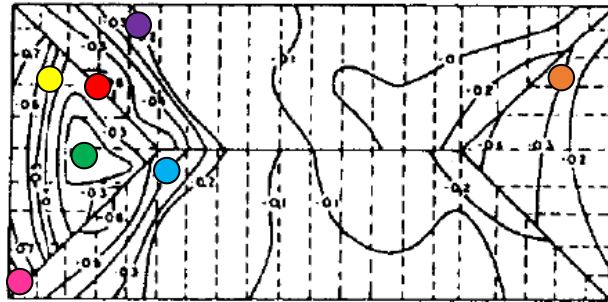
**Quadro 22** – Resultados de Gavanski et. al. (2013) x Simulação numérica –  $i = 18,41^\circ$ .

Fonte: Própria do autor.

### 5.3 MÉTODO ANALÍTICO X MÉTODO NUMÉRICO

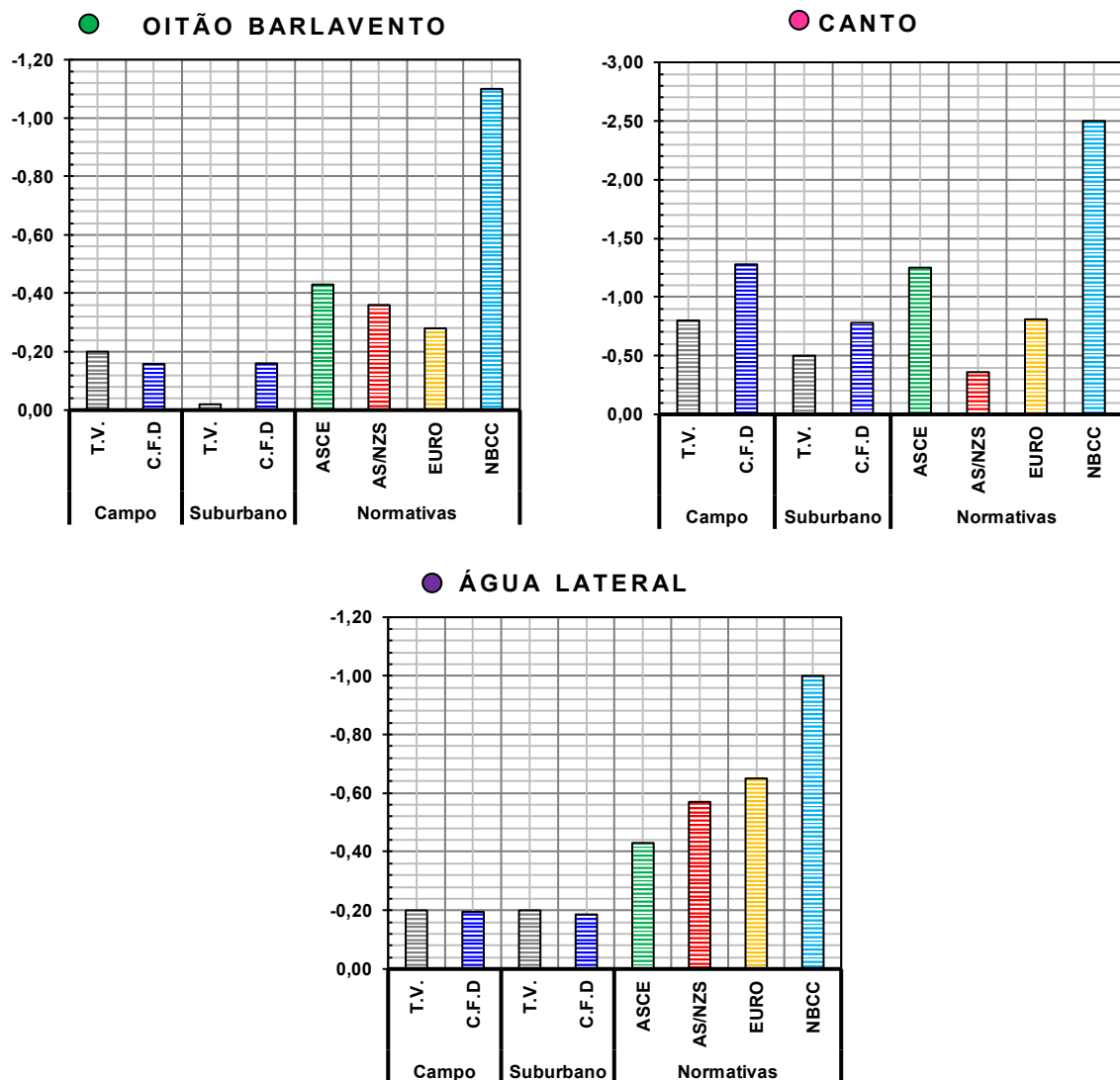
Nesta seção são apresentadas as análises do cruzamento entre os métodos analítico e numérico. A Figura 24 apresenta comparativos diretos entre os ensaios de túnel de vento, simulações numéricas e normativas para pontos de interesse junto a cobertura para ângulo de incidência de  $0^\circ$  e a Figura 25 para ângulo de incidência de  $90^\circ$  para os dados de Meehan (1991).

**Figura 24** – Comparativo direto método numérico x túnel de vento x método analítico – Vento 0° - Meechan (1991).



Fonte: Própria do autor.

**Figura 24** – Comparativo direto método numérico x túnel de vento x método analítico – Vento 0° - Meechan (1991) - Continuação.



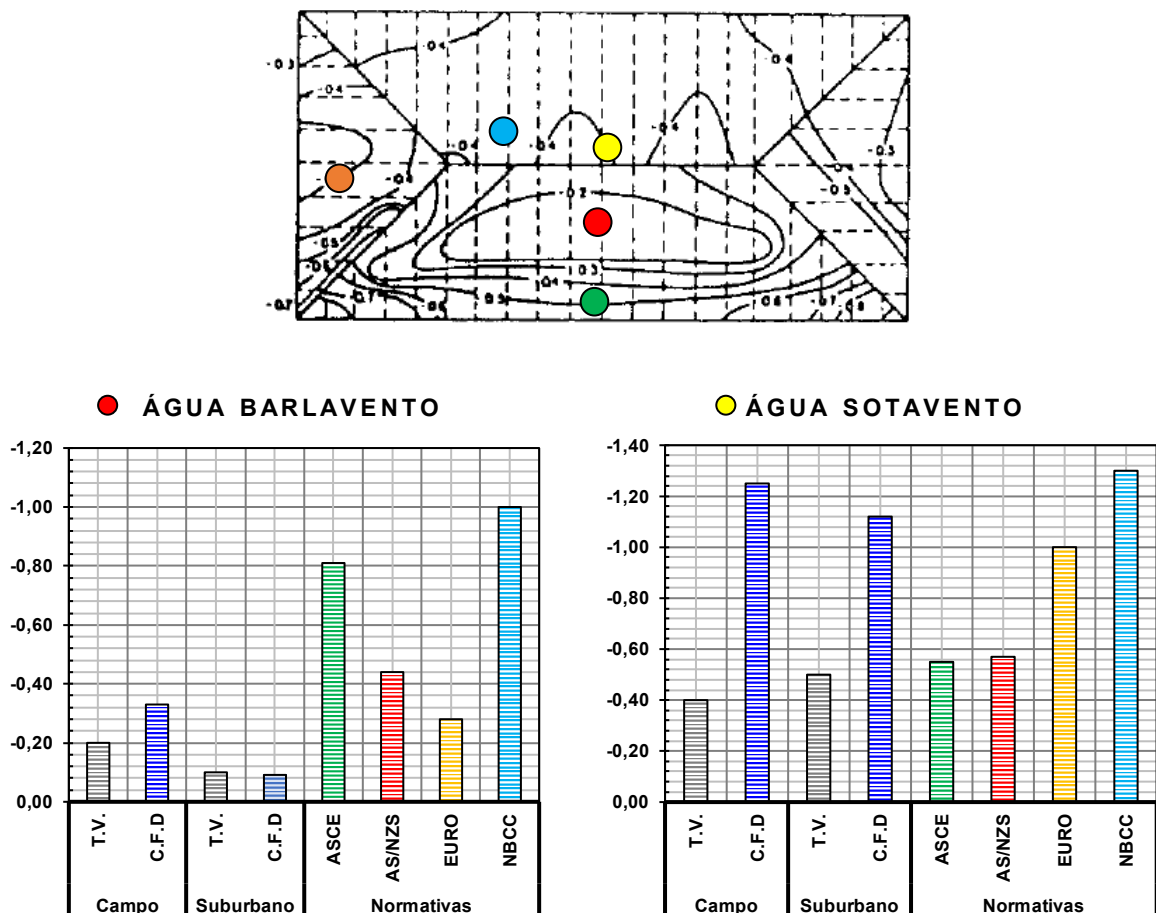
Fonte: Própria do autor.

Pode-se perceber, em relação a Figura 24, que para os pontos amarelo, azul, laranja e roxo, há uma grande convergência entre os valores da simulação numérica e dos ensaios de túnel de vento sendo as diferenças pouco significativas. Já para os pontos rosa, vermelho e verde tais diferenças são mais notórias:

- Ponto rosa: enquanto os ensaios de túnel de vento marcam -0,80 para campo aberto e -0,50 para suburbano, as simulações numéricas marcam -1,278 e -0,78 respectivamente. Ressalta-se que tal magnitude embora díspar dos ensaios de túnel de vento se encontram na faixa de abrangência das normativas sendo que a ASCE:2022 e o NBCC:2005 preveem -1,25 e -2,50 para tais regiões;

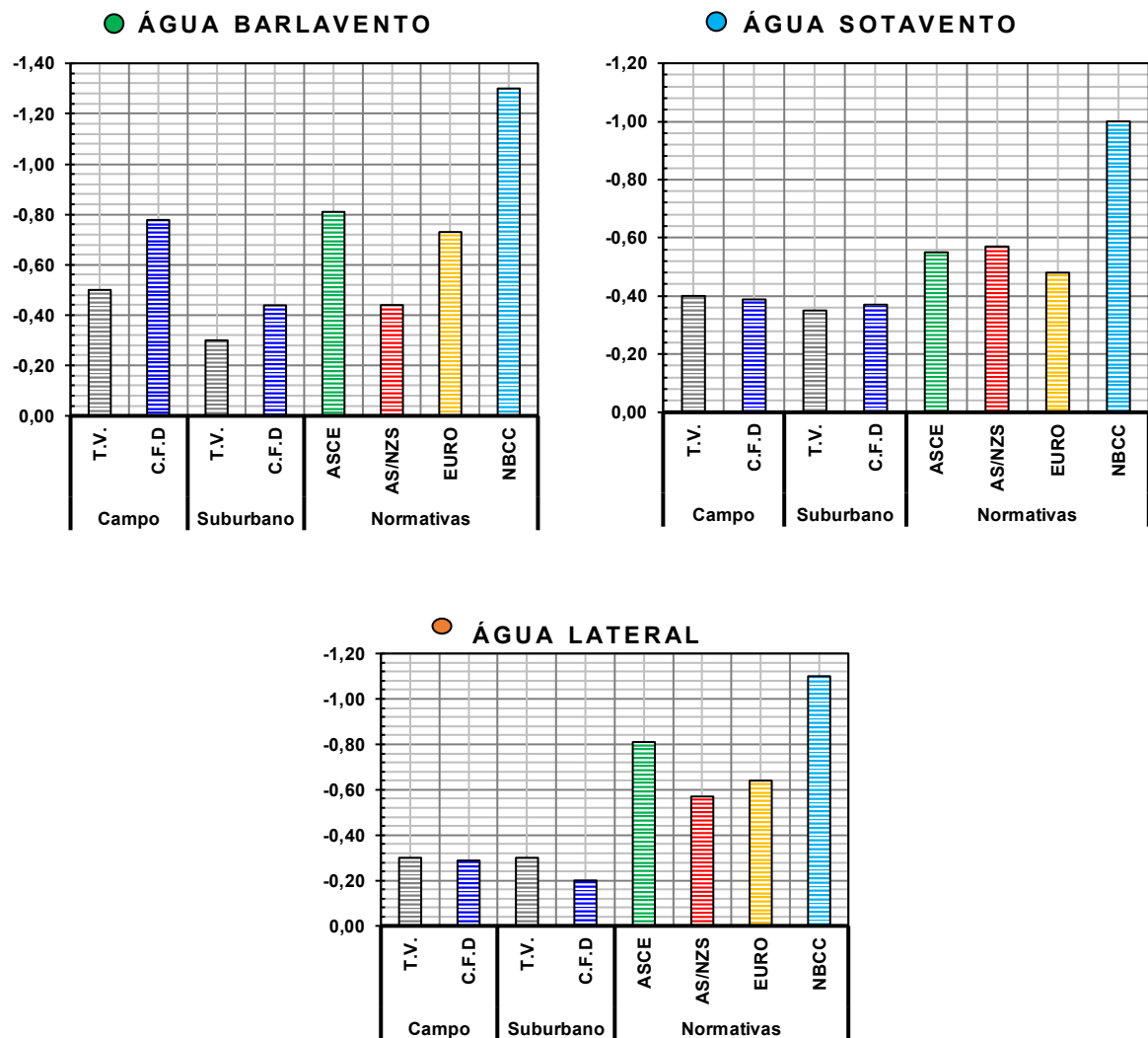
- Pronto vermelho: a área do espigão também apresentara diferenças notórias, enquanto os ensaios de túnel de vento marcam -0,40 para campo aberto e -0,50 para suburbano as simulações numéricas marcam -0,814 e -0,57 respectivamente. Embora para suburbano seja uma diferença plausível para campo aberto trata-se de o dobro do coeficiente sendo que para essa região o EUROCODE:2010 prevê -1,20 e o NBCC:2005 -1,50;
- Ponto verde: embora para campo aberto houvera uma equiparação de coeficientes entre túnel de vento e simulação numérica, para categoria suburbana enquanto o túnel marca -0,02 a simulação numérica marca -0,16. Do ponto de vista normativo, para tal região, localizada no centro do oitão à barlavento, são previstos coeficientes da ordem de -0,28 (EUROCODE:2010) até -1,10 (NBCC:2005).

**Figura 25** – Comparativo direto método numérico x túnel de vento x método analítico – Vento 90° - Meechan (1991).



Fonte: Própria do autor.

**Figura 25** – Comparativo direto método numérico x túnel de vento x método analítico - Vento 90° - Meechan (1991)  
- Continuação.



Fonte: Própria do autor.

Para os pontos de estudo apresentados na Figura 25, denota-se referente aos ensaios de Meechan (1991):

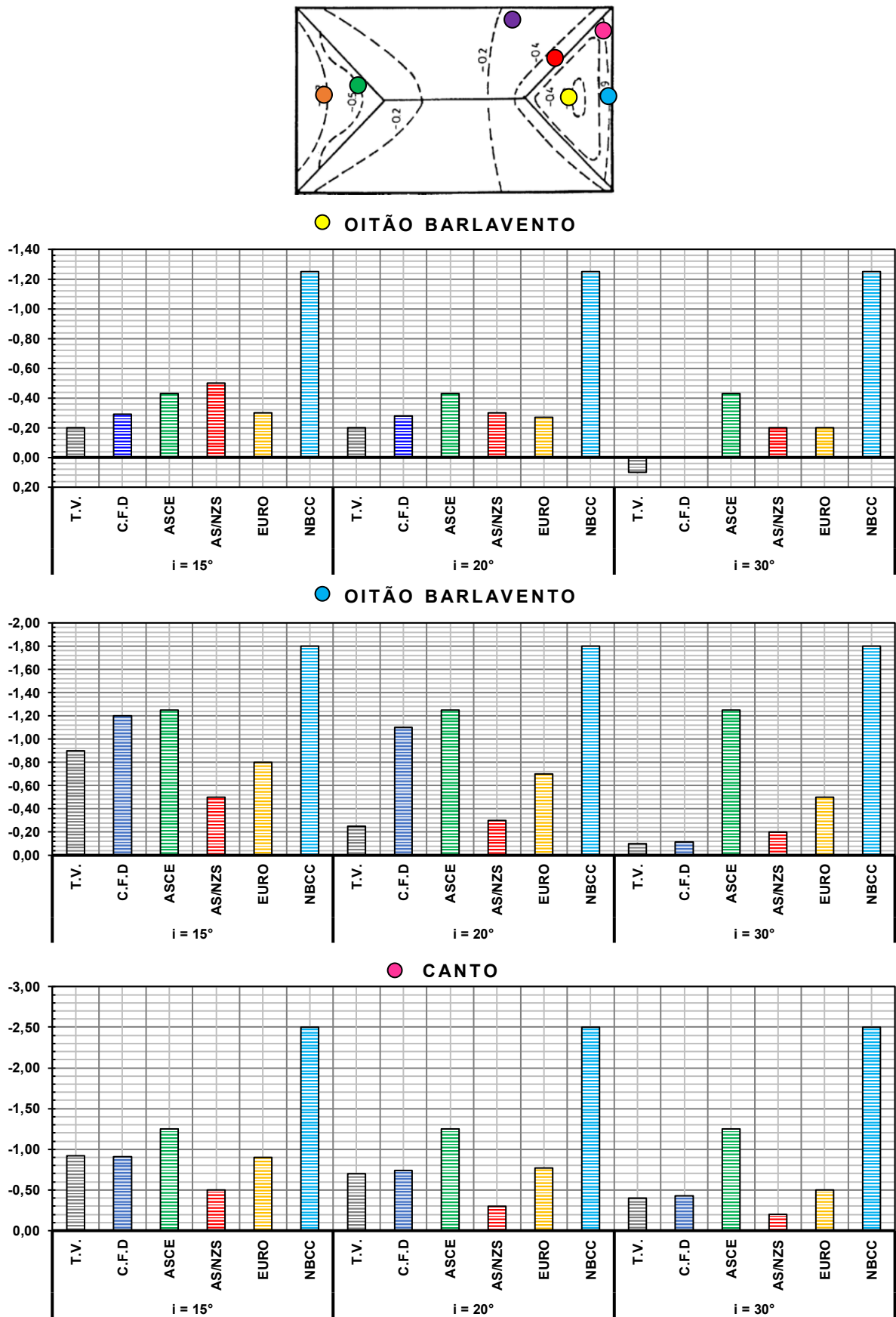
- Ponto verde: localizado nas proximidades do beiral à barlavento, para tal ponto os ensaios de túnel de vento marcaram -0,50 e -0,30 para campo aberto e suburbano respectivamente as simulações marcaram -0,778 e -0,439. Embora tais coeficientes estejam contidos na faixa preconizada por norma, -0,81 para ASCE:2022, -0,73 para EUROCODE:2010 e -1,30 para NBCC:2005, chama atenção pelo fato de tratar novamente de uma zona de coeficientes locais de pressão externa;

- Ponto vermelho: embora os coeficientes se equiparem para categoria suburbana, -0,10 para ensaio de túnel de vento e -0,0928 para simulação numérica, para campo aberto as simulações numéricas mostraram-se ligeiramente mais tendo coeficientes de -0,33 defronte a -0,20 dos ensaios de túnel de vento;
- Ponto amarelo: localizado em região importante de pressão externa local, posterior a cumeeira, trata-se da maior diferença registrada em relação aos ensaios de Meechan (1991). Enquanto para túnel de vento as medições foram de -0,40 para campo aberto e -0,50 para suburbana o modelo numérico;
- Ponto laranja: localizado no meio do plano inclinado lateral a qual para condição de campo aberto túnel de vento e simulação numérica convergem, sendo -0,30 e -0,288 respectivamente, todavia, para condição suburbana denota-se um ligeira diferença sendo -0,30 em ensaios de túnel de vento e -0,20 em simulações numéricas.

Em geral para os ensaios de Meechan (1991) as principais diferença deparadas se dão em regiões de pressões locais onde há arestas e cantos vivos. Em relação ao ângulo de incidência de 45°, tal padrão se repetira, embora seja a incidência resultante dos maiores picos de sucção tanto na simulação numérica como nos ensaios de Meechan (1991), a magnitude dos mesmos é díspar. Na região junto a interface espigão/cumeeira onde túnel de vento apresenta coeficientes de pressão da ordem -1,40 para campo aberto a simulação numérica marcara -2,05. Tal comportamento repete-se para exposição suburbana, onde os ensaios apresentaram coeficientes de -1,20 e as simulações numéricas -1,60. Como essa incidência não é contemplada em textos normativos não há o parâmetro da faixa normativa para saber se esses coeficientes estariam contidos na mesma. Executando a magnitude das regiões de espigão e cumeeira as demais regiões convergiram cabendo a chamar atenção para as semelhanças nas distribuições das zonas de pressão.

Para os ensaios e reproduções numéricas de Xu et. al. (1998), a Figura 26 apresenta o comparativo direto referente aos pontos de estudo que mais chamaram a atenção para vento 0°. Por conseguinte, a Figura 25 apresenta os comparativos diretos de pontos de estudo junto ao ângulo de incidência de vento 90.

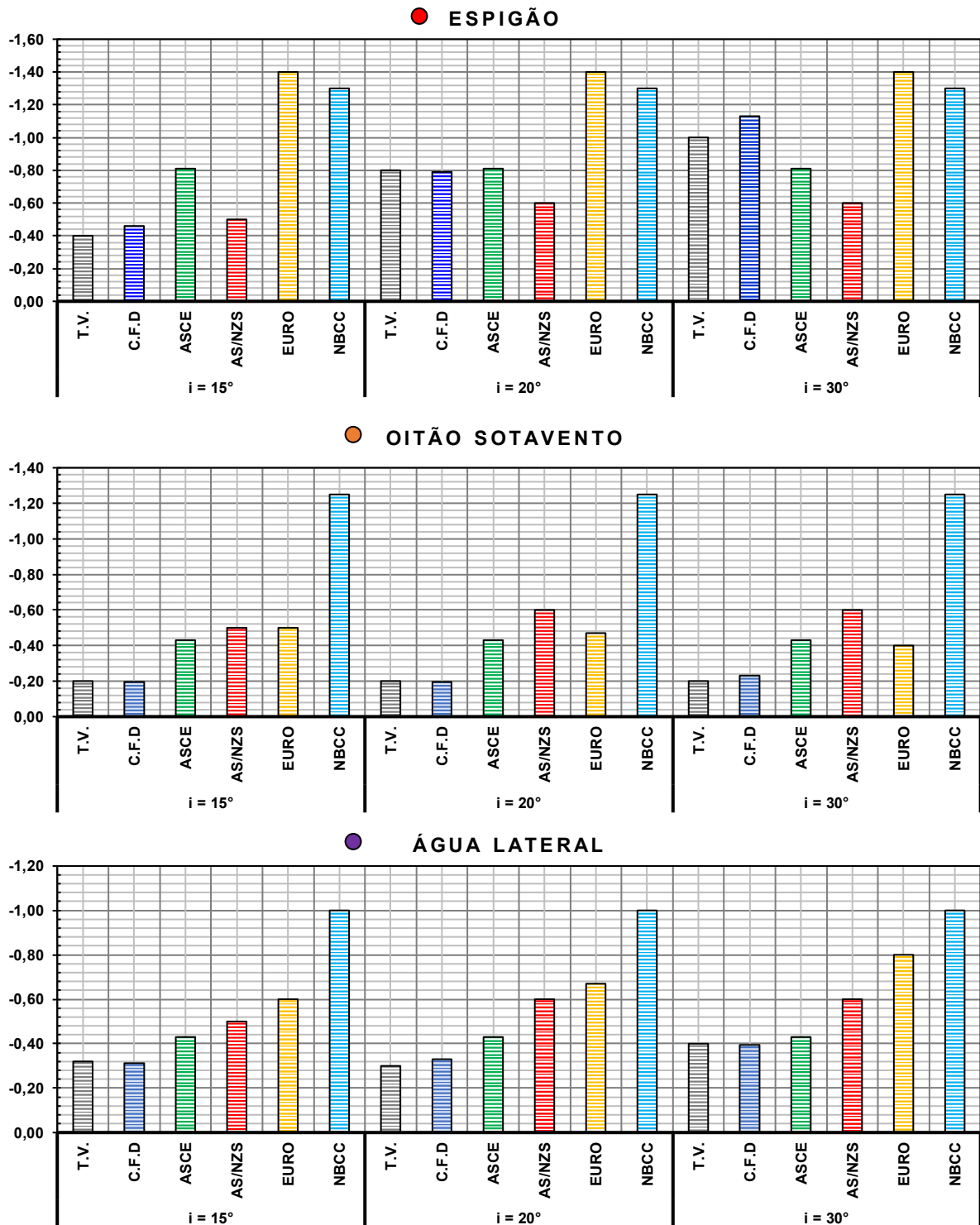
Figura 26 – Comparativo direto método numérico x túnel de vento x método analítico – Vento 0° - Xu et. al. (1998).



Fonte: Própria do autor.

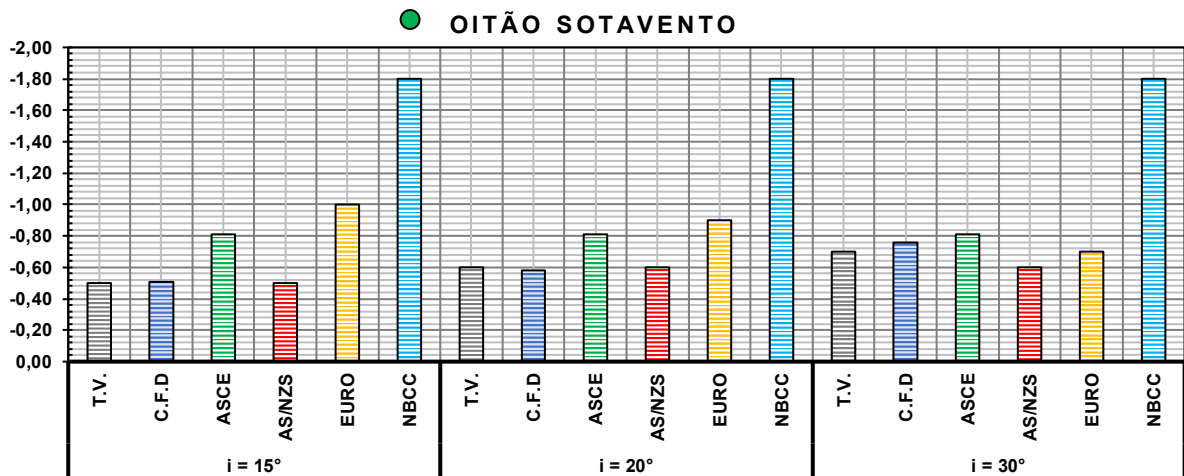


Figura 26 - Comparativo direto método numérico x túnel de vento x método analítico – Vento 0° - Xu et. al. (1998) - Continuação.



Fonte: Própria do autor.

**Figura 26** - Comparativo direto método numérico x túnel de vento x método analítico – Vento 0° - Xu et. al. (1998) - Continuação.



Fonte: Própria do autor.

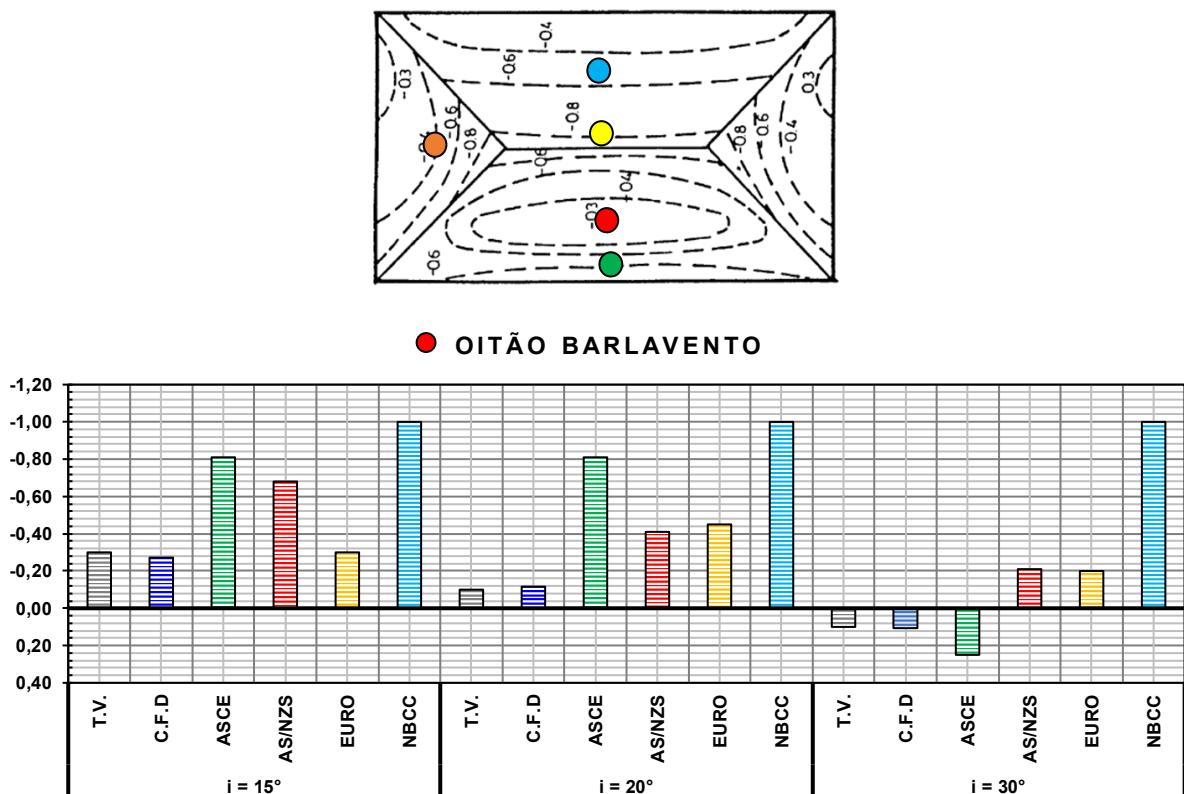
Para os pontos de estudo apresentados na Figura 26 em relação de Xu et. al. (1998), denota-se:

- Ponto amarelo: embora a pressão junto ao centro do oitão à barlavento tenha diminuído com o aumento da inclinação do telhado conforme os ensaios de túnel de vento, a magnitude da mesma não fora alcançada. A diferença entre os valores da simulação numérica mostrara-se sempre 0,10 maior que as medições em túnel sendo que através de ensaios chegara-se em -0,20 para  $i = 15^\circ$ , -0,20 para  $i = 20^\circ$  e +0,10 para  $i = 30^\circ$ . Já na reprodução dos ensaios as simulações marcaram -0,291 para  $i = 15^\circ$ , -0,279 para  $20^\circ$  e 0,00 para  $30^\circ$ ;
- Ponto azul: seguindo no oitão à barlavento, outra diferença levantada fora a magnitude dos coeficientes próximos ao beiral. Enquanto para inclinação  $30^\circ$  o valor convergira perfeitamente, para as inclinações de  $15^\circ$  e  $20^\circ$  se mostrara muito superior sendo de túnel de vento para simulação numérica para inclinação de  $15^\circ$  coeficientes de -0,90 para -1,20 e para inclinação  $20^\circ$  coeficientes de -0,25 para -1,10;
- Ponto rosa: localizado no canto do oitão a barlavento, tal ponto apresenta leve disparidade entre os ensaios e a metodologia numérica. Como tal zona de pressão não é pontuada em alguns códigos como AS/NZS:2017 pode-se notar a disparidade de magnitude dos coeficientes atribuídos;
- Ponto vermelho: localizado na área de pressão local do espigão, a magnitude da sucção nessa região vai se elevando consoante a inclinação de cobertura. Sendo a

maior disparidade junto aos ensaios na inclinação de 30° onde as simulações numéricas marcam -1,13 enquanto os ensaios marcam -1,00;

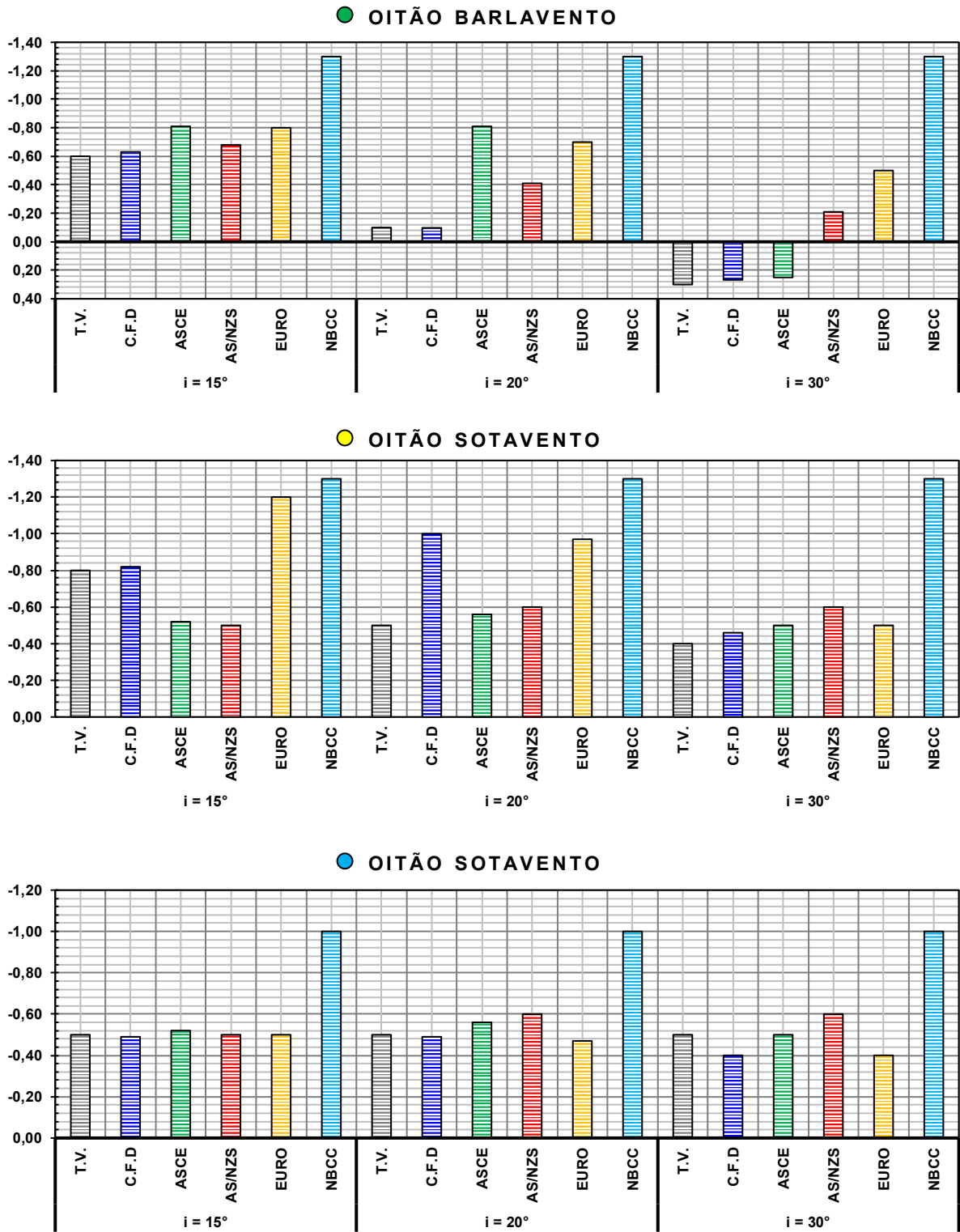
- Ponto roxo: para a região lateral a incidência de vento 0°, percebe-se uma branda elevação nas pressões sendo diretamente proporcional a inclinação da cobertura. Do ponto de vista de variação entre valores do modelo numérico em relação aos ensaios os coeficientes não tiveram diferença absoluta maior de 0,03;
- Ponto verde: tal qual o plano inclinado lateral, o oitão à sotavento à medida que a inclinação da cobertura aumenta há um brando aumento de pressão sendo que o espigão fica mais sobressalente. Quanto aos coeficientes, as simulações possuem uma diferença absoluta máxima de 0,06 acima dos ensaios em túnel de vento;
- Ponto laranja: sendo a zona de pressões no centro do plano inclinado do oitão sotavento, apresentara-se constante em relação à inclinação de cobertura além de uma grande convergência entre os ensaios de túnel de vento e as simulações realizadas.

Figura 27 – Comparativo direto método numérico x túnel de vento x método analítico – Vento 90° - Xu et. al. (1998).



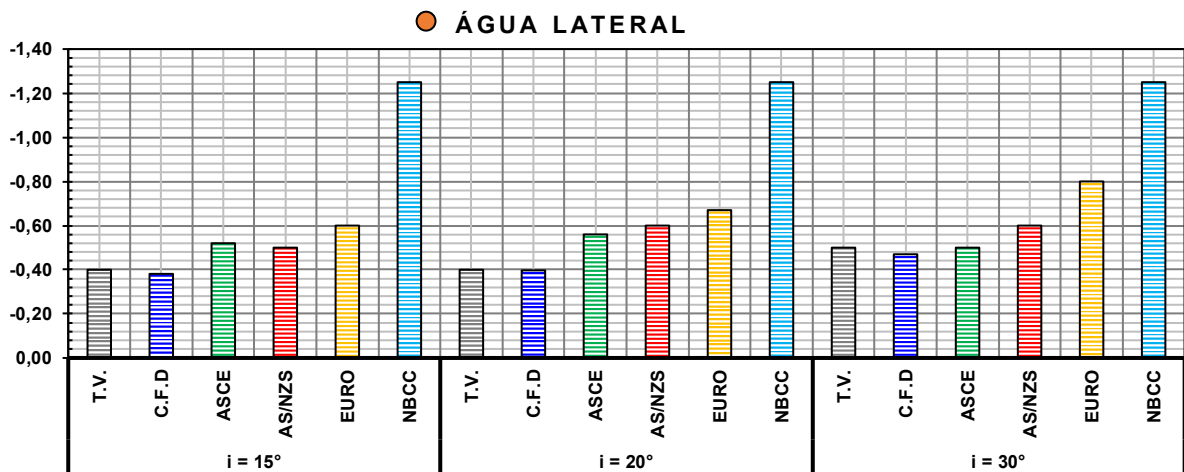
Fonte: Própria do autor.

**Figura 27** – Comparativo direto método numérico x túnel de vento x método analítico – Vento 90° - Xu et. al. (1998) - Continuação.



Fonte: Própria do autor.

**Figura 27** – Comparativo direto método numérico x túnel de vento x método analítico – Vento 90° - Xu et. al. (1998) - Continuação.



Fonte: Própria do autor.

Para os pontos de estudo apresentados na Figura 27 em relação de Xu et. al. (1998), denota-se:

- Ponto vermelho: diferentemente da situação para vento 0°, para o vento 90° além do comportamento de redução de pressões de sucção a magnitude dos coeficientes convergem melhor ficando muito próximo ao dos ensaios de túnel de vento incluindo a sobrepressão para inclinação de cobertura 30°. Para tais a diferença absoluta entre os coeficientes fora de 0,03;
- Ponto verde: consoantes ao comportamento do centro do oitão, a região próxima ao beiral à barlavento apresenta uma redução de sucções e o aparecimento de sobrepressões diretamente proporcionais à medida que a inclinação da cobertura vai aumentando. Cabe destacar que, a magnitude da sobrepressão para a inclinação de 30° supera a prevista pela ASCE:2022, além de que a mesma não prevê sobrepressões para vento 0° como mostrara os ensaios de túnel de vento;
- Ponto amarelo: zona de pressão local pós a cumeeira, chama atenção como o coeficiente de pressão oriundo da das simulações numéricas destoa da linha de tendência dos coeficientes oriundos dos ensaios de túnel de vento. Pode-se notar a mesma tendência mencionada dos coeficientes preconizados pelo EUROCODE:2010, que tendem a reduzir as sucções com o aumento da inclinação da cobertura. Cabe ressaltar que os demais pontos do telhado não apresentam tamanha disparidade com os ensaios de túnel de vento o que fica intrigante, pois têm-

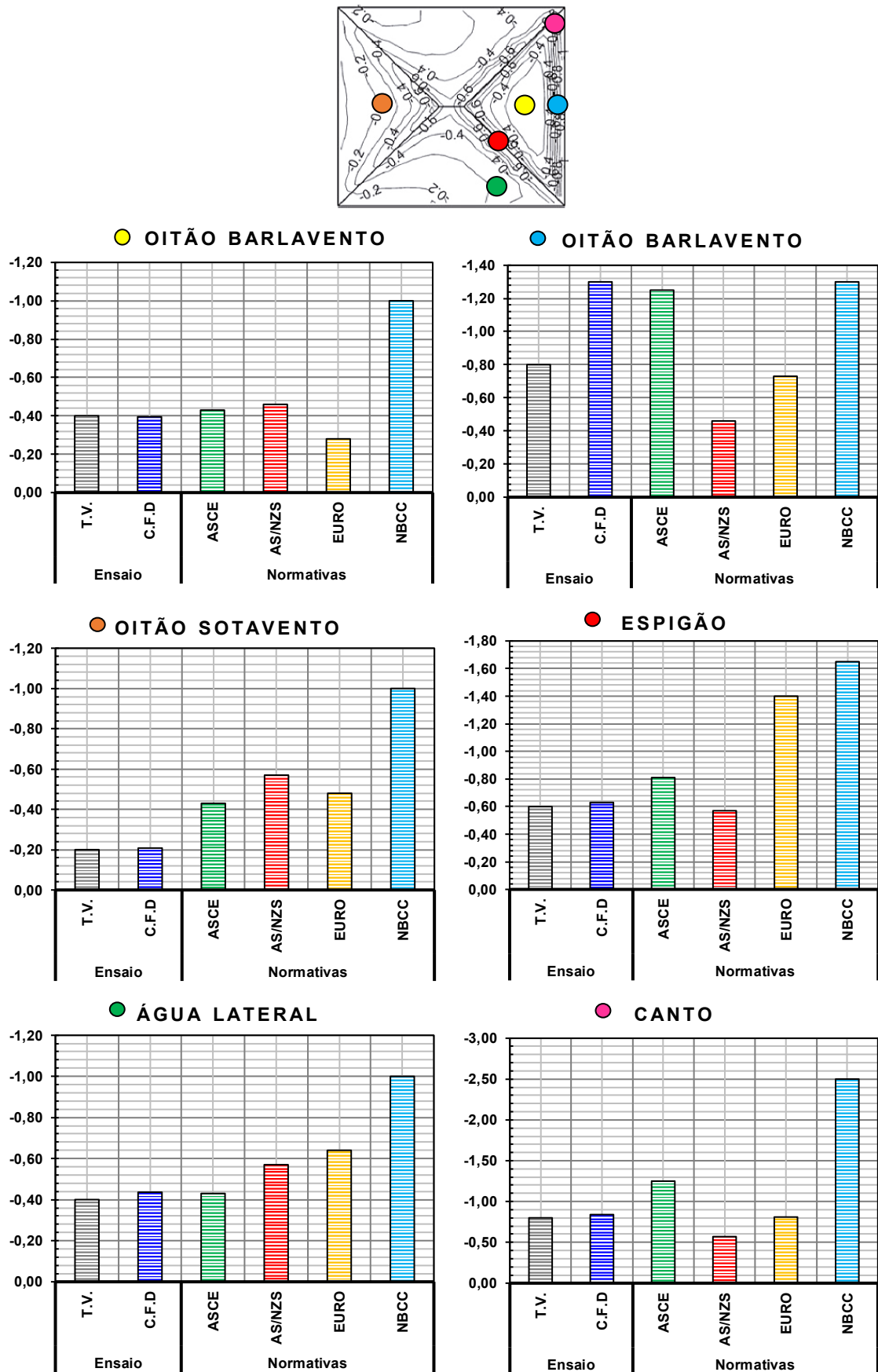
se -0,50 segundo os ensaios de túnel de vento e -1,00 segundo as simulações numéricas;

- Ponto azul: assim como no caso de vento  $0^\circ$  a magnitude dos coeficientes permanece imutável a inclinação da cobertura, tal comportamento também é retratado pelos coeficientes da simulação numérica. Porém, há uma pequena variação absoluta de 0,10 entre estes métodos junto a cobertura de inclinação de  $30^\circ$ ;
- Ponto laranja: localizado na água lateral que, embora sua extensão seja menor do que na configuração de vento a  $0^\circ$  o comportamento repete-se perfeitamente.

Para os ensaios e reproduções numéricas de Gavanski et. al. (2013), a Figura 28 apresenta o comparativo direto referente aos pontos de estudo que mais chamaram a atenção para vento  $0^\circ$ . Ao cruzar ambas as metodologias e fazer uma comparação direta entre os principais pontos de coeficientes de pressão, têm-se:

- Ponto amarelo: assim como os demais estudo percebe-se convergência dos valores com pouca variação entre eles, chama atenção para o NBCC:2005 o qual permanece como a normativa com maiores coeficientes enquanto as demais tangenciam os valores obtidos;
- Ponto azul: localizado na borda próximo ao beiral, apresenta uma diferença entre os ensaios de túnel de vento e as simulações de túnel de vento. Enquanto os ensaios marcam -0,80 as simulações marcam -1,30;
- Ponto rosa: localizado junto ao canto à barlavento, apresenta apenas uma pequena disparidade entre ensaios e simulações sendo a diferença absoluta de 0,04 entre eles;
- Ponto vermelho: localizado junto ao espigão, assim como nos cantos apresenta uma convergência nos resultados tendo como diferença absoluta defronte aos ensaios de 0,03;
- Ponto verde: localizado na água lateral do telhado, apresenta pouca disparidade em relação aos ensaios de túnel de vento tendo como diferença absoluta entre eles 0,04;
- Ponto laranja: localizado no oitão a sotavento, assim como os demais pontos, executando a região do beiral, apresenta uma coesão aceitável entre as metodologias tendo diferença absoluta de 0,01 entre as mesmas.

**Figura 28** – Comparativo direto método numérico x túnel de vento x método analítico – Vento 0° - Gavanski et. al. (2013).



Fonte: Própria do autor.

## 5.4 PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO

Com base nas assertividades da localização das zonas e da convergência dos coeficientes o Quadro 23 apresenta a relação dos parâmetros de dimensionamento para carga de vento quatro águas proposto pelo estudo. Tais coeficientes foram gerados através do processamento dos resultados da pesquisa e conseqüentemente a interpolação dos valores dos coeficientes dos ensaios de túnel de vento, simulação numérica e normas internacionais.

**Quadro 23** – Parâmetros de dimensionamento propostos pelo estudo.

COEFICIENTES DE PRESSÃO EXTERNA RESULTANTES DO ESTUDO									
<p style="text-align: center;"><b>Vento 0°</b></p>					<p style="text-align: center;"><b>Vento 90°</b></p>				
Notas:									
Y = h ou 0,15b (menor dos dois);									
Z = b/3 ou a/4 (o maior dos dois porém ≤ 2h).									
VENTO 0°									
	E	F	G	H	I	J	K	L	M
15°	-1,00	-1,10	-0,50	-0,85	-0,50	-0,30	-0,85	-0,50	-
20°	-0,90	-1,00	-0,45	-1,00	-0,60	-0,30	-0,80	-0,50	-
30°	-0,50	-0,70	-0,20	-1,10	-0,70	-0,30	-0,80	-0,40	-
VENTO 90°									
	E	F	G	H	I	J	K	L	M
15°	-0,80	-1,00	-0,50	-0,95	-0,50	-	-0,80	-0,55	-0,90
20°	-0,60	-0,80	-0,45	-1,05	-0,65	-	-0,75	-0,50	-0,80
30°	-0,10	-0,30	-0,25	-1,10	-0,70	-	-0,70	-0,50	-0,60

Fonte: Própria do autor.



Salienta-se que, as dimensões das zonas de pressão dispostas Quadro 23 são uma adaptação das atuais disposições da ABNT NBR 6123:1988 para telhado duas águas. Para a definição da medida coesa das zonas há a necessidade de ensaios de túnel de vento, além de amostragens amplas que contemplem outras variáveis não docilizadas nesta pesquisa, como platibanda, beiral, altura da vedação, entre outras.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em análise geral, Xu et. al (1998) fora o precursor do estudo do efeito da inclinação do telhado sobre os coeficientes de pressão para telhado quatro águas, todavia, não contemplando inclinações acima de  $30^\circ$ , enquanto para Meechan (1991) o objetivo fora a performance da cobertura quatro águas defronte a cobertura duas águas. Já Gavanski et. al. (2013) concentrara-se em pressão de revestimentos junto ao invólucro de edificações com proporções quase quadradas com telhado quatro águas e telhado duas águas.

Ao compilar os estudos pode-se observar a concordância na localização dos picos de pressão estando locados próximos aos beirais e linhas limítrofes dos planos inclinados. Para a direção  $0^\circ$ , em inclinações de cobertura menores ou igual a  $20^\circ$  ( $i \leq 20^\circ$ ) os picos de pressões localizam-se na borda junto aos beirais à barlavento. No entanto, à medida que a inclinação aumenta até a marca de  $30^\circ$  ( $20^\circ < i \leq 30^\circ$ ) as pressões vão se redistribuindo e concentrando-se na região dos espigões, evento este diretamente proporcional à redução da sucção no oitão barlavento e aparecimento de sobrepressão. Na direção  $45^\circ$ , a localização dos picos de pressões permanece imutável com a inclinação da cobertura. Como o vento incide perpendicular aos espigões, logo, são neles as resultantes de maiores coeficientes de pressão, sendo os picos de sucção no vértice entre a cumeeira e o espigão e os picos de sobrepressão junto ao espigão à barlavento. Cabe acrescentar, que a incidência de  $45^\circ$  mostrara-se deveras importante pois resultara nos coeficientes de pressão externos de maior magnitude, fato confirmado junto aos ensaios analisados. Já para a direção  $90^\circ$ , em inclinações baixas, menores e iguais a  $15^\circ$  ( $i \leq 15^\circ$ ) os picos de sucção localizam-se linha da cumeeira e nos espigões à barlavento. A partir dessa inclinação até a marca de  $30^\circ$  ( $15^\circ < i \leq 30^\circ$ ) eles vão se deslocando e localizando-se apenas nos espigões. Tal análise permite revela a importância dessas zonas no contexto aerodinâmico e estrutural do telhado.

Atrelado a isso, justamente os pontos mais díspares entre os ensaios de túnel de vento e simulação numérica localizam-se nessas regiões relatadas anteriormente. Cabe ressaltar que essas regiões que ficam próximas a vértices do modelo reduzido, devido à disposição angular, são difíceis de instrumentar, locar as tomadas de pressão, em ensaios de túnel de vento. Tal fato é corroborado pela escala de representação nos ensaios a exemplo dos ensaios de Meechan (1991) a qual os modelos para os ensaios foram feitos na escala 1:100 enquanto os demais ensaios estudados foram realizados na escala 1:50. Outra consideração a acrescentar é a perspectiva cronológica entre os ensaios estudados, ao longo dos anos as tecnologias

empregadas em ensaios são retificadas e evoluídas. Como o trabalho utiliza ensaios de anos diferentes e feitos em laboratórios diferentes a variável técnica empregada junto aos mesmos não pode ser docilizada, sendo que está também pode gerar um desvio de valores. Além disso, a simulação numérica é uma metodologia relativamente nova dentro do contexto da história da engenharia do vento, sua utilização exige cautela. Como não há uma relação definida entre o coeficiente da lei de potência utilizado em túneis de vento para determinar as categorias de exposição e o índice de turbulência atribuído em simulações numéricas, não há como reproduzir um ensaio de túnel de vento totalmente fidedigno a seus parâmetros originais. Tal fato deve ser estudado mais aprofundadamente para que possa ter mais confiabilidade no emprego de CFD junto a análise estrutural. Assim como o aparato numérico do software pode ter dificuldade em convergir os dados em tais regiões. Esses dois pontos levantados podem ser explicações plausíveis para as diferenças entre as metodologias.

Ao correlacionar os dados das simulações numéricas com os dados analíticos levantados tona-se perceptível a semelhança entre as distribuições do gradiente de cores com as definições das zonas especificadas nos códigos, o que leva a crer que o comportamento das reproduções dos ensaios está coeso. Assim como as sucções e sobrepressões ligadas a inclinação da cobertura e suas localizações. Cabe ressaltar, que configuração do comportamento do vento revelado pelas isobáricas obtido nas análises computacionais demonstram grande semelhança com a norma EN 1991-1-4:2005 (2010), sobretudo nas zonas localizadas nos cantos a barlavento e zonas de espigões e cumeeira. Ainda dentro deste contexto baseado em uma assertividade média global do estudo, o *National Building Code of Canada* (2005) mostra-se como sendo o código mais conservador em quesito de magnitude de coeficientes e a AS/NZS 1170.2:2017 (2017) mostra-se como sendo o código mais brando. Logo, pode-se afirmar que, para este estudo as normativas ASCE/SEI 7-22 (2022) e a EN 1991-1-4:2005 (2010) foram as que melhor preconizaram os coeficientes de pressão externas dos ensaios reproduzidos.

Conforme apresentado, as simulações numéricas são um mecanismo de análise relevante que apresentam níveis de correspondência satisfatórias defronte a ensaios de túnel de vento e normas internacionais, todavia, necessita-se ter cautela uma vez que há muito conhecimento a evoluir em seu uso. Estudos em um procedimento padrão de configuração para túneis de ventos numéricos, bem como, a equalização entre os parâmetros de entrada perante as variáveis controladas em túnel de vento é primordial para garantir a segurança dos dados obtidos. Além disso, o fato de não haver relação entre os parâmetros de turbulência e exposição

usados em ensaios de túnel de vento e simulação numérica é uma lacuna que necessita ser sanada.

Os coeficientes de pressão externa resultantes deste estudo têm por objetivo contribuir para o mercado da engenharia estrutural, afim de ser utilizado para obtenção das ações devidas ao vento em tipologia de cobertura quatro águas. Ressalta-se que um estudo apresentado neste trabalho cabe ser expandido e validado oficialmente em ensaios de túnel de vento, sobretudo na definição das dimensões das zonas de pressão que requer um estudo mais minucioso e gama de amostragem e parametrização mais abrangente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures**. Reston, Virginia-EUA: ASCE/SEI 7-16, 2016. p. 658.

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

BAETKE, Frank; WERNER, Heinrich; WENGLER, Hans. Numerical simulation of turbulent flow over surface-mounted obstacles with sharp edges and corners. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 35, p. 129–147, 1990. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(90\)90213-V](https://doi.org/10.1016/0167-6105(90)90213-V)

BASKARAN, Appupillai; STATHOPOULOS, Ted. Computational evaluation of wind effects on buildings. **Building and Environment**, [s. l.], v. 24, n. 4, p. 325–333, 1989. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(89\)90027-9](https://doi.org/10.1016/0360-1323(89)90027-9)

BASKARAN, Appupillai; STATHOPOULOS, Ted. Influence of computational parameters on the evaluation of wind effects on the building envelope. **Building and Environment**, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 39–49, 1992. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(92\)90006-B](https://doi.org/10.1016/0360-1323(92)90006-B)

BJERG, Bjarne *et al.* Modelling of ammonia emissions from naturally ventilated livestock buildings: Part 2, air change modelling. **Biosystems Engineering**, [s. l.], v. 116, n. 3, p. 246–258, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.01.010>

BLOCKEN, B.; GUALTIERI, C. Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for Environmental Fluid Mechanics. **Environmental Modelling & Software**, [s. l.], v. 33, p. 1–22, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.02.001>

BLOCKEN, B.; PERSON, J. Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new Dutch wind nuisance standard. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 97, n. 5–6, p. 255–270, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2009.06.007>

BLOCKEN, Bert *et al.* Application of computational fluid dynamics in building performance simulation for the outdoor environment: an overview. **Journal of Building Performance**

**Simulation**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 157–184, 2011. Disponível em:

<https://doi.org/10.1080/19401493.2010.513740>

CANDIDO, Daniel Henrique. **Tornados e trombas-d'água no brasil: modelo de risco e proposta de escala de avaliação de danos**. 259 f. 2012. - Universidade Estadual de Campinas, [s. l.], 2012.

CHEN, Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. **Building and Environment**, [s. l.], v. 44, n. 4, p. 848–858, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.025>

CONAN, Boris; VAN BEECK, Jeroen; AUBRUN, Sandrine. Sand erosion technique applied to wind resource assessment. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 104–106, p. 322–329, 2012. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.03.017>

DARLEY, E. R. Wind-pressure test made on large model building. **Engineering News-Record**, Manhattan, Kansas - EUA, v. 100, n. 13, p. 508–510, 1928.

DEAVES, D.M. Wind over hills: A numerical approach. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 1, p. 371–391, 1975. Disponível em:

[https://doi.org/10.1016/0167-6105\(75\)90031-8](https://doi.org/10.1016/0167-6105(75)90031-8)

DELAGE, Yves; TAYLOR, P. A. Numerical studies of heat island circulations. **Boundary-Layer Meteorology**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 201–226, 1970. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/BF00185740>

DERICKSON, R. G.; MERONEY, R. N. A simplified physics airflow model for evaluating wind power sites in complex terrain. *In: , 1977. Summer Computer Simulation Conference*. [S. l.: s. n.], 1977. p. 763–769.

ESTOQUE, M. A. The Sea Breeze as a Function of the Prevailing Synoptic Situation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 244–250, 1962. Disponível em:

[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1962\)019<0244:TSBAAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1962)019<0244:TSBAAF>2.0.CO;2)

ESTOQUE, M. A.; BHUMRALKAR, C. M. FLOW OVER A LOCALIZED HEAT SOURCE. **Monthly Weather Review**, [s. l.], v. 97, n. 12, p. 850–859, 1969. Disponível em:

[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0850:FOALHS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0850:FOALHS>2.3.CO;2)

ETHERIDGE, David. Natural Ventilation of Buildings Theory Measurement and Design. **International Journal of Ventilation**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 405–406, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14733315.2012.11683965>

EUROPEAN STANDARD. **Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions** European Committee for Standardization, Brussel: EN 1991-1-4:2005+A1, 2010.

FERZIGER, Joel H. Approaches to turbulent flow computation: Applications to flow over obstacles. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 35, p. 1–19, 1990. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(90\)90208-T](https://doi.org/10.1016/0167-6105(90)90208-T)

FISHER, Edwin L. A THEORETICAL STUDY OF THE SEA BREEZE. **Journal of Meteorology**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 216–233, 1961. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1961\)018<0216:ATSOTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1961)018<0216:ATSOTS>2.0.CO;2)

FONT, Manuel. Lessons From Hurricanes in Puerto Rico. **Engineering News-Record**, San Juan, Puerto Rico, v. 109, n. 16, p. 470–471, 1932.

FOSBERG, Michael A. Airflow Over a Heated Coastal Mountain. **Journal of Applied Meteorology**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 436–442, 1969. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1969\)008<0436:AOAHCM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1969)008<0436:AOAHCM>2.0.CO;2)

FOSBERG, Michael A. Numerical Analysis of Convective Motions over a Mountain Ridge. **Journal of Applied Meteorology**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 889–904, 1967. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1967\)006<0889:NAOCMO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1967)006<0889:NAOCMO>2.0.CO;2)

FRAGOS, Vasilios P.; NTINAS, Georgios K.; KATERIS, Dimitrios L. Numerical estimation of external pressure coefficients of a pitched-type roof greenhouse and comparison with Eurocode in different flow-type circumstances. **International Conference of Agricultural Engineering - AgEng 2014**, Zurich, Switzerland, 2014.

FROST, Walter; MAUS, J. R.; FICHTL, G. H. A boundary-layer analysis of atmospheric motion over a semi-elliptical surface obstruction. **Boundary-Layer Meteorology**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 165–184, 1974. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00227911>

GIOVANNONZI, R. Studio dell'azione del vento sopra due modelli di edifici.

**L'Aerotecnica**, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 596–651, 1935.

HEISELBERG, P.; PERINO, M. Short-term airing by natural ventilation - implication on IAQ and thermal comfort. **Indoor Air**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 126–140, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2009.00630.x>

HIRT, C.W; COOK, J.L. Calculating three-dimensional flows around structures and over rough terrain. **Journal of Computational Physics**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 324–340, 1972. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(72\)90070-8](https://doi.org/10.1016/0021-9991(72)90070-8)

HUBOVA, Olga *et al.* External Pressure Coefficients on the Atypical High-Rise Building – Computing Simulation and Measurements in Wind Tunnel. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 190, p. 488–495, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.368>

JANSSEN, W.D.; BLOCKEN, B.; VAN HOOFF, T. Pedestrian wind comfort around buildings: Comparison of wind comfort criteria based on whole-flow field data for a complex case study. **Building and Environment**, [s. l.], v. 59, p. 547–562, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.012>

JENDZELOVSKY, Norbert; ANTAL, Roland; KONECNA, Lenka. Determination of the wind pressure distribution on the facade of the triangularly shaped high-rise building structure. **MATEC Web of Conferences**, [s. l.], v. 107, p. 00081, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710700081>

JENSEN, Martin; FRANCK, Niels. Model-Scale tests in Turbulent Wind: Phenomena Dependent on the Velocity Pressure. **The Danish Technical Press**, Copenhagen, 1965.

JOINT STANDARDS AUSTRALIA/STANDARDS NEW ZEALAND COMMITTEE. **Structural design actions - Part 2: Wind actions** Wellington, Australian/New Zealand: AS/NZS 1170.2:2017, 2017.

KASAHARA, AKIRA; WASHINGTON, WARREN M. NCAR GLOBAL GENERAL CIRCULATION MODEL OF THE ATMOSPHERE. **Monthly Weather Review**, [s. l.], v. 95, n. 7, p. 389–402, 1967. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1967\)095<0389:NGGCMO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1967)095<0389:NGGCMO>2.3.CO;2)



LESCHZINER, M.A. Computational modelling of complex turbulent flow - expectations, reality and prospects. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 46–47, p. 37–51, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(93\)90113-3](https://doi.org/10.1016/0167-6105(93)90113-3)

LESCHZINER, M.A. Modelling engineering flows with Reynolds stress turbulence closure. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 35, p. 21–47, 1990. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(90\)90209-U](https://doi.org/10.1016/0167-6105(90)90209-U)

MAHMOUD, G. H.; NASR, E.; NOURHAN, S. No Title. **Al-Azhar University Civil Engineering Research Magazine (CERM)**, Cairo, Egypt, v. 39, n. 1, 2017. Disponível em: <http://www.azharcermjournal.com/CERMF1701/P17-01-19.pdf>

MEECHAM, D. The improved performance of hip roofs in extreme winds — A case study. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Queensland, Australia, v. 43, n. 1–3, p. 1717–1726, 1992. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90583-V](https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90583-V)

MERONEY, R. N.; YAMADA, T. Numerical and physical simulation of a stratified airflow over a series of heated island. **Proceedings of the Summer Simulation Conference**, San Diego, California, v. 13–16, 1972.

MERONEY, R. N.; YAMADA, T. Wind tunnel and numerical experiments of two-dimensional stratified airflow over a heated island. **Winter Annual Meeting of ASME**, Washington, DC, 1971.

MOCHIDA, A. *et al.* Numerical Simulation of Flowfield around Texas Tech Building by Large Eddy Simulation. *In*: COMPUTATIONAL WIND ENGINEERING 1. [S. l.]: Elsevier, 1993. p. 455–460. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-81688-7.50050-4>

MONTAZERI, H. *et al.* CFD evaluation of new second-skin facade concept for wind comfort on building balconies: Case study for the Park Tower in Antwerp. **Building and Environment**, [s. l.], v. 68, p. 179–192, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.07.004>

MONTAZERI, H.; BLOCKEN, B. CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis. **Building and Environment**, [s. l.], v. 60, p. 137–149, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.012>

MURAKAMI, S. Computational wind engineering. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 36, p. 517–538, 1990a. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(90\)90335-A](https://doi.org/10.1016/0167-6105(90)90335-A)

MURAKAMI, S. Numerical simulation of turbulent flowfield around cubic model current status and applications of model and LES. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 33, n. 1–2, p. 139–152, 1990b. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(90\)90030-G](https://doi.org/10.1016/0167-6105(90)90030-G)

MURAKAMI, S. *et al.* Numerical study on velocity-pressure field and wind forces for bluff bodies by  $\kappa$ - $\epsilon$ , ASM and LES. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 44, n. 1–3, p. 2841–2852, 1992. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90079-P](https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90079-P)

MURAKAMI, S. Overview of turbulence models applied in CWE–1997. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 74–76, p. 1–24, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(98\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(98)00004-X)

MURAKAMI, S. Preface. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 35, p. ix–xi, 1990c. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(90\)90207-S](https://doi.org/10.1016/0167-6105(90)90207-S)

MURAKAMI, S. Preface to the first international symposium on Computational Wind Engineering. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 46–47, n. 1–2, 1993.

MURAKAMI, S. Comparison of various turbulence models applied to a bluff body. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 46–47, p. 21–36, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(93\)90112-2](https://doi.org/10.1016/0167-6105(93)90112-2)

MURAKAMI, Shuzo; MOCHIDA, Akashi. 3-D numerical simulation of airflow around a cubic model by means of the model. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 31, n. 2–3, p. 283–303, 1988. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(88\)90009-8](https://doi.org/10.1016/0167-6105(88)90009-8)

MURAKAMI, Shuzo; MOCHIDA, Akashi. Three-dimensional numerical simulation of turbulent flow around buildings using the  $k$ - $\epsilon$  turbulence model. **Building and Environment**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 51–64, 1989. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/0360->

1323(89)90016-4

MURAKAMI, Shuzo; MOCHIDA, Akashi; HAYASHI, Yoshihiko. Examining the  $\kappa$ - $\epsilon$  model by means of a wind tunnel test and large-eddy simulation of the turbulence structure around a cube. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 35, p. 87–100, 1990. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(90\)90211-T](https://doi.org/10.1016/0167-6105(90)90211-T)

MURAKAMI, Shuzo; MOCHIDA, Akashi; HIBI, Kazuki. Three-dimensional numerical simulation of air flow around a cubic model by means of large eddy simulation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 25, n. 3, p. 291–305, 1987. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(87\)90023-7](https://doi.org/10.1016/0167-6105(87)90023-7)

NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA. **ASSOCIATE COMMITTEE ON THE NATIONAL BUILDING CODE. National building code of Canada**. Ontario, Canada: NBCC-2012, 2012. p. 761.

NICHOLLS, M; PIELKE, R; MERONEY, R. Large eddy simulation of microburst winds flowing around a building. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 46–47, p. 229–237, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(93\)90288-Y](https://doi.org/10.1016/0167-6105(93)90288-Y)

NTINAS, G.K. *et al.* CFD study of external pressure coefficient over two greenhouses with parabolic roofs in tandem arrangement with numerical approximation. **Acta Horticulturae**, [s. l.], n. 1170, p. 145–150, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.16>

PATERSON, D.A.; APELT, C.J. Simulation of wind flow around three-dimensional buildings. **Building and Environment**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 39–50, 1989. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(89\)90015-2](https://doi.org/10.1016/0360-1323(89)90015-2)

PATERSON, David A.; APELT, Colin J. Computation of wind flows over three-dimensional buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 24, p. 192–213, 1986.

PATERSON, David A.; APELT, Colin J. Simulation of flow past a cube in a turbulent boundary layer. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 35, p. 149–176, 1990. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(90\)90214-W](https://doi.org/10.1016/0167-6105(90)90214-W)

PEARCE, R. P. The calculation of a sea-breeze circulation in terms of the differential heating across the coastline. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, [s. l.], v. 81, n. 349, p. 351–381, 1955. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.49708134906>

PHILLIPS, Norman A. On the Problem of Initial Data for the Primitive Equations. **Tellus**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 121–126, 1960. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1960.tb01289.x>

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. **Building and Environment**, [s. l.], v. 53, p. 34–48, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.004>

RICHARDS, P.J. *et al.* Pedestrian level wind speeds in downtown Auckland. **Wind and Structures**, [s. l.], v. 5, n. 2\_3\_4, p. 151–164, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.12989/was.2002.5.2\\_3\\_4.151](https://doi.org/10.12989/was.2002.5.2_3_4.151)

ROY, Amrit Kumar *et al.* Wind pressure variation on pyramidal roof of rectangular and pentagonal plan low rise building through CFD simulation. **International Conference on Advances in Construction Materials and Structures (ACMS-2018)**, Roorkee, Uttarakhand, India, p. 10, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10167.42401>

SACHS, Peter. **WIND FORCES IN ENGINEERING**. 2. ed. Toronto, Ontario, Canada: PERGAMON PRESS, 1978.

SHUMAN, Frederick G.; HOVERMALE, John B. An Operational Six-Layer Primitive Equation Model. **Journal of Applied Meteorology**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 525–547, 1968. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1968\)007<0525:AOSLPE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1968)007<0525:AOSLPE>2.0.CO;2)

SINGH, Jagbir; ROY, Amrit Kumar. Effects of roof slope and wind direction on wind pressure distribution on the roof of a square plan pyramidal low-rise building using CFD simulation. **International Journal of Advanced Structural Engineering**, Hamirpur - India, v. 11, n. 2, p. 231–254, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40091-019-0227-3>

SMAGORINSKY, J. GENERAL CIRCULATION EXPERIMENTS WITH THE PRIMITIVE EQUATIONS. **Monthly Weather Review**, [s. l.], v. 91, n. 3, p. 99–164, 1963. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2)

SMAGORINSKY, Joseph. Problems and promises of deterministic extended range forecasting1. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [s. l.], v. 50, n. 5, p. 286–312, 1969. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/1520-0477-50.5.286>

SPARKS, P.R. *et al.* ON THE FAILURE OF SINGLE-STORY WOOD-FRAMED HOUSES IN SEVERE STORMS. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, Netherlands, v. 29, p. 245–252, 1988.

STATHOPOULOS, T.; BASKARAN, A. Boundary treatment for the computation of three-dimensional wind flow conditions around a building. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 35, p. 177–200, 1990. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(90\)90215-X](https://doi.org/10.1016/0167-6105(90)90215-X)

STATHOPOULOS, T.; BASKARAN, B.A. Computer simulation of wind environmental conditions around buildings. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 18, n. 11, p. 876–885, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0141-0296\(95\)00155-7](https://doi.org/10.1016/0141-0296(95)00155-7)

STATHOPOULOS, Theodore. Computational wind engineering: Past achievements and future challenges. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 67–68, p. 509–532, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(97\)00097-4](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(97)00097-4)

SUMMERS, D.M.; HANSON, T.; WILSON, C.B. Validation of a computer simulation of wind flow over a building model. **Building and Environment**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 97–111, 1986. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(86\)90016-8](https://doi.org/10.1016/0360-1323(86)90016-8)

TOMINAGA, Yoshihide *et al.* AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 96, n. 10–11, p. 1749–1761, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058>

TSANG, C.W.; KWOK, K.C.S.; HITCHCOCK, P.A. Wind tunnel study of pedestrian level wind environment around tall buildings: Effects of building dimensions, separation and podium. **Building and Environment**, [s. l.], v. 49, p. 167–181, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.014>

VAN HOOFF, T.; BLOCKEN, B. CFD evaluation of natural ventilation of indoor environments by the concentration decay method: CO<sub>2</sub> gas dispersion from a semi-enclosed

stadium. **Building and Environment**, [s. l.], v. 61, p. 1–17, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.021>

VAN HOOFF, T.; BLOCKEN, B. Full-scale measurements of indoor environmental conditions and natural ventilation in a large semi-enclosed stadium: Possibilities and limitations for CFD validation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 104–106, p. 330–341, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.02.009>

VAN HOOFF, T.; BLOCKEN, B. On the effect of wind direction and urban surroundings on natural ventilation of a large semi-enclosed stadium. **Computers & Fluids**, [s. l.], v. 39, n. 7, p. 1146–1155, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2010.02.004>

VASILIC-MELLING, Dubravka. **THREE-DIMENSIONAL TURBULENT FLOW PAST RECTANGULAR BLUFF BODIES**. 350 f. 1976. - Faculty of Engineering University of London, London, 1976.

VINCENT, Okafor Chinedum. Application of Computational Fluid Dynamics Model in High-Rise Building Wind Analysis-A Case Study. **Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 197–203, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.25046/aj020426>

WU, G.; HIGUCHI, K.; MERONEY, R.N. Applications of digital image processing in wind engineering. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 42, n. 1–3, p. 999–1010, 1992. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90106-K](https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90106-K)

YOSHIE, R. *et al.* Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 95, n. 9–11, p. 1551–1578, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.02.023>



**UPF**  
UNIVERSIDADE  
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José  
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900  
(54) 3316 7000 - [www.upf.br](http://www.upf.br)