



Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2025**  
10º Congresso Latino-americano da Construção Metálica  
09 de Setembro de 2025, São Paulo - SP, Brasil

Tema: Coberturas e fechamentos em aço: materiais, tecnologia e projeto

## LIMITAÇÕES E EXTRAPOLAÇÕES DA NBR 6123:2023 PARA COBERTURAS NÃO CONVENCIONAIS: ANÁLISE NUMÉRICA APLICADA

Enio Carlos Mesacasa Júnior<sup>1</sup>  
Zacarias M. Chamberlain Pravia<sup>2</sup>

### Resumo

Este trabalho investiga a aplicabilidade da norma ABNT NBR 6123:2023 em geometrias de coberturas não convencionais, por meio da comparação entre extrapolações baseadas em modelos normativos e resultados obtidos por Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Um galpão com cobertura poligonal tipo gambrel foi analisado, com avaliação de coeficientes de pressão em diferentes trechos do telhado. Três hipóteses de extrapolação normativa foram consideradas e comparadas com os resultados de uma simulação numérica feita em regime permanente utilizando o modelo de turbulência RANS k- $\omega$  SST. Os resultados evidenciam que nenhuma das extrapolações normativas avaliadas apresentou valores conservadores para todos os trechos da cobertura, destacando a limitação de sua aplicação em geometrias complexas. A análise CFD revelou maior precisão e criticidade nas zonas de alta sucção, reforçando a importância da modelagem numérica em projetos com formas arquitetônicas não usuais, e demonstrando a necessidade de ensaios de modelos em escala em túnel de vento.

**Palavras-chave:** Coberturas Não Convencionais; Vento em Edificações; ABNT NBR 6123; Dinâmica dos Fluidos Computacional

### EXTRAPOLATIONS OF NBR 6123:2023 FOR NON-CONVENTIONAL ROOFS: A CFD-BASED CASE STUDY

### Abstract

This work investigates the applicability of the ABNT NBR 6123:2023 standard in unconventional cover geometries by comparing extrapolations based on normative models and results obtained by Computational Fluid Dynamics (CFD). A shed with a polygonal gambrel-type roof was analyzed, and pressure coefficients in different sections of the roof were evaluated. Three hypotheses of normative extrapolation were considered and compared with the results of a numerical simulation performed in steady state using the RANS k- $\omega$  SST turbulence model. The results show that none of the normative extrapolations evaluated presented conservative values for all roof sections, highlighting the limitation of their application in complex geometries. The CFD analysis revealed greater accuracy and criticality in



high-suction zones, reinforcing the importance of numerical modeling in projects with unusual architectural forms and demonstrating the need for scale model tests in a wind tunnel.

**Keywords:** Coberturas Não Convencionais; Vento em Edificações; ABNT NBR 6123; Dinâmica dos Fluidos Computacional

<sup>1</sup> Eng. Civil, D.Sc., Professor, Departamento de Eng. Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Poto Alegre, RS, Brasil.

<sup>2</sup> Eng. Engenharia Civil, D.Sc., Professor, Programa de Pós graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Passo Fundo, RS, Brasil

## 1 INTRODUÇÃO

A elaboração de projetos estruturais para uma ampla gama de formas arquitetônicas é uma realidade que impõe desafios significativos à engenharia de estruturas. Nesse contexto, a engenharia do vento ganha destaque, dadas as inúmeras variáveis e incertezas que definem o comportamento estático e dinâmico das estruturas, e a grande influência da geometria das edificações neste campo.

A norma brasileira ABNT NBR6123 [1], revisada e publicada em 2023, apresenta os métodos para a determinação das forças devidas ao vento em edificações, mas, inevitavelmente, se limita a algumas formas geométricas comuns, a partir das quais os projetos podem ser avaliados.

A prática mais comum para a determinação de velocidades do vento, pressões sobre vedações, e cargas totais induzidas pelo vento em edificações, é predominantemente realizada por meio de medições em túneis de vento de camada limite (Fig. 1). Estes ensaios simulam as características principais das condições de escoamento atmosférico e são amplamente aceitos (Stathopoulos [2], Blocken [3]). De fato, grande parte da informação sobre cargas de vento contidas em normas e códigos de prática construtiva foi obtida a partir de pesquisas que utilizaram essa modelagem física, a qual permite um grande controle sobre as condições de contorno e de teste para a avaliação de projetos (Blocken [3]).



Fig. 1 - Fotografias dos túneis de vento Prof. Joaquim Blessmann/UFRGS (esquerda) e Prof. Jacek Piotr Gorecki/UNNE (direita). Fonte: Loredo-Souza *et al.* [4].

Contudo, segundo Stathopoulos [2], a pesquisa em túneis de vento de camada limite possui suas próprias limitações, as quais incluem, mas não se restringem a: (i) incapacidade de modelar satisfatoriamente os impactos de escoamentos com vórtice, como tornados, e certos tipos de frentes de rajada, como downbursts; (ii) as restrições impostas pelo número de Reynolds que afetam a precisão na modelagem de escoamentos sobre superfícies curvas ou de escoamentos no interior de edificações, como a ventilação natural ou a difusão de poluentes em recintos parcialmente abertos; e (iii) a dificuldade para simular com precisão escoamentos em camadas limite atmosféricas sob variadas condições de estabilidade (Loredo-Souza *et al.* [4]).

Além das análises em túnel de vento, outra prática comum é a utilização de valores aproximados baseados em formas geométricas padronizadas que sejam similares à forma em estudo. Embora essa prática necessariamente introduza ao projeto algum tipo de erro (ou incerteza adicional), pode auxiliar em estudos iniciais. Contudo, conforme ilustrado pelo trabalho de Cóstola *et al.* [5], essa prática exige cuidado, pois pode introduzir erros significativos, a depender das hipóteses adotadas para extrapolação.

Assim, justifica-se a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) como um complemento promissor para superar as limitações impostas pelos métodos citados anteriormente, nos casos envolvendo geometrias complexas ou não padronizados.

A engenharia do vento computacional, que trata da aplicação de metodologias de CFD em problemas clássicos de engenharia do vento e aerodinâmica de edificações, tem desenvolvido soluções numéricas com potencial para contornar as restrições dos túneis de vento (Blocken [2]). Contudo, a precisão e a confiabilidade das simulações de CFD ainda são uma preocupação, e estudos de verificação e validação da solução costumam ser imperativos (Blocken [3], e Blocken [6]).

Segundo Blocken [3], os resultados da CFD podem ser muito sensíveis a uma ampla gama de parâmetros computacionais, incluindo o modelo de turbulência, a discretização do problema (malha), e as condições de contorno. Modelos RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes), embora amplamente utilizados devido ao menor custo computacional, podem ter deficiências em regiões de alta vorticidade ou para a modelagem de características transientes do campo de fluxo, como separação e derramamento de vórtices. Por outro lado, modelos LES (Large Eddy Simulation – ou Simulações de Grandes Escalas) oferecem uma performance intrinsecamente superior na resolução de grandes escalas de turbulência, mas com um custo computacional significativamente maior, tornando-os muitas vezes inviáveis para aplicações práticas que exigem simulações para múltiplas direções de vento. Portanto, na maioria das vezes é crucial a validação dos resultados da CFD com dados experimentais confiáveis (Fig. 2).

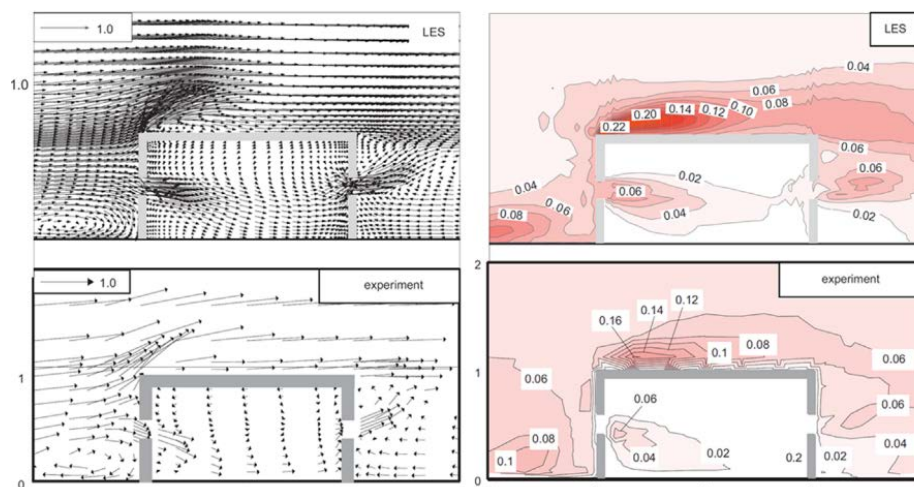


Fig. 2 – Exemplo que ilustra vetores de velocidade obtidos por análise tipo LES (esquerda) e distribuição da energia cinética de turbulência (direita), ambos em comparação a resultados obtidos através de análise em túnel de vento. Fonte: Hu *et al.* [7].

Outro aspecto intrínseco à aplicação de modelos de CFD é o fato de que a sua aplicação requer um entendimento claro dos princípios da mecânica dos fluidos e das técnicas computacionais envolvidas, sob risco de uma avaliação incorreta ou de se considerar erros significativos nos resultados.

Assim, para ilustrar as ideias e implicações das análises simplificadas sobre um exemplo de projeto com cobertura não atendido pela norma brasileira, este trabalho apresenta uma análise crítica a respeito da

obtenção das forças devidas ao vento em um galpão de planta retangular com telhado poligonal semelhante a uma geometria tipo gambrel, com duas águas para cada lado (Fig. 3).

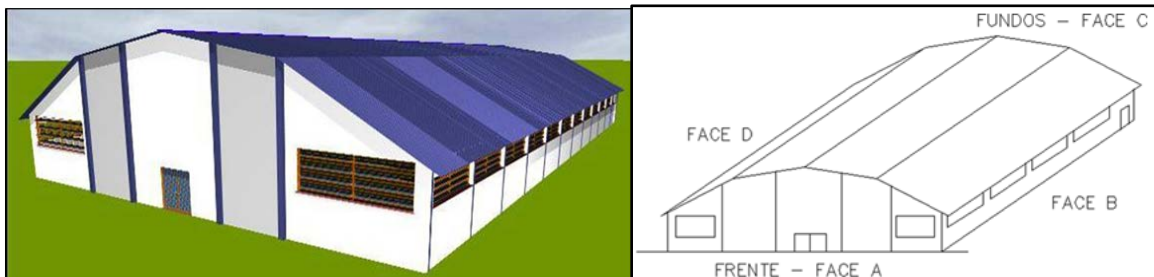


Fig. 3 – Perspectiva do galpão a ser analisado, e identificação das superfícies laterais.

A análise em questão é feita através de comparações entre extrapolações possíveis de modelos contidos na norma ABNT NBR6123:2023, e de análise computacional de CFD a partir do Método dos Volumes Finitos realizado a partir do pacote comercial ANSYSFluent, com uma abordagem RANS e modelo  $k-\omega$  SST (Shear Stress Transport – Menter [8]) de turbulência para a obtenção dos coeficientes de pressão em torno da edificação.

## 2 METODOLOGIA

O presente estudo é dividido em duas análises básicas, uma analítica a partir de métodos apresentados na ABNT NBR6123:2023, e outra numérica realizada através do Método dos Volumes Finitos. Ambas as análises são apresentadas a seguir.

### 2.1 Esforços devidos ao vento segundo a ABNT NBR6123:2023

O cálculo das forças devidas ao vento para o galpão a ser analisado, segundo a norma, é dado pela expressão 1, que é função da pressão dinâmica ( $q$ ), do coeficiente aerodinâmico ( $C$ ), da área de atuação da respectiva pressão ( $A$ ), e do fator de vizinhança ( $f_v$ ).

$$F = q \cdot C \cdot A \cdot f_v \quad (1)$$

A pressão dinâmica  $q$  é determinada conforme as expressões 2 e 3, a partir da velocidade básica do vento ( $V_0$ ), e dos fatores  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ , além da massa específica do ar, constante para todos os efeitos aqui tratados (se adotada como  $1,226 \text{ kg/m}^3$ , com velocidades em  $\text{m/s}$ , a unidade da pressão  $q$  resulta em  $\text{N/m}^2$ ).

$$q = \frac{1}{2} \rho V_k^2 = 0,613 V_k^2 \quad (2)$$

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (3)$$

A velocidade básica do vento  $V_0$  é obtida a partir do mapa de isopleias apresentado pela norma, que define a velocidade de uma rajada de 3 segundos, a 10 metros acima do terreno, em campo aberto e plano, excedida em média uma vez a cada 50 anos. O fator  $S_1$  é um fator topográfico que permite considerar características do relevo do terreno, como áreas planas, taludes, morros ou vales profundos.

O fator  $S_2$  leva em conta o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno, e das dimensões da edificação. Por fim, o fator  $S_3$  é um fator baseado em conceitos probabilísticos, que considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação.

O coeficiente aerodinâmico  $C$ , utilizado para a determinação das forças devidas ao vento, é determinado a partir dos coeficientes de forma externa  $C_e$  e interno  $C_i$ , conforme a expressão 4, e contabiliza os efeitos aerodinâmicos associados à geometria da edificação, bem como sua permeabilidade (aberturas como juntas, frestas, espaços de ventilação, vãos de portas e janelas etc.).

$$F = q \cdot A \cdot (C_e - C_i) \quad (4)$$

Para a determinação do  $C_i$  em galpões (onde admite-se que a pressão interna seja uniformemente distribuída), é possível utilizar um método simplificado a partir de características como simetria e estanqueidade, ou calcular a partir das áreas de abertura e direção do vento. Em tais casos, o coeficiente de forma interno é tomado igual ao coeficiente de pressão interno  $C_{pi}$  calculado ou indicado pela norma.

Quanto à determinação do  $C_e$ , deve-se considerar a geometria da edificação. A norma apresenta parâmetros para telhados com uma água (integrados à edificação ou isolados), duas águas com cumeeira ou calha central (integrados à edificação ou isolados), além de telhados múltiplos com algumas condições específicas, e, por fim, apresenta ainda alguns valores de referência para coberturas curvas.

São apresentados nas Figs. 4 e 5, respectivamente, os parâmetros geométricos para a cobertura de duas águas com cumeeira, e a abóboda cilíndrica de seção circular.

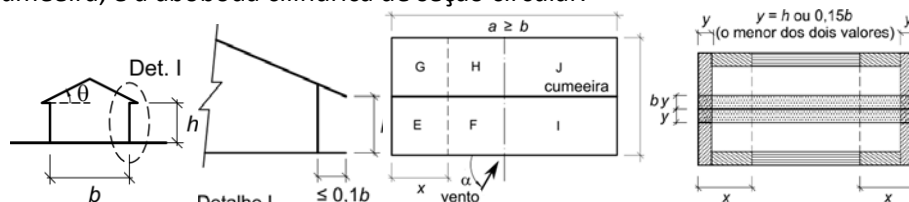


Fig. 4 – Parâmetros geométricos para cobertura em duas águas. Fonte: ABNT NBR6123:2023.

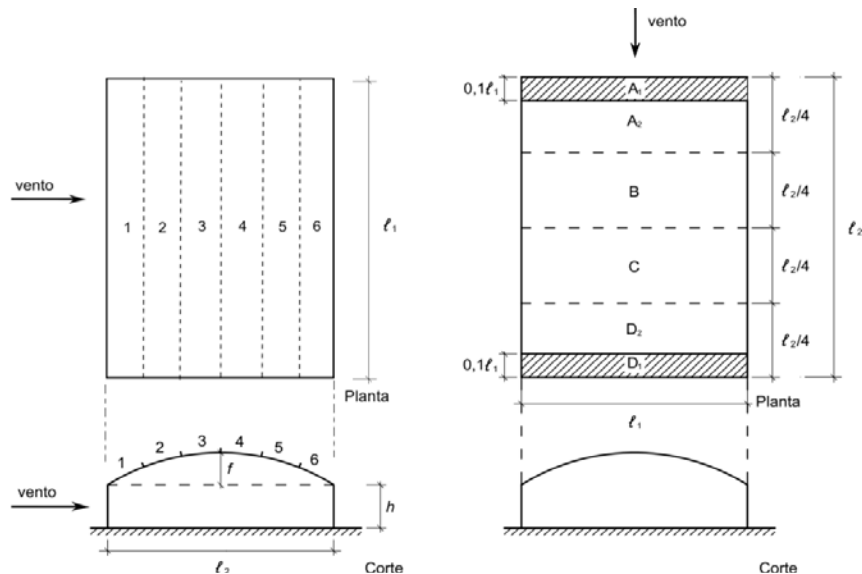


Fig. 5 – Parâmetros geométricos para cobertura curva. Fonte: ABNT NBR6123:2023.

Assim, com base nos parâmetros geométricos ilustrados, a norma apresenta os coeficientes de pressão e de forma externos para ambas as geometrias. De forma truncada para valores de interesse do trabalho atual, a Tabela 1 ilustra os coeficientes para a relação  $h/b < 0,5$  no caso da cobertura em duas águas, enquanto a Tabela 2 apresenta os coeficientes relacionados a  $f/l_2 = 0,2$ .

Tabela 1 – Coeficientes de pressão e de forma externos para telhados em duas águas.

Fonte: ABNT NBR6123:2023.

Altura Relativa	$\theta$	Valores de $C_e$ para				$C_{pe}$ médio			
		$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 0^\circ$					
		EFI	GHJ	EG	FH				
	0°	-0,8	-0,4	-0,8	-0,4	-2,0	-2,0	-2,0	—
	5°	-0,9	-0,4	-0,8	-0,4	-1,4	-1,2	-1,2	-1,0
	10°	-1,2	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,4		-1,2
	15°	-1,0	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,2		-1,2
	20°	-0,4	-0,4	-0,7	-0,6	-1,0			-1,2
	30°	0	-0,4	-0,7	-0,6	-0,8			-1,1
	45°	+0,3	-0,5	-0,7	-0,6				-1,1
	60°	+0,7	-0,6	-0,7	-0,6				-1,1

Tabela 2 – Coeficientes de pressão externa para telhados em curva e vento perpendicular à geratriz.

Fonte: ABNT NBR6123:2023.

$f/l_2$	$h/l_2$	$c_{pe}$ para a parte					
		1	2	3	4	5	6
1/5	0	+0,3	-0,3	-0,6	-0,7	-0,6	-0,2
	1/8	-0,5	-0,5	-0,7	-0,7	-0,5	-0,2
	1/4	-0,9	-0,6	-0,8	-0,8	-0,4	-0,2
	1/2	-1,2	-0,7	-0,9	-0,8	-0,3	-0,2
	1	-1,4	-0,8	-0,9	-0,9	-0,4	-0,4
	5	-1,8	-1,0	-1,1	-1,2	-0,8	-0,7

## 2.1 Esforços devidos ao vento a partir de simulação numérica (CFD)

A análise numérica foi efetuada através do software ANSYS Fluent, disponível na Escola de Engenharia da UFRGS, com uma abordagem bidimensional, e solução numérica para regime permanente (modelo RANS) através do Método dos Volumes Finitos.

A formulação utilizada para o acoplamento pressão-velocidade utiliza o algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations– Patankar[9]), e a discretização espacial do problema envolve uma malha 2D composta por elementos majoritariamente quadriláteros (com possíveis elementos triangulares para transições), com refinamento de borda aplicado às superfícies de maior interesse, e camada de inflação para melhor organização da malha nesta região.

É importante destacar que neste tipo de modelo, não há interação entre o fluido e a estrutura. Isto é, apenas o contorno da estrutura é modelado a fim de que sejam obtidos os parâmetros de escoamento do fluido através da mesma (campo de velocidades e pressão). A figura 6 ilustra a malha de elementos finitos utilizada na modelagem em questão. Mais informações sobre a geometria da edificação são apresentadas no item 2.3 deste trabalho.

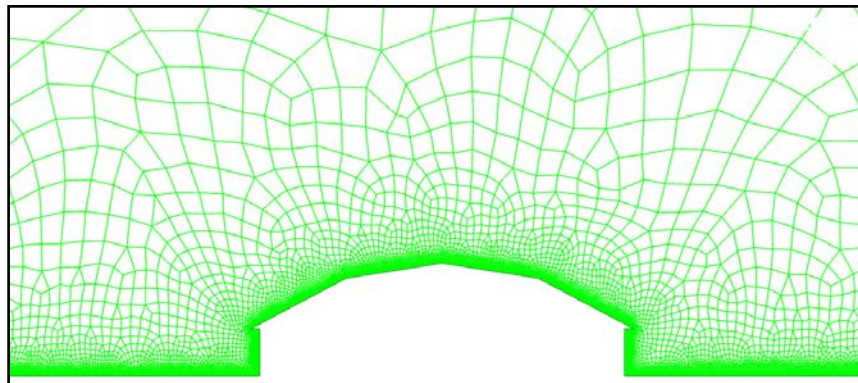


Fig. 6 – Discretização do modelo bidimensional analisado.

Ainda sobre o algoritmo, é importante destacar o modelo de turbulência utilizado do tipo  $k-\omega$  SST (Menter [8]), que apresenta bom desempenho para escoamentos externos com separação de fluxo, pois combina as vantagens do modelo  $k-\omega$  na camada limite e do modelo  $k-\epsilon$  (Launder e Spalding [10]) no escoamento livre, com parâmetros do fluido tratado como incompressível e com densidade do ar de  $1,23 \text{ kg/m}^3$ , e viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) de  $1,79 \times 10^{-5} \text{ kg/(m.s)}$ .

As condições de contorno do problema são ilustradas pela figura 7, de modo a ilustrar as camadas de entrada (com velocidade inicial determinada no item 2.3 deste trabalho), saída (pressão de referência nula), e de simetria (topo). O solo e a edificação são definidos com a condição de não deslizamento, e uma constante de rugosidade 0,5.

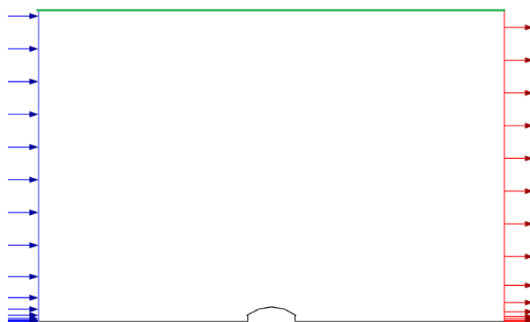


Fig. 7 – Condições de contorno.

### 2.3 Edificação analisada

O exemplo ilustrativo deste trabalho se refere a um galpão para usos gerais, com vão simples e fechamento de alvenaria, e cobertura em poligonal, conforme ilustrado pela figura 3. Os pórticos são treliçados, e espaçados a cada 5m, sendo o galpão com 60m de comprimento e 30m de largura, conforme ilustrado nas Figuras 8 e 9.

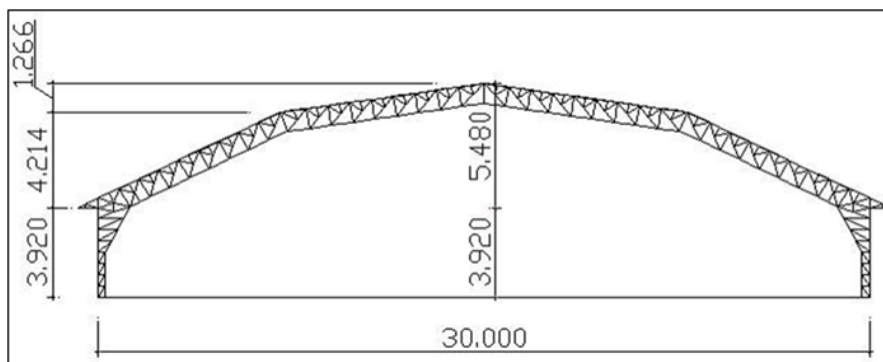


Fig. 8 – Pórtico típico da estrutura.

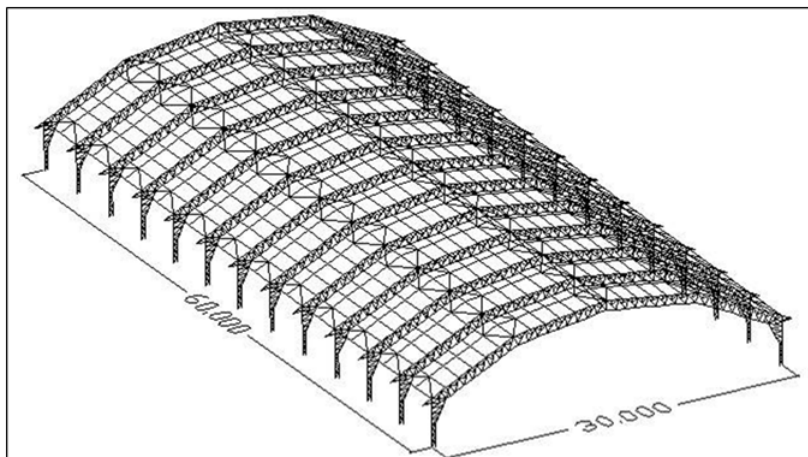


Fig. 9– Estrutura em perspectiva.

Além das dimensões apresentadas, também são necessários, para a determinação do coeficiente de pressão interna, as áreas das faces e suas respectivas aberturas. A figura 3 (direita) nomeia as quatro faces laterais da edificação, cujas áreas são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 – Áreas das superfícies laterais e respectivas aberturas.

	Face A	Face B	Face C	Face D
Área Total (m <sup>2</sup> )	230,6	260,2	230,6	260,2
Área de Aberturas (m <sup>2</sup> )	29,5	68,4	0	66,2

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Parâmetros básicos de norma

Algumas hipóteses são adotadas para fins ilustrativos, de modo que seja possível determinar os parâmetros apresentados no item 2.1 deste trabalho:

- Parâmetro  $S_1 = 1$ : Terreno plano, ou fracamente acidentado;
- Parâmetro  $S_2$ (na altura da cobertura  $z=9,4$  m) = **0,79**: Classe C, categoria IV;
- Parâmetro  $S_3 = 1$ : Grupo 3.
- Velocidade básica  $V_0 = 45$  m/s: Mapa de isopleias;
- Velocidade característica do vento ( $V_k$ ), conforme a Eq. 3:  $V_k = 35,55$  m/s;
- Pressão de obstrução ( $q$ ) conforme a Eq. 2:  $q = 774,71$  N/m<sup>2</sup>.

#### 3.2 Coeficientes de forma para as paredes ( $C_e$ ) e coeficiente de pressão interno ( $C_{pi}$ )

Os coeficientes de forma externos para as paredes são extraídos diretamente da ABNT NBR 6123:2023, para o caso de planta retangular, com os parâmetros  $h/b < 0,5$ , e relação  $a/b = 2$ . Os resultados são apresentados na figura 10.

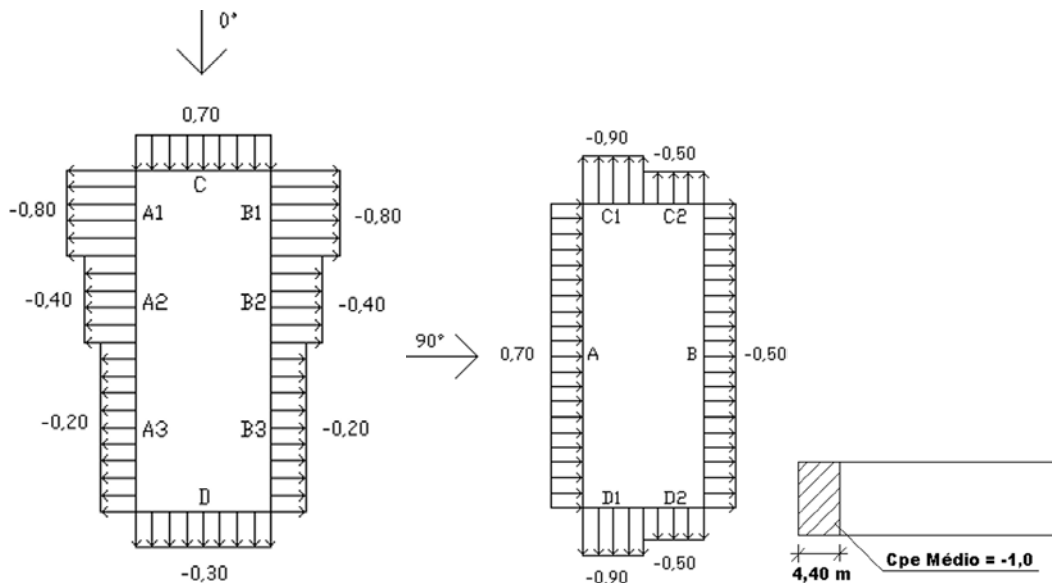


Fig. 10 – Coeficientes de forma para as paredes da edificação.

É possível a aplicação do método detalhado da ABNT NBR6123:2023 para a determinação do coeficiente de pressão interno, que é baseado na hipótese de que massa de ar que entra na edificação deve ser a mesma que sai, ou seja, o somatório da vazão ( $Q$ ) em todas as aberturas é nulo, o que permite determinar com boa precisão o coeficiente de pressão interno, uma vez conhecidos os coeficientes de pressão médios na periferia das aberturas.

Além disso, várias hipóteses podem ser estudadas, como diferentes áreas de abertura (portas e/ou janelas abertas ou fechadas), o que deve conduzir a uma hipótese crítica para  $C_{pi}$  em diferentes direções do vento.

A partir deste estudo, chegou-se aos valores de  $C_{pi} = (+0,7; - 0,57)$ , para vento a  $0^\circ$ , e  $C_{pi} = (+0,7; - 0,53)$  para vento a  $90^\circ$ .

### 3.2 Coeficientes de forma para a cobertura ( $C_e$ ) e vento a $90^\circ$ - Método aproximado a partir da norma

Algumas hipóteses aproximadas podem ser elencadas a partir dos tipos de cobertura apresentados pela norma ABNT NBR6123:2023, conforme ilustram as figuras 11.a-c.

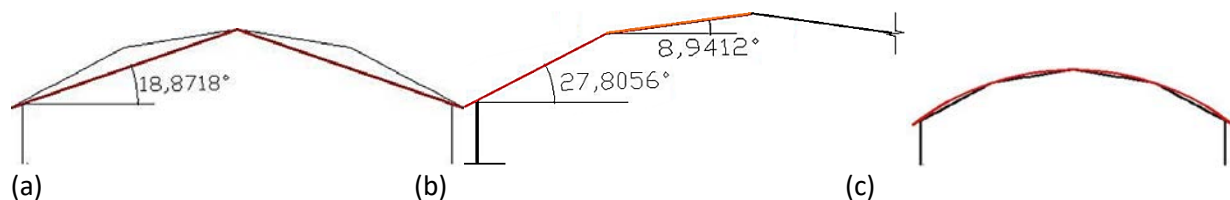


Fig. 11 – Hipóteses aproximadas: (a) cobertura em duas águas com mesma altura da cumeeira; (b) Coberturas com duas águas com duas inclinações iguais às dos trechos da poligonal; e (c) cobertura em arco sobreposta à poligonal.

Segundo essas hipóteses, para o vento a 90° (perpendicular à geratriz do arco), é possível obter os seguintes coeficientes de forma externos a partir das tabelas apresentadas na norma para cada um dos casos (Tabelas 1 e 2 deste trabalho), ilustrados nas figuras 12.a-c.

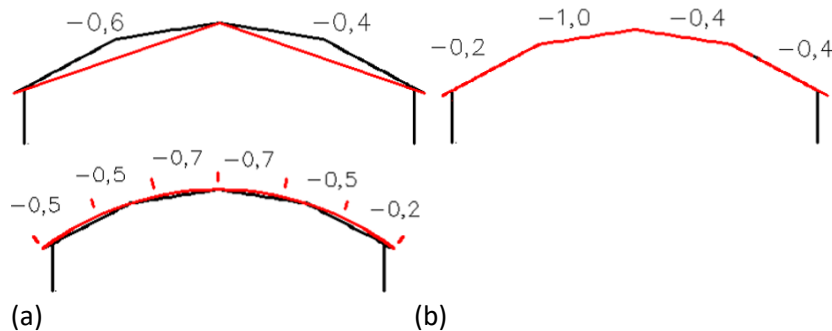


Fig. 12 – Coeficientes de forma para as hipóteses aproximadas para cada caso: (a) duas águas inscritas; (b) duas águas com cada inclinação da poligonal; e (c) arco.

Outro aspecto ainda relevante para a análise em questão trata da incidência oblíqua do vento, que nos casos de cobertura em duas águas deve ser atendido pelos coeficientes  $C_{pe}$  médio nas regiões de desprendimento de vórtices (alta sucção) conforme área de incidência e valores descritos na Tabela 1, e no caso de cobertura em arco é atendido pelo coeficiente  $C_e = -1,8$  nas áreas A1 e D1 conforme Fig. 5.

### 3.3 Coeficientes de pressão para vento a 90°- Análise numérica

Conforme descrito no item 2.1, foi realizada a simulação do vento à 90°, com base nos parâmetros físicos e de modelagem apresentados, e velocidade inicial característica do vento determinada no item 3.1.

A figura 13 ilustra os resultados obtidos para a velocidade e direção do vento em torno da edificação, de onde se notam velocidades maiores próximas aos vértices mais altos da cobertura a barlavento, além dos(esperados) vórtices criando zonas de sucção (evidenciadas pelas direções do fluxo) a sotavento.

A figura 14, por sua vez, ilustra os resultados de energia cinética da turbulência, a partir da qual se observa mais facilmente as zonas de maior turbulência associadas aos vórtices, onde também é esperado que ocorram as maiores flutuações de velocidades.

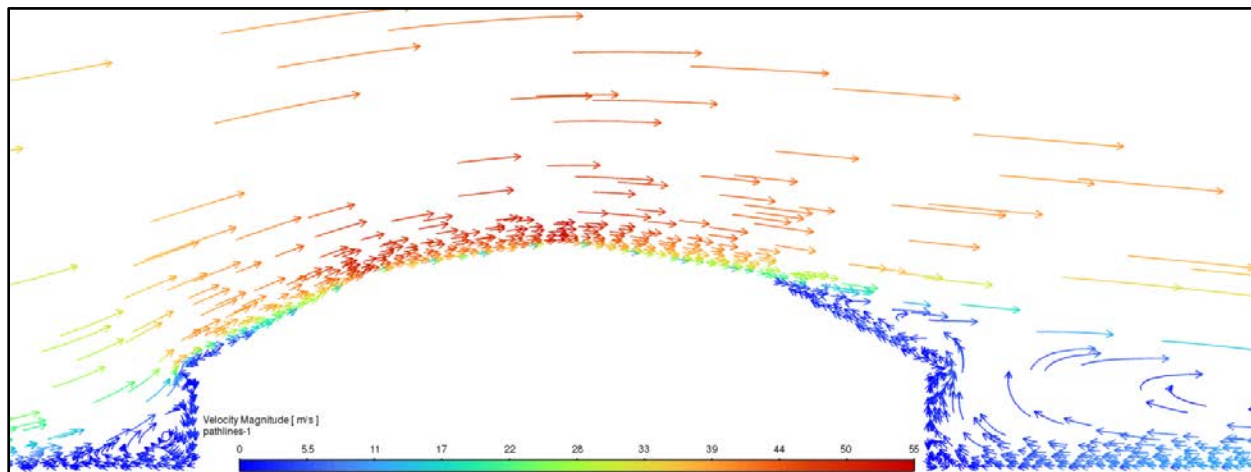


Fig. 13 – Linhas de fluxo e velocidade do ar em torno da edificação.

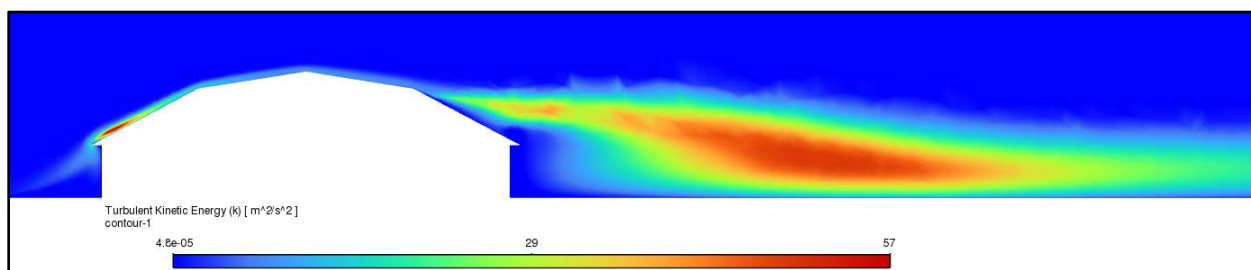


Fig. 14 – Energia cinética da turbulência ( $m^2/s^2$ ).

Finalmente, a figura 15 apresenta os resultados do coeficiente de pressão, que é determinado localmente para cada valor de pressão obtido, em função de pressão, velocidade e densidade do fluido de referência.

A partir desse resultado, é possível observar mais claramente que as regiões dos dois vértices mais altos à barlavento, de fato, apresentam elevada sucção. Também as duas águas superiores, com menor inclinação em relação à horizontal, sofrem sucção significativa, enquanto as duas águas mais baixas e com maior inclinação alternam entre sucção baixa à barlavento e valores de sucção mais próximos de zero à sotavento.

Evidentemente, para que seja possível avaliar adequadamente esses resultados, é necessário relacioná-los com as áreas da ABNT NBR6123:2023 que são características para zonas de elevada sucção ( $C_{pe}$  médio conforme Tabela 1), e avaliar os valores médios para as regiões for dessas zonas. Entretanto, é também necessária uma aproximação neste quesito para que essas regiões se apliquem aos vértices e cumeeira da cobertura em poligonal estudada. É adotada, portanto, uma região para  $C_{pe}$  médio de cobertura tipo duas águas próxima aos beirais (distância 'y' na Fig. 4), que neste caso resulta 3,92 m (dimensão h), e para cada uma das cumeeiras, o valor de 2 vezes  $0,1 \cdot a'$ , onde  $a'$  é a dimensão de um tramo simétrico nos casos de coberturas com repetição (tipo shed, ou múltiplos tramos de duas águas,

por exemplo), que no caso analisado resultaria em 3 m (centralizado em ambos os vértices e na cumeeira).

Assim, ilustra-se o gráfico da figura 16, que apresenta os valores de coeficiente de pressão obtidos ao longo da linha poligonal da cobertura (onde o eixo x é a posição local de cada linha que compõe o contorno da cobertura). Neste gráfico, é possível identificar cada um dos tramos que compõem a poligonal, de barlavento a sotavento. Além disso, estão destacadas com sombreamento amarelo as duas regiões próximas aos beirais, com largura de 3,92 m (altura  $h$  – Fig. 8), e com sombreamento azul as três regiões de vértices da poligonal (o central é a cumeeira), com largura de 3 m cada ( $2 \cdot 0,1 \cdot a' = 2 \cdot 0,1 \cdot 15 = 3$ ).

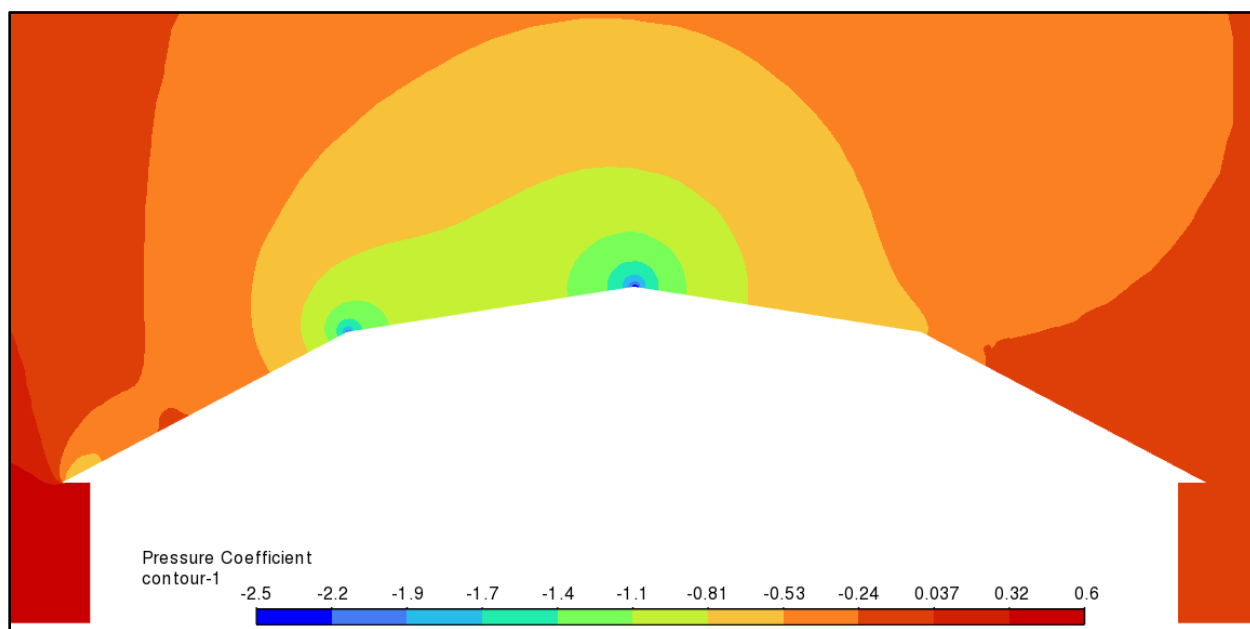


Fig. 15 – Coeficientes de pressão calculado a partir dos valores de referência (itens 2.1 e 3.1).

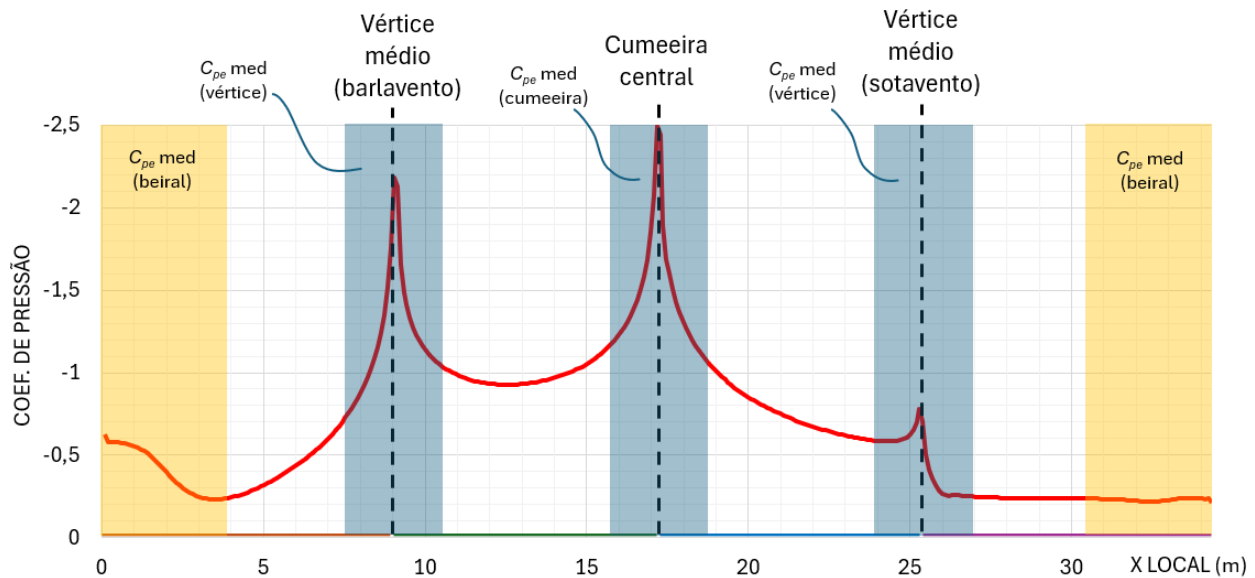


Fig. 16 – Coeficientes de pressão ao longo do comprimento da poligonal da cobertura, e respectivas zonas de alta sucção.

A separação dos trechos de elevada sucção é essencial para que seja possível a comparação com os coeficientes de forma externos  $C_e$  da Fig. 12. Assim, resultam os valores médios para os coeficientes de pressão de cada trecho reto da cobertura conforme ilustrado na Fig. 17.

Vale comentar ainda que os valores dos coeficientes de forma  $C_{pe}$  médio para as regiões de elevada sucção (Tabela 1) não são diretamente comparáveis com os picos dos coeficientes de pressão obtidos via análise numérica (Fig. 16), nem tampouco são valores médios dessas regiões. Contudo, como não são valores utilizados para dimensionamento da estrutura principal analisada, não serão abordados neste trabalho.

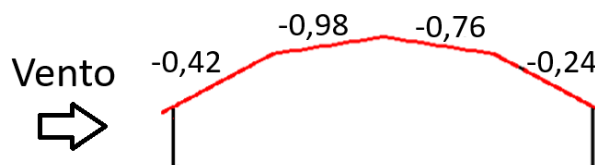


Fig. 16 – Coeficientes de pressão médio para cada trecho conforme análises numéricas

#### 4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram avaliadas duas formas distintas para a obtenção dos coeficientes de forme externo para uma cobertura em poligonal não tratada diretamente pela ABNT NBR6123:2023. A primeira forma diz respeito à extrapolação de geometrias tratadas pela norma, com base em dimensões semelhantes, buscando-se valores minimamente conservadores como referência. Neste contexto, foram comparados os valores de coeficientes de forma externos ( $C_e$ ) obtidos a partir de três hipóteses:

Hipótese 1: Uma cobertura em duas águas com altura da cumeeira coincidente com a altura da cumeeira da cobertura em poligonal (Fig. 12.a);

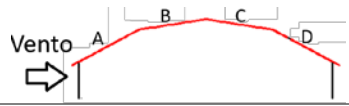
Hipótese 2: Tomando-se os coeficientes de forma para cobertura em duas águas, individualmente para a inclinação de cada trecho distinto, ignorando a formação conjunta com 4 tramos em vez de 2 (Fig. 12.b);

Hipótese 3: Assumindo um arco contornando a poligonal com pontos coincidentes nos vértices (Fig. 12.c).

A segunda forma avaliada é por meio de uma análise numérica (CFD), sem considerar a interação do fluido com a estrutura, e com foto somente na obtenção dos coeficientes de pressão externo médios para cada trecho, excluídas as regiões de alta sucção mapeadas a partir de critérios da própria norma ABNT NBR6123:2023 (Fig. 16).

Para uma interpretação mais clara, a Tabela 4 ilustra os coeficientes de forma extrapolados a partir de cada hipótese listada acima, assim como os coeficientes de pressão médios obtidos numericamente.

Tabela 4 – Resumo dos resultados de coeficiente de pressão para vento a 90º.



	Hipótese 1	Hipótese 2	Hipótese 3	Análise numérica
<b>Trecho A</b>	-0,6	-0,2	-0,5	-0,42
<b>Trecho B</b>	-0,6	-1,0	-0,7	-0,98
<b>Trecho C</b>	-0,4	-0,4	-0,7	-0,76
<b>Trecho D</b>	-0,4	-0,4	-0,5	-0,24

Este trabalho investiga a aplicabilidade da norma ABNT NBR 6123:2023 em geometrias de coberturas não convencionais, por meio da comparação entre extrapolações baseadas em modelos normativos e resultados obtidos por Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Um galpão com cobertura poligonal tipo gambrel foi analisado, com avaliação de coeficientes de pressão em diferentes trechos do telhado. Três hipóteses de extrapolação normativa foram consideradas e comparadas com os resultados de uma simulação numérica RANS-kw SST em regime permanente. Os resultados evidenciam que nenhuma das extrapolações normativas avaliadas apresentou valores conservadores para todos os trechos da cobertura, destacando a limitação de sua aplicação em geometrias complexas. A análise CFD revelou maior precisão e criticidade nas zonas de alta sucção, reforçando a importância da modelagem numérica em projetos com formas arquitetônicas não usuais.

Assumindo todos os efeitos desprezados nas extrapolações realizadas a partir das hipóteses 1 a 3 avaliadas, e que, mesmo de forma aproximada, são contabilizadas pela análise numérica, é razoável admitir que os resultados oriundos da análise numérica sejam mais precisos. Neste caso, é interessante observar que nenhuma das hipóteses de extrapolação conduziu a coeficientes de pressão conservadores para mais do que um dos trechos.

Para os dois trechos com maiores solicitações de sucção (trechos B e C), a hipótese 2 conduziu a um valor próximo ao numérico para o trecho B, mas conduziu a um valor inferior para o trecho C, e a hipótese 3 levou a um valor próximo para o Trecho C, mas um valor inferior para o trecho B.

Outra observação interessante é de que todas as hipóteses conduziram a valores inferiores em relação aos numéricos, para pelo menos 2 (dois) trechos de cobertura cada, e apenas no trecho D os resultados numéricos são inferiores a todas as hipóteses avaliadas.

Com isso, torna-se claro que a extrapolação dos coeficientes de forma fornecidos pela norma ABNT NBR 6123:2023 para algumas geometrias de coberturas, quando aplicada a outros tipos de geometria, pode não garantir resultados seguros. Em tais casos, a principal solução a ser avaliada deve ser uma validação experimental em túnel de vento, e, na impossibilidade desta, buscar uma avaliação cuidadosa por meio de simulações numéricas de dinâmica dos fluidos computacional.

Além disso, é importante comentar que no presente trabalho somente o vento na direção transversal à edificação (90º) foi avaliado, enquanto numa análise completa também a direção longitudinal e variações oblíquas devem ser estudadas. Contudo, tais resultados já são suficientes para a conclusão sobre a inviabilidade das extrapolações representadas pelas hipóteses avaliadas, além de ser necessário recomendar a necessidade de estudos em túnel de vento que permitam calibrar modelos computacionais.

## REFERÊNCIAS

- 1 ABNT NBR 6123 –Associação Brasileira de Normas Técnicas–Forças devidas ao vento em edificações, 2ª Ed., Versão corrigida, 08.04.2025, Rio de Janeiro-RJ.
- 2 Stathopoulos T. Computational wind engineering: Past achievements and future challenges. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1997.V. 67. P. 509 – 532.
- 3 Blocken B. 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Elsevier B.V.; 2014.V.129, p. 69–102.
- 4 Loredou-Souza, A., Beatriz Camaño Schettini E, José Paluch M. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento.Proceedings of ETT 2004 – Escola de Primavera de Transição e Turbulência, ABCM, Porto Alegre – RS, Brazil.
- 5 Cóstola D, Blocken B, Ohba M, Hensen JLM. Uncertainty in airflow rate calculations due to the use of surface-averaged pressure coefficients. Energy and Buildings. 2010 Jun; V42(6) P. 881–888.
- 6 Blocken B. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. Building and Environment. 2015 Sep 1; V. 91:219–245.
- 7 Hu CH, Ohba M, Yoshie R. CFD modelling of unsteady cross ventilation flows using LES. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2008 Oct; V. 96(10–11):1692–1706.



8 Menter, F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*. 1994 Aug; V. 32 (8): 1598–1605.

9 Patankar, S. V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Hemisphere Publishing Corporation. McGraw-Hill Book Company; 1980.

10 LAUNDER, Brian Edward; SPALDING, Dudley Brian. The numerical computation of turbulent flows. *Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion*. Pergamon, 1983. p. 96-116.