



Tema: Construção Leves Estruturadas em Aço

ANÁLISE NUMÉRICA DOS EFEITOS DAS AÇÕES DO VENTO EM EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS METÁLICOS

Jennifer Gonçalves¹

Cilmar Baságlia²

João A. Requena³

Resumo

Para uma rigorosa avaliação da ação do vento em um edifício industrial metálico é necessário obter informações sobre a distribuição das pressões do vento em toda a edificação e considerar as interferências aerodinâmicas dos efeitos do espaçamento de outros edifícios na vizinhança. No entanto, é possível obter informações sobre a velocidade do vento e coeficientes de pressão por meio de análises numéricas. O objetivo deste trabalho é determinar e avaliar os valores dos coeficientes de pressão nas paredes e coberturas de edifícios industriais metálicos exibindo diversas condições de vizinhança – em particular, o espaçamento entre galpões. As análises são realizadas por meio do programa comercial ANSYS, considerando a interação fluido-estrutura, e alguns dos resultados obtidos são comparados com os valores fornecidos pela NBR 6123:1988.

Palavras-chave: Ações do vento; Coeficientes de pressão; Edifícios industriais metálicos; Análise numérica da dinâmica dos fluidos.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECTS OF WIND ACTIONS ON INDUSTRIAL STEEL BUILDINGS

Abstract

For the assessment of wind effects on an industrial steel building, it is necessary to obtain information about the wind pressure distributions on the whole building and consider the aerodynamic interferences of the spacing effects of other buildings in the vicinity. However, it is possible to find the wind velocities, pressures and, therefore, force coefficients by means of numerical analyses. The objective of this work is to assess the pressure and force coefficient values due the wind action in the walls and roofs of steel industrial buildings exhibiting several vicinity conditions – in particular, spacing between buildings. The analyses are carried out using commercial ANSYS software, considering the interaction fluid-structure, and the some results are compared with values provided by NBR 6123:1988.

Keywords: Wind actions; Wind force coefficients; Industrial steel buildings; Computational fluid dynamics.

¹ Engenheira Civil, Mestranda, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

² Engenheiro Civil, Doutor, Professor Doutor, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

³ Engenheiro Civil, Doutor, Professor Associado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A maioria dos galpões metálicos são utilizados para fins comerciais e industriais, como: centro de distribuições, depósitos, fábricas, estacionamentos, hangares entre outros – então, devido a sua utilização, exige-se que esse tipo de edifício seja projetado para vencer grandes vãos. Para suprir a necessidade de vencer esses vãos, a maioria desses galpões são projetados com estrutura metálica leve (geralmente com perfis de paredes finas) e localizados em zonas industriais (com baixo fator de ocupação). Esses fatores faz com que muitas vezes a ação do vento seja um fator determinante no dimensionamento.

No Brasil, a norma que estabelece os critérios para determinar as ações do vento é a NBR 6123 (ABNT NBR 6123:1988) [1], Forças Devidas ao Vento em Edificações. Essa norma estabelece os critérios de acordo com o tipo de estrutura a ser analisada – em particular, como sua forma geométrica, localização, aberturas de janelas e dimensões. Um dos principais fatores para a determinação da ação do vento é a localização do edifício, tanto para determinar a velocidade básica que a estrutura estará exposta, como para estabelecer os critérios de rugosidade do terreno, onde a existência ou não, bem como, a altura de obstáculos (*e.g.*, outros edifícios) influenciam na velocidade característica de impacto.

Considerando que a maioria dos galpões industriais são construídos em zonas industriais e que na maioria dos casos outros galpões são construídos ao redor, o objetivo desse trabalho é determinar os coeficientes de pressão de um galpão industrial levando em consideração os efeitos de vizinhança, para isso será realizada uma simulação numérica utilizando o software ANSYS-CFX [2] para simular um túnel de vento para os galpões em questão. Como resultado, pretende-se fornecer subsídios para profissionais da área de Engenharia de Estruturas sobre o comportamento da ação do vento e dos coeficientes de pressão, em particular, avaliando os efeitos de vizinhança entre galpões.

1.1 Coeficientes de Pressão

Considerando o objeto da Figura 1, mergulhado em um fluido em movimento uniforme com velocidade V_0 , observa-se que o objeto desvia as linhas de fluxo do fluido. Em alguns pontos do objeto, algumas linhas de fluxo incidem perpendicularmente no objeto e se estagnam, nesses pontos temos a pressão de obstrução q . Assim, considerando um ponto p na superfície do objeto e aplicando o Princípio de Bernoulli é possível determinar a pressão efetiva (ΔP_p), como:

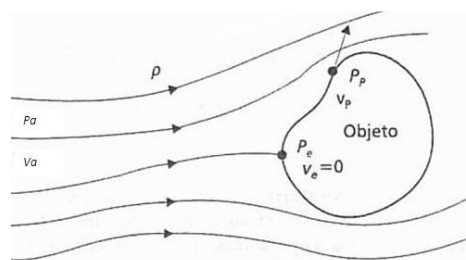


Figura 1 - Linhas de fluxo no entorno de um objeto
Fonte: Pitta [3]

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

$$\Delta P_p = P_p - P_0 = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - V_p^2) \quad (1)$$

$$\Delta P_p = \frac{1}{2} \rho V_0^2 \left(1 - \frac{V_p^2}{V_0^2}\right) \quad (2)$$

$$\Delta P_p = q \left(1 - \frac{V_p^2}{V_0^2}\right) \quad (3)$$

$$C_p = \left(1 - \frac{V_p^2}{V_0^2}\right) \quad (4)$$

$$\Delta P_p = C_p q \quad (5)$$

Denominando C_p como coeficiente de pressão, quando $C_p > 0$ ocorre sobrepressão, e quando $C_p < 0$ tem-se sucção. O valor máximo que pode ocorrer de sobrepressão em uma estrutura é igual ao valor de obstrução, ou seja, $C_p = 1$. Já no caso de sucções, em certas regiões, ela pode ser muito elevada, chegando a atingir 6 a 8 vezes a pressão de obstrução (e.g, Manfrim [4]).

Se o objeto analisado não for totalmente fechado (assim como ocorre em uma edificação), independentemente da posição da abertura, em todas as superfícies que compõe o objeto ocorrerá pressões do lado externo e interno.

Para o ponto e , ilustrado na Figura 2, situado na face externa do objeto e para o ponto i , situado na face interna, têm-se respectivamente:

$$C_{pe} = \frac{\Delta P_e}{q} \quad (6)$$

$$C_{pi} = \frac{\Delta P_i}{q} \quad (7)$$

Assim, a diferença de pressão total é dada por

$$\Delta P_p = (C_{pe} - C_{pi})q \quad (8)$$

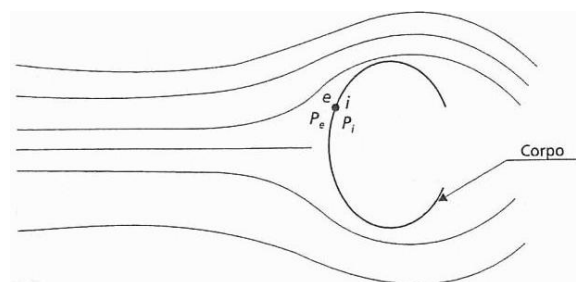


Figura 2 - Linhas de fluxo no entorno de um objeto com abertura
Fonte: Pitta [3]

Para os efeitos aerodinâmicos, a ABNT NBR 6123:1988 estabelece no item 6 os valores dos coeficientes de pressão aerodinâmicos. Os coeficientes de pressão externos (C_{pe}) são determinados em função da geometria do edifício analisado, já os coeficientes de pressão internos (C_{pi}), os quais são causados devido a permeabilidade das edificações, são determinados através de valores pré-estabelecidos, também é possível determinar os coeficientes de pressão interna através do Anexo D da referida norma.

1.2 Efeitos de Vizinhança

Segundo BLESSMAN [5], os coeficientes aerodinâmicos variam muito com as condições de vizinhança. Um obstáculo natural ou artificial existente nas proximidades de uma edificação ou elemento estrutural pode afetar consideravelmente o campo aerodinâmico e, conseqüentemente, os esforços exercidos pelo vento. Algumas vezes esta alteração é benéfica, outras vezes não.

As alterações causadas pelos efeitos de vizinhança podem causar aumento das forças do vento por efeito Venturi, por deflexão do vento na direção vertical e por turbulência da esteira. O efeito Venturi acontece quando as edificações vizinhas causam o afunilamento do vento, conseqüentemente há um aumento da aceleração do fluxo de ar, geralmente ocorre em edificações muito próximas. A alteração da força do vento se dá por deflexão do vento na direção vertical, quando edificações altas defletem para baixo parte do vento incidente a barlavento, dessa maneira há um aumento da velocidade em zonas próximas ao solo, o que pode prejudicar as edificações mais baixas. No caso da alteração da força de vento por turbulência da esteira, uma edificação situada a sotavento de outra pode ser afetada devido a turbulência gerada na esteira da edificação de barlavento, podendo gerar efeitos dinâmicos (como o efeito de golpe) [1].

Apesar da ABNT NBR 6123:1988 indicar alguns fatores de majoração para considerar o efeito de vizinhança no anexo G, em muitas situações é necessário que sejam realizados ensaios em túnel de vento para avaliar as condições de vizinhança e as características do vento natural – porém, um ensaio que pode ser bastante oneroso.

1.3 Análise numérica – simulação de um túnel de vento utilizando o software Ansys

Através da aplicação da fluidodinâmica computacional é possível analisar a interação fluido estrutura por meio de equações diferenciais. Dessa maneira é possível simular um túnel de vento e analisar qual o efeito da ação do vento na estrutura em questão. No presente trabalho propõe-se a utilização da ferramenta CFX do software ANSYS [2].

O ANSYS-CFX utiliza a técnica de volumes finitos aplicada à fluidodinâmica computacional (Computational Fluid Dynamics – CFD), com a qual é possível encontrar uma solução numérica para as equações diferenciais de Navier-Stokes (*e.g.*, Ferreira [6]).

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Ferreira [6] analisou por meio do CFD, utilizando a técnica de volumes finitos, a ação do vento em uma estrutura de casca de forma livre. Uma das maneiras de validar os resultados obtidos por esse autor foi simular uma cúpula conforme descrição do item E.2.1 – Cúpulas Sobre o Terreno da ABNT NBR 6123:1988, onde pode-se considerar que os resultados obtidos são bastantes satisfatórios. A Figura 5 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos através da análise via ANSYS-CFX e os valores apresentados pela ABNT NBR 6123:1988.

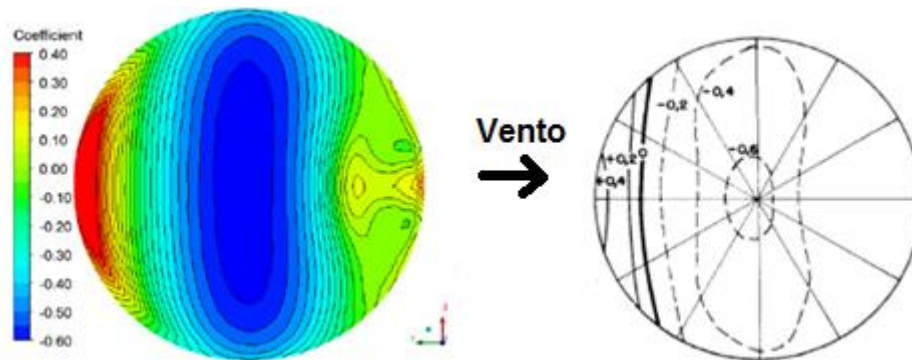


Figura 3 - Testes de convergência: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa da cúpula ($f/d = 1/4$), regime laminar (Ansys versus ABNT:NBR 6123:1988)
Fonte: Ferreira [6]

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise dos efeitos de vizinhança em edifício industrial, foram considerados os modelos descritos na Tabela 1. A Figura 4 apresenta as dimensões consideradas para o edifício em estudo.

Tabela 1 – Modelos Utilizados para análise

VARIÁVEIS	MODELO 01	MODELO 02	MODELO 03	MODELO 04	MODELO 05	MODELO 06	MODELO 07	MODELO 08
DISTÂNCIA ENTRE GALPÕES	-	-	5m	5m	10m	10m	15m	15m
INCIDÊNCIA DO VENTO	0º	90º	0º	90º	0º	90º	0º	90º

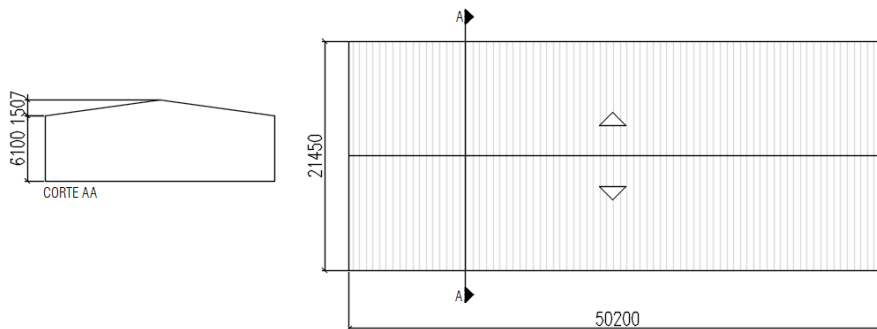


Figura 4 – Dimensões (mm) do edifício analisado

Após determinar a geometria do edifício, estabeleceram-se os critérios para a análise dos efeitos de vizinhança, no total foram considerados oito modelos, as Figuras 5 e 6 apresentam o modelo para um e dois edifícios industriais.

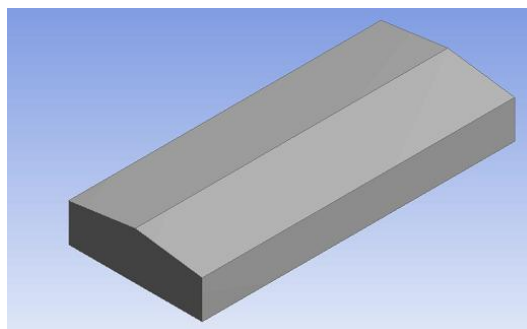


Figura 5 – Modelo com um edifício industrial

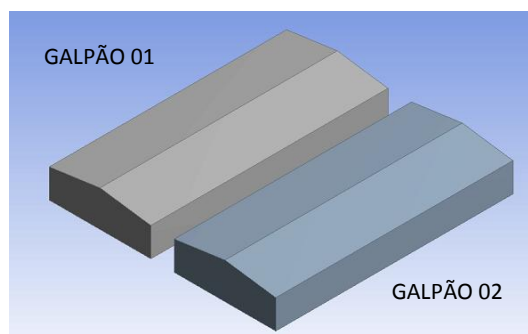


Figura 6 – Modelo com dois edifícios industriais para análise do efeito de vizinhança

Para simular o túnel de vento por meio do ANSYS-CFX foram consideradas as seguintes hipóteses a respeito do fluido e do escoamento:

- existência de apenas uma fase;
- fluido incompressível;
- escoamento laminar.

Ao iniciar a análise numérica no CFX, a primeira tarefa é definir a geometria e o túnel de vento. Para definir a geometria pode-se importar uma geometria feita em outro software, como o Autocad, ou desenhar a geometria no ANSYS, nesse caso, por se tratar de uma estrutura com geometria simples, optou-se por desenhar os edifícios no próprio software. Após essa modelagem, é preciso definir o túnel de vento – neste ponto, é importante destacar que Irwin [7] propõe que a obstrução máxima da área de projeção do modelo em relação à área transversal do túnel de vento não ultrapasse 10% para se evitar a interferência do fluxo entre o modelo e as paredes do túnel de vento. Para os modelos analisados, a maior área de obstrução em relação à área transversal do túnel é de aproximadamente 5%. Refere-se ainda que no módulo de geometria é preciso encapsular os elementos para se obter um volume por onde o ar será escoado. A Figura 7 ilustra o volume gerado no módulo de geometria dos modelos analisados.

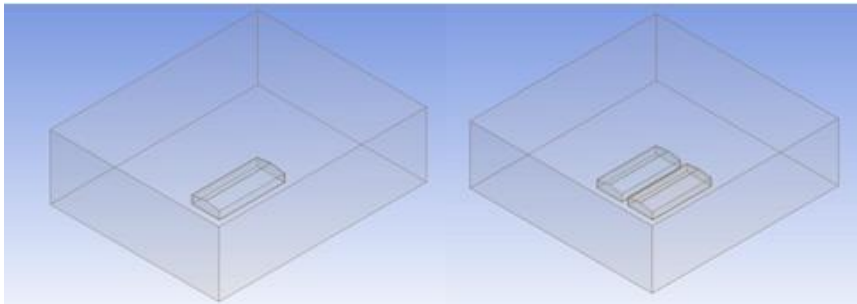


Figura 7 – Volume de contorno para os modelos analisados

Após definir a geometria, deve-se definir a malha para a aplicação do método dos volumes finitos. O elemento escolhido para gerar a malha foi o elemento tetraédrico, que segundo Galter [8] proporciona uma solução mais automatizada, com capacidade de adição de controles ou parametrizações para melhoramento em regiões críticas da análise. O refinamento da malha nas regiões críticas foi realizado por meio do controle FaceSizing e a camada limite foi definida utilizando o controle Infation. Para determinar os parâmetros da camada limite Galter [8] utilizou as seguintes equações:

$$\delta = 0,035 * Dh * Re^{-1/7} \quad (9)$$

Onde:

δ - Tamanho da camada limite;

Dh - Raio hidráulico;

Re – Número de Reynolds;

$$Dh = \frac{4 * A}{(2 * a) + (2 * b)} \quad (10)$$

$$Re = \frac{V * Dh}{\nu} \quad (11)$$

Onde:

A – Área Transversal do túnel de vento ao escoamento de ar;

a - Dimensão Horizontal da seção transversal do túnel de vento ao escoamento de ar;

b - Dimensão Vertical da seção transversal do túnel de vento ao escoamento de ar;

V – Velocidade de escoamento em m/s;

ν - Viscosidade cinemática do ar, considerada igual a 0,0000156m²/s.

A taxa de expansão é definida pela Equação 12 e o valor mínimo para o espaçamento da primeira subcamada é dada pela Equação 13:

$$\text{Taxa de expansão} = \left(\frac{\delta}{\Delta y}\right)^{1/14} \quad (12)$$

$$\Delta y = Dh * \sqrt{74} * (Re)^{-13/14} \quad (13)$$

A Tabela 2 mostra os valores das camadas limite para os modelos analisados e na Figura 8 é possível visualizar a malha resultante.

Tabela 2 – Cálculo da camada limite

CÁLCULO DA CAMADA LIMITE (Vento a 0º)					CÁLCULO DA CAMADA LIMITE (Vento a 90º)	
PARÂMETROS	MODELO 01	MODELO 03	MODELO 05	MODELO 07	PARÂMETROS	MODELO 02, 04, 06 e 08
a (m)	130	156,45	161,45	166,45	a (m)	160
b (m)	50	50	50	50	b (m)	50
A (m ²)	6500	7822,5	8072,5	8322,5	A (m ²)	8000
Dh (m)	72,22	75,78	76,35	76,90	Dh (m)	76,19
Re	92592592,59	97155206,14	97889420,42	98589713,97	Re	97680097,68
δ (m)	0,18	0,19	0,19	0,19	δ (m)	0,19
Δy (m)	0,0000249	0,0000250	0,0000250	0,0000250	Δy (m)	0,0000250
Taxa (Grow rate)	1,89	1,89	1,90	1,90	Taxa (Grow rate)	1,90

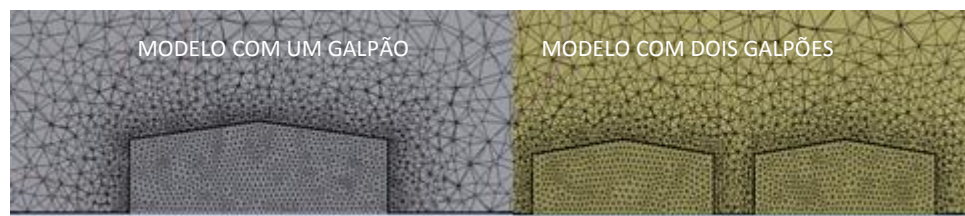


Figura 8 – Malha resultante.

No módulo Setup são configuradas as condições de contorno para a análise em questão. Para o presente trabalho foi considerado o regime laminar e utilizou o modelo SST (Shear Stress Transport) a um regime isotérmico de temperatura de 25 °C e a pressão ambiente de 1atm. As superfícies foram divididas nos seguintes elementos galpão, piso, parede, entrada e saída, para os elementos galpão, piso e parede as configurações aplicadas foi de “Wall” e as contenções de fluxo definidas com “No slip Wall”. Para o elemento entrada, a configuração aplicada foi de entrada de fluido “Inlet” e a velocidade utilizada foi de 20m/s, para o elemento saída, a configuração aplicada foi de “outlet” e a pressão relativa foi considerada nula. A Figura 9 ilustra as condições citadas para o modelo com três galpões. Após atribuir as condições de contorno o modelo é processado e assim é possível se obter os coeficientes de pressão.

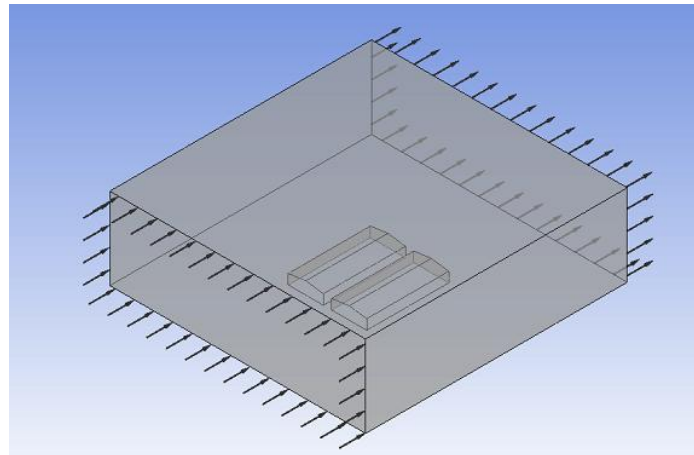


Figura 9 – Condições de contorno definidas no Setup

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Modelo 01: 1 Galpão – Vento 0º

O Modelo 01 é composto de apenas 1 galpão e com o vento incidindo a 0º (longitudinal), com esse modelo foi possível comparar os valores de coeficiente de pressão externo C_{pe} obtidos através do ANSYS com os apresentados pela ABNT NBR 6123:1988 – enquanto que a Figura 10 apresenta as linhas de fluxo do escoamento do vento, as Figuras 11 e 12 mostram os valores de C_{pe} fornecidos pelo ANSYS e pela ABNT NBR 6123:1988. No que diz respeito à Figura 13, ela apresenta a velocidade do fluido.

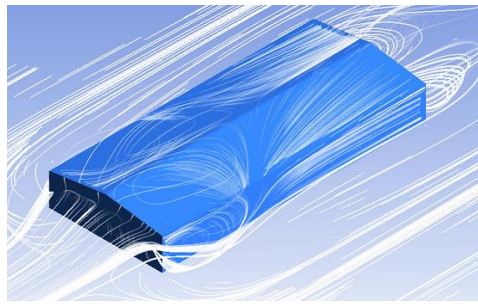


Figura 10 – Visualização das linhas de fluxo do escoamento para o Modelo 01

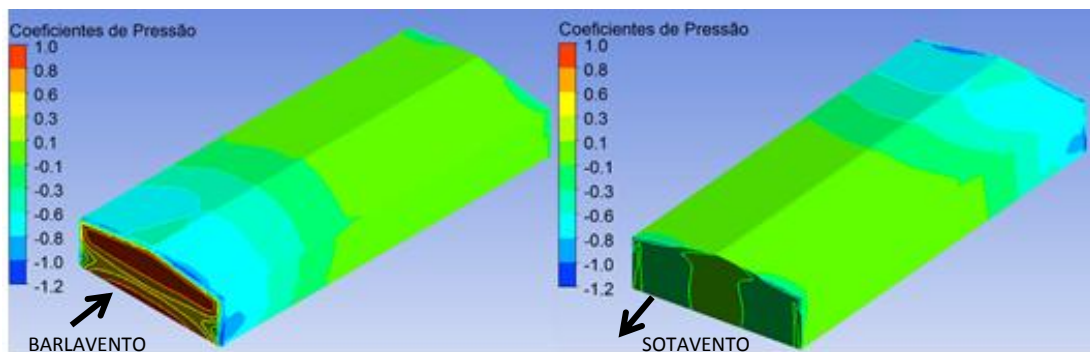


Figura 11 – Coeficientes de Pressão obtidos pela análise numérica para o Modelo 01

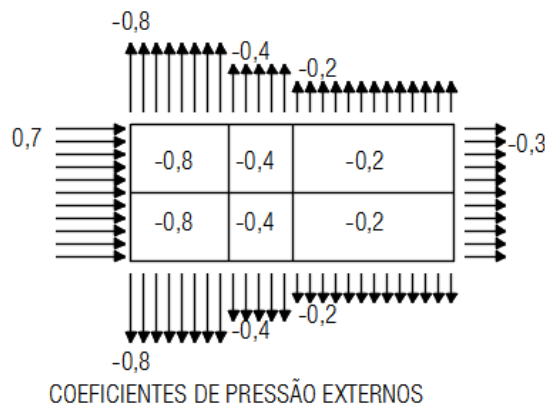


Figura 12 – Coeficientes de Pressão apresentados pela ABNT NBR 6123:1988 para o vento a 0º

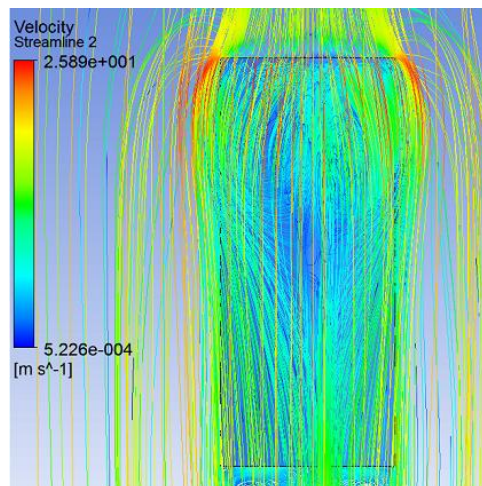


Figura 13 – Linhas de fluxo do escoamento – Velocidade do fluido para o Modelo 01

A observação dos resultados apresentados nas Figuras 10 a 13 mostram que:

- (i) É possível identificar na Figura 10 a formação de vórtices na região de sotavento;
- (ii) Comparando os resultados da análise numérica com os resultados obtidos pela ABNT NBR 6123:1988, observa-se que os coeficientes de pressão são similares;
- (iii) É possível visualizar as divisões das superfícies onde ocorre uma variação considerável entre os coeficientes de pressão, além de observar a similaridade com as superfícies apontadas pela ABNT NBR 6123:1988;
- (iv) Na Figura 11 é possível visualizar as zonas com altas sucções nas arestas dos edifícios, conforme descrição da ABNT NBR 6123:1988, ainda nessas regiões nota-se através da Figura 13 os maiores valores de velocidade.

3.2 Modelo 02: 1 Galpão – Vento 90º

O Modelo 02 é composto de apenas 1 galpão e com o vento incidindo a 90º (transversal), com esse modelo também foi possível comparar os valores de C_{pe} obtidos com o proposto pela ABNT NBR 6123:1988. Enquanto que a Figura 16 apresenta os valores apresentados pela ABNT NBR 6123:1988, as Figuras 14, 15 e 17 mostram os valores fornecidos pelo ANSYS-CFX.

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

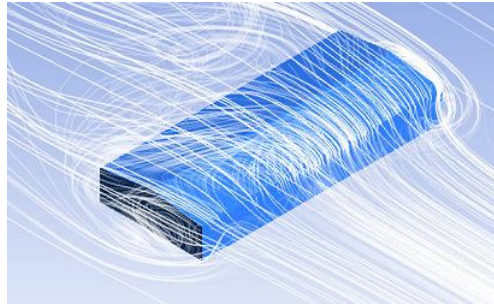


Figura 14 – Visualização das linhas de fluxo do escoamento para o Modelo 02

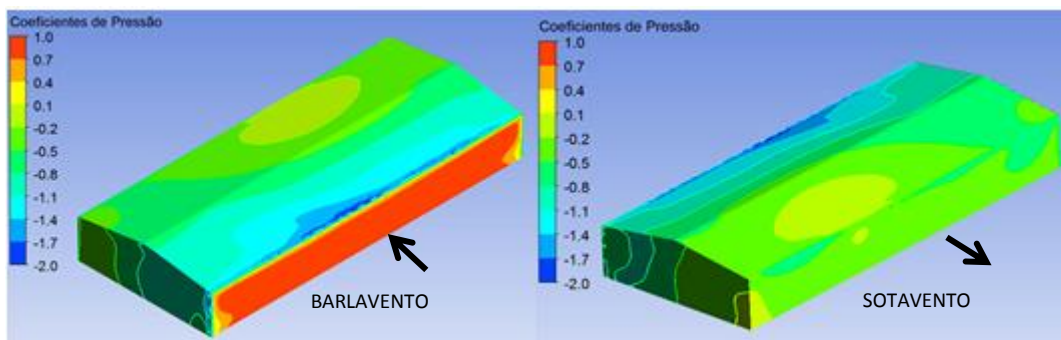


Figura 15 – Coeficientes de Pressão obtidos pela análise numérica para o Modelo 02

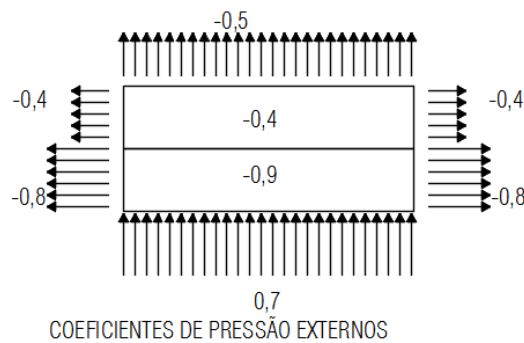


Figura 16 – Coeficientes de Pressão obtidos pela ABNT NBR 6123:1988 para o vento a 90º

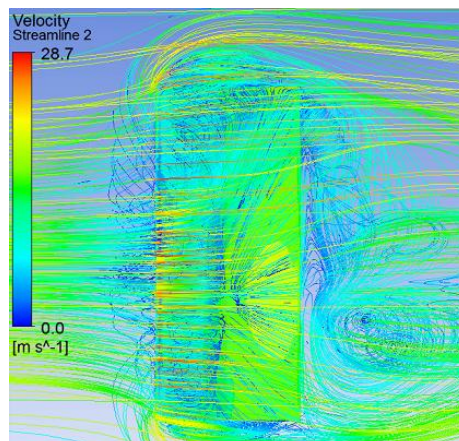


Figura 17 – Linhas de fluxo do escoamento – Velocidade do fluido para o Modelo 02

Por meio da análise dos resultados apresentados nas Figuras 14 a 17 é possível tecer os seguintes comentários:

- (i) Os resultados da análise numérica mostrados na Figura 15 e os resultados obtidos pela ABNT NBR 6123:1988 (Figura 16) apresentam valores similares para os coeficientes de pressão;
- (ii) É possível visualizar as divisões das superfícies onde ocorre uma variação considerável entre os coeficientes de pressão, além de observar a similaridade com as superfícies apontadas pela ABNT NBR 6123:1988;
- (iii) Na Figura 15 é possível visualizar as zonas com altas sucções nas arestas dos edifícios conforme descrição da ABNT NBR 6123:1988;
- (iv) A Figura 17 mostra a variação da velocidade do vento ao longo do edifício analisado, nota-se que os valores da velocidade são maiores na face de sotavento.

3.3 Modelo 03: 2 Galpões – Vento 0º – Espaçamento 5m

O Modelo 03 é composto de dois galpões com espaçamento entre si de 5m e com o vento incidindo a 0º. As Figuras 18 a 22 apresentam os resultados obtidos para o modelo em questão.

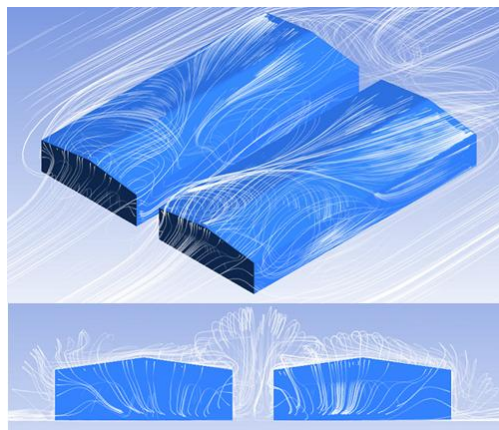


Figura 18 – Visualização das linhas de fluxo do escoamento para o Modelo 03

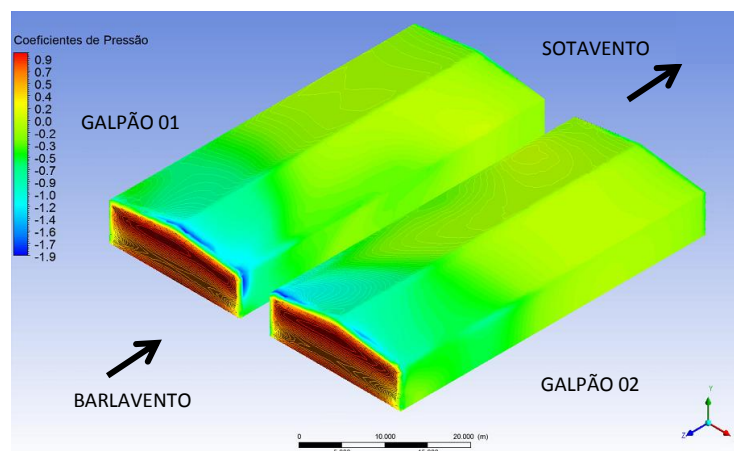


Figura 19 – Coeficientes de Pressão obtidos pela análise numérica para o Modelo 03

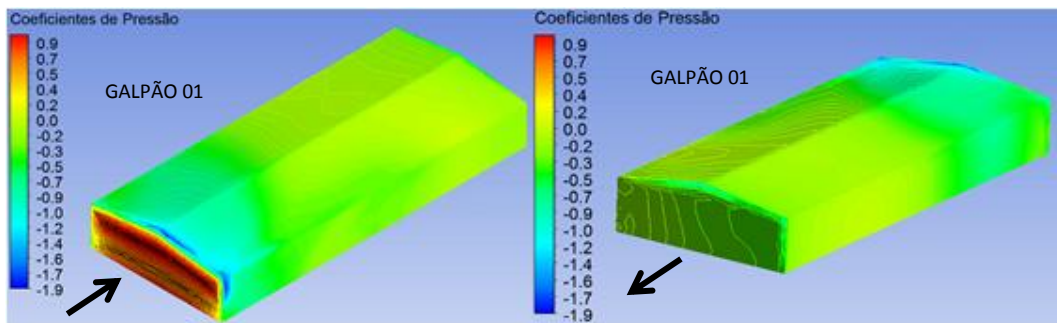


Figura 20 – Coeficientes de Pressão do Galpão 01 obtidos pela análise numérica para o Modelo 03

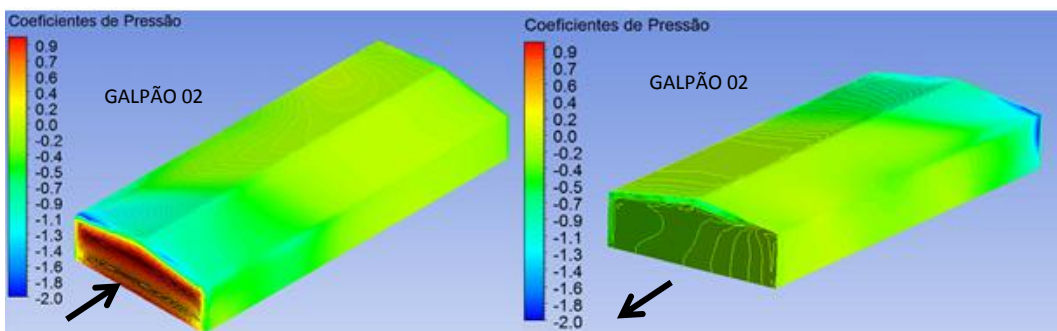


Figura 21 – Coeficientes de Pressão do Galpão 02 obtidos pela análise numérica para o Modelo 03

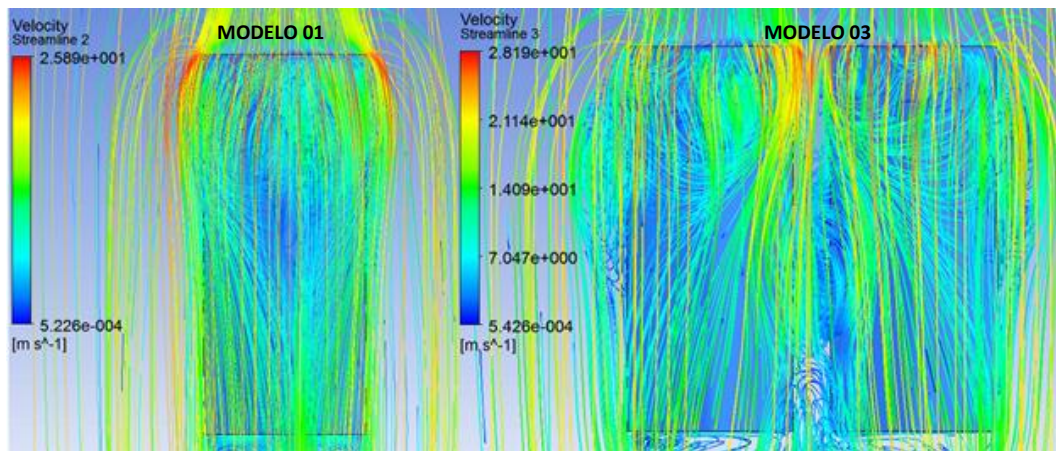


Figura 22 – Linhas de fluxo do escoamento – Velocidade do fluido

Observando-se os resultados apresentados nas Figuras 20 a 22 pode-se concluir que:

- (i) Há alteração nos coeficientes de pressão, quando comparamos os resultados apresentados nas Figuras 20 e 21 com os resultados apresentados na Figura 11 (modelo com um galpão isolado);
- (ii) Nota-se que as divisões das superfícies onde ocorrem as variações consideráveis entre os coeficientes de pressão não são bem definidas, além de não haver similaridade com as superfícies propostas ABNT NBR 6123:1988;
- (iii) Na Figura 22 nota-se uma diferença no comportamento do escoamento do fluido em relação ao Modelo 01. Para além disso, é possível observar um aumento na velocidade do vento e formação de vórtices no espaço entre os dois galpões.

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

3.4 Modelo 04: 2 Galpões – Vento 90º – Espaçamento 5m

Para o Modelo 04, utiliza-se a composição de dois galpões com espaçamento entre si de 5m e com o vento incidindo a 90º. As Figuras 23 a 27 apresentam os resultados fornecidos pelo ANSYS-CFX.

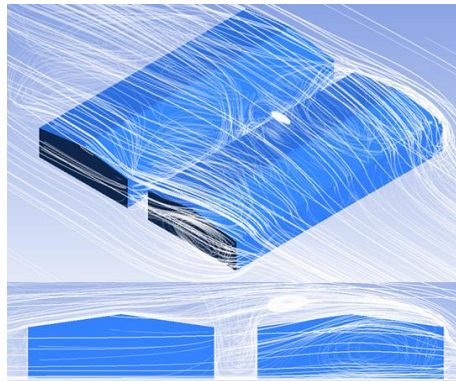


Figura 23 – Visualização das linhas de fluxo do escoamento para o Modelo 04

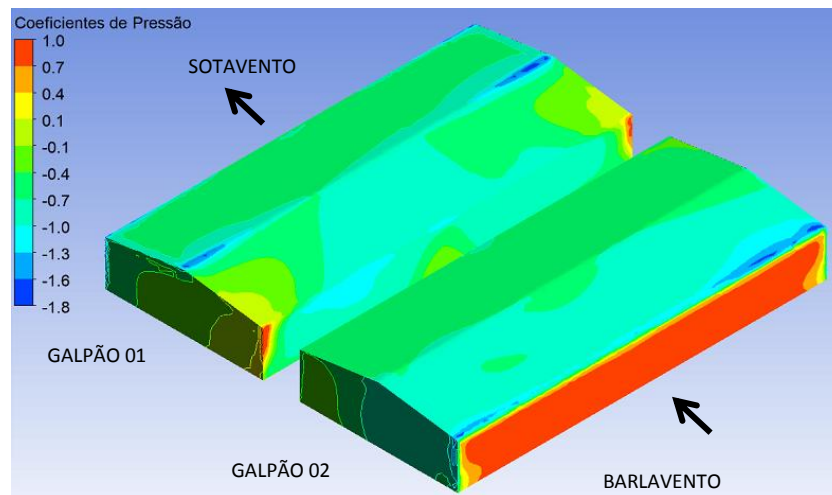


Figura 24 – Coeficientes de Pressão obtidos pela análise numérica para o Modelo 04

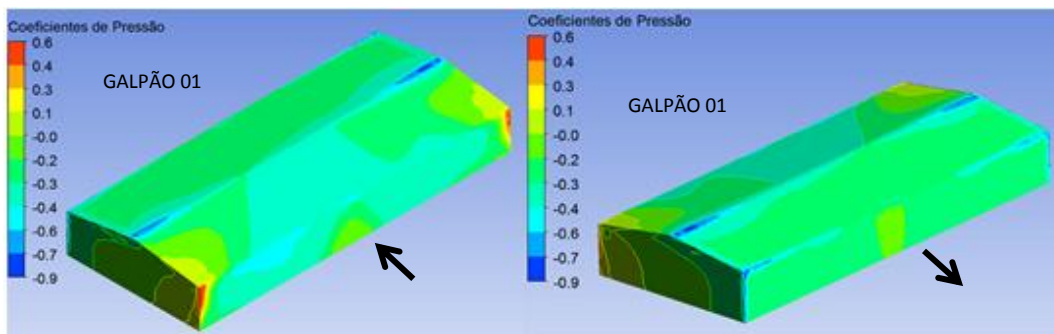


Figura 25 – Coeficientes de Pressão do Galpão 01 obtidos pela análise numérica para o Modelo 04

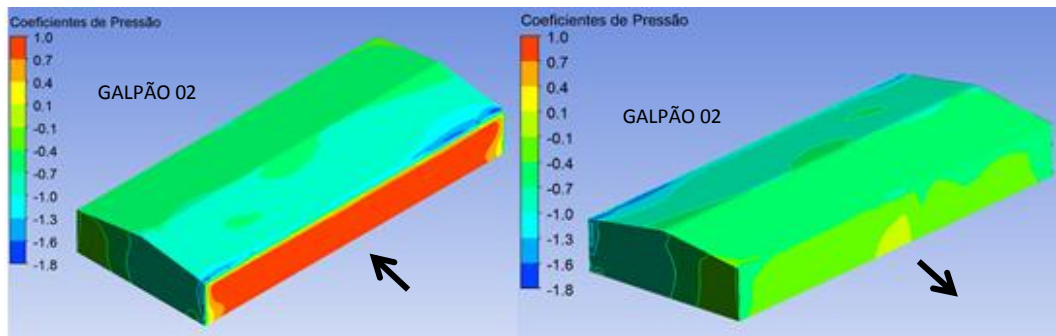


Figura 26 – Coeficientes de Pressão do Galpão 02 obtidos pela análise numérica para o Modelo 04

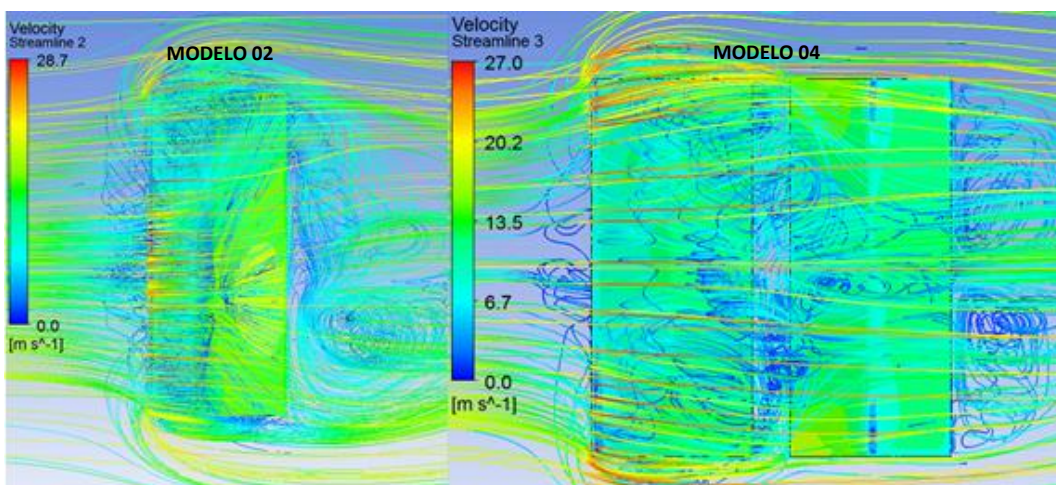


Figura 27 – Linhas de fluxo do escoamento – Velocidade do fluido

Com os resultados apresentados nas Figuras 25 a 27 constata-se que:

- (i) Na Figura 25 nota-se alteração nos coeficientes de pressão para o Galpão 01, quando comparado com os resultados apresentados no Modelo 02;
- (ii) Na Figura 26 são apresentados os coeficientes de pressão para o Galpão 02 (edifício com a face de barlavento), é possível observar que os coeficientes de pressão se mantêm similares com os coeficientes apresentados no Modelo 02;
- (iii) Ainda na Figura 26 é possível notar as divisões das superfícies onde ocorrem as variações consideráveis entre os coeficientes de pressão para o Galpão 02, conforme propõe a ABNT NBR 6123:1988;
- (iv) Na Figura 27 é possível visualizar a formação de vórtices entre os edifícios, com isso, na face perpendicular a incidência do vento do Galpão 01 ocorre coeficientes de pressão de sucção.

3.5 Modelo 05: 2 Galpões – Vento 0º – Espaçamento 10m

O Modelo 05 é o modelo composto de dois galpões com espaçamento entre si de 10m e com o vento incidindo a 0º. As Figuras 28 a 32 apresentam os resultados fornecidos pelo ANSYS-CFX.

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.



Figura 28 – Visualização das linhas de fluxo do escoamento para o Modelo 05

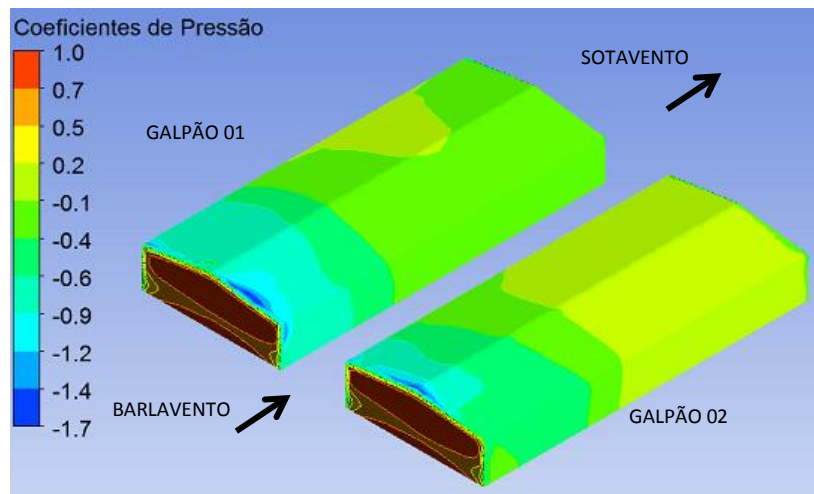


Figura 29 – Coeficientes de Pressão obtidos pela análise numérica para o Modelo 05

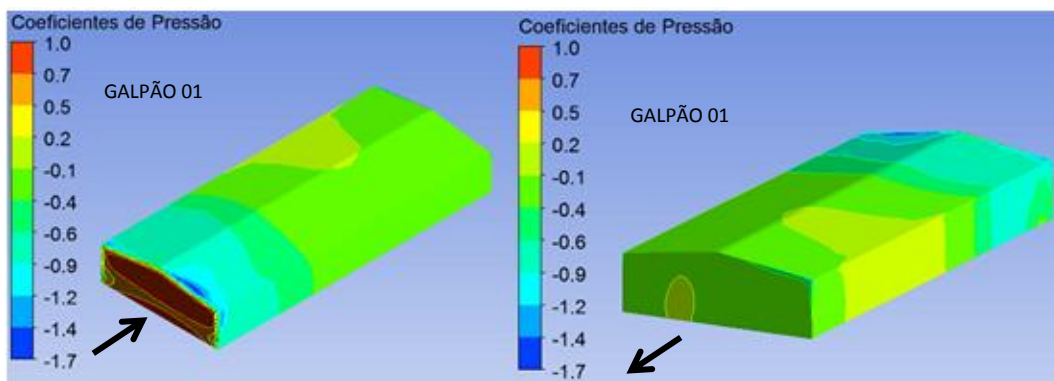


Figura 30 – Coeficientes de Pressão do Galpão 01 obtidos pela análise numérica para o Modelo 05

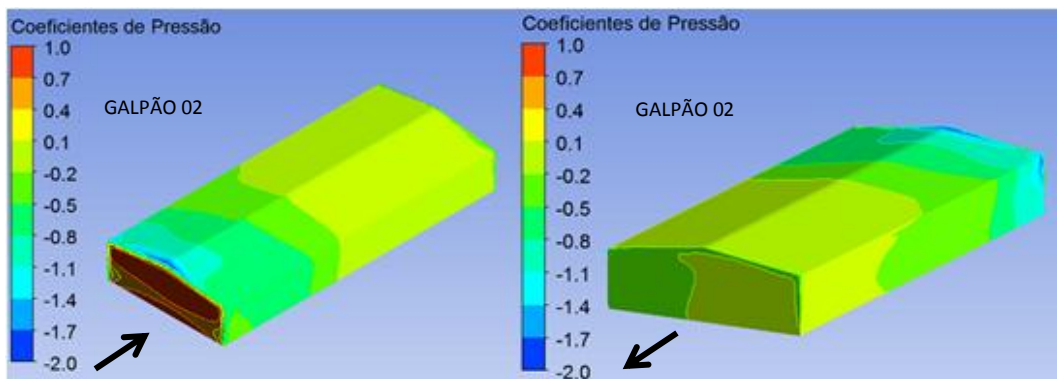


Figura 31 – Coeficientes de Pressão do Galpão 02 obtidos pela análise numérica para o Modelo 05

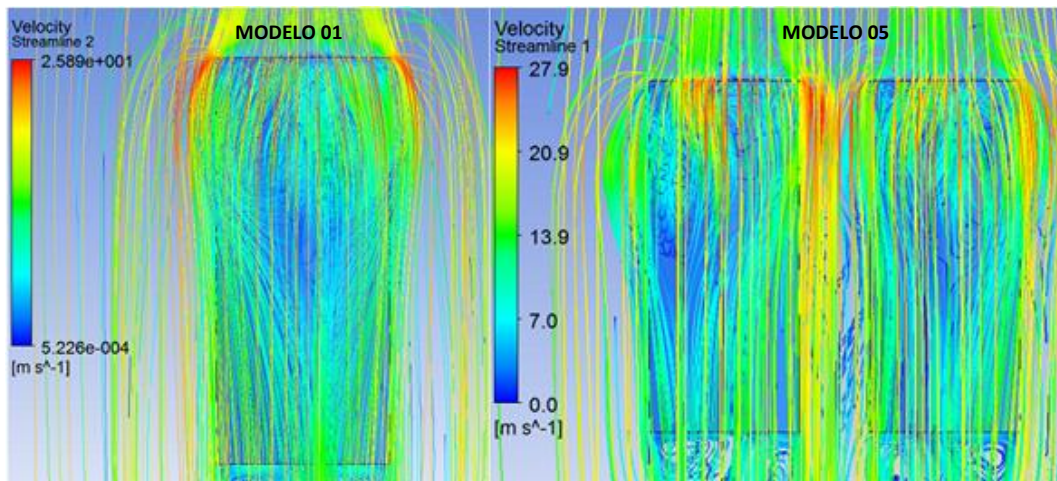


Figura 32 – Linhas de fluxo do escoamento – Velocidade do fluido

Analisando os resultados apresentados nas Figuras 28 a 32 pode-se dizer que:

- (i) É possível identificar alteração nos coeficientes de pressão, quando comparamos os resultados apresentados nas Figuras 31 e 32 com os resultados apresentados na Figura 11, no entanto observa-se que essa diferença não é tão significativa como as diferenças apresentadas no Modelo 03;
- (ii) Nota-se que as divisões das superfícies onde ocorrem as variações consideráveis entre os coeficientes de pressão voltam a ficar definidas conforme o Modelo 03 e similar com ABNT NBR 6123:1988;
- (iii) Na Figura 31 é possível identificar um trecho com sobrepressão na cobertura;
- (iv) Na Figura 32 nota-se uma diferença no comportamento do escoamento do fluido em relação ao Modelo 01, aparentemente há um aumento na velocidade do vento no espaço entre os dois galpões.

3.6 Modelo 06: 2 Galpões – Vento 90º – Espaçamento 10m

Para o Modelo 06 foi considerado dois galpões com espaçamento entre si de 10m e com o vento incidindo a 90º. As Figuras 33 a 37 apresentam os resultados fornecidos pelo ANSYS-CFX.

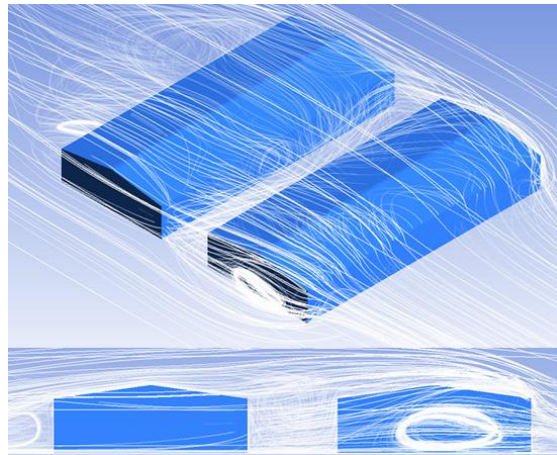


Figura 33 – Visualização das linhas de fluxo do escoamento para o Modelo 06

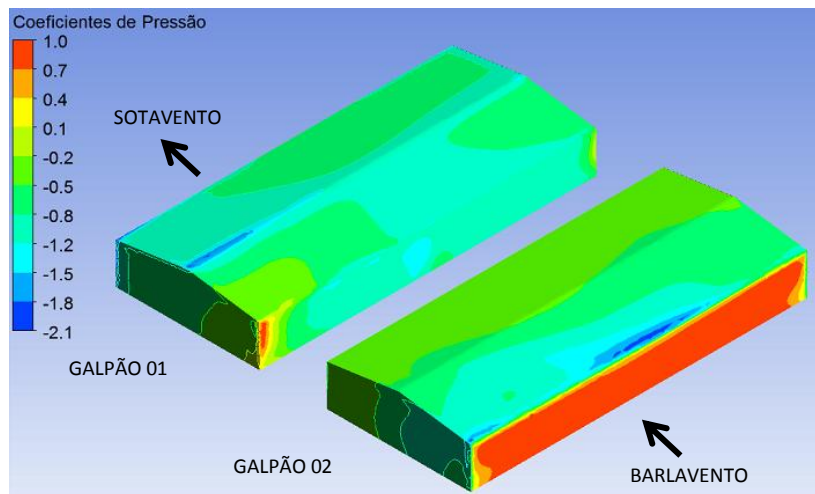


Figura 34 – Coeficientes de Pressão obtidos pela análise numérica para o Modelo 06

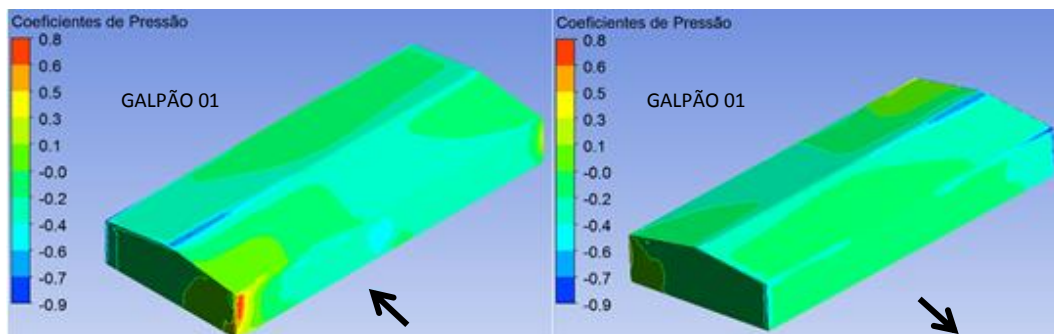


Figura 35 – Coeficientes de Pressão do Galpão 01 obtidos pela análise numérica para o Modelo 06

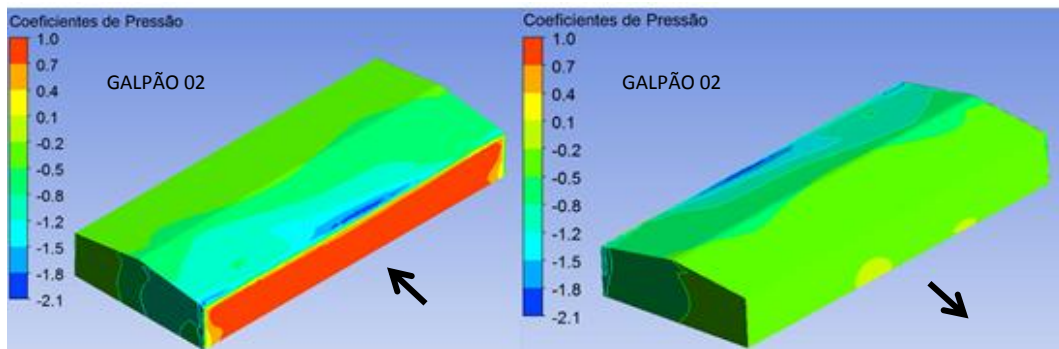


Figura 36 – Coeficientes de Pressão do Galpão 02 obtidos pela análise numérica para o Modelo 06

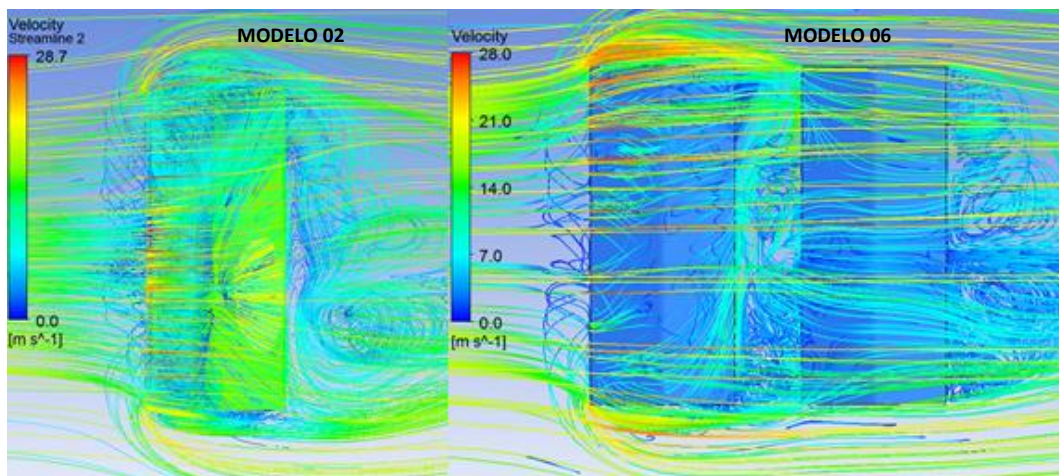


Figura 37 – Linhas de fluxo do escoamento – Velocidade do fluido

Com os resultados apresentados nas Figuras 33 a 37 pode-se fazer os seguintes comentários:

- (i) É possível identificar alteração nos coeficientes de pressão, quando comparamos os resultados apresentados nas Figuras 35 com os resultados apresentados no Modelo 02;
- (ii) Para os coeficientes de pressão do Galpão 02 apresentados na Figura 36 é possível observar que os coeficientes de pressão são similares aos coeficientes apresentados no Modelo 02;
- (iii) Ainda na Figura 36 nota-se as divisões das superfícies onde ocorrem as variações consideráveis para os coeficientes de pressão para conforme indicado pela ABNT NBR 6123:1988;
- (iv) Na Figura 37 é possível identificar a formação de vórtices entre os edifícios – diante disso, na face perpendicular a incidência do vento do Galpão 01 ocorre os coeficientes de pressão de sucção;
- (v) Comparando os resultados da Figura 35 com os resultados apresentados na Figura 25 nota-se a similaridade entre os coeficientes de pressão, dessa forma conclui-se que a alteração da distância de 5m para 10m entre os edifícios não causam alterações significativas nos coeficientes de pressão quando a incidência do vento se dá a 90°.

3.7 Modelo 07: 2 Galpões – Vento 0º – Espaçamento 15m

O Modelo 07 trata-se de um modelo composto de dois galpões com espaçamento entre si de 15m e com o vento incidindo a 0º. As Figuras 38 a 42 apresentam os resultados fornecidos pelo ANSYS-CFX.

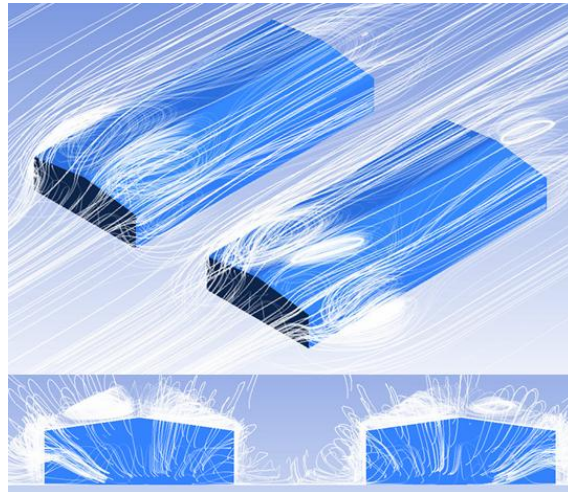


Figura 38 – Visualização das linhas de fluxo do escoamento para o Modelo 07

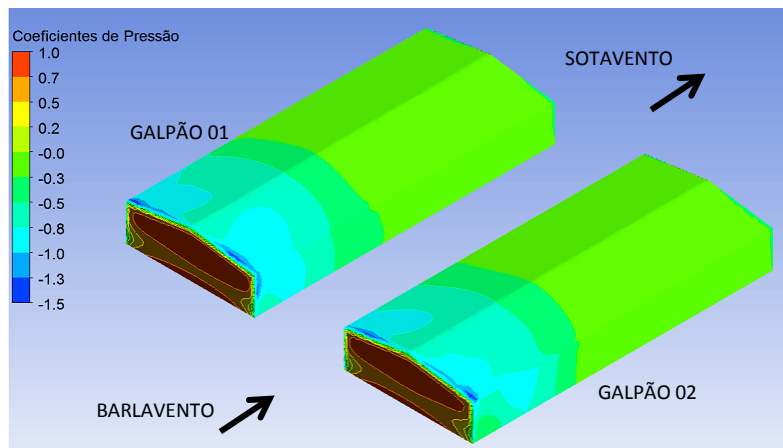


Figura 39 – Coeficientes de Pressão obtidos pela análise numérica para o Modelo 07

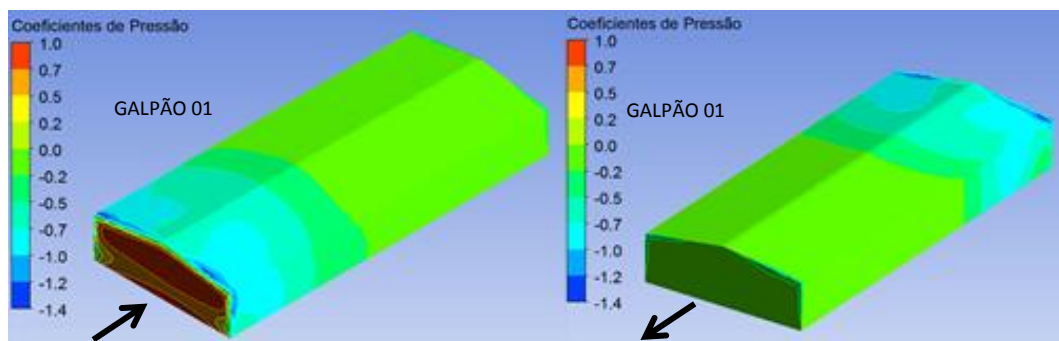


Figura 40 – Coeficientes de Pressão do Galpão 01 obtidos pela análise numérica para o Modelo 07

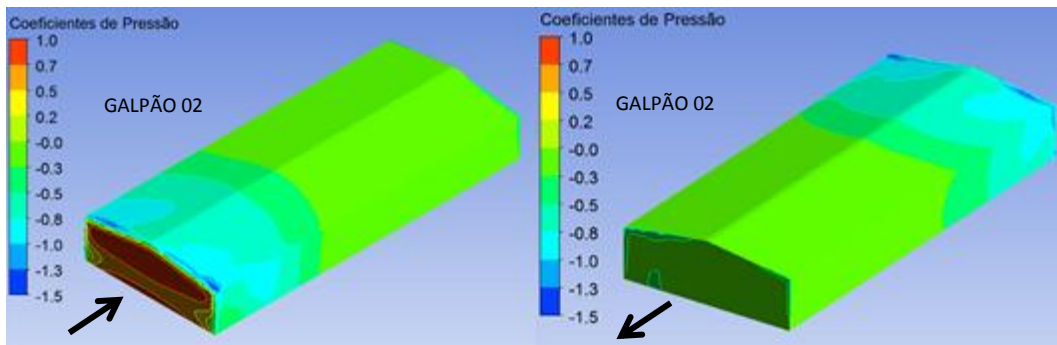


Figura 41 – Coeficientes de Pressão do Galpão 02 obtidos pela análise numérica para o Modelo 07

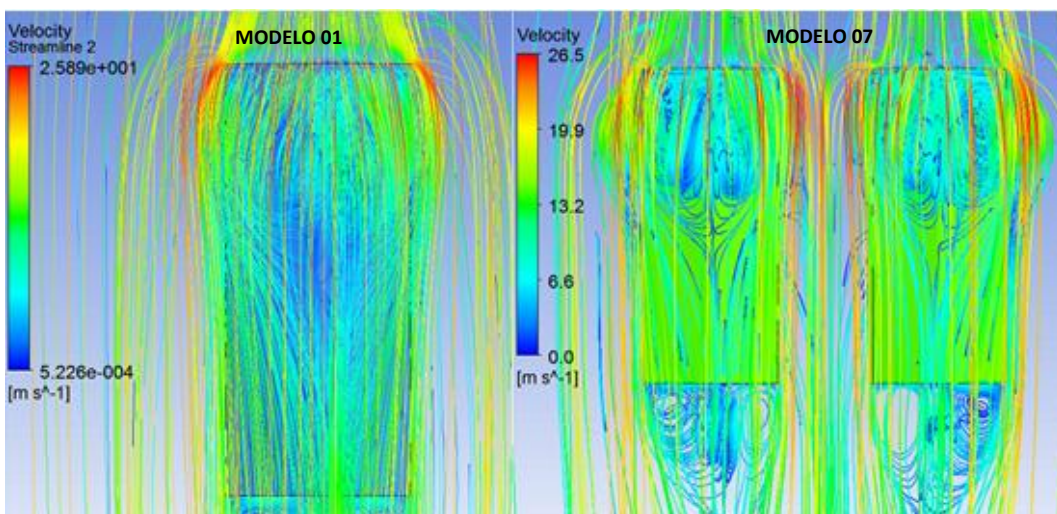


Figura 42 – Linhas de fluxo do escoamento – Velocidade do fluido

Analisando os resultados apresentados nas Figuras 38 a 42 pode-se dizer que:

- (i) É possível identificar que não há alteração nos coeficientes de pressão, quando comparamos os resultados apresentados nas Figuras 40 e 41 com os resultados apresentados na Figura 11 (Modelo 01 – galpão isolado);
- (ii) Nota-se que as divisões das superfícies onde ocorrem as variações consideráveis entre os coeficientes de pressão voltam a ficar definidas conforme o Modelo 03 e similar com ABNT NBR 6123:1988;
- (iii) Na Figura 42 nota-se que o escoamento do fluido do Modelo 07 se comporta de maneira similar ao escoamento do fluido do Modelo 01;
- (iv) Devido à similaridade dos resultados entre os Modelos 01 e 07 conclui-se que a distância de 15m entre os edifícios se torna insignificante quando o vento incide a 0°, dessa maneira os modelos podem ser considerados como isolados.

3.8 Modelo 08: 2 Galpões – Vento 90° – Espaçamento 15m

Para o Modelo 08 foram considerados dois galpões com espaçamento entre si de 15m e com o vento incidindo a 90°. As Figuras 43 a 47 apresentam os resultados fornecidos pelo ANSYS-CFX.

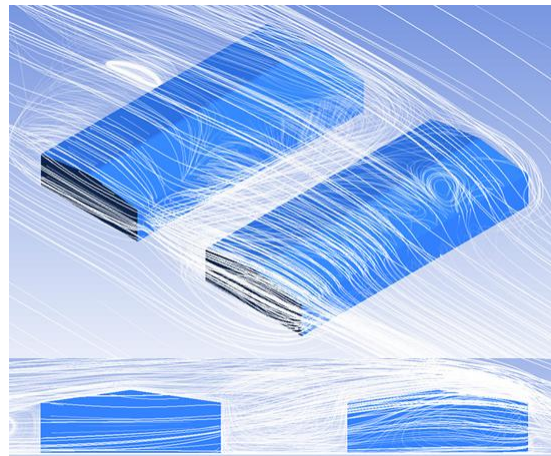


Figura 43 – Visualização das linhas de fluxo do escoamento para o Modelo 08

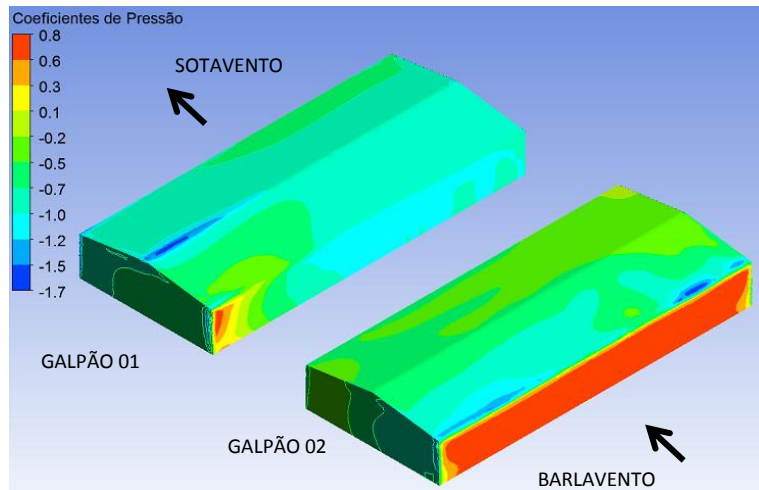


Figura 44 – Coeficientes de Pressão obtidos pela análise numérica para o Modelo 08

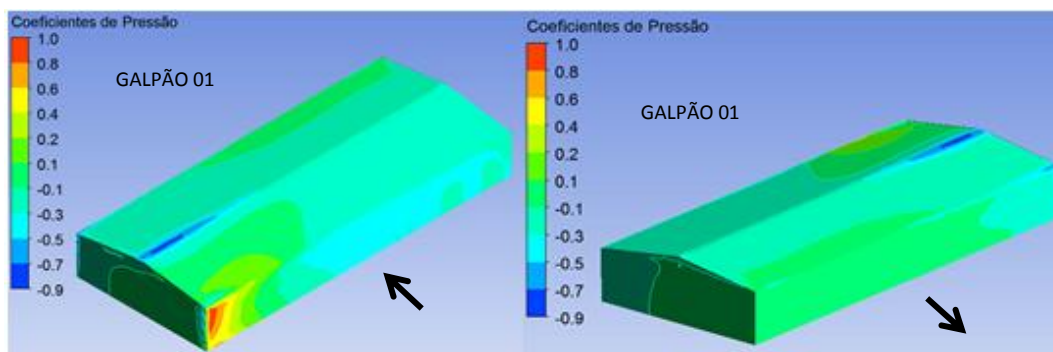


Figura 45 – Coeficientes de Pressão do Galpão 01 obtidos pela análise numérica para o Modelo 08

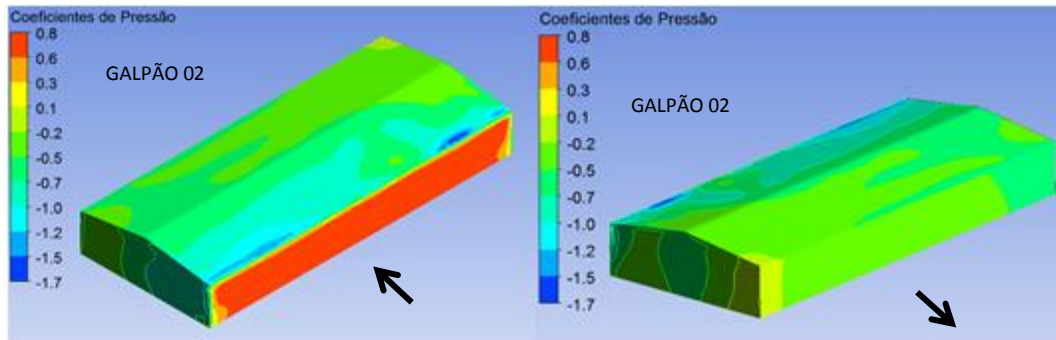


Figura 46 – Coeficientes de Pressão do Galpão 02 obtidos pela análise numérica para o Modelo 08

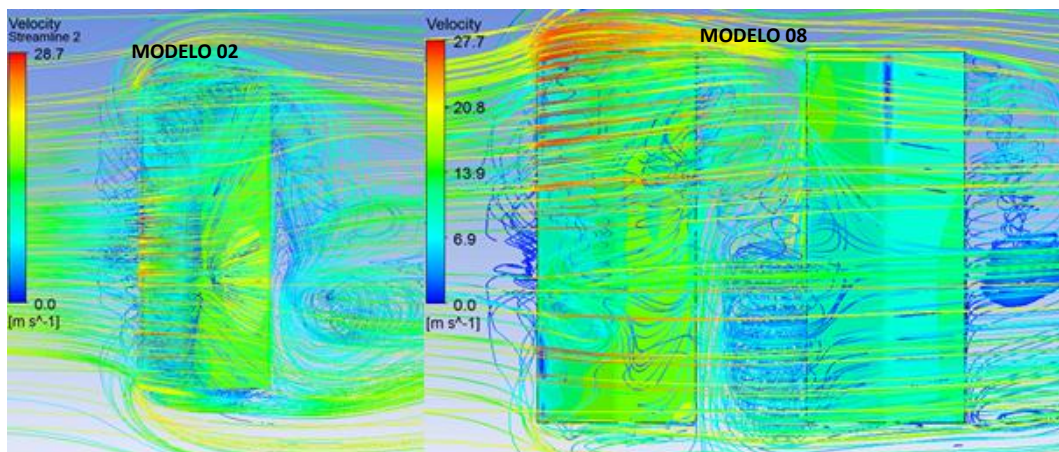


Figura 47 – Linhas de fluxo do escoamento – Velocidade do fluido

Com os resultados apresentados nas Figuras 45 a 47 pode-se fazer os seguintes comentários:

- (i) Nota-se uma alteração nos coeficientes de pressão, quando comparamos os resultados apresentados na Figura 45 (Galpão 01) com os resultados apresentados no Modelo 02;
- (ii) Os coeficientes de pressão do Galpão 02, apresentados na Figura 46, são similares aos coeficientes apresentados no Modelo 02;
- (iii) É possível visualizar na Figura 46 as divisões das superfícies onde ocorrem as variações consideráveis para os coeficientes de pressão para conforme indicado pela ABNT NBR 6123:1988;
- (iv) Na Figura 37 é possível identificar a formação de vórtices entre os galpões, observa-se que na face perpendicular a incidência do vento do Galpão 01 ocorre a formação de coeficientes de pressão de sucção;
- (v) Comparando os resultados da Figura 45 com os resultados apresentados na Figura 25 nota-se uma similaridade entre os coeficientes de pressão, dessa forma conclui-se que a alteração da distância de 5m para 15m entre os edifícios não causam alterações significativas nos coeficientes de pressão quando a incidência do vento se dá a 90°.

4 CONCLUSÃO

Os coeficientes de pressão externos obtidos por meio do modelo numérico para um galpão isolado apresentaram resultados similares aos valores apresentados pela ABNT NBR 6123:1988, é possível visualizar as zonas de alteração significativas dos coeficientes de pressão e as zonas de altas sucções nas arestas dos edifícios.

Por meio da análise das linhas de escoamento do fluxo é possível observar a formação de vórtices que em alguns casos fazem com que os coeficientes sejam alterados de pressão para sucção.

Por fim, conclui-se que existem diferenças nos coeficientes de pressão externo quando levamos em consideração o efeito de vizinhança. Para os resultados obtidos com o vento incidente a 0º, observa-se que com 5m de espaçamento entre os edifícios essa diferença é muito considerável. Quando a distância do espaçamento aumenta para 10m ainda existem algumas diferenças, contudo de menor significado em relação aos 5m. Por outro lado, com o espaçamento entre galpões igual a 15m é possível observar que praticamente não existem diferenças, dessa maneira os galpões podem ser considerados como isolados. Para os resultados do vento incidentes a 90º, observa-se que os coeficientes de pressão se mantêm parecidos independentes da distância do espaçamento entre os edifícios.

REFERÊNCIAS

1. ABNT NBR 6123:1988. **Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988.
2. Swanson Analysis Systems Inc. (2013). *ANSYS Reference Manual* (version 15).
3. PITTA, J.A.A. **Ações Devidas ao Vento em Edificações**. São Carlos: UfSCar, 2002.(Série Apontamentos).
4. TORRES MANFRIM, S. **Estudo numérico para a determinação das pressões devidas a ação do vento em edifícios industriais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.
5. BLESSMANN, J. **Ação do Vento em Edifícios**. 2ª ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1978.
6. FERREIRA, A. M. **Análise de Estruturas em Cascas de Formas Livres sob a Ação do Vento**. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2013.
7. IRWIN, P., DENOON, R., SCOTT, D. **Wind Tunnel Testing of High-Rise Buildings**. Illinois Institute of Technology, Routledge, New York, 2013.
8. GALTER, M. D. **Ação do vento em casca de forma livre de planta pentagonal apoiada nos vértices**. 2015. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotecnia, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2015.

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.