

COEFICIENTES AERODINÂMICOS EM ESTUFAS AGRÍCOLAS DE TELHADO DUAS ÁGUAS INFLUENCIADOS PELA MALHA E MODELO DE TURBULÊNCIA

JOSÉ GABRIEL VIEIRA NETO¹, JULIO SORIANO², ANA CAROLINA GIGLI
SHIGUEMOTO³, LIGIA MARIA MOLINA PEDRONI⁴

¹ Eng. Agrícola, Prof. Doutor, Universidade Federal do Paraná - UFPR, Jandaia do Sul – PR, jose.vieira@ufpr.br

² Eng. Civil, Prof. Doutor, Faculdade de Engenharia Agrícola, FEAGRI/UNICAMP, Campinas – SP

³ Eng.^a Agrícola, Prof.^a Mestre, Instituto Federal Catarinense, Concórdia – SC

⁴ Graduanda em Eng. Agrícola, Universidade Federal do Paraná, Jandaia do Sul – PR

Apresentado no
LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2023
18 a 21 de outubro de 2023 – Ribeirão Preto - SP, Brasil

RESUMO: A fluidodinâmica computacional (CFD) foi empregada com o objetivo de avaliar os coeficientes de pressão em estufas agrícolas com cobertura em duas águas. Os coeficientes aerodinâmicos são sensíveis a malha e ao modelo de turbulência adotados na modelagem computacional. Portanto, como metodologia, a modelagem consistiu no emprego de malhas automáticas e refinadas, bem como nos modelos de turbulência $k-\epsilon$, $k-\omega$ e $k-\epsilon$ RNG. Verificou-se para esses modelos de turbulência semelhanças nas conformações dos coeficientes de pressão, sendo, portanto, todos viáveis. Os coeficientes de pressão da zona do telhado a barlavento, passaram de sobrepressão para sucção, inversão essa que diverge do normalizado, mas corrobora com outras pesquisas correlatas. Verificou-se ainda que a malha gerada automaticamente favorece o custo computacional, no entanto, devido sua disparidade em relação aos valores normalizados, não é recomendada sua aplicação.

PALAVRAS-CHAVE: Fluidodinâmica; coeficientes de pressão; ação do vento.

AERODYNAMIC COEFFICIENTS IN PITCHED ROOF GREENHOUSES DUE TO MESH CHANGE AND TURBULENCE MODEL

ABSTRACT: Computational fluid dynamics (CFD) was employed to evaluate the pressure coefficients in pitched roofs greenhouses. The aerodynamic coefficients are sensitive to the mesh and turbulence model used in the computational modeling. Therefore, as a methodology, the modeling consisted of using automatic and refined meshes, as well as the $k-\epsilon$, $k-\omega$, and $k-\epsilon$ RNG turbulence models. Similarities in the pressure coefficient distributions were observed for these turbulence models, indicating their viability. The pressure coefficients in the windward roof zone changed from overpressure to suction, which deviates from the normalized behavior, but is consistent with another related research. It was also found that the automatically generated mesh favors computational cost, however, due to its disparity with respect to normalized values, its application is not recommended.

KEYWORDS: Computational fluid dynamics; pressure coefficients; wind action.

INTRODUÇÃO: A ABNT NBR 16032 (2012) apresenta os coeficientes de pressão externos para estufas de um ou de múltiplos vãos, porém, para ambos os casos existem limitações, principalmente quanto às dimensões da construção. Em função disso, os métodos de análise computacional são ferramentas que possibilitam ao projetista uma ampla capacidade de simulação e otimização de modelos. A simulação por CFD é uma metodologia já consolidada em diversas áreas da engenharia, principalmente para fins de avaliação do controle ambiental das construções rurais. Com o uso da simulação CFD, objetivou-se avaliar a influência do tipo

da malha e do modelo de turbulência nos coeficientes de pressão, tendo por base os valores estabelecidos pela ABNT NBR 16032 (2012) para estufas com o telhado em duas águas.

MATERIAL E MÉTODOS: Para as simulações CFD, foram elaboradas as geometrias tridimensionais das estufas e inseridas no volume de controle (Fig. 1A). Com o uso do *software* Autodesk CFD (*student version 17.2*), as simulações foram realizadas com o fluxo do vento aplicado na direção perpendicular à cumeeira, para a qual os coeficientes de pressão externos se apresentam bem distintos em relação às faces de telhado e parede (Fig. 1B), bem como em relação as posições dos planos à barlavento e à sotavento.

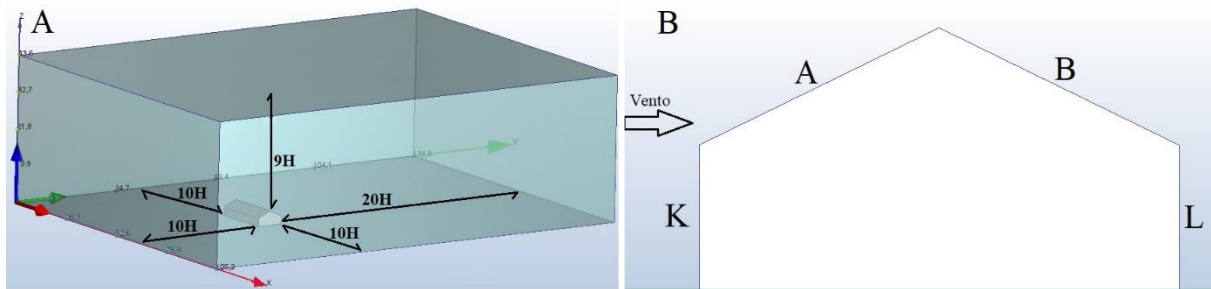


FIGURA 1. A) Volume de controle (H altura entre o piso e a cumeeira); B) Zonas de pressão.

As condições de contorno adotadas para simulação são apresentadas na Tabela 1 e as variáveis envolvidas foram os modelos de turbulência ($k-\epsilon$, $k-\omega$ e $k-\epsilon$ RNG) e a densidade da malha não estruturada (automática e refinada). O número de Reynolds foi pré-estabelecido em 2000, tendo por base pesquisas correlatas (KATERIS et al., 2012; FRAGOS et al., 2014).

TABELA 1. Propriedades do sólido e do fluido aplicados nas simulações.

Propriedade	Fluido (ar)	Sólido (aço)
Massa específica (kg m^{-3})	1,20473	7833
Viscosidade (Pa.s)	$1,817 \times 10^{-5}$	-
Condutividade (W/m.K)	0,02563	-
Calor específico (J/kg.K)	1004	465
C_p/C_v (ad.)	1,4	-
Emissividade (ad.)	1	0,3
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	19,85	19,85
Resistividade elétrica (Ohm.m)	-	$1,7 \times 10^{-7}$

Em que: C_p – é capacidade térmica a pressão constante; C_v – é capacidade térmica a volume constante.

Foram estabelecidos 12 cenários para a modelagem CFD (Tabela 2), com 2 modelos de forma para telhado em duas águas, que conforme ABNT NBR 16032 (2012) relacionam a altura (até a calha) e o vão da estufa, como sendo $h/s = 0,3$ e $h/s = 0,6$. A inclinação do telhado foi adotada igual a 26° , tendo por base os estudos realizados por Vieira Neto e Soriano (2016).

TABELA 2. Cenários das simulações.

Parâmetros	Cenários											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
h/s	0,3						0,6					
Malha	Automática			Refinada			Automática			Refinada		
Modelo	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Re V (m s^{-1})	2000			$4,45385 \times 10^{-4}$			2000			$2,96822 \times 10^{-4}$		

Em que os modelos de turbulência são A = RNG; B = $k-\epsilon$; C = $k-\omega$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: O número de nós e elementos gerados com a malha automática, variou de 2626 e 11452, respectivamente, para 9175 e 40133 com a malha refinada para $h/s=0,3$. Para $h/s = 0,6$, a variação foi de 1301 e 5284 (nós e elementos, respectivamente), para 5260 e 23412. A diferença entre os valores dos coeficientes de pressão foi calculada considerando o quanto que os valores determinados com a malha automática foram maiores que os determinados com a malha refinada. Obteve-se a menor variação da diferença entre as malhas na zona K, sendo de 5,3% e 9% para $h/s = 0,3$ e $0,6$, respectivamente. As maiores diferenças ocorreram nas zonas de telhado (A e B), com destaque a região de ocorrência de sobrepressão (zona A), com diferença de 82,2% para $h/s = 0,6$. Em geral, os coeficientes de pressão obtidos com a malha automática foram maiores do que os obtidos com a malha refinada (Fig. 2). No teste de independência de malhas, a malha automática se mostrou inviável e não concisa, pois a diferença em relação a malha refinada, para uma mesma zona, foi maior do que 5% que representa o limite para o teste indicado por Autodesk (2023).

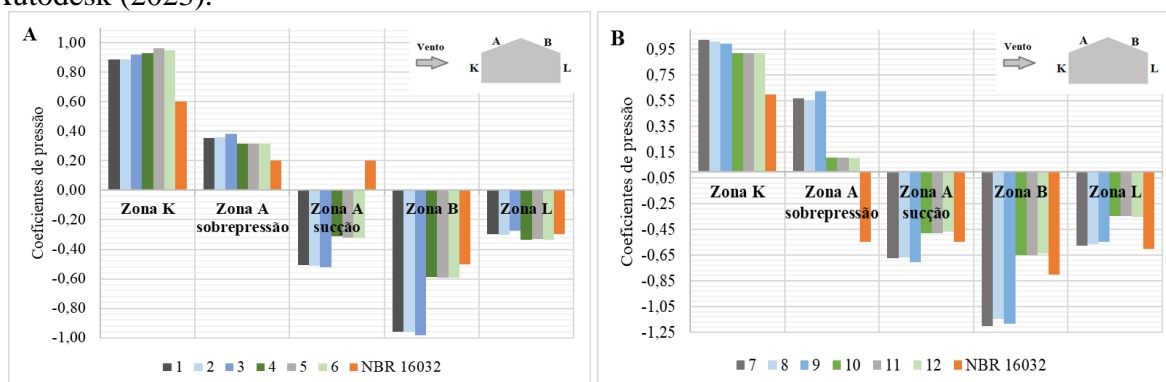


FIGURA 2. Coeficientes de pressão para os modelos simulados, A) $h/s = 0,3$; B) $h/s = 0,6$.

Devido ao refinamento da malha próximo das zonas das paredes e dos telhados, a pressão na região tende a se alterar (AUTODESK, 2023; HA et al., 2014), implicando nos valores de coeficientes de pressão. Isso ocorre, pois, o valor da camada limite tende a diminuir na região de malha refinada. Na região de telhado a barlavento (zona A), a ABNT NBR 16032 (2012) apresenta graficamente os coeficientes de pressão, porém, não se considera a inversão dos coeficientes para essa zona. A ferramenta CFD apresentou-se como uma solução para obtenção dos coeficientes de pressão, facilitando a análise dos efeitos da fluidodinâmica. Para a relação de $h/s = 0,6$, quando aplicado o refinamento da malha, houve a tendência em diminuir o valor do coeficiente de pressão e também reduzir a extensão da faixa de sobrepressão na Zona A. Isto se deve ao aumento da altura da coluna, que amplificou o desprendimento dos vórtices em relação ao telhado. A ABNT NBR 16032 (2012), apresenta apenas valores de sucção ou de sobrepressão para zona A, os quais dependem da inclinação do telhado e da relação h/s . A faixa de sobrepressão no telhado a barlavento obtida neste estudo, para os modelos $h/s=0,3$ chegou a aproximadamente 1,8 m com aplicação da malha automática e, cerca de 0,65 m de extensão quando aplicada a malha refinada. Kateris et al. (2012) destacaram em estudos correlatos a este, para a norma europeia de estufas agrícolas (EN – 13031 1), a sugestão de uma divisão das zonas, principalmente nas regiões que representam o telhado, ao invés de somente duas zonas (A e B). Na zona B (sotavento), os valores estimados pelas simulações foram consideravelmente maiores (em módulo) do que os estabelecidos em norma quando aplicada a malha automática, chegando a ser o dobro do valor, enquanto para a malha refinada a diferença média foi menor que 12%. Esta ocorrência também foi identificada por Fragos et al. (2014) e por Kateris et al. (2012), com a ocorrência de valores próximos aos da EN 13031-1 na zona a barlavento e maiores discrepâncias entre os valores quando comparados aos normalizados para a zona B (região à sotavento). Os valores

obtidos na Zona B apresentaram ocorrência de sucção, assim como estudos correlatos (KATERIS et al., 2012; FRAGOS et al., 2014), apresentando um pico de sucção próximo a cumeeira, o que também foi constatado por Tominaga et al. (2015). Na zona de parede K, independente da malha aplicada, os coeficientes de pressão pouco variaram, mantendo-se maiores que o valor de +0,6 apresentado pela ABNT NBR 16032 (2012), o que está de acordo com os resultados obtidos por Tominaga et al. (2015) ao avaliarem modelos de duas águas em túnel de vento e por CFD com número de Reynolds na ordem de 35.000. Na Zona L, para a relação $h/s=0,6$ com aplicação do refinamento da malha houve uma diferença da ordem de 48% nos valores médios dos coeficientes de pressão, quando comparados com o valor estipulado pela ABNT NBR 16032 (2012). Os valores destes coeficientes foram alterados principalmente pela modificação da camada limite e o valor de Y^+ , em que se obteve maior diferença para a relação $h/s=0,6$, fato também observado por Tominaga et al. (2015).

CONCLUSÕES: Na zona de telhado a barlavento verificou-se duas faixas, com valores de coeficiente de pressão positivo e negativo, o que sugere a subdivisão da Zona A. A malha automática forneceu resultados coerentes para os coeficientes de pressão e o menor tempo de simulação, porém com menor precisão. Com isto, não se indica seu uso para obtenção dos coeficientes de pressão, principalmente para os modelos com maiores dimensões ($h/s=0,6$). Os três modelos de turbulência mostraram-se coerentes, com resultados próximos entre si. Os coeficientes de pressão foram mais afetados pela malha do que pelos modelos de turbulência, indicando a viabilidade de uso dos três modelos avaliados ($k-\varepsilon$, $k-\omega$ e $k-\varepsilon$ RNG).

AGRADECIMENTOS: À FEAGRI/Unicamp; à UFPR/Jandaia do Sul; ao IFC/Concórdia.

REFERÊNCIAS:

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16032: Estrutura de estufa e viveiro agrícola – Requisitos de projeto, construção, manutenção e restauração. Rio de Janeiro, 61p., 2012.
- AUTODESK CFD 2017. Version 17.2 (Student).
- AUTODESK – CFD. Support and Learning. 2023. Disponível em: <<https://knowledge.autodesk.com/support/cfd>>.
- FRAGOS, V. P.; NTINAS, G. K.; KATERIS, D. L. Numerical estimation of external pressure coefficients of a pitched-type roof greenhouse and comparison with Euro-code in different flow-type circumstances. International Conference of Agricultural Engineering. 7 p. Zurich, 2014.
- HA, T.; LEE, I.; HWANG, H.; HA, J. Wind Pressure Coefficients Determination for Greenhouse Built on a Reclaimed Land. **Acta Horticulturae**. v. 1037, p. 1001-1007, 2014.
- KATERIS, D. L.; KOTSOPOULOS, T. A.; FRAGOS, V. P.; MARTZOULOPOULOU, C. N. Numerical Estimation of Pressure Coefficients over Single and Multispan Duo Pitched Roof Greenhouses. **Acta Horticulturae**. v. 952, p. 155-161, 2012.
- TOMINAGA, Y.; AKABAYASHI, S.; KITAHARA, T.; ARINAMI, Y. Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments and CFD simulations. **Building and Environment**. v. 84, p. 204-213, 2015.
- UNE-EN 13031-1 (2002). Invernaderos: proyectos y construcción. Parte 1: Invernaderos para la producción comercial. European Committee for standardization CEN. Brussels, Belgium.
- VIEIRA NETO, J. G.; SORIANO, J. Distribution of stress in greenhouses frames estimated by aerodynamic coefficients of Brazilian and European standards. **Scientia agrícola**. v.73, n.2, p. 97-102, 2016.