



## Utilização de CFD para Cálculo de Pressões de Vento em Galpões sobre Taludes.

Aron Zavelinski<sup>1</sup>, Pablo Penas<sup>1</sup>, Rodrigo S. Romanus<sup>1</sup>, Alan Lugarini<sup>1</sup>, João Alberto Vendramini<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> AeroSim / Engenharia de Vento / aron@aerosim.io  
<sup>2</sup> Vendramini Engenharia / Engenharia de Estruturas / joao@vendramini.eng.br

### Resumo

Prever com precisão as cargas do vento em galpões é essencial para o dimensionamento das suas estruturas primárias e auxiliares. O método de fluidodinâmica computacional (CFD) de simulação de grandes vórtices (LES) é capaz de capturar as pressões extremas, sendo uma ferramenta apta para avaliar as cargas de vento em estruturas.

A escassez de terrenos planos para a construção de empreendimentos de grandes dimensões, como galpões industriais, tem levado ao crescente interesse na utilização de regiões inclinadas. Tais condições topográficas alteram significativamente o comportamento do vento, levando a acréscimos de velocidade. O fator topográfico  $S1$  fornece uma medida dessa aceleração.

As normas atuais especificam escalonamentos verticais e horizontais para que se determine o valor de  $S1$  na fachada de barlavento de uma edificação, aplicando-o de forma constante em toda a extensão longitudinal da edificação. No entanto, em edificações longas na direção do vento, essa abordagem pode ser excessivamente conservadora.

Este estudo utiliza CFD-LES para calcular numericamente o fator topográfico e a distribuição de pressão externa em um galpão posicionado sobre um talude com múltiplas configurações. Dessa forma busca-se elucidar os efeitos da interação entre a geometria do talude e o posicionamento do galpão e a acurácia com a qual tais aspectos são capturados pela aplicação separada do fator topográfico e dos coeficientes de pressão e forma.

Foram investigadas cinco configurações de altura do talude ( $d$ ), três variações de inclinação ( $\theta$ ) e três valores para o afastamento do galpão em relação à crista ( $l$ ). Ao todo, foram realizadas 62 simulações, sendo 15 para análise do fator topográfico e 47 para medição dos coeficientes de pressão na cobertura do galpão.

Os resultados deste estudo fornecem subsídios sobre o impacto de diferentes configurações de talude no comportamento do vento, contribuindo para o projeto de estruturas mais seguras e eficientes em topografias complexas. A análise destaca a eficiência do CFD-LES na captura de fenômenos complexos, podendo até mesmo oferecer subsídios valiosos para projetos mais seguros e econômicos.

### Palavras-chave

fluidodinâmica computacional; estrutura metálica; galpões; taludes; fator topográfico.

### Introdução

O uso de fluidodinâmica computacional (CFD) para reprodução de fenômenos de alta complexidade tem se tornado cada vez mais factível com o constante avanço tecnológico. Em se tratando de estudos topográficos, o método *Reynolds-Averaged Navier Stokes* (RANS) permite que seja avaliado o perfil de velocidade média do escoamento para o domínio computacional modelado. Dessa forma é possível a obtenção de estimativas do fator topográfico ( $S1$ ) de determinado terreno.

Simulações RANS se valem de modelagem da turbulência para determinação de campos médios sendo portanto incapazes de determinar valores de picos e inadequadas para aplicações estruturais (Blocken, 2014). Para uma melhor reprodução do escoamento é necessário o uso de simulações de larga escala (LES), capazes de capturar valores de pico das escalas com maior energia. Tradicionalmente, o uso de LES está

atrelado a altos custos computacionais devido à necessidade de refino espacial e temporal elevados, porém esse cenário tem mudado nos últimos anos.

O uso de simulações de larga escala para determinação de extremos de pressão ao redor de edificações tem se tornado cada vez mais presente na literatura. Murakami et al. (1987) foi pioneiro nos estudos com LES ao realizar a simulação de um escoamento turbulento ao redor de um cubo de meia altura para diferentes perfis de velocidade na entrada. Em trabalho recente, Geleta e Bitsuamlak (2022) propuseram guidelines para obtenção de resultados de pressão de vento confiáveis em edificações baixas.

Neste estudo utilizamos LES para análise de pressão externa em um galpão posicionado sobre um talude. O objetivo é avaliar a influência de diferentes configurações de talude e posicionamentos do galpão na distribuição de pressão sobre a cobertura. A crescente escassez de terrenos planos para a construção de empreendimentos de grande porte, como galpões industriais, tem impulsionado o interesse na utilização de áreas inclinadas. No entanto, essas condições topográficas influenciam significativamente o comportamento do vento, podendo gerar aumentos expressivos de velocidade devido ao efeito Venturi.

Neste estudo foram investigadas cinco configurações de altura do talude ( $d$ ), três variações de inclinação ( $\theta$ ) e três valores para o afastamento do galpão em relação à crista ( $l$ ). Ao todo, foram realizadas 62 simulações, sendo 15 para análise do fator topográfico e 47 para medição dos coeficientes de pressão na cobertura do galpão.

## Metodologia Numérica

As simulações foram realizadas utilizando o método de grandes escalas (LES) no software OpenFOAM ESI v2206. Com o método das grande escalas são resolvidas as equações da conservação da massa e equações de Navier-Stokes:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} &= 0 \\ \mathbf{g}_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} (\nu + \nu_{SGS}) \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) &= \frac{Du_x}{Dt} \\ \mathbf{g}_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} (\nu + \nu_{SGS}) \left( \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) &= \frac{Du_y}{Dt} \\ \mathbf{g}_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} (\nu + \nu_{SGS}) \left( \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) &= \frac{Du_z}{Dt} \end{aligned}$$

Nas quais  $\rho$  é a densidade do fluido,  $\mathbf{u}$  é o vetor de velocidade,  $\mathbf{g}$  é o vetor associado a forças externas,  $\nu$  é a viscosidade cinemática e  $\nu_{SGS}$  é a viscosidade subgrid, associada ao modelo LES utilizado. O método das grandes escalas consiste na aplicação de um filtro nos sinais de maiores frequências capturados (REF LES). A viscosidade subgrid é calculada utilizando o modelo LES Smagorinsky (REF), para o qual  $\nu_{SGS}$  é dado por:

$$\nu_{SGS} = C_s^2 (\Delta x) \sqrt{2S \cdot S}$$

Na qual,  $C_s$  é a constante de Smagorinsky,  $\Delta x$  é a dimensão do filtro a ser aplicado e  $S$  é a taxa de deformação do fluido.

Para a discretização do domínio computacional é utilizado o método de volumes finitos (FVM), no qual o domínio é subdividido em volumes de controle menores (Moukalled et al., 2016). O acoplamento entre o campo de pressão e velocidades é resolvido utilizando o método PIMPLE, o qual utiliza uma composição entre os métodos PISO para solucionar o escoamento transiente e SIMPLE para convergir os resultados em cada timestep e obter maior estabilidade numérica com número de CFL maiores.

Para as condições de contorno é utilizado o método do filtro digital (DFM) para a condição de entrada do domínio. O DFM gera uma condição de contorno transiente capaz de reproduzir velocidade média e intensidade turbulenta desejados (Klein et al., 2003).

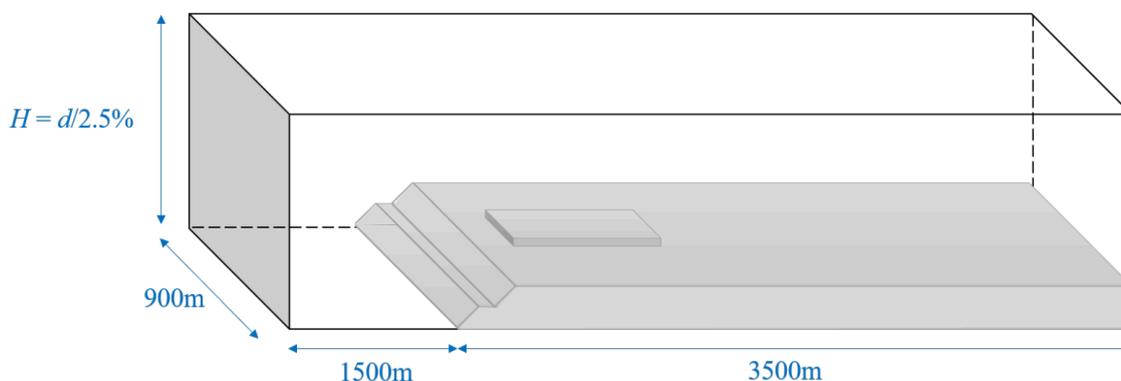
Para as paredes sólidas foi utilizado um modelo de parede de camada limite atmosférica, e para as demais fronteiras condições de contorno de superfície livre.

## Descrição do Problema

O domínio computacional e suas dimensões são ilustrados na Figura 1, com as principais dimensões destacadas na Tabela 1. Os símbolos utilizados para os parâmetros estão indicados na Figura 2 e o conjunto de valores avaliados para cada um estão listados na Tabela 2.

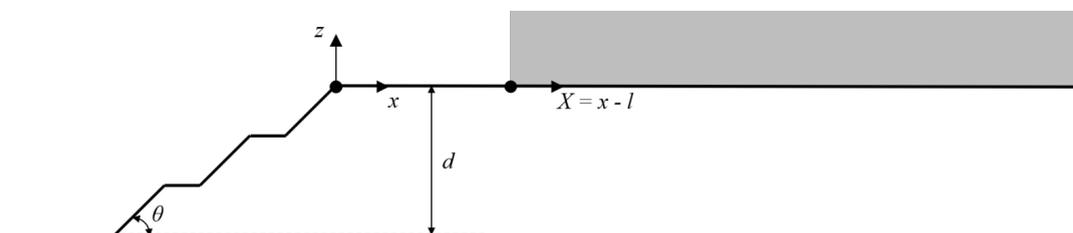
**Tabela 1 – Parâmetros geométricos e de vento constantes do estudo.**

<b>Dimensões do galpão</b>	
Comprimento ( $a$ )	400 m
Largura ( $b$ )	100 m
Altura ( $h$ )	15 m (na cumeeira)
Inclinação do telhado	1:24
<b>Dimensões das bermas</b>	
Altura	8 m
Largura	3 m
<b>Vento</b>	
Orientação	0°
Categoria de rugosidade	II



**Figura 1 – Representação do domínio computacional.**

Para a avaliação do fator topográfico testou-se as 5 alturas totais de talude ( $d$ ) e 3 inclinações ( $\theta$ ), totalizando 15 configurações. Para o estudo de coeficiente de pressão testou-se 3 distanciamentos da crista ( $l$ ) para cada uma das 15 configurações de talude, totalizando 45 configurações. Além disso, avaliaram-se 2 casos adicionais: um caso base contendo somente o galpão e nenhum talude e um caso com um talude sem bermas de 40m, inclinação de 45° e distância da crista de 5m, para avaliar o impacto da rugosidade do talude sobre as pressões medidas.



**Figura 2 – Parâmetros e símbolos avaliados.**

**Tabela 2 – Conjunto de parâmetros avaliados.**

$d$ [m]	$l$ [m]	$\theta$ [°]
8	5	20
16	20	33,5
24	40	40
32		
40		

## Resultados

O fator topográfico foi resolvido neste estudo como forma de complementar a interpretação dos resultados de distribuição de pressão sobre o galpão. Embora o fator topográfico seja especificado como um perfil em função da distância do solo, os valores de maior interesse para o cálculo estrutural são os correspondentes à altura do galpão (15m). As Figuras 3, 4 e 5 apresentam a variação do fator topográfico a 15m em função do distanciamento em relação à crista do talude (l).

Como padrão geral observa-se que os valores de  $S_1$  calculados por CFD são menores do que as previsões da correlação analítica da norma NBR 6123 para posições próximas à crista. Por outro lado, a redução do fator topográfico com o afastamento da crista não é tão brusca quanto preconizada pela NBR 6123, de modo que os valores obtidos por CFD superam os valores indicados pela norma. De fato, o comprimento de re-desenvolvimento da camada limite atmosférica é de algumas centenas de metros, conforme observado anteriormente por muitos autores, tais como Bowen e Lindley (1977) e Ngo e Letchford (2009).

Observa-se, ainda, na Figura 5, que para o caso de talude com altura de 40 m e inclinação de  $45^\circ$  houve o surgimento de uma separação no escoamento

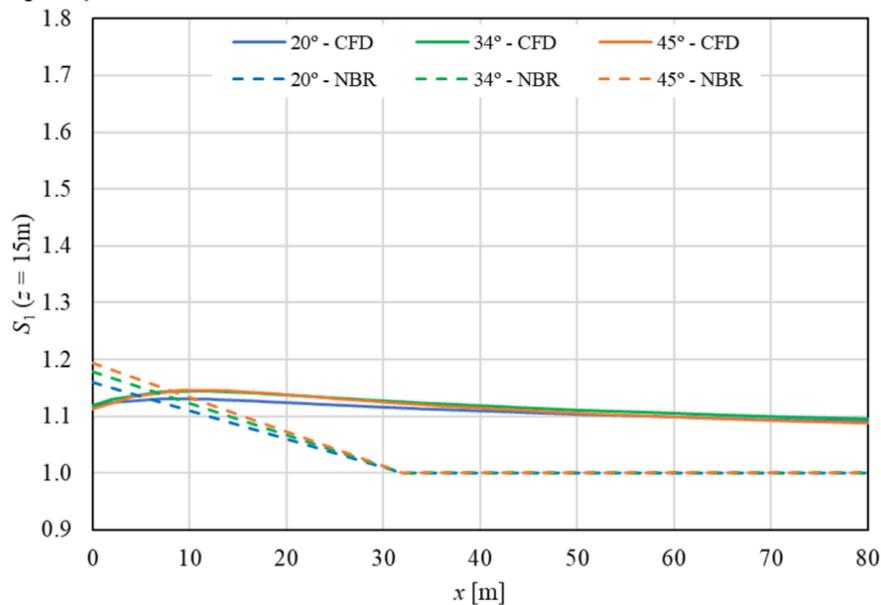


Figura 3 – Variação do fator topográfico a 15m em função do afastamento da crista, para  $d=8m$ .

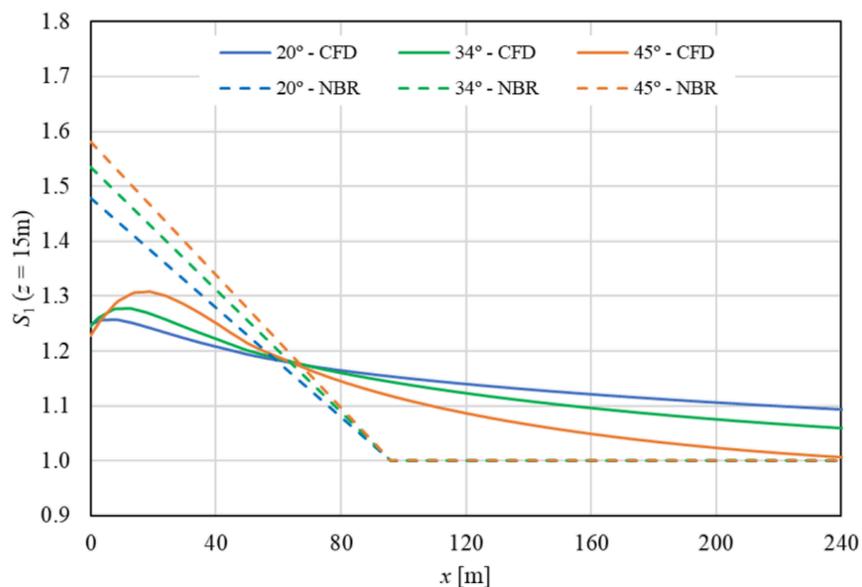
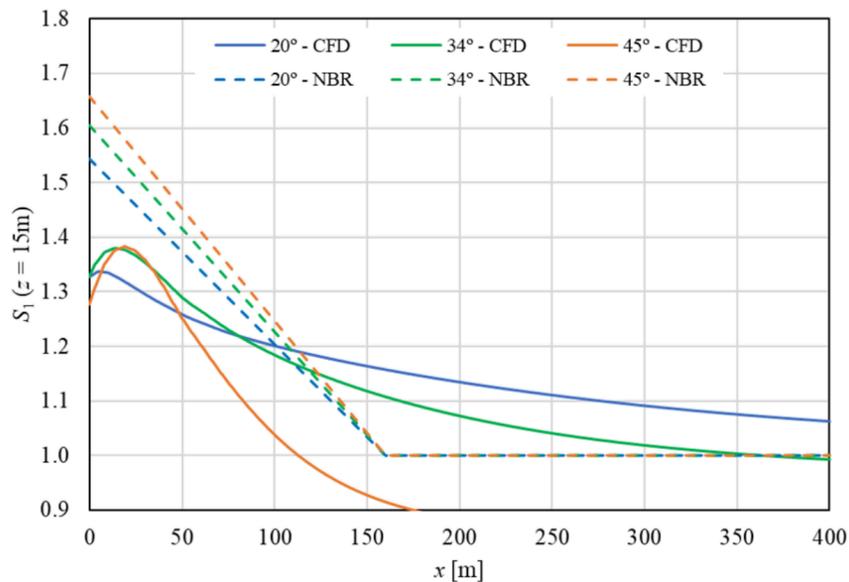
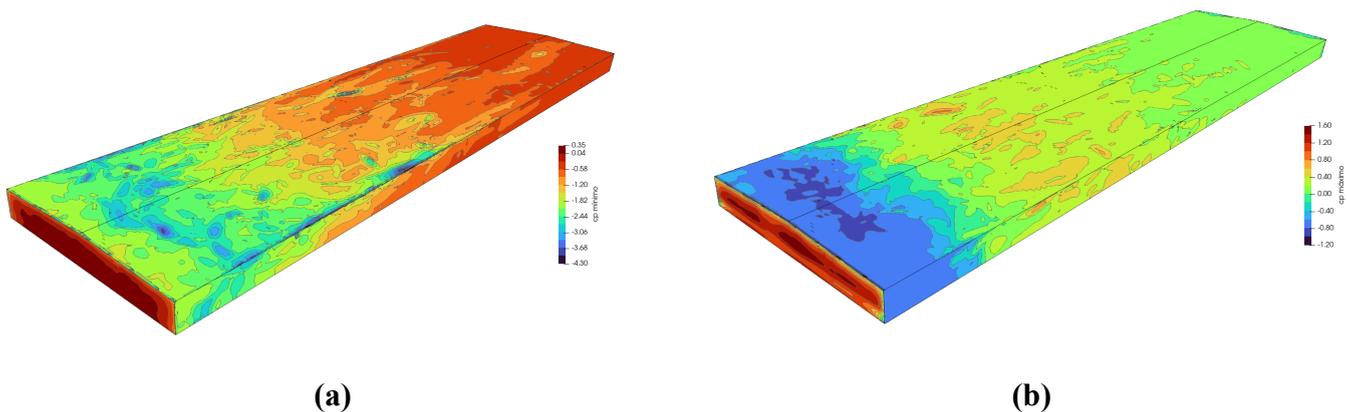


Figura 4 – Variação do fator topográfico a 15m em função do afastamento da crista, para  $d=24m$ .



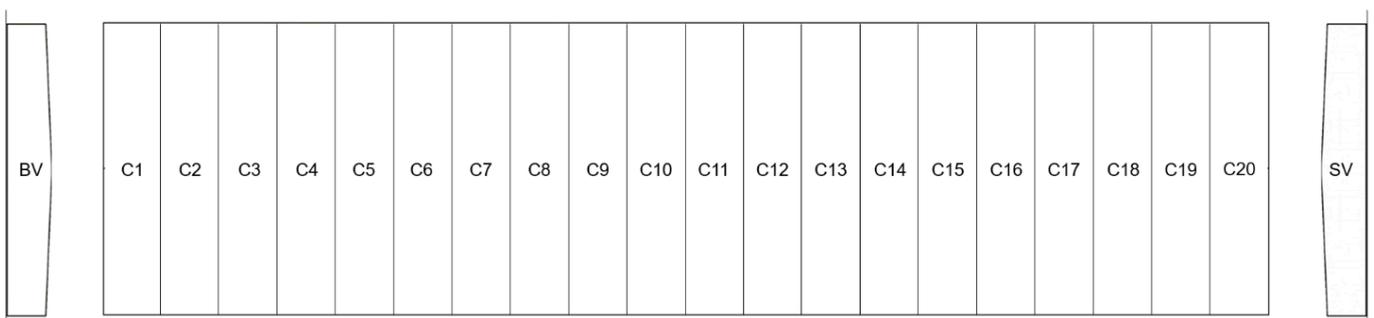
**Figura 5 – Variação do fator topográfico a 15m em função do afastamento da crista, para d=40m.**

A Figura 6 mostra um exemplo da distribuição do coeficiente de pressão mínimo (a) e máximo (b) na fachada de barlavento para o caso de talude sem bermas. Em cada local aferido, a medida extrema da série temporal é um valor relativamente severo. Porém, estes valores não são perfeitamente correlacionados e, portanto, não ocorrem simultaneamente em toda a fachada, de forma que para se realizar o cálculo de cargas sobre grandes áreas é necessário se utilizar a série histórica das forças espaciais médias, representados por meio do coeficiente de forma.



**Figura 6 – Coeficientes de pressão mínimo (a) e máximo (b) para o caso com talude de 40m de altura, 45° de inclinação e sem bermas.**

Neste trabalho, os coeficientes de forma de projeto são definidos pelo extremos da série temporal de  $C_e(t)$ , tanto para sobrepressão ( $\hat{C}$ ) quanto sucção ( $\check{C}$ ). Na cobertura, foram subdivididas regiões com 20 metros de comprimento, conforme ilustrado na Figura X.



**Figura 7 – Divisões utilizadas para definir as áreas tributárias usadas no cálculo dos coeficientes de forma**

A Figura 8 mostra a distribuição dos coeficientes de forma sobre as regiões do galpão, para diferentes valores de altura do talude ( $d$ ). O afastamento e a inclinação foram fixados em  $l = 20$  metros e  $\theta = 33.5^\circ$ , respectivamente. Na cobertura, o efeito de  $d$  é o de aumentar a carga de sucção. Nos primeiros 60 metros na direção longitudinal ( $x$ ) as curvas para os diferentes  $d$  se distanciam, para a partir de então gradativamente se aproximar. Em todos os casos investigados, o coeficiente de forma na fachada de barlavento é muito próximo aos valores medidos no final da cobertura.

As Figuras 9 e 10 mostram uma comparação entre diferentes aplicações dos coeficientes de forma para a cobertura. Compararam-se nas figuras os cálculos dos coeficientes de forma obtidos por 3 métodos: (i) diretamente na simulação, (ii) a aplicação combinada do coeficiente de forma indicado pela norma e os fatores topográficos obtidos numericamente e (iii) aplicação exclusiva dos procedimentos normativos. Para a região C1, foi utilizado um coeficiente analítico de  $-2.0$ , conforme preconizado pela NBR 6123 para atender a estruturas secundárias. Como pode ser observado, o uso deste valor é muito severo. Para ambas as aplicações de fator topográfico, alguns elementos da faixa entre as regiões C2 e C4 ficaram sub-dimensionados com aplicação dos coeficientes da NBR 6123. Porém, as mesmas aplicações em problemas com taludes menores apresentam um super-dimensionamento na faixa entre C5 e C10. Em taludes maiores que 24 metros de altura, o coeficiente de forma aumenta de C1.

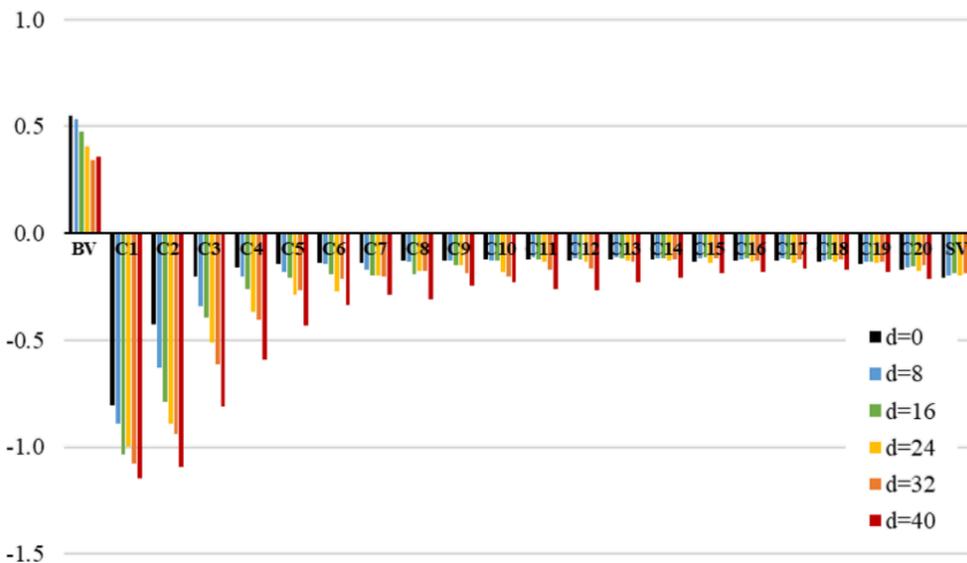


Figura 8 – Coeficientes de forma na cobertura. Variação com a altura do talude.

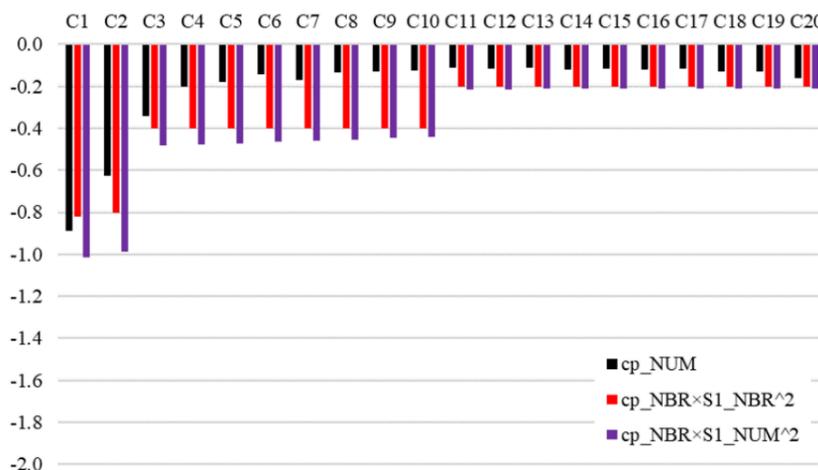
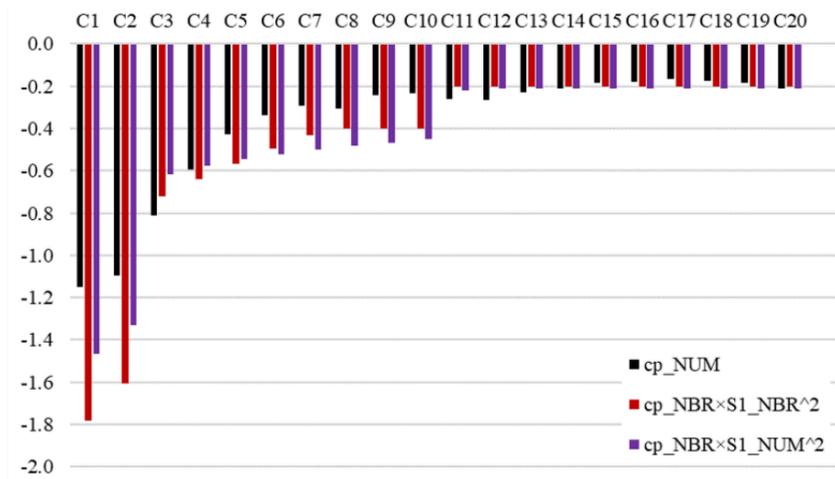


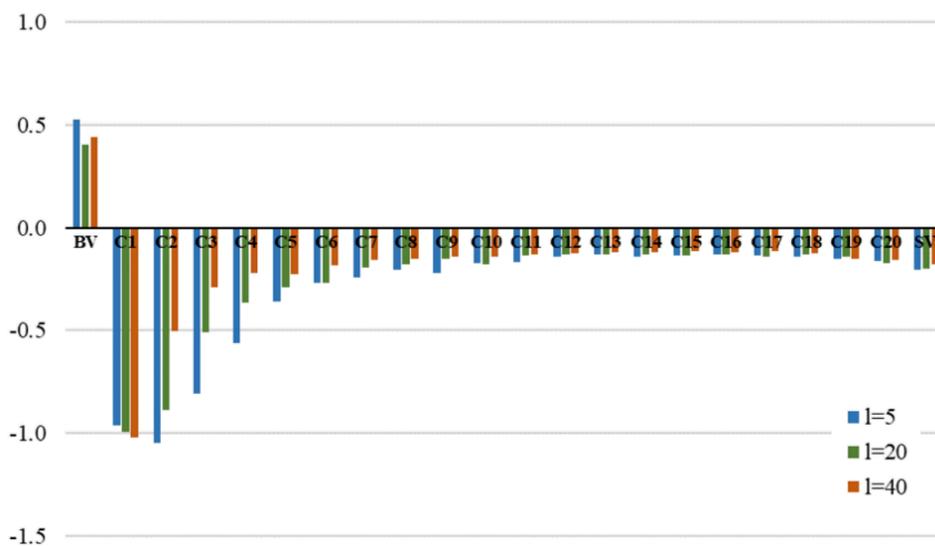
Figura 9 – Comparativo dos coeficientes de forma na cobertura, combinando resultados numéricos e analíticos.  $d=8m$ ,  $l=20m$ ,  $\theta=33,5^\circ$ .



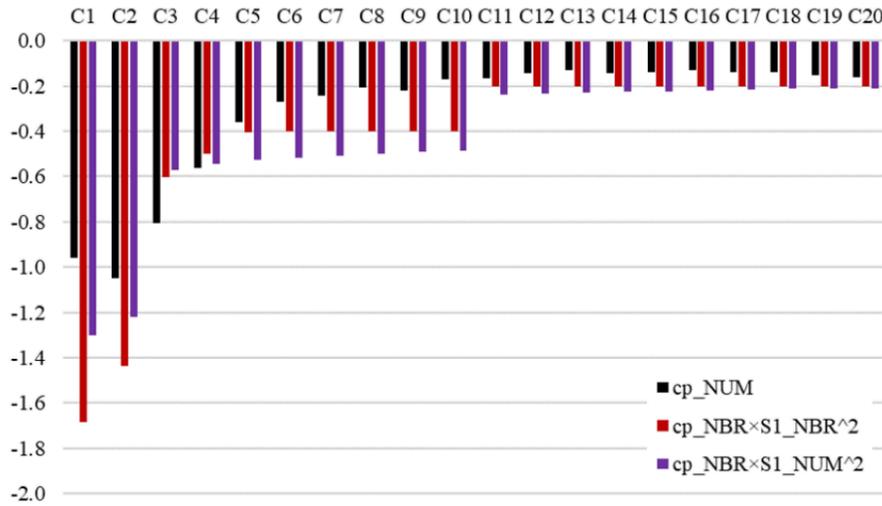
**Figura 10 – Comparativo dos coeficientes de forma na cobertura, combinando resultados numéricos e analíticos.  $d=40m$ ,  $l=20m$ ,  $\theta=33,5^\circ$ .**

A Figura 11 mostra a distribuição dos coeficientes de forma sobre as regiões do galpão, para diferentes valores de afastamento da crista ( $l$ ). A altura e a inclinação foram fixados em  $d = 24$  metros e  $\theta = 33.5^\circ$ , respectivamente. Na cobertura, o efeito de  $l$  é o de diminuir a carga de sucção, exceto na região C1, onde esta tendência é inversa. Nos primeiros 60 metros na direção longitudinal ( $x$ ) as curvas para os diferentes  $l$  se distanciam, para a partir de então gradativamente se aproximam.

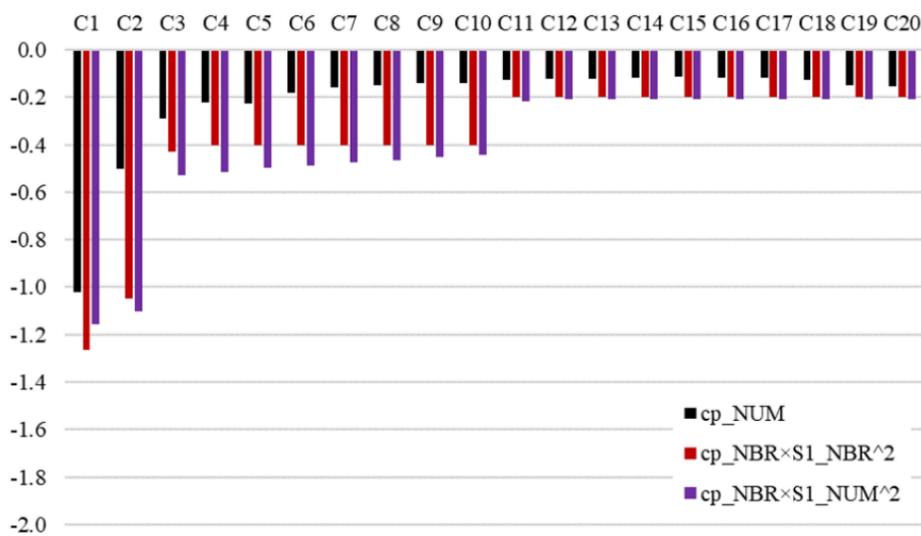
As Figuras 12 e 13 utilizam os mesmos procedimentos das Figuras 9 e 10, mas avaliam o efeito do afastamento da crista. Para afastamentos curtos, os elementos da faixa entre as regiões C3 e C5 ficaram sub-dimensionados com aplicação dos coeficientes da NBR 6123. Porém, as mesmas aplicações em problemas com afastamentos maiores apresentam um super-dimensionamento na faixa entre C1 e C10. No caso dos afastamentos de 5 e 20 metros, o coeficiente de forma aumenta de C1 para C2. Este tipo de tendência não é capturado pelas soluções analíticas.



**Figura 11 – Coeficientes de forma na cobertura. Variação com o afastamento da crista.**



**Figura 12 – Comparativo dos coeficientes de forma na cobertura, combinando resultados numéricos e analíticos.  $d=24m$ ,  $l=5m$ ,  $\theta=33,5^\circ$ .**



**Figura 13 – Comparativo dos coeficientes de forma na cobertura, combinando resultados numéricos e analíticos.  $d=24m$ ,  $l=40m$ ,  $\theta=33,5^\circ$ .**

A Figura 14 mostra a distribuição dos coeficientes de forma sobre as regiões do galpão, para diferentes valores de inclinação do talude ( $\theta$ ). A altura e o afastamento foram fixados em  $d = 24$  e  $l = 20$  metros, respectivamente. Na cobertura, o efeito de  $\theta$  é o de diminuir a carga de sucção. As diferenças absolutas obtidas entre os diferentes valores de  $\theta$  é menor do que para as outras variáveis ( $d$  e  $l$ ).

As Figuras 15 e 16 utilizam os mesmos procedimentos das Figuras 9 e 10, mas avaliam o efeito da inclinação do talude. Para ambas as aplicações de fator topográfico, alguns elementos da faixa entre as regiões C2 e C5 ficaram sub-dimensionados com aplicação dos coeficientes da NBR 6123. Porém, especialmente para maiores inclinações, existem locais de super-dimensionamento na faixa entre C6 e C10. Nos casos de  $20^\circ$  e  $33.5^\circ$ , o coeficiente de forma aumenta de C1 para C2. Este tipo de tendência não é capturada pelas soluções analíticas.

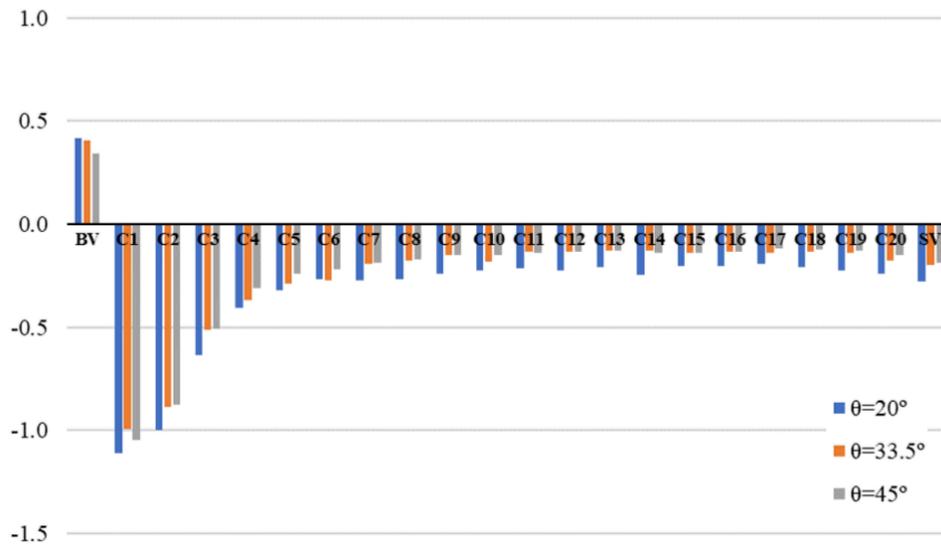


Figura 14 – Coeficientes de forma na cobertura. Variação com a inclinação do talude.

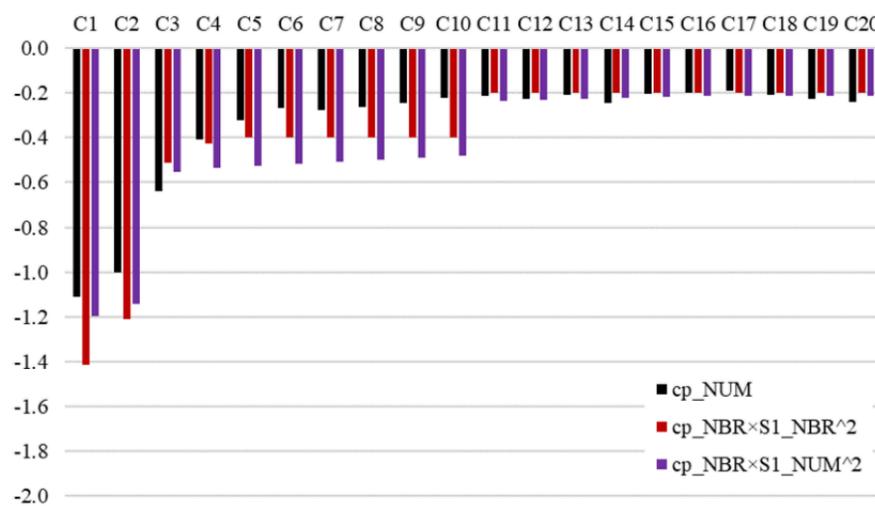


Figura 15 – Comparativo dos coeficientes de forma na cobertura, combinando resultados numéricos e analíticos.  $d=24m$ ,  $l=20m$ ,  $\theta=20^\circ$ .

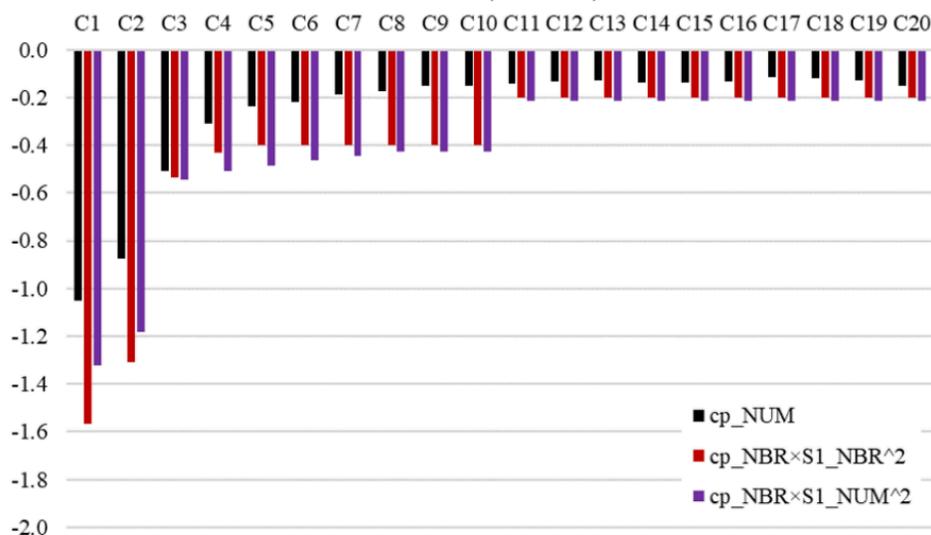
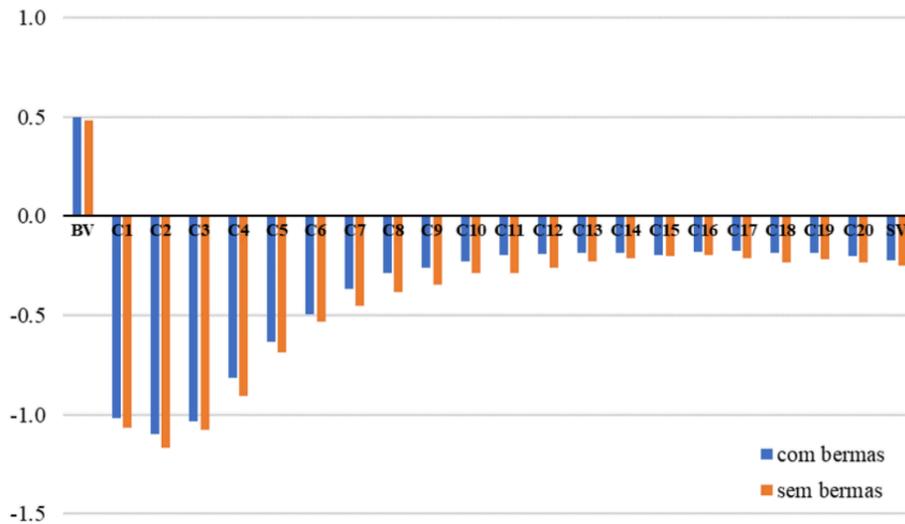


Figura 16 – Comparativo dos coeficientes de forma na cobertura, combinando resultados numéricos e analíticos.  $d=24m$ ,  $l=20m$ ,  $\theta=45^\circ$ .

A Figura 17 mostra a distribuição dos coeficientes de forma sobre as regiões do galpão, para dois taludes de altura  $d = 24$  metros, afastamento de  $l = 5$  metros e inclinação de  $\theta = 45^\circ$ . O talude com bermas é o caso 43 e o talude sem bermas é o caso 46, sendo que o último é simplesmente uma rampa de  $45^\circ$ . Na cobertura, o efeito das bermas é o de diminuir a carga de sucção. As diferenças absolutas obtidas entre os dois casos é

relativamente pequena. Em relação às estatísticas locais, mostradas pelos coeficientes de pressão, as diferenças também são muito pequenas.



**Figura 17 – Coeficientes de forma na cobertura. Avaliação do efeito da presença de bermas.**

### Conclusões

A análise numérica realizada permitiu avaliar a interação entre o efeito topográfico e os coeficientes de pressão em taludes com diferentes geometrias e galpões com variados afastamentos da crista. O comparativo entre os resultados obtidos e os preconizados pela norma ABNT 6123 aponta para valores de fator topográfico menores próximo à crista, mas maiores em regiões afastadas, indicando um longo comprimento de neutralização da velocidade. Observou-se que o aumento da altura do talude e o afastamento em relação à crista apresentaram grande efeito sobre os coeficientes de forma, mas o ângulo de inclinação e a presença de bermas apresentaram impacto reduzido. A utilização de métodos numéricos LES demonstrou ser confiável para a determinação das velocidades do vento e cargas sobre a estrutura, servindo como um método complementar ao túnel de vento físico. Por fim, sugere-se a ampliação dos estudos para incluir configurações mais complexas, como múltiplos taludes e formações geomorfológicas mais detalhadas.

### Referências

- BLOCKEN, B. 50 Years of Computational Wind Engineering: Past, Present and Future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 129, 69–102, 2014.
- BOWEN, A.J.; LINDLEY, D. A. Wind-Tunnel Investigation of the Wind Speed and Turbulence Characteristics Close to the Ground over Various Escarpment Shapes. *Boundary-Layer Meteorology*, Oct, 12:259-7., 1977.
- GELETA, T.N., BITSUAMLAK, G.. Validation Metrics and Turbulence Frequency Limits for LES-Based Wind Load Evaluation for Low-Rise Buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 231, 105210, 2022.
- MANGANI, M. Darwish F. Moukalled L. et al. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*. 2016.
- MURAKAMI, S., MOCHIDA, A., HIBI, K., Three-Dimensional Numerical Simulation of Air Flow Around a Cubic Model by Means of Large Eddy Simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 25, 291–305, 1987.
- NGO, T.T., LETCHFORD, C.W. Experimental Study of Topographic Effects on Gust Wind Speed. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Nov 1;97(9-10):426-38, 2009.