



XIV Congresso Brasileiro
de Pontes e Estruturas

Utilização de Fluidodinâmica Computacional para Calcular o Fator Topográfico de Aceleração do Vento

Aron L. Zavelinski¹, Alan Lugarini¹, Admilson T. Franco²

¹AeroSim / Engenharia de Vento / aron@aerosim.io,

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) / admilson@utfpr.edu.br

Resumo

Uma estrutura posicionada sobre um morro ou talude está sujeita a uma velocidade de vento amplificada por Efeito Venturi. Tal variação provoca cargas consideravelmente maiores do que aquelas que ocorreriam em terreno plano. Por isto o Fator Topográfico, parâmetro que indica a proporção de elevação de velocidade devido à forma do terreno, é previsto em todas as principais normas de cargas de vento. As normas de cargas de vento sobre estruturas, como por exemplo a brasileira NBR 6123, apresentam soluções analíticas para estimar o Fator Topográfico em perfis simplificados. No entanto, terrenos reais apresentam perfis topográficos complexos. Desta maneira, as soluções analíticas acabam acarretando em grandes incertezas, tanto pela sua inabilidade de representar uma variedade de perfis, quanto pela subjetividade em sua aplicação. O presente trabalho traz a descrição de uma metodologia para calcular o Fator Topográfico em terrenos complexos através de um método de fluidodinâmica computacional (CFD). A metodologia desenvolvida utiliza uma maquete digital do terreno de entorno da obra, combinada com o projeto de terraplenagem. Comparações com resultados de túnel de vento são mostradas para efeito de validação. Uma análise de custo/benefício mostra que o método desenvolvido para calcular o Fator Topográfico é uma alternativa viável e mais precisa do que as soluções analíticas. Os benefícios para as estruturas são maior segurança, qualidade e economia, especialmente para aquelas construções com fachadas próximas às cristas de morros e taludes.

Palavras-chave

Cargas de Vento; Fator Topográfico; Fluidodinâmica Computacional; Modelo Digital de Elevação.

Introdução

Acidentes topográficos, sejam naturais ou artificiais, modificam significativamente o perfil de velocidade da camada limite atmosférica. As variações de elevação no terreno podem provocar alterações significativas na velocidade média e na intensidade turbulenta do vento. Pode-se também mencionar a possibilidade de proteção topográfica, se a edificação estiver precedida de um terreno mais elevado a barlavento. Esses fenômenos são de central interesse para os projetistas de estruturas, pois para que se garanta a segurança e viabilidade econômica do empreendimento, é necessário que se realize uma determinação acurada das cargas de vento, as quais estão fortemente relacionadas com o perfil de velocidade.

Ao longo das últimas décadas avaliou-se em estudos de campo e em túnel de vento os impactos de diferentes configurações topográficas simplificadas sobre o vento. Jackson e Hunt (1975) desenvolveram um modelo analítico para escoamento sobre morros bidimensionais com inclinação suave. Bowen e Lindley (1977), por outro lado, avaliaram experimentalmente em túnel de vento taludes bidimensionais com diferentes inclinações. Meroney et al. (1976, 1977) avaliaram encostas e morros com diferentes formatos. Outros estudos, como o de Britter et al. (1981) avaliaram o efeito da rugosidade superficial do terreno sobre e no entorno de um morro. Kim et al. (1997) avaliaram o efeito de múltiplos morros bidimensionais alinhados em sequência. Tais estudos foram importantes para se identificar padrões gerais de distorção do campo de velocidades e influenciaram na

formulação de soluções analíticas para normas de vento internacionais. No entanto, terrenos reais possuem configurações complexas, em contraste com os perfis simplificados das soluções analíticas. Considerando o impacto do fator topográfico sobre o projeto de uma estrutura, é desejável o desenvolvimento de métodos mais precisos para o cálculo deste parâmetro.

A engenharia de vento computacional, definida como a utilização de fluidodinâmica computacional para solucionar problemas de engenharia de vento, apresenta mais de 50 anos de desenvolvimento através dos quais a disciplina passou de um campo emergente para um campo de pesquisa estabelecido, cobrindo um número crescente de tópicos e com aplicações em correntes de ar de escalas sinópticas, mesoscópicas e microscópicas (Blocken, 2014). Miller et al. (2013) analisam diversas aplicações de sucesso da fluidodinâmica computacional, análise de elementos finitos e modelagem numérica da meteorologia para otimizar diferentes aspectos associados à energia eólica, tais como otimização de layout, modelagem e previsão de vento, otimização e modelagem de hélices e estruturas de suporte, resolução de escoamento turbulento e previsão de ruído. Cochran e Derickson (2011) apontam os sucessos que a área já alcançou e indicam o potencial e os desafios para a utilização da técnica para previsão da velocidade do vento sobre relevos complexos, estimativa de cargas de vento e estudo de impacto sobre pontes extensas, além de estudo de ventilação natural e dispersão de poluentes. Além disso, de forma similar ao realizado em estudos de túnel de vento, Bitsuamlak, Stathopoulos e Bédard (2004) apontam que a técnica já foi utilizada com sucesso para analisar o vento sobre diversas estruturas topográficas típicas, tais como morros, taludes e vales, isolados ou em sequência. Blocken et al. (2015) analisaram paralelamente por meio de medições em campo e através de simulação numéricas as velocidades do vento em uma topografia complexa com sucessões de morros e vales nos arredores de um canal estreito em Ria de Ferrol, Galícia, Espanha. Os autores classificaram a concordância entre os resultados como boa ou muito boa.

O presente trabalho apresenta uma metodologia fundamentada na utilização de fluidodinâmica computacional, baseada em um método RANS, para calcular numericamente o fator topográfico em implantações tridimensionais reais. Utilizou-se modelos de parede que replicam o comportamento da camada limite atmosférica. Os resultados obtidos são compatíveis com o uso em projetos de estruturas, conforme se verifica com a bateria de validações realizadas.

Metodologia Numérica

A solução numérica se dá por meio do método de volumes finitos aplicado sobre uma malha hexaédrica não ortogonal ajustada ao terreno tridimensional. Utilizou-se o algoritmo de correção de pressão SIMPLEC para solucionar o conjunto de equações. O problema foi descrito por meio das Equações de Navier-Stokes sob Média de Reynolds (RANS) em regime permanente, e a turbulência foi modelada por meio do modelo $k-\omega$ SST. As metodologias baseadas em equações RANS são capazes de estimar o comportamento do perfil de velocidade média, de forma que sua aplicação é adequada no cálculo do fator topográfico. Por outro lado, a metodologia não modela as componentes oscilatórias do escoamento, sendo, portanto, inadequada para estimar o comportamento estatístico das cargas de vento sobre estruturas.

Para se formar a camada limite atmosférica com a categoria de rugosidade adequada utilizou-se um conjunto de funções de parede. Para a energia cinética da turbulência (k) aplicou-se a condição de Neumann com gradiente nulo. Para a taxa de dissipação específica da turbulência (ω) aplicou-se a Equação 1, apresentada por Parente et al. (2011), em que C_μ e κ são constantes iguais a 0,09 e 0,41, y é a distância em relação ao solo e z_0 é o comprimento de rugosidade.

$$\omega = \frac{\sqrt{k}}{C_\mu^{1/4} \kappa (y + z_0)} \quad (1)$$

O perfil de velocidade média, caracterizado pela lei logarítmica, é implementada indiretamente por meio da aplicação de uma função de parede sobre a viscosidade turbulenta, conforme apresentado na Equação 2, em que ν_{tw} e ν_w são, respectivamente viscosidade turbulenta e viscosidade cinemática do fluido em contato com a parede. A variável u_τ e u_p representam, respectivamente, a velocidade de fricção, calculada por meio da Equação 3, e a velocidade tangencial do fluido próximo à parede.

$$\nu_{tw} = \frac{(u_\tau)^2 y}{\max(u_p, 10^{-6})} - \nu_w \quad (2)$$

$$u_\tau = \frac{u_p \kappa}{\ln \left(\max \left(\frac{y+z_0}{z_0+10^{-4}}, 1+10^{-4} \right) \right)} \quad (3)$$

Além disso, para que o perfil de velocidade característico da camada limite atmosférico se forme a barlavento da região simulada, é necessário que se apliquem condições de contorno adequadas na entrada do domínio. Nas simulações aplicaram-se perfis sobre a energia cinética da turbulência (k), apresentada na Equação 4 e para a taxa de dissipação específica da turbulência (ω), apresentada na Equação 5. Os coeficientes de ajuste C_1 , C_2 são iguais a 0 e 1, respectivamente. A altura de deslocamento d foi igualada ao comprimento de rugosidade z_0 . A equação 4 foi apresentada por Yang, Gu, Chen e Jin (2009), resultado tomado como base e modificado por Yang, Gu e Jin (2009) para se chegar à equação 5.

$$k = \frac{(u_\tau)^2}{\sqrt{C_\mu}} \sqrt{C_1 \ln \left(\frac{z-d+z_0}{z_0} \right) + C_2} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{u_\tau}{\kappa \sqrt{C_\mu}} \frac{1}{z-d+z_0} \quad (5)$$

Na formulação apresentada o perfil de velocidade média característico de uma determinada categoria de rugosidade é obtido por meio da especificação do comprimento de rugosidade z_0 .

Com o intuito de incorporar os efeitos topográficos sobre a velocidade do vento, a norma brasileira NBR 6123 utiliza-se de um fator multiplicativo denominado fator topográfico, ou fator S1. O fator é calculado conforme o indicado na Equação 6, e indica o aumento de velocidade sofrido pelo vento a uma determinada altura, devido a acelerações e bloqueios locais devidos à topografia.

$$S_1(z) = \frac{\text{Velocidade do vento a altura } z \text{ acima do obstáculo}}{\text{Velocidade do vento a altura } z \text{ acima do chão plano a barlavento}} \quad (6)$$

Validação da Metodologia

Para se realizar a validação da metodologia proposta, utilizaram-se resultados experimentais obtidos em túnel de vento e apresentados em dois trabalhos publicados na literatura. O primeiro, realizado por Bowen e Lindley (1977) avalia o efeito de aceleração da velocidade do escoamento devido à existência de um talude reto e simples com diferentes inclinações, além de um caso de um penhasco com inclinação de 90°. No presente trabalho utilizaram-se os dados referentes ao talude com

inclinação de 45° , conforme apresentado no desenho esquemático da Figura 1. O segundo trabalho, realizado por Scotton (2020), avaliou efeito similar provocado por geometrias mais complexas de taludes com bermas e morros sinusoidais. As duas geometrias selecionadas desse trabalho para comparação estão apresentadas nos desenhos esquemáticos das Figuras 2 e 3, apresentando a situação de um morro sinusoidal com inclinação de 45° e um talude subdividido e separado por duas bermas, respectivamente. No restante do trabalho, as geometrias apresentadas serão denominadas, em ordem, por geometria A, B e C.

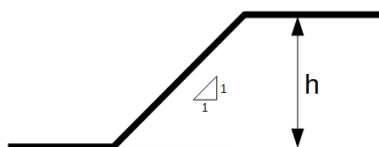


Figura 1 – Geometria A: Talude reto com inclinação de 45° .

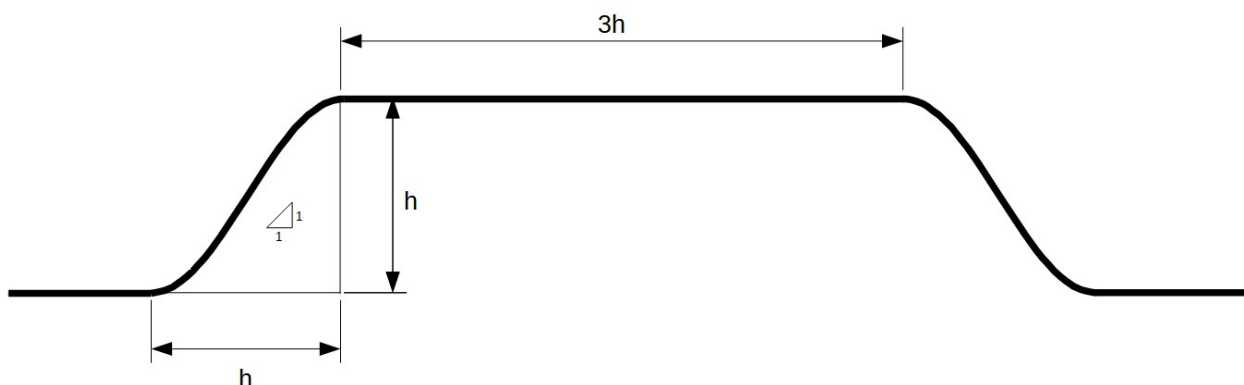


Figura 2 – Geometria B: Morro sinusoidal com inclinação de 45° .

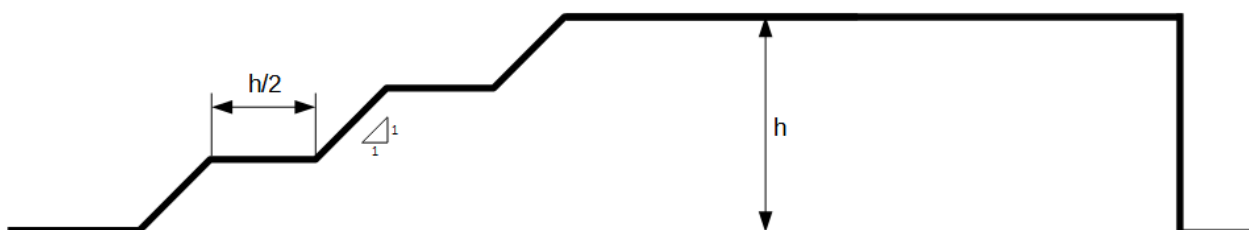


Figura 3 – Geometria C: Talude escalonado com degraus de 45° e 2 duas bermas.

As Figuras 4, 5 e 6 apresentam a visualização da velocidade média do vento para os três casos avaliados. As cores indicam as zonas de escoamento separado (azul), baixa velocidade (cinza) e alta velocidade (vermelho). Em todas as figuras é possível se observar a formação de uma zona de recirculação que se separa na crista do talude. De acordo com Holmes (2015), a separação pode ocorrer nessa zona para inclinações superiores a aproximadamente 17° . É possível observar também que a presença do obstáculo distorce o escoamento a barlavento do pé do talude, tornando-o mais lento do que o escoamento livre. Na figura 6 é possível observar que pequenas zonas de recirculação se formam em cada berma da configuração C.

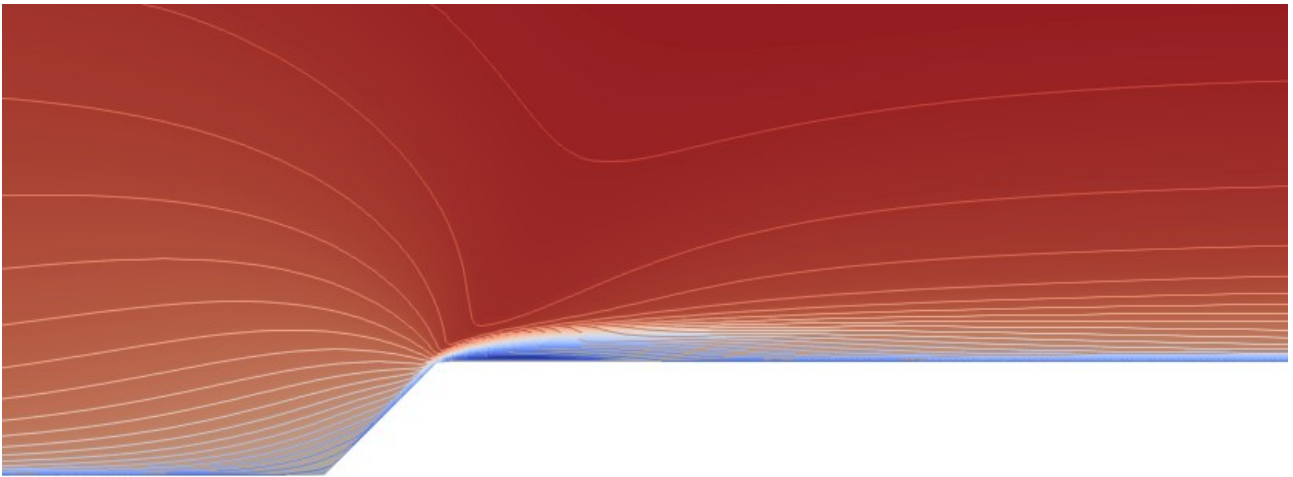


Figura 4 – Campo de velocidade sobre a geometria A.

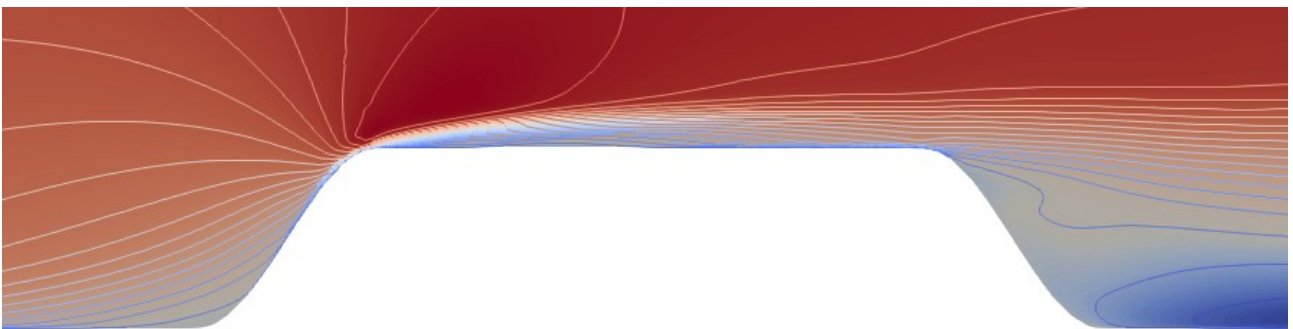


Figura 5 – Campo de velocidade sobre a geometria B.

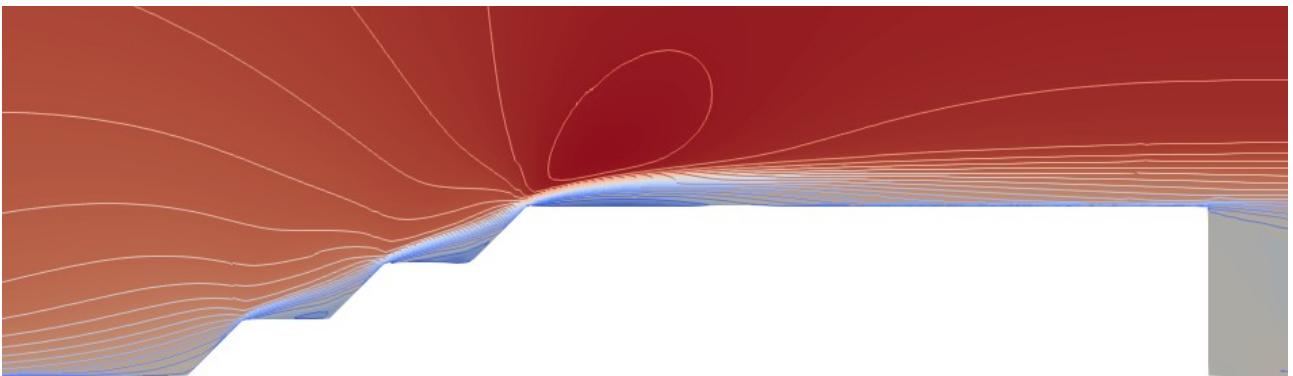


Figura 6 – Campo de velocidade sobre a geometria C.

Na crista dos obstáculos percebe-se uma aproximação das linhas de iso-velocidade, indicando uma grande aceleração do vento na região. De fato, é possível se observar na Figura 7 que ocorre um significativo aumento de velocidade próximo ao chão, atingindo-se fatores topográficos de até 1,8 para $z \leq 0,15h$. A Figura 7 realiza um comparativo entre os fatores topográficos obtidos experimentalmente, numericamente e calculados a partir da solução analítica da norma NBR 6123. Nota-se que, para alturas de $z \leq 2h$, a solução analítica superestima o fator S1 na crista dos taludes. Os resultados obtidos numericamente acompanham com ótima precisão os resultados experimentais.

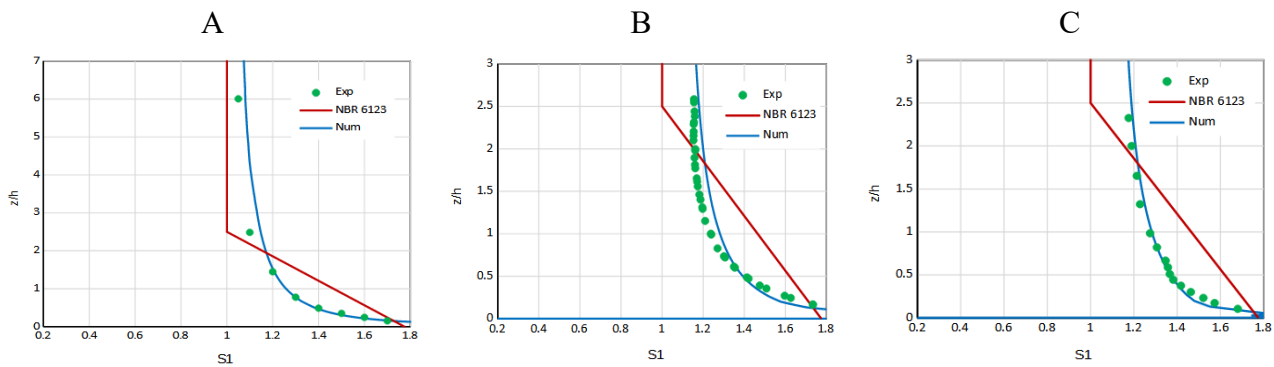


Figura 7 – Fator topográfico na crista do talude, para as geometrias A, B e C.

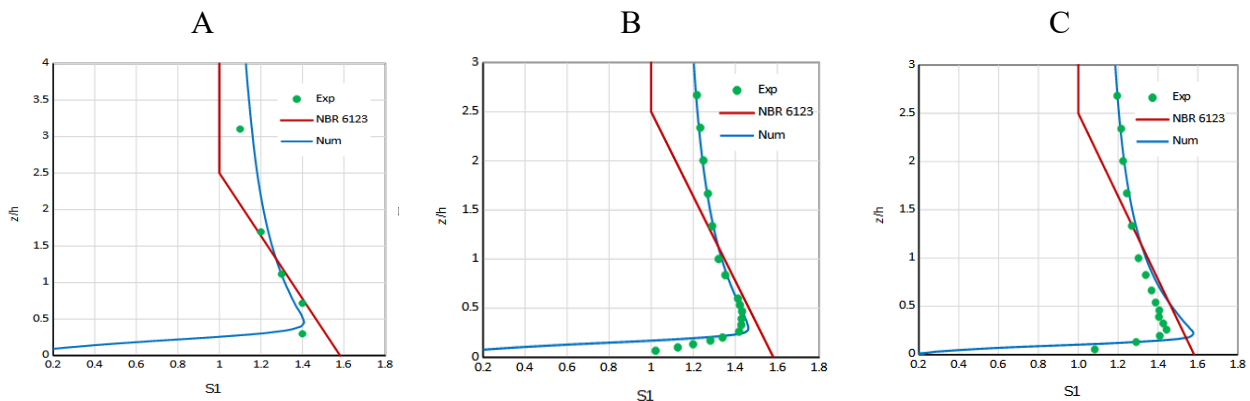


Figura 8 – Fator topográfico a uma distância de $1h$ a sotavento da crista, para as geometrias A, B e C.

A Figura 8 demonstra o fator topográfico obtido a uma distância de $1h$ do talude a partir da crista, na direção sotavento. Observa-se que os fatores topográficos extremos obtidos na crista sofrem reduções significativas ao longo do trajeto a sotavento, atingindo valores de em torno de 1,4. A solução analítica mantém uma tendência de superestimar o valor de $S1$ próximo ao chão, apontando valores de aproximadamente 1,6. Os valores obtidos numericamente mantiveram um bom ajuste aos resultados experimentais.

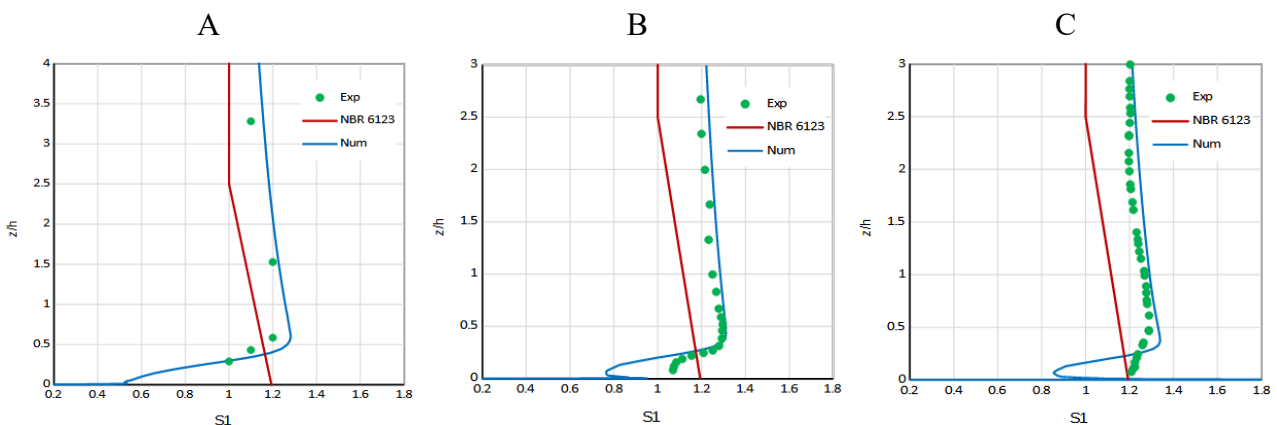


Figura 9 – Fator topográfico a uma distância de $3h$ a sotavento da crista, para as geometrias A, B e C.

A Figura 9 apresenta os fatores topográficos a uma distância igual a $3h$ e revela que a tendência de redução do fator topográfico se mantém conforme a mensuração se distancia da crista. A norma

NBR 6123 dita que para afastamentos iguais ou superiores a 4h, o fator topográfico decai para 1 em toda a extensão vertical. Observa-se que para afastamentos longos a tendência de erro da norma é invertida, ou seja, subestima a real velocidade do vento, incorrendo em riscos estruturais. Bowen e Lindley (1977), assim como Ngo e Letchford (2009) mensuraram valores de fator topográfico superiores a 1,1 que persistiram por um afastamento maior que 10h. Os resultados numéricos, novamente, acompanham com ótima precisão os resultados experimentais em regiões distantes da crista.

Conclusões

Os resultados apresentados indicam as grandes potencialidades associadas à utilização de métodos numéricos para se realizar a determinação dos efeitos topográficos sobre os perfis de vento. Embora as soluções analíticas sejam muito práticas, foi possível observar severas limitações quando se comparam o fenômeno real com o que se estabelece em normativa. Para regiões próximas à crista do talude observa-se que a norma NBR 6123 dá valores excessivamente conservadores, enquanto que a mesma subestima o fator topográfico em afastamentos mais longos. Por outro lado, para todos os casos analisados, as soluções numéricas apresentaram precisões muito boas em relação às medições experimentais.

Os casos avaliados consideram geometrias bidimensionais, nos quais se pressupõem que a topografia sofre pouca ou nenhuma variação na direção transversal ao vento. Essa pode ser uma boa aproximação em casos com escarpas e taludes muito extensos. No entanto, no caso de morros e taludes com estrutura tridimensional, o vento é capaz de realizar desvios laterais ou passar por meio de frestas, reduzindo-se, assim, a velocidade do vento sobre o platô da obra (Holmes, 2015). Com a metodologia numérica é possível construir um modelo digital de elevação (digital elevation model - DEM) da topografia por meio da integração de informações de altimetria provindas de leituras das mais diversas fontes, tais como receptores GNSS, sensoriamento remoto por drones e pequenos aviões, além de dados de satélite, entre outros. Além disso, pode-se também adicionar múltiplos projetos de terraplenagem alternativos sobre o relevo real, de forma a se avaliar potenciais efeitos associados com cada intervenção. As Figuras 10, 11 e 12 apresentam três etapas de um exemplo de construção de um relevo digital a partir de medições altimétricas provindas de 3 fontes distintas.



Figura 10 – Visão da região a ser modelada digitalmente.

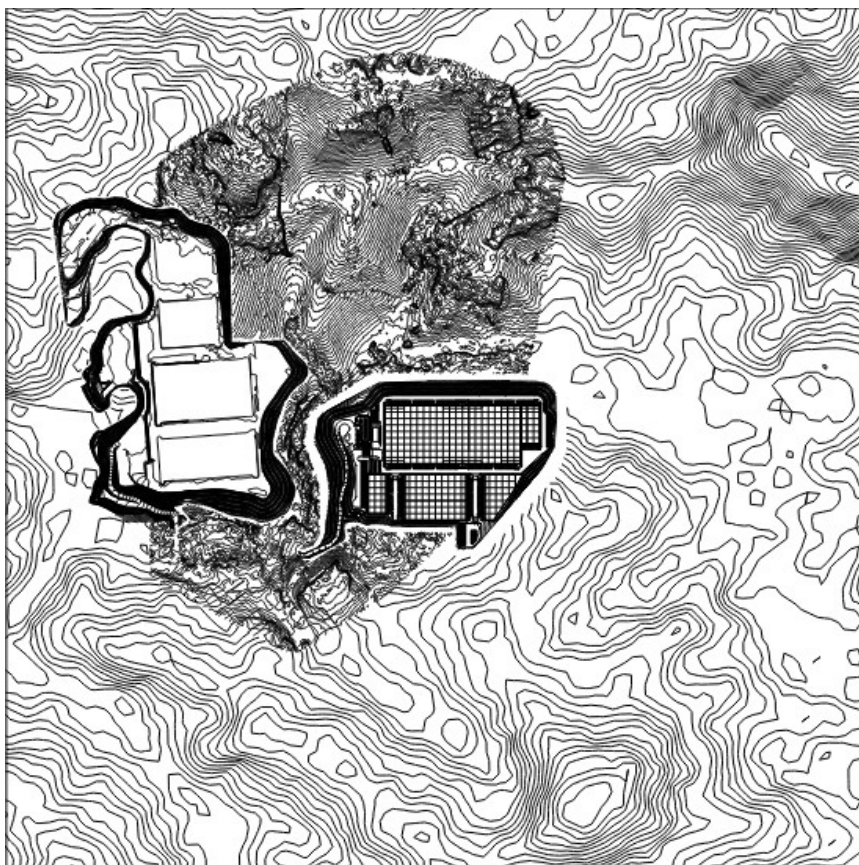


Figura 11 – Curvas de nível formadas a partir de 3 fontes de medições altimétricas distintas.

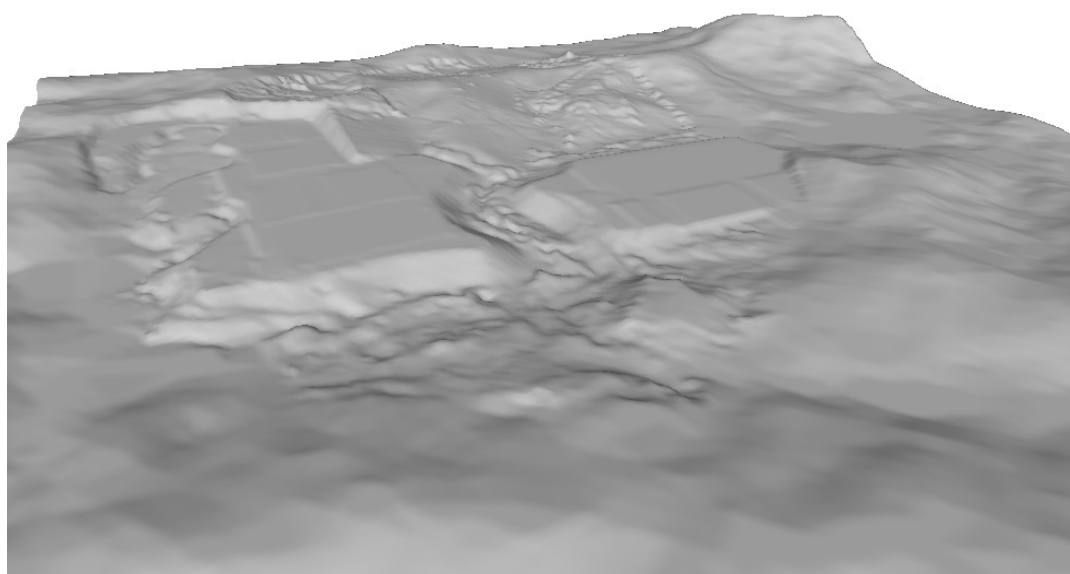


Figura 12 – Modelo de Elevação Digital (DEM) formado.

A partir dos resultados obtidos concluiu-se que a utilização de metodologias numéricas para se realizar a estimativa do fator topográfico apresenta grandes potenciais positivos, em especial em regiões com relevo complexo. Foi possível se obter uma redução de incertezas na estimativa de cargas de vento, o que naturalmente acarreta em maior segurança, qualidade e economia, especialmente para aquelas construções com fachadas próximas às cristas de morros e taludes.

Referências

- JACKSON, P.; HUNT, J. Turbulent wind flow over a low hill. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 101, No. 430, p.929-955, 1975.
- BOWEN, A.; LINDLEY, D. A Wind-Tunnel Investigation of the Wind Speed and Turbulence Characteristics Close to the Ground Over Various Escarpment Shapes. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 12, No. 3, p. 259-271, 1977.
- MERONEY, R.; SANDBORN, V. A.; BOUWMEESTER, R.; RIDER, M. Wind Tunnel Simulation of the Influence of Two Dimensional Ridges on Wind Speed and Turbulence. *International Symposium on Wind Energy Systems*, p.6, 1976.
- MERONEY, R. N.; BOUWMEESTER, R. J. B.; SANDBORN, V. A.; RIDER, M. A. The Influence of Hill Shape on Wind Characteristics Over Two-Dimensional Hills. *Proceedings of Third Biennial Conference and Workshop on Wind Energy Conversion Systems*, Washington, D.C., p.646-653, Setembro, 1977.
- BRITTER, R.; HUNT, J.; RICHARDS, K. Air Flow Over a Two-Dimensional Hill: Studies of Velocity Speed-Up, Roughness Effects and Turbulence. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 107, No. 451, p.91-110, 1981.
- KIM, H. G.; LEE, C. M.; LIM, H. C.; KYONG, N. H. An Experimental and Numerical Study on the Flow Over Two-Dimensional Hills. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 66, No. 1, p.17-33, 1997.
- BLOCKEN, B. 50 Years of Computational Wind Engineering: Past, Present and Future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 129, p.69-102, 2014.
- COCHRAN, L.; DERICKSON, R. A Physical Modeler's View of Computational Wind Engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol 99, No.4, p.139-153, 2011.
- BITSUAMLAK, G. T.; STATHOPOULOS, T.; BÉDARD, C. Numerical Evaluation of Wind Flow Over Complex Terrain. *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 17, No.4, p.135-145, 2004.
- BLOCKEN, B.; ET AL. Cfd Simulation of Wind Flow Over Natural Complex Terrain: Case Study with Validation by Field Measurements for Ria De Ferrol, Galicia, Spain. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 147, p.43-57, 2015.
- SCOTTON, J. A. Determinação Experimental em Túnel de Vento das Velocidades Incrementais Sobre Morros e Taludes. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.
- HOLMES, J. D. *Wind Loading of Structures*. Taylor & Francis Group, LLC, 2015
- NGO, T. T.; LETCHFORD, C. W. Experimental Study of Topographic Effects on Gust Wind Speed. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 97, p.426-438, 2009.
- MILLER, A.; CHANG, B.; ISSA, R.; CHEN, G.. Review of Computer-Aided Numerical Simulation in Wind Energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 25, p.122-134, 2013.
- YANG, Y.; GU, M.; CHEN, S.; JIN, X. New Inflow Boundary Conditions for Modelling the Neutral Equilibrium Atmospheric Boundary Layer in Computational Wind Engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 97, No.2, p.88-95, 2009.
- YANG, Y.; GU, M.; JIN, X. New Inflow Boundary Conditions for Modelling the Neutral Equilibrium Atmospheric Boundary Layer for the SST k- ω Model. In *The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, Tapei, Taiwan, 2009.
- PARENTE, A.; GORLÉ, C.; VAN BEECK, J.; BENOCCI, C. Improved k- ϵ Model and Wall Function Formulation for the RANS Simulation of ABL Flows. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 99, No. 4, p.267-278, 2011.