

DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO PARA CÁLCULO DAS FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM COBERTURAS ISOLADAS

Bruna Miki Tokutsune Tashiro¹, Rodolfo Krul Tessari²

RESUMO: À medida que os procedimentos de análise estrutural avançam, surge a demanda por projetos mais econômicos e que obtenham um aproveitamento mais eficiente dos materiais. Isso resulta em edificações mais leves, esbeltas e flexíveis, tornando as estruturas mais suscetíveis a vibrações e pressões induzidas pelo vento, que podem causar danos parciais ou totais às estruturas. A fim de quantificar as forças geradas pela ação do vento nas estruturas, a ABNT NBR 6123:2023 fornece as diretrizes necessárias para estimar tais forças em estruturas. Dentre as tipologias de edificações correntes abordadas pela norma brasileira estão as coberturas isoladas, foco do presente trabalho, cujo objetivo consiste em desenvolver um aplicativo para automatização dos procedimentos de cálculo prescritos na referida normativa nacional e que será posteriormente integrada ao software Notus. É também feita a comparação dos resultados obtidos com base no emprego da metodologia de cálculo da norma brasileira com aqueles calculados segundo os preceitos na norma europeia EN 1991-1-4. Os resultados obtidos indicam que a norma brasileira adota uma metodologia mais simplificada desde os cálculos iniciais, o que gera valores aproximados. Em contraste, a norma europeia utiliza uma abordagem mais detalhada e técnica, apesar de conduzir a valores mais conservadores. Com o *software* desenvolvido, é possível realizar os cálculos de maneira totalmente automatizada, evitando erros interpretativos da norma ou erros cumulativos decorrentes de arredondamento usuais em processos de cálculo manual. O *software* permite ainda a análise de uma série de cenários de carregamento, considerando diversos ângulos de incidência do vento, prevenindo a ocorrência de erros.

Palavras-chave: Pressão do vento; NBR 6123; Eurocódigo 1.

1 INTRODUÇÃO

Com o progresso das técnicas de análise estrutural, surgiu a necessidade de desenvolver projetos mais econômicos, que maximizem a eficiência dos materiais, resultando em estruturas mais leves, esbeltas e flexíveis. No entanto, essa flexibilidade aumenta a suscetibilidade das edificações a vibrações, incluindo aquelas provocadas pelo vento.

De acordo com Oliveira (2003), as vibrações induzidas pelo vento podem gerar desconforto para os ocupantes e até mesmo comprometer a integridade estrutural. Gonçalves et al. (2007) também destacam que a velocidade do vento pode causar danos significativos às construções, que podem variar de danos parciais a totais, principalmente devido à negligência deste fenômeno natural durante a fase de projeto.

¹ Voluntariado, UTFPR, brunatashiro@alunos.utfpr.edu.br

² Professor, Doutor, UTFPR, rtessari@utfpr.edu.br

Para a quantificação das forças exercidas pelo vento em edificações com geometria convencional, deve-se seguir as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 6123 - "Forças devidas ao vento em edificações" (ABNT, 2023). Em seu texto, há orientações específicas para estruturas com coberturas isoladas, que nada mais são do que telhados suportados por pilares de dimensões reduzidas em edificações sem fechamentos laterais ou paredes permanentes. O projeto dessas estruturas deve considerar a possibilidade de bloqueio parcial ou total do vento na parte inferior da estrutura, uma vez que a ação do vento deve ser analisada ao longo de toda a vida útil da edificação.

A complexidade desta configuração exige uma análise detalhada, especialmente devido à variação da direção do vento que sopra na edificação, que gera um número grande de cenários de carregamentos a serem analisados pelo projetista da estrutura que se almeja construir. Sendo assim, o uso de ferramentas computacionais torna-se crucial para a realização precisa dos cálculos, minimizando erros de interpretação das normas e erros acumulativos comuns em cálculos manuais.

Nesse contexto, o presente trabalho objetiva a implementação de um *software* capaz de automatizar o referido processo de cálculo para permitir a realização de uma ampla gama de cenários de maneira mais eficiente e precisa, facilitando o estudo e a prática dos profissionais da área.

2 METODOLOGIA

A ferramenta desenvolvida foi implementada no ambiente de desenvolvimento Microsoft Visual Studio versão *Community*, utilizando linguagem de programação Visual Basic (VB.NET). Trata-se de um suplemento do aplicativo Notus, criado pelo Prof. Dr. Rodolfo Krul Tessari e continuado por Costa (2021) e Silva (2023).

As rotinas de cálculo implementadas são baseadas na metodologia da NBR 6123:2023 para determinação dos coeficientes utilizados para o cálculo da ação do vento em coberturas isoladas. Especial atenção foi dada ao desenvolvimento de uma interface gráfica intuitiva e amigável, pois acredita-se serem estas as qualidades que mais facilitam a adoção do *software* por novos usuários, sendo fundamentais para sua disseminação.

Após sua programação, são conduzidos estudos de caso para validação da ferramenta e sua comparação com a norma europeia EN 1991-1-4 (Eurocode 1). Para

esse fim, foi utilizada a calculadora online Eurocode Applied (2024). Esta ferramenta requer a inserção de dados equivalentes aos parâmetros estabelecidos pela norma brasileira, incluindo fatores de rugosidade, características topográficas do terreno, velocidade básica do vento, dados estruturais, entre outros.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O suplemento desenvolvido realiza o cálculo das forças geradas pela ação do vento em coberturas isoladas de acordo com as recomendações da NBR 6123:2023. A ferramenta destina-se, tanto a estudantes de Engenharia Civil quanto a profissionais da área, sendo sua utilização fácil e intuitiva. A seguir, apresenta-se um panorama geral do *software*.

3.1 Suplemento de cobertura isolada de duas águas

Primeiramente, o usuário escolhe a tipologia de cobertura que deseja analisar, como mostra a Figura 1. Em seguida, deve informar os dados relativos à geometria da estrutura.

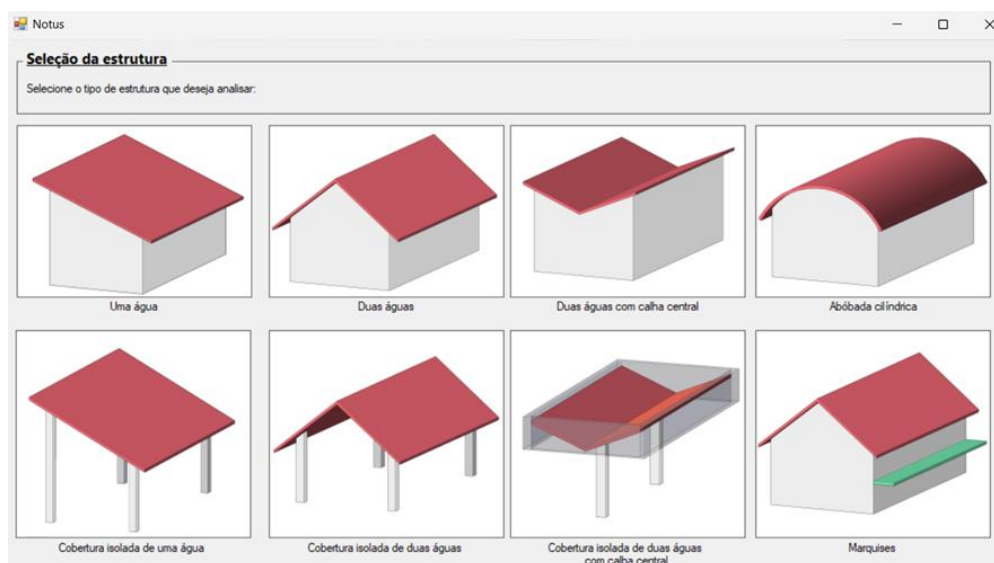


Figura 1: Tipologias estruturais e de coberturas. Fonte: Notus.

Procede-se então para a determinação da velocidade básica do vento (V_0), definida com base no mapa brasileiro de isopletras. Essa velocidade multiplicada pelos coeficientes do fator topográfico (S_1), fator relacionado à rugosidade do terreno (S_2) e o fator estatístico (S_3) resulta na velocidade característica (V_k). Esses fatores são tabelados na norma brasileira e selecionados pelo usuário de acordo com as características do projeto.

Após a determinação da velocidade característica e da pressão dinâmica, o *software* calcula e exibe os coeficientes de pressão externa (C_{Pe}). Os coeficientes de pressão são grandezas adimensionais que quantificam a relação entre a pressão dinâmica exercida pelo vento e a pressão de referência estática em uma determinada superfície da estrutura (ABNT, 2023).

Os coeficientes de pressão externa aplicáveis a telhados variam conforme a configuração da cobertura, suas dimensões e a direção do vento. Para coberturas isoladas de duas águas simétricas, a NBR 6123:2023 fornece coeficientes para vento incidente em um ângulo de 90° . Para vento a 0° , considera-se apenas a força de atrito na cobertura causada pelo vento.

Quando a altura livre (h) da cobertura isolada é inferior ao limite especificado ($h < 0,5L_2$, sendo L_2 a menor dimensão em planta da cobertura) ou na presença de obstruções situadas sob ou adjacentes à cobertura, é imprescindível que essa cobertura possua capacidade de suportar as forças do vento na região de obstrução. Sendo assim, para o cálculo dessa zona, o *software* considera uma edificação fechada com a mesma tipologia de cobertura, adotando o coeficiente de pressão interna $C_{pi} = +0,8$ para obstruções localizadas na borda de sotavento e $C_{pi} = -0,3$ para aquelas na borda de barlavento, de acordo com a norma brasileira.

Após a estimativa dos coeficientes de pressão externa e interna, procede-se à combinação desses coeficientes para determinar as forças e pressões resultantes em cada seção da estrutura. Na etapa final, o programa disponibiliza a opção de exportar os resultados para um arquivo PDF, que inclui todos os cálculos e análises realizados.

3.2 Comparativo entre NBR 6123 e Eurocode 1

Embora as normas NBR 6123 (ABNT, 2023) e EN 1991-1-4 (Eurocode 1) utilizem coeficientes de pressão que variam em função da geometria, inclinação, altura e exposição da cobertura ao vento, cada instrumento normativo apresenta uma metodologia própria para o cálculo das forças devidas ao vento sobre estruturas.

Na norma europeia, a velocidade básica do vento ($V_{b,0}$) é estabelecida a partir de mapas de vento específicos de cada país, similarmente à abordagem adotada pela norma brasileira. Contudo, a norma europeia incorpora dois fatores de ajuste à velocidade básica: um fator direcional (c_{dir}) e um fator sazonal (c_{season}).

Em relação às coberturas isoladas, os métodos de cálculo do coeficiente de pressão apresentam diferenças substanciais. Na norma brasileira, o cálculo considera a inclinação do telhado, a direção do vento e os tipos de carregamento. Quando existem obstruções, deve-se calcular a pressão sobre uma estrutura fechada com igual cobertura, conforme descrito no item 7.2.1 da NBR 6123:2023. Em contraste, a norma europeia fornece valores tabelados para o coeficiente de pressão, que variam com base na inclinação do telhado, no coeficiente de obstrução (variável entre 0 e 1) e no coeficiente de força global. Além disso, a norma europeia segmenta a cobertura em zonas de diferentes intensidades de pressão do vento.

Essas normas são fundamentais para assegurar a segurança e a estabilidade das coberturas isoladas em diversas regiões globais, adaptando-se às condições climáticas locais e às práticas construtivas de cada país

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo destaca a importância de utilizar métodos de cálculo precisos e atualizados para avaliar as forças do vento em estruturas, especialmente em coberturas isoladas, tipologia muito comum na construção civil. O desenvolvimento e a automação dos cálculos de acordo com a ABNT NBR 6123:2023 são facilitados por meio do suplemente desenvolvido para o *software* Notus, o qual permite a análise eficiente e sem erros dos coeficientes de pressão externa e interna em coberturas isoladas de duas águas.

A automação dos cálculos possibilitada pelo *software* não só elimina erros interpretativos e cumulativos comuns nos cálculos manuais, como também permite a análise de múltiplos cenários e ângulos de incidência do vento. Esta capacidade é crucial para garantir a integridade estrutural e evitar danos potenciais durante a fase de projeto.

A integração de ferramentas computacionais para a análise de forças do vento é, portanto, uma prática recomendada que pode melhorar a segurança e a eficiência dos projetos estruturais. A evolução contínua dessas ferramentas e a consideração das melhores práticas internacionais são essenciais para a evolução do campo da engenharia civil e a garantia da estabilidade das construções em diferentes condições climáticas.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha gratidão ao professor orientador deste projeto, cuja orientação e motivação foram fundamentais durante todo o processo de pesquisa. Ademais, agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “PROJETO DE REVISÃO ABNT NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações.” Rio de Janeiro, 2023.

BLESSMANN, Joaquim. Ação dos ventos em edifícios. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1989.

COSTA, Alex Sandro da. Desenvolvimento De Software Para O Levantamento De Cargas Devidas Ao Vento Em Edificações De Plantas Retangulares. 2021. 95 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Apucarana, 2021.

EUROCODE APPLIED. Wind Pressure for Duopitch Canopy. Disponível em: <https://eurocodeapplied.com/design/en1991/wind-pressure-duopitch-canopy>. Acesso em 02 de setembro de 2024.

EUROCODE 1. EN 1991-1-4: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions. British Standards Institution, UK, 2005.

GONÇALVES, Roberto Martins et al. Ação do vento nas edificações: teoria e exemplos. São Carlos: SET/EESC/USP, 2007.

SILVA, João Vitor Maronezzi da. Desenvolvimento De Software Para Cálculo Das Forças Devidas Ao Vento Em Coberturas De Uma Água E Abóbada Cilíndrica. 2023. 110 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Apucarana, 2023.

OLIVEIRA, M. G. K. Desenvolvimento de um suporte flexível para ensaios de modelos aeroelásticos em túnel de vento. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.