https://doi.org/10.4322/CBPAT.2022.003

UMA ANÁLISE DOS FATORES AERODINÂMICOS E DAS CAUSAS ESTRUTURAIS NOS DESASTRES CAUSADOS PELO VENTO EM EDIFICAÇÕES

Ana Clara Silva Monteiro[1], Marco Donisete de Campos[1]*
*Autor de contato: marco.campos@ufmt.br

[1] Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso, Barra do Garças, Brasil.

RESUMO

Os desastres em edificações devidos à ação do vento ocorrem com frequência e, na maioria dos casos, são atribuídos a ventos incomuns quando, na verdade, as causas são outras. Anualmente, embora seja grande o número de eventos dessa natureza, a sua maioria não é divulgada e nem a sua origem é investigada. Este trabalho trata dos fatores aerodinâmicos e das causas estruturais em acidentes causados pelo vento em edificações. A metodologia utilizada foi uma discussão individual sobre a influência dos aspectos aerodinâmicos. Além disso, foi feita uma análise aerodinâmica da edificação durante o processo de construção, bem como os efeitos de vizinhança na carga média de vento. Da mesma forma, as reformas na edificação foram tratadas como sendo outra possível causa de acidentes por vento nas estruturas. Finalmente, as causas estruturais do colapso do vento em edifícios, com foco nos erros de projeto. Este estudo pode orientar a elaboração de um guia de apoio a fim de identificar os riscos do projeto, mitigá-los e, até mesmo, eliminar os efeitos adversos causados pela ação do vento sobre as edificações.
Palavras-chave: acidentes em edificações; ação do vento; fatores aerodinâmicos; causas estruturais.

ABSTRACT

Accidents in buildings due to wind action occur frequently and, in most cases, are attributed to uncommon winds when, in fact, the causes are other. Annually, although the number of events of this nature is large, most of them are not publicized, and either origin investigated. This work deals with the studies on aerodynamic factors and structural causes in accidents caused by wind in structures. The methodology used was an individual discussion of the influence of aerodynamic aspects. In addition, aerodynamic analysis of the buildings during the construction process. Also, were studied the neighborhood effects on the mean wind loading. Likewise, another possible cause of accidents due to wind in the structures analyzed in this work was the reforms in the construction. Finally, the structural causes of wind collapse in edifications, focusing on design errors. This study may guide the elaboration of a guide to identifying project risks, mitigating them, and even eliminating the adverse effects caused by the action of the wind on the buildings.
Keywords: accidents in buildings; wind action; aerodynamic factors; structural causes.

1. INTRODUÇÃO

Dentro do alcance da camada limite atmosférica, o fluxo de ar, geralmente chamado de *vento*, é afetado pelo atrito devido à rugosidade do solo. Os ventos classificados como *fortes* causam, eventualmente, graves danos às infraestruturas e às pessoas, devidos aos seus efeitos aerodinâmicos. No entanto, os ventos de nível *fraco* ou *médio* também podem causar fortes vibrações nas edificações, além de ocasionar impactos ambientais tais como poluição do ar e efeitos térmicos. A maioria dos desastres induzidos pelo vento é resultado da combinação de ventos fortes – monções, ciclones tropicais, frentes de rajada, *downbursts*, tornados, redemoinhos de poeira, ventos catabáticos, ondas a sotavento – e tempestades e, as suas consequências estão entre os mais graves impactos já relatados na sociedade (TAMURA *et al*., 2017).

De um modo geral, na Engenharia Civil esses acidentes são atribuídos, principalmente, tanto às falhas quanto à seleção inadequada do local de construção, à avaliação de risco, ao projeto e à execução, bem como à ocupação e à manutenção. Assim, muitos dos chamados *desastres naturais*, tais como os terremotos, as inundações, os deslizamentos de terra, os fluxos de detritos e os ventos fortes, foco de estudo deste trabalho, poderiam ser reduzidos por meio de uma investigação adequada e de um sistema de prevenção efetivo. As obras na Engenharia são projetadas, construídas, ocupadas e mantidas pelo homem. Por consequência, fica implícito notar que a deficiência estrutural na obra está associada à falta de conhecimento ou aos erros atribuídos aos fatores humanos (LILI; ZHE, 2018).

Neste contexto, a seguir é feita uma análise dos fatores aerodinâmicos e das causas estruturais nos acidentes causados pelo vento em estruturas, com enfoque na relevância dos fatores aerodinâmicos como a direção do vento e os coeficientes de pressão, bem como a topografia local. Também, uma investigação sobre a aerodinâmica do edifício durante o processo construtivo, assim como a influência da vizinhança na ação do vento em construções. Além disso, é apresentada uma abordagem sobre a manutenção e o gerenciamento das construções, de modo particular, para as reformas e as alterações quanto ao uso da edificação e os erros de projeto.

2. SELEÇÃO INADEQUADA DO LOCAL PARA CONSTRUÇÃO

2.1 Estudo da topografia local

Na Engenharia, quando bem executado, o levantamento do local para a construção deve englobar elementos relevantes existentes como as edificações vizinhas, o bioma, o meio fio, as caixas de drenagem, as vias de acesso, a presença de rios ou córregos, os taludes, as curvas de nível, dentre outros. Ainda, o comportamento do vento em edificações diversas é influenciado pelas topologias que caracterizam esses locais. Assim, os resultados obtidos variam de acordo com o tipo de topografia do terreno em estudo. A topografia, a forma, as dimensões e a distribuição dos obstáculos naturais e artificiais do terreno, bem como a variação da temperatura na direção vertical são condições prioritárias para a determinação das características do vento (BLESSMANN, 2013).

Terrenos localizados em falhas ativas, expostos aos deslizamentos de terra ou assentamento de entulhos são alguns exemplos de locais impróprios para as construções. Com a tecnologia disponível atualmente é tecnicamente impossível conseguir uma resistência adequada dos edifícios e infraestruturas frente às calamidades nesses locais, a menos de um custo excessivamente alto para fazê-la.

A rugosidade do terreno exerce uma grande influência sobre as cargas do vento uma vez que a velocidade média do vento é reduzida pela rugosidade do terreno aumentando com a altura acima do solo. Como o terreno ao redor da estrutura em questão influencia a rugosidade, possíveis alterações, como a construção ou demolição de edificações próximas, que podem ocorrer durante a vida útil da estrutura, podem afetar as cargas de vento (DYRBYE; HANSEN, 1997).

A análise cuidadosa desses efeitos é relevante para as aplicações da Engenharia e todas as suas decorrências e implicações precisam ser tratadas ou modeladas de maneira adequada, independentemente de serem utilizadas técnicas analíticas ou experimentais na abordagem (COMMITTEE ON STRUCTURAL WIND ENGINEERING, 2012).

2.2 Influência da vizinhança

A influência da vizinhança é o fenômeno no qual o escoamento em torno de uma ou mais edificações afeta as cargas de vento em uma estrutura próxima. De uma maneira geral, as causas dos efeitos de vizinhança são o *efeito Venturi* (o qual ocorre quando as construções vizinhas, projetadas num ângulo aberto ao vento, provoca o afunilamento do escoamento; este efeito aparece principalmente em edificações muito próximas, caso em que já foram observadas sucções excedendo, em módulo, o valor 2,0), a *deflexão do vento na direção vertical* (quando nas regiões próximas ao solo ocorre um aumento da velocidade do escoamento em razão dos obstáculos e de construções baixas localizadas a barlavento; essas edificações mais baixas poderão ter os coeficientes de forma médios atingindo valores entre -1,5 e -2,0) e a *turbulência da esteira* (com edificações, de modo particular coberturas e painéis de vedação feitos de materiais leves, situadas a sotavento de outras podendo ser afetadas sensivelmente pela turbulência gerada na esteira da edificação de barlavento, causando efeitos de golpe e alterações nas pressões) (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2009)

3 AVALIAÇÃO INCOMPLETA DOS RISCOS

3.1 Direção e intensidade do vento

A diminuição efetiva das calamidades relacionadas à Engenharia pode ser alcançada considerando um nível de risco apropriado no projeto da construção. Mesmo que essas ameaças sejam levadas em consideração desde o projeto, uma avaliação inadequada dos níveis de perigo pode levar à construção de estruturas inapropriadas.

A determinação da direção crítica do vento deve ser feita para cada elemento de uma edificação, sendo da Engenharia Estrutural a competência sobre as pressões nas superfícies da estrutura para qualquer direção do vento. No caso da ação dos ventos, como a vida útil de uma construção é, em geral, considerada como 50 anos, faz-se necessário determinar qual a velocidade máxima do vento nesse período de tempo (GONÇALVES *et al.*, 2013). Recentemente, um tornado atingiu Porto Velho, em Rondônia, no dia 28 de outubro de 2021, ocasionando vários estragos. Embora tenha durado alguns minutos, foi suficiente para derrubar árvores, placas de sinalização, além de danificar os fios de energia, destelhar casas e estabelecimentos comerciais (Fig. 1a) (DIÁRIO DA AMAZÔNIA, 2021). Já em 26 de outubro de 2021, um temporal ocasionou estragos diversos no distrito de Engenheiro Schmitt em São José do Rio Preto, São Paulo. No ocorrido, nenhum morador ficou ferido, mas dez casas foram atingidas pela força do vento e sofreram prejuízos, além de 200 árvores, de pequeno e médio porte, derrubadas. Houve destelhamentos e muitos vidros quebrados; o vento e a chuva arrancaram as placas solares de uma residência, além de

derrubar parte do muro de um sobrado em construção (Fig. 1b), o que ocasionou o comprometimento da estrutura e, por isso, o local foi interditado e recebeu ordem de demolição pela Defesa Civil (G1, 2021).

Figura 1 - (a) Destelhamento de um galpão em Porto Velho, RO, e (b) construção danificada em Engenheiro Schmidt, SP.



(a) Fonte: Diário da Amazônia (2021)



(b) Fonte: G1 (2021)

3.2 Coeficientes de pressão

Na Engenharia, as informações adequadas sobre as distribuições de pressão são importantes para estimar as cargas de pressão do vento nas edificações. A pressão na parte envolvente dos edifícios pode ser determinada com tabelas ou com modelos paramétricos baseados em experimentos em túnel de vento. Mas, infelizmente, para os projetistas, essas tabelas ou correlações não se aplicam às edificações não usuais ou localizadas na lateral de outros edifícios em uma área urbana complexa. E isto ocorre devido à forte dependência da geometria das construções, o campo de pressão muito heterogêneo na envolvente do edifício e, ainda, pela forte influência das edificações vizinhas (SANQUER; CANIOT, 2015). De uma maneira geral, a distribuição das pressões sobre as edificações é constituída por combinações de pressões externas e internas. Para fins do projeto, as pressões internas podem ser originadas desde aberturas na fachada até por janelas e portas deixadas abertas durante um evento de vento forte. Nas regiões sujeitas a furacões, as atualizações dos códigos e normas exigem, também, a consideração dos impactos de detritos no revestimento, envolvendo, em alguns casos, o uso de persianas contra tormentas (Fig. 2a). Concluído o projeto, o construtor pode utilizar materiais disponíveis no mercado ou ter um novo projeto de fachada testado por meio de algum procedimento estabelecido de teste em escala real (COULBOURNE; STAFFORD, 2020).

Por convenção, quando o valor do coeficiente de pressão for positivo, ou seja, quando o vento está empurrando a parede, temos uma sobrepressão. Em 24 de março de 2006, às 13h24, em um prédio do laboratório de pesquisa do Instituto Nacional de Ensino Superior em Química de Mulhouse (ENSCMu), da Universidade de Haute-Alsace, na França, devido a um vazamento de um cilindro de gás, uma violenta explosão de etileno ocorreu no espaço fechado do laboratório e foi seguida por um incêndio. Esse acidente vitimou um professor, feriu gravemente um jovem estagiário e feriu 20 pessoas. Os fragmentos foram arremessados a uma distância de até 100 m. A Fig. 2b mostra os danos por sobrepressão observados na fachada do prédio localizado a 50 m em frente ao prédio fonte da explosão (LAURENT *et al.*, 2014).

Figura 2 - (a) Persianas contra tormentas instaladas em condomínios em Marco Island, na Flórida e (b) danos causados por sobrepressão na Universidade de Haute-Alsace, na França.



(a) Fonte: *https://category5.com/projects*



(b) Fonte: Laurent *et al.* (2014, p. 10)

Uma atenção especial deve ser dada quanto às áreas com pressão extremamente alta, as quais são determinadas, em média, pelas pressões totais do projeto usadas ao se considerar o sistema principal de resistência à força do vento de uma estrutura. Essas pressões altas precisam ser consideradas explicitamente ao examinar as forças que atuam em áreas de superfície relativamente pequenas, como montantes e vidros, painéis de revestimento de compensado ou telhas. Os códigos de construção estipulam pressões de vento mais altas para pequenos elementos de superfície, tais como vidro e painéis de parede, ou fornecem valores separados de componentes e revestimento para os coeficientes de pressão externa e fatores de rajada.

3.2.1 Pressões internas

As pressões geradas pelo vento no interior dos edifícios desempenham um papel importante na carga total sobre o edifício. As pressões internas combinam-se ou neutralizam as pressões externas do ambiente para produzir pressões líquidas em todas as partes envolventes da construção. De acordo com a convenção de sinais para as pressões do vento, as pressões internas positivas são direcionadas sobre a superfície e tendem a *empurrar* as paredes externas para fora. Por outro lado, as pressões internas negativas agem para longe de uma superfície e tendendo a *puxar* as paredes externas para dentro. Agora, se a parte envolvente do edifício permanecer intacta durante um evento de vento forte, a pressão interna, que atua sobre a fachada, é considerada relativamente fraca. Também, as aberturas, os vazamentos e as rachaduras na superfície externa do edifício permitirão que alguma pressão externa média da área se infiltre no volume interno da edificação. Esse efeito é chamado de *vazamento na fachada* e, quando combinado com uma pequena sobrepressão do ar acondicionado, a pressão interna que é adicionada à pressão externa produz uma pressão líquida para a parte externa do edifício em uma faixa de ±200 a ±700 Pa. Mas, se houver uma brecha na parte externa do edifício, então a pressão interna será substancialmente maior e provavelmente iniciará uma falha catastrófica adicional da estrutura e/ou da parte externa. Dessa forma, a maioria dos atuais códigos e normas de construção visa proteger a parte externa do edifício de rupturas induzidas por detritos ou falhas induzidas por pressão (COMMITTEE ON STRUCTURAL WIND ENGINEERING, 2012).

Na Fig. 3a, o aumento da pressão interna, causado por uma falha na janela de barlavento (à esquerda, não mostrada), sobrecarregou a parede de blocos a sotavento sem reforço durante o

furacão Andrew em 1992, o qual atingiu a costa leste dos EUA, cuja carga de vento crítica foi da esquerda para a direita.

4 CONFIGURAÇÃO IMPRÓPRIA

Para uma atribuição mais adequada do nível de perigo durante o projeto de uma estrutura é preciso uma compreensão abrangente dos riscos. Além disso, o projeto apropriado de uma estrutura para um determinado nível de perigo requer um conhecimento aprofundado da estrutura que suportará o perigo. Deve-se enfatizar que a melhoria do projeto estrutural é um processo gradual e de longo prazo, e os desastres da Engenharia colocam as últimas inovações em testes em tempo real, ao mesmo tempo em que fornecem pistas para melhorias adicionais do projeto (LILI; ZHE, 2018).

Em 16 de outubro de 2016, em Tubarão, Santa Catarina, foi detectada a ocorrência de uma tempestade que gerou grandes prejuízos para casas e galpões (Fig. 3b). De acordo com a Defesa Civil, mais de 150 empresas tiveram suas atividades interrompidas ou decretaram falência, em detrimento dos danos causados pelo temporal. O evento teve impactos sociais e econômicos, e a maioria dos galpões estudados sofreu desde danos na estrutura da cobertura até o colapso total da edificação, além do rompimento das aberturas principais. A partir desse rompimento, a entrada do vento na estrutura causou uma sobrepressão interna que tendeu a aumentar os danos como um todo nas estruturas que tinham aberturas principais a barlavento (ROCHA; BOTEGA, 2016).

Figura 3 - (a) Colapso de estrutura durante o furacão Andrew (1992) devido ao aumento da pressão interna e (b) acidentes em galpões em Tubarão, SC, em 2016.



(a) Fonte: Committee on Structural Wind Engineering (2012, p. 42)



(b) Fonte: Secretaria de Estado da Comunicação do Estado de Santa Catarina (2016)

5 CONSTRUÇÃO INADEQUADA

De acordo com Czajkowska e Ingaldi (2021), as principais causas de falhas estruturais são as aleatórias e aquelas causadas pelo homem, sendo que, ao longo dos anos, pode-se notar que cada vez menos, as causas de falhas estruturais decorrem de erros cometidos durante o processo de construção e, mais frequentemente, por causas aleatórias, as quais muitas vezes são impossíveis de prever. Ainda, segundo Czajkowska e Ingaldi (2021), embora o número de falhas estruturais não pareça expressivo, valem ressaltar quais efeitos eles podem causar. As perdas financeiras incluem não apenas a instalação danificada (a despesa do projeto e da construção), mas também os custos após a falha. Aí, incluem-se a análise da causa de uma determinada falha estrutural, uma possível compensação, a limpeza da área, um possível custo de reconstrução da instalação

danificada se tal ação for planejada, dentre outros. Além disso, frequentemente, muitas vidas são perdidas devido à falha estrutural, como, por exemplo, durante uma forte chuva no dia 14 de agosto de 2018, em Gênova, Itália, 43 pessoas foram mortas e 12 foram gravemente feridas durante o colapso do viaduto Polcevera, devido à ruptura de um dos cabos de sustentação, perda essa que não pode ser convertida em valor monetário (RYMSZA, 2021).

O gerenciamento adequado da construção e o uso de materiais de construção de qualidade adequada são essenciais para uma realização eficaz de um projeto estrutural. Frequentemente muitas tragédias da Engenharia são causadas por construções inadequadas. Na literatura são relatados vários exemplos nos quais a ação do vento é apontada como a causa de inúmeros acidentes estruturais (SHA; MALINOV, 2014; MIANG *et al*., 2016; SOLARI, 2019). Nesse caso, o colapso progressivo é um mecanismo de ruína parcial ou total de uma estrutura provocado pela falha localizada de um elemento estrutural primário levando à redistribuição das cargas para os elementos do entorno, os quais também podem vir a ruir (TAPAJOS *et al*., 2016).

Um dos mais recentes acidentes estruturais em edifícios de concreto registrados no Brasil aconteceu no dia 29 de janeiro de 2011, em Belém, Pará. Neste dia, o edifício residencial *Real Class*, de aproximadamente 13.400 m² e 105 m de altura, em fase de construção, ruiu vitimando fatalmente três pessoas. (Fig. 4).

Figura 4 - Colapso do edifício *Real Class* em Belém, PA, em 2011.



Fonte: Tapajós *et al*. (2016, p. 898).



Fonte: G1 (2016).

Já em de março de 2011 foi apresentado um laudo técnico elaborado pelo *Grupo de Análise Experimental de Estruturas e Materiais* (GAEMA), do *Instituto de Tecnologia* (ITEC) da *Universidade Federal do Pará* (UFPA), sobre as causas do desabamento, atribuindo a queda do edifício ao erro de cálculo do projeto estrutural, já que a edificação colapsou quando foi submetida a uma combinação de carregamentos verticais e horizontais num momento de tempestade. Segundo o laudo, as fundações foram corretamente projetadas, o concreto e o aço também apresentavam resistências compatíveis com as recomendadas pelas normas brasileiras. Mas diversos pilares do pavimento térreo não apresentavam resistência compatível com os esforços atuantes e ruíram bruscamente, sem apresentar fissuras. O laudo afirmou, ainda, que a simulação realizada concluiu que, em pouco mais de nove segundos, o prédio veio abaixo. Na decisão judicial conclui-se que o desabamento foi causado por falha na concepção do sistema

estrutural projetado, pois "*o modelo matemático escolhido pelo engenheiro de cálculo da obra não foi capaz de garantir a estabilidade para uma edificação com 34 pavimentos e aproximadamente 104 metros de altura*". Ainda, de acordo com a sentença, ao utilizar o modelo pórtico por pavimento, o engenheiro "*não considerou as cargas horizontais, tanto as decorrentes da ação do vento, como do próprio desequilíbrio da estrutura assimétrica, quando submetida ao peso próprio, não resistindo, com isso, a estrutura já construída a um vento de cerca de 30 a 39 km/h*". Por sua vez, no seu interrogatório, o engenheiro alegou que o *software* utilizado para efetuar os cálculos estruturais estava pré-configurado e ele apenas aceitou os cálculos fornecidos pelo mesmo. No que diz respeito ao engenheiro responsável pela execução do projeto, o juiz considerou que não foi provada qualquer conduta negligente, omissiva ou imperita que tenha dado causa ao desabamento do edifício (G1, 2016; PARÁ, 2017).

6 REFORMAS E POSSÍVEIS ALTERAÇÕES QUANTO AO USO DA EDIFICAÇÃO

Seja pelo desgaste natural dos materiais, pela estética, pela alteração de função do prédio ou por qualquer outro motivo, as reformas precisam ser bem instruídas, pois cada tipo de obra possui características próprias. As mudanças em espaços internos remetem ao conhecimento do sistema estrutural da edificação, uma vez que existem sistemas que não permitem alterações ou que são complexos. A modificação sobre uma estrutura existente sem observar os devidos aspectos técnicos pode gerar perda de desempenho ou colocar a segurança e a estabilidade da construção, seus sistemas e/ou seu entorno em risco. Por esse motivo, esse processo deve seguir determinados fatores técnicos, de forma que não haja perda de desempenho ou risco à segurança de seus usuários.

A queda do edifício Liberdade, em janeiro de 2012, no centro da cidade do Rio de Janeiro, foi um marco para todo o mercado de reformas no Brasil. O acidente deixou 23 mortos e outros dois edifícios, o Colombo e o Treze de Maio, também foram atingidos. O projeto inicial do edifício de 1938 que previa 15 pavimentos foi modificado, acrescentando um subsolo, garagem e três pavimentos e, a partir do 16º pavimento, um escalonamento dos andares com formato decrescente até o topo. Finalizado, o edifício contava com 20 pavimentos. Na década de 50, os pavimentos escalonados foram ocupados e o edifício assumiu um formato completamente vertical. Na mesma época, um terraço no 8º andar foi coberto por uma laje, dando condições para maior ocupação do 9º andar, exatamente o andar da transição. A reforma de janeiro de 2012 não foi realizada por um profissional da Engenharia e nela os pilares de sustentação foram removidos, causando uma falência sequencial das peças estruturais (COURI; DEUTSCH, 2013; FERREIRA, 2016). No decorrer do processo de responsabilização civil e penal, foram encontrados diversos fatores que podem ter culminado no acidente. Mesmo com a realização de perícia judicial e os pareceres de diversos especialistas de Engenharia, ainda não foi definida a causa do acidente (MENDONÇA; MOUNZER, 2021).

Em decorrência desse colapso, em 26 de março de 2013 passou a ser obrigatória a autovistoria em edificações no município do Rio de Janeiro e, em 18 de abril de 2014, entrou em vigor a ABNT NBR 16280 "*Reforma em edificações – Sistema de gestão de reformas – Requisitos*". Tanto as leis instituídas no município do Rio, quanto à norma criada pela ABNT, vieram no contexto de esforços para diminuir a ocorrência deste tipo de desastre, criando diretrizes e obrigações, tanto para os responsáveis legais pela edificação, quanto para os responsáveis técnicos, seja da obra de reforma, seja pelo laudo técnico. Apesar disso, mais recentemente, no final da manhã de 10 de fevereiro de 2022, o teto de um galpão, que passava por algumas reformas, em Goiânia - GO, desabou e vitimou um pedreiro que trabalhava no local. Além disso,

após uma avaliação, a Defesa Civil recomendou que houvesse a demolição do resto da estrutura para eliminar riscos aos imóveis vizinhos. Segundo o *Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Goiás,* CREA-GO, a obra era irregular e não havia um engenheiro responsável pela reforma que estava sendo feita no galpão (G1, 2022).

A evolução da qualidade e da resistência de materiais tradicionais como o aço e o concreto, o aparecimento de novos materiais de construção e de esquemas estruturais são elementos que tornaram possível o surgimento de construções mais esbeltas e flexíveis. Como consequência, o número de acidentes devidos ao vento aumentou pela manifestação de alguns efeitos que não ocorriam nas edificações correntes graças a seu peso próprio e à rigidez maiores (PITTA, 2015).

Conforme já mencionado, os acidentes em edificações devidos à ação do vento têm acontecido com certa eventualidade e, em sua maioria, são atribuídos a ventos inusitados, quando realmente, as causas são distintas. Os fatores aerodinâmicos, as causas estruturais, tais como os esquemas estruturais mais susceptíveis, as falhas de projeto e as divergências ocorridas durante a fabricação e a montagem são as principais causas desses acidentes. Também são cada vez mais comuns acidentes envolvendo as coberturas das construções. A maioria dos acidentes atingem construções leves, como em casas, pavilhões, igrejas, ginásios e sedes. Usualmente, os colapsos sequer são divulgados e nem suas causas investigadas e a prova disso foi o uso, neste trabalho, de informações relatadas informalmente, divulgadas em *sites* de notícias não especializados.

As perdas, tanto humanas quanto materiais, relacionadas a esses eventos exigem um novo modelo para a sua análise, modelagem e avaliação de desempenho. Nas últimas décadas, uma extensa pesquisa foi conduzida sobre a diminuição desses eventos, gerando desafios, possíveis soluções e a necessidade de novos estudos.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada uma análise dos fatores aerodinâmicos e das causas estruturais nos acidentes causados pelo vento em edificações. Essa abordagem foi feita através da discussão individual da influência dos fatores aerodinâmicos, da aerodinâmica do edifício durante o processo construtivo, da influência da vizinhança, das reformas e as alterações quanto ao uso da estrutura como uma possível causa de acidentes e, finalmente, das causas estruturais nos colapsos devido ao vento nas construções.

Embora frequentes, os desastres em edificações devidos à ação do vento, na maioria das vezes, não são investigados e, nem ao menos, quantificados e divulgados. Prova disso foi o uso, neste trabalho, de informações relatadas informalmente, divulgadas em meios não especializados. As perdas, tanto humanas quanto materiais, relacionados a esses eventos exigem um novo modelo para a sua análise, modelagem e avaliação. Nas últimas décadas, muitas pesquisas foram conduzidas sobre a diminuição desses acidentes, gerando desafios, possíveis soluções e a necessidade de outros estudos sobre a carga de vento em estruturas.

Baseado nisso, destacamos, como conclusão deste trabalho, os pontos a seguir, como fonte de informações para a construção de edificações mais seguras quanto à ação do vento:
- é essencial a determinação da velocidade crítica do vento, pois se refere à velocidade na qual a frequência de desprendimento de um par de vórtices coincide com uma das frequências naturais da estrutura. Já os coeficientes de pressão são fundamentais para o entendimento das regiões de sobrepressões e de sucções na edificação;

- é importante a realização de várias análises estruturais sob a atuação do vento e sob o efeito de sucção e pressão nas estruturas pois, quando não são devidamente previstas e calculadas com o seu fator de segurança correto, podem levar ao colapso global ou parcial da estrutura, devido às forças do vento externas e internas à edificação;
- no que se refere às causas de acidentes estruturais, a maior parte das falhas em obras têm origem em algum erro cometido em ao menos uma das fases do projeto e podem estar relacionadas ao planejamento, ao projeto, à execução e ao uso.

Por fim, este estudo poderá nortear a elaboração de um roteiro para que, identificando os riscos de projeto, seja possível atenuá-los e, até mesmo, eliminá-los, a fim de que não surjam efeitos adversos provocados pela ação do vento nas edificações.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2003.

BLESSMANN, J. **O vento na Engenharia Estrutural.** 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2013.

BLESSMANN, J., RIERA, J. D. Wind excitation of neighbouring tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 18, p. 91–103, 1985.

COMMITTEE ON STRUCTURAL WIND ENGINEERING. **Wind issues in the design of buildings**. Reston: American Society of Civil Engineers, 2012.

COULBOURNE, W. L., STAFFORD, T. E. **Wind loads: guide to the wind load provisions of ASCE 7-16.** Reston: American Society of Civil Engineers, 2020.

COURI, G. A., DEUSTCH, S. F. Ruína do Ed. Liberdade – Cinelândia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS, 17., 2013. **Proceedings [...]**. Florianópolis: IBAPE/SC, 2013.

CZAJKOWSKA, A., INGALDI, M. Structural failures risk analysis as a tool supporting corporate responsibility. **Journal of Risk and Financial Management,** v. 14, n. 187, p.1–20, 2021.

DIÁRIO DA AMAZÔNIA. **Temporal provoca destruição em Porto Velho.** Disponível em: https://www.diariodaamazonia.com.br/temporal-provoca-destruicao-em-bairros-de-porto-velho/. Acesso em: 16 de nov. 2021.

DYRBYE, C., HANSEN, S. O. **Wind loads in structures**. Chichester: John Wiley & Sons, 1997.

FERREIRA, F. J. G. **Estudo sobre a robustez de edifícios em concreto armado.** 2016. 168 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, 2016.

GONÇALVES, R. M.; MUNAIAR NETO, J.; SALES, J. J.; MALITE, M. **Ação do vento nas edificações: teoria e exemplos**. 2. ed. São Carlos: EESC/USP, 2013.

G1. **Justiça do Pará condena engenheiro do edifício Real Class por homicídio.** 31 mai. 2016. Disponível em: http://g1.globo.com/pa/para/noticia/2016/05/justica-do-para-condena-engenheiro-do-edificio-real-class-por-homicidio.html Acesso em: 13 jan. 2022.

G1. **Moradores fazem limpeza e contabilizam estragos após temporal em distrito de Rio Preto.** 27 out. 2021. Disponível em: https://g1.globo.com/sp/sao-jose-do-rio-preto-aracatuba/noticia/2021/10/27/moradores-fazem-limpeza-e-contabilizam-estragos-apos-temporal-em-distrito-de-rio-preto.ghtml. Acesso em: 8 nov. 2021.

G1. **Obra em galpão que desabou e causou a morte de pedreiro era irregular, diz CREA.** 11 fev. 2022. Disponível em: https://g1.globo.com/go/goias/noticia/2022/02/11/obra-em-galpao-que-desabou-e-causou-a-morte-de-pedreiro-era-irregular-diz-crea.ghtml. Acesso em: 11 fev. 2022.

LAURENT, A., PERRIN, L., DUFAUD, O. Investigation and analysis of an explosion in a Research Laboratory at a French University. **Chemical Engineering Transactions**, v. 36, p. 7–12, 2014.

LILI, X., ZHE, Q. On Civil Engineering disasters and their mitigation. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, v. 17, n.1, p. 1–10, 2018.

LOREDO-SOUZA, A. M., NUNEZ, G. J. Z., OLIVEIRA, M. G. K., SIQUEIRA, G. M.; BENIA, M. C. D. Majorações e reduções nas cargas de vento em edifícios altos de concreto armado: influência de prédios vizinhos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51., 2009. **Anais [...]**. Curitiba: ABECE, 2009.

MENDIS, P.; NGO, T.; HARITOS, N.; HIRA, A.; SAMALI, B.; CHEUNG, J. Wind loading on tall buildings. **Electronic Journal of Structural Engineering**, vol. 7, p. 41–54, 2007.

MENDONÇA, B. C., MOUNZER, E. C. Estudo de caso: Engenharia Forense e a responsabilidade civil no desabamento de três edifícios no Rio de Janeiro. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, e216101018648, 2021.

MIANG, G. Y., SEND, Y. Y., KUN, E. L. W., TAN, J. The collapse of table formworks at a construction site - a case study. **The Singapore Engineer,** p. 28–29, 2016.

PARÁ. Tribunal de Justiça. Acórdão n. 175626. Apelação Penal. Ministério Público Estadual versus Carlos Otávio Santos de Lima Paes e Raimundo Lobato da Silva. Relator: Vânia Lúcia Silveira. Belém, 23 de maio de 2017. **Diário da Justiça – edição n. 6202/2017.** Disponível em https://www.tjpa.jus.br/CMSPortal/VisualizarArquivo?idArquivo=730422. Acesso em: 14 jan. 2022.

PITTA, J. A. A. **Ações devidas ao vento em edificações**. (*Série Apontamentos*) São Carlos: EdUFSCar, 2015.

ROCHA, D. H.; BOTEGA, R. R. **Estudos de acidentes em galpões ocorridos pela ação do vento: avaliação dos danos ocasionados pela tempestade de 16 de outubro de 2016 em**

Tubarão, SC. 2017. 96 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, SC, Brasil, 2017.

RYMSZA, J. Causes of the collapse of the Polcevera Viaduct in Genoa, Italy. **Applied Sciences**, v. 11, n. 17, 8098, 2021.

SANQUER, S., CANIOT, G. Wind-induced pressure coefficients on buildings dedicated to air change rate assessment with CFD tool in complex urban areas. In: AIVC CONFERENCE, 36.; TIGHTVENT CONFERENCE, 5., and VENTICOOL CONFERENCE, 3., 2015. **Proceedings [...]**. Madrid: AIVC, 2015, p. 179–187.

SHA, W.; MALINOV, S. Cantilever steel post damaged by wind. **Case Studies in Engineering Failure Analysis**, v. 2, p. 162–168, 2014.

SOLARI, G. **Wind Science and Engineering: origins, developments, fundamentals and advancements** (*Springer Tracts in Civil Engineering Serie*). Cham: Springer, 2019, p. 655–801.

TAMURA, Y., NISHIJIMA, K., MATSUI, M., VAN PHUC, P., YANG, Q. From load estimation to performance estimation – from model-scale test to full-scale test: with special interest in Asian region. **Frontiers in Built Environment,** v. 3, n. 8, p. 1–12, 2017.

TAPAJOS, L. S., FERREIRA, J. A. T., LIMA NETO, A. F.; TEIXEIRA, M. R., FERREIRA, M. P. Effect of wind in the design of reinforced concrete buildings. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais,** v. 9, n. 6, p. 883–910, 2016.