

EFEITO E AÇÕES DO VENTO EM ESTRUTURAS PREDIÁRIAS

Robert Allan Ribeiro¹

Marcelo Rodrigo de Matos Pedreiro²

RESUMO: Este artigo buscou evidenciar melhorias no setor de construção civil quanto aos projetos que foram paulatinamente inovadores. Edifícios mais altos, por exemplo, são resultados de um saber da engenharia que dominou ferramentas com maior precisão, pois concomitante à altura dos prédios também há o problema da força eólica, o que foi superado a partir de pesquisas na área, como demonstrado neste trabalho. Assim sendo, considerou-se que a partir de testes com modelos em túneis de vento foi possível unir a eficácia com a lucratividade, permitindo racionalizar a estrutura. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é apresentar procedimentos básicos para o cálculo dos efeitos estáticos da ação do vento na construção de acordo com o disposto na norma brasileira (NBR 6123/1988, a partir disso, comparar estimativas especificadas e resultados obtidos por meio de relatório técnico, que foram baseado em ensaios de modelos simplificados, tanto no que diz respeito aos esforços cortantes e ao momento fletor e torção.

Palavras-chave: Engenharia. Eólica. Fletor. Torção.

INTRODUÇÃO

Existe uma grande disponibilidade de técnicas na construção civil e materiais, o que permite cada vez mais a otimização de projetos para reduzir custos e desperdício de matéria-prima, além de aumentar a imponência das edificações ousadas e complexas, proporcionando o uso mais racional de materiais, combinados com otimizações estruturais de construção. Isso proporciona aos engenheiros civis a oportunidade de apresentar maior confiabilidade no dimensionamento de estruturas de concreto armado. Devido à essas melhorias, muitos projetos podem ser inovadores. Edifícios mais altos, por exemplo, passaram a ser construídos na medida em que a tecnologia de contenção eólica foi sendo aperfeiçoada, pois esse tipo de estrutura está sujeita aos efeitos variáveis do vento. No caso de grandes alturas, essas ações podem ocasionar algumas situações de instabilidade e imprevistos. Neste contexto, é importante que os projetistas verifiquem ferramentas atuais para determinar com mais precisão a carga estrutural.

¹Acadêmico em Engenharia Civil-Bacharel, Universidade Brasil-Campus Fernandópolis.

²Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Paulista Júlio de Mesquita Filho.

Em geral, projetistas ao elaborarem planos de construção civil no Brasil, no que diz respeito ao efeito do vento, referenciam-se nos parâmetros contidos na Norma Brasileira Regulamentadora (NBR), 6123 – Forças do vento em edifícios, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 1988. No entanto, essa regra é consistente com estrutura geometria simplificada já pesquisada em vários países, fato que proporcionou uma maior confiança para edificar projetos cotidianos. Entretanto, para àqueles mais complexos, o método prescritivo pode estimar valores acima dos verdadeiros, tornando prejudicial quanto aos custos de construção e não atingindo um nível de segurança predeterminado.

Por outro lado, há estimativas cada vez mais realistas de valores alcançados quando passa a se utilizar túnel de vento quando não houve detrimento do método normativo. Esses testes permitem uma previsão de carga mais precisa, pois os engenheiros têm o cuidado de reproduzir o vento natural no canteiro de obras. Na maquete em escala reduzida, o relevo, as características geométricas da estrutura e a presença de obstáculos na vizinhança são reflexos da validação de cálculos por meio desses métodos.

De forma experimental, os protótipos testados demonstraram uma capacidade para manter a velocidade natural dos ventos que ocorrem nas grandes estruturas edificadas, especialmente a força eólica conhecida como turbulenta. Para os cálculos, esses padrões a partir da manutenção da velocidade determinam esforços para padronizar suas estruturas. Sendo assim, esses métodos têm evoluído constantemente nos últimos anos, mas ainda há muito espaço para que se atinge um resultado satisfatório quando observado na manutenção da segurança e do bem-estar dos usuários, pois ambas estão diretamente relacionados à precisão da ação do vento.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Visa-se, na realização deste Trabalho de Conclusão de Curso, aprofundar os conhecimentos na área de Estruturas e apresentar a importância de se considerar o cálculo de esforços devidos às ações do vento no dimensionamento de estruturas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar de modo sucinto conceitos sobre os efeitos dinâmicos decorrentes das ações do vento e a importância de sua consideração no dimensionamento de estruturas;
- Apresentar princípios e o procedimento básico para carregamentos estáticos devidos às ações do vento de acordo com as prescrições da norma brasileira;
- Avaliar as consequências de um projeto mal dimensionado;

3 METODOLOGIA

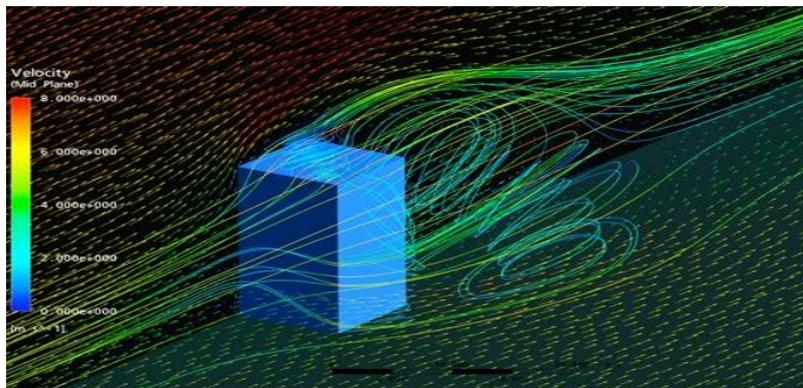
Este trabalho considera apenas os efeitos estáticos, determinados a partir de coeficientes aerodinâmicos.

3.1 A AÇÃO DO VENTO EM EDIFICAÇÕES

De acordo com Blessmann (1995, p. 9); o movimento do ar sobre a superfície terrestre ocorre essencialmente devido a discrepâncias na pressão atmosférica, resultado de variações na temperatura do ar. Esse desequilíbrio de pressões gera forças que movem porções do ar atmosférico de áreas de alta pressão para áreas de baixa pressão. Tal movimento é influenciado pela aceleração de Coriolis, que ocorre quando há massas de ar em movimento em relação à superfície da Terra, sendo denominada por “força de Coriolis”. Além disso, existe a “força de inércia”, que é causada pela trajetória e curva das partículas de ar, conhecida como “força centrífuga”. Em outras palavras, há na pressão atmosférica muitas variantes que resultam em uma força de pressão, desencadeando duas outras forças: a “força de Coriolis” e a “força centrífuga”. O movimento de ar correspondente é chamado de vento gradiente (BLESSMANN, 1995, p. 9).

Quanto às características eólicas, é uma massa de ar em movimento que apresenta estrutura que, quando encontra algum obstáculo que desvia ou impede a passagem dessa massa de ar, é convertido em energia cinética e combinado com pressão positiva (sobre pressão) e negativa (sucção), o que faz exercer um grande esforço sobre as estruturas e, especialmente em sua vedação externa (**Figura 1**).

Figura 1 – Efeitos do vento após um obstáculo

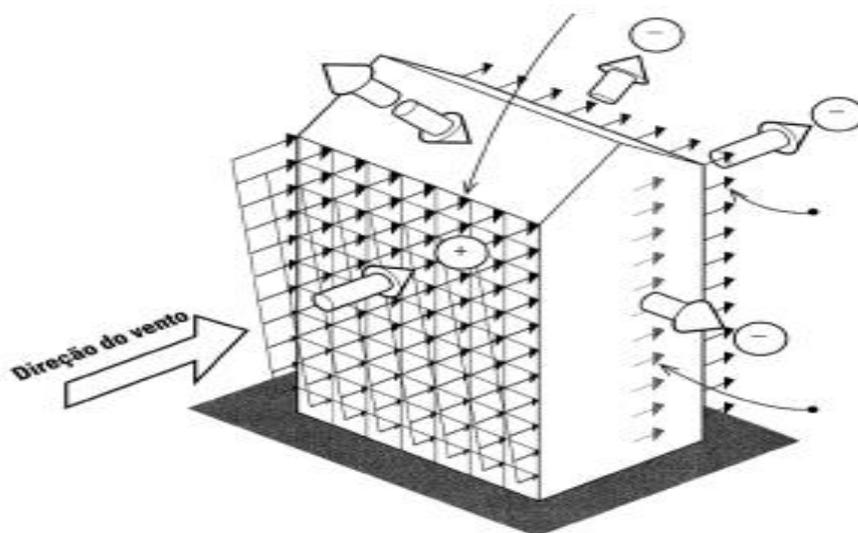


Fonte: PET engenharia civil – UFJF (30/11/2010)

Assim exposto acima, os ventos expõem as estruturas a cargas dinâmicas que, em geral, representam mudanças rápidas quando comparado aos termos de magnitude e ponto de aplicação e colacionado com cargas de gravidade, que são efeitos eólicos que intensificam-se rapidamente de acordo com o aumento da altitude. Apesar de sua natureza dinâmica, cargas de vento podem, em certos casos, ser consideradas equivalentes a cargas estáticas que atua lateralmente (CHING et al., 2010, p. 188). Cada prédio, portanto, está sujeito a carga de vento lateral independente de sua altura. No entanto edifícios altos geralmente são dominados por essas cargas, pois grandes momentos fletores atuam na sua verticalidade, o que faz com que ele se desloque como resultado da força de cisalhamento que surge entre a estrutura e sua base (**Figura 2**).

4772

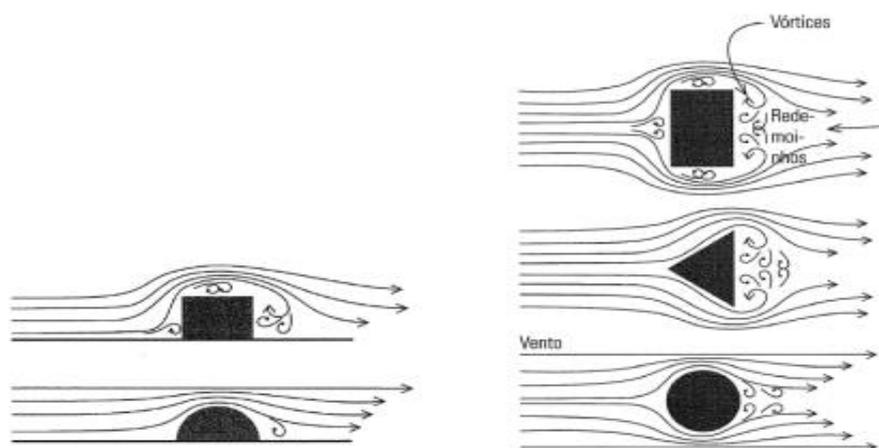
Figura 2 – A ação do vento em uma edificação



Fonte: CHING et al. (2010, p. 190).

Dessa forma, projetos de engenharia que consideram estruturas mais alargadas do que alteadas, predominam cargas de gravidade, sendo que a força eólica, por sua vez, apresenta pouco efeito sobre dimensionamento de seus componentes. Entretanto, de acordo com Ching et al. (2010, p. 189), é preciso observar com a tenção as características dos ventos da área que se construirá, pois o perfil e a forma do edifício são capazes de aumentar ou diminuir a ação eólica. Por exemplo, um aerofólio que tem uma forma arredondada ou curva, tende a oferecer menos resistência às cargas de vento do que a forma retangular, com superfícies planas (**Figura 3**).

Figura 3 – A influência das proporções



Fonte: CHING et al. (2010, p. 191)

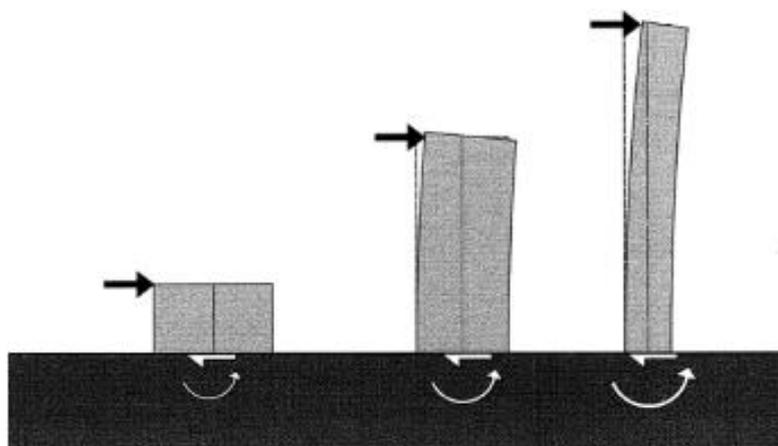
3.2 EDIFICAÇÕES DE GRANDES ALTURAS

De acordo com Ching et al. (2010, p. 191); quanto maiores forem as superfícies expostas de formas retangulares, o efeito do vento atingirá máximo de esforço de cisalhamento, criando um fletor criado na base do edifício. Isso quer dizer que velocidade de uma massa de ar em movimento aumenta à medida que ela passa por um obstáculo, como cantos e arestas vivas, que comprimem as partículas de ar que, em em comparação com bordas arredondadas ou aerodinâmicas, são mais problemáticos. Nos casos em que o movimento da massa de ar é muito rápido, ela sai da superfície do edifício e cria zonas de sucção, com uma pequena quantidade de ar, proporcionando redemoinhos e vórtices, que são caracterizados por correntes de ar circulares geradas pelos ventos turbulentos nessas áreas de baixa pressão. Os redemoinhos se movem lentamente, enquanto os vórtices têm alta velocidade, criando em conjunto as “zonas de sucção e correntes circulares” nas laterais do edifício.

Consistente com Loredo-Souza et al. (2012, p. 12), são as características naturais e amortecimento que nem todas as estruturas estão sujeitas a resposta dinâmica relevante à ação do vento, por isso a investigação de possíveis efeitos dinâmicos são importantes para que a estrutura exiba o comportamento esperado. Dizendo melhor, os efeitos do vento estático ocorrem em todas as estruturas, ficando exposto ao fluxo de ar. Isso proporciona uma resposta estática, que é caracterizada por distribuição de pressões na fachada do edifício, o que gera forças. Essas forças, por sua vez, são quebradas em certas direções e levam à criação de coeficientes aerodinâmicos. Para avaliar o comportamento aerodinâmico na sua forma mais básica, é por meio de medições de seus coeficientes (LOREDO-SOUZA et al., 2012, p. 12).

Esse mesmo princípio básico a solução de design se aplica a arranha-céus e outros tipos de construção, quando componentes individuais da estrutura devem ser projetados para fornecer resistência suficiente às cargas de gravidade e cargas de vento, considerados equivalente a cargas estáticas, além de apresentar rigidez suficiente para limitar os deslocamentos a níveis aceitáveis. Por seu turno, estruturas altas são muitas vezes dominadas pela necessidade de resistir às cargas de vento lateral a medida que os efeitos das forças laterais na estrutura aumentam significativamente concomitante a sua sua altura, o que gera aumento considerado de vento cruzado, controle de oscilação ou vibração, comportamento dinâmico e à resistência do momento de flexão na base supera as considerações de capacidade de resistir à carga de gravidade (CHING et al., 2010, p. 258) (Figura 4).

Figura 4 – Os efeitos da força do vento sobre as estruturas



Fonte: CHING et al. (2010, p. 258).

3.3 AS CARGAS LATERAIS EM EDIFÍCIOS ALTOS

Em concordância com Ching et al. (2010, p. 262), ao projetar um edifício alto é necessário, inicialmente, minimizar a probabilidade de colapso em decorrências das cargas de ventos. Destarte, é necessário considerar o risco de ruptura de materiais empregados para vedações em fachadas e telhados, de elementos arquitetônicos, de instalações e serviços. Prédios altos submetidos a ventos constantes comportam-se como vigas verticais em balanço engastadas no solo, sendo que, geralmente, as cargas de vento que agem sobre eles, em crescente pressão e aumento de magnitude, crescem à medida de sua altura.

Essas cargas de vento podem fazer com que uma edificação se desloque lateralmente em consequência de esforços gerados através da estrutura e sua fundação. Uma ancoragem adequada é necessária para que não ocorra um colapso e cargas laterais aplicadas a um intervalo acima da cota do terreno. O que gera um momento fletor máximo, ou momento de tombamento na base da estrutura.

3.4 OS EFEITOS DE VIZINHANÇA

Os coeficientes aerodinâmicos podem variar bastante dependendo das diferentes condições da vizinhança. Essas variações podem ser benéficas ou prejudiciais, pois, segundo Blessmann (1989, p. 24), a presença de obstáculos naturais ou artificiais nas proximidades de um prédio ou estrutura podem afetar significativamente o campo aerodinâmico e, conseqüentemente, as forças exercidas pelo vento.

O Anexo G da NBR 6123/1988 (ABNT, p. 58) enfatiza que não é possível fornecer valores numéricos que sejam universalmente aplicáveis aos efeitos da vizinhança, pois esses efeitos podem ser determinados por meio de testes em túneis de vento que reproduzem as condições de vizinhança e características do vento natural, influenciando cada local uma especificidade. No entanto, há a possibilidade de alterações desfavoráveis ao longo da vida útil do prédio em questão, devido a futuras urbanizações prováveis. Conforme Blessmann (1989, p. 25), estudos atestam que, sob condições específicas de distância entre as faces confrontantes e ângulos de incidências dos ventos, a intensidade eólica em uma edificação pode ser reduzida pela presença de outras estruturas próximas. Esse fenômeno é denominado por “efeito de proteção”, o qual, na maioria dos casos, é vantajoso. Entretanto, existem situações em que tal efeito é controverso, como é o caso de edificações vizinhas que podem

ocasionar uma concentração do vento, acelerando o fluxo de ar e gerando fortes correntes de ar entre as faces confrontantes.

4 OS ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

4.1 A AÇÃO DO VENTO EM EDIFICAÇÕES

Conforme mencionado por Blessmann (1983, p. 110), os primeiros experimentos para calcular os esforços causados pelo vento nas construções surgiram no final do século XIX. Nessa época, os túneis aerodinâmicos eram utilizados principalmente para analisar modelos de construções e objetos geométricos simples. Entretanto, com o avanço da aviação, esses túneis foram aprimorados para atender às necessidades desse novo meio de transporte, era o início da engenharia aeronáutica, que atualmente se concentra no estudo de aeronaves que se movem em correntes de ar tranquilas e uniformes, livres de turbulência. Os fins experimentais logo obtidos foram amplamente empregados e atuam parte da maioria dos textos normativos que tratam a ação dos ventos. Mas, em certos casos, esses resultados afastam-se bem dos reais, uma vez que, o fluxo de ar era tão suave e uniforme quanto possível; nisto ele diferia do vento natural, que não é apenas turbulento e em rajadas, mas também contém importantes variações de velocidade com a altura.

4776

Em conformidade com Blessmann (1983, p. 114), uma maior precisão dos resultados tornou-se fundamental nos tempos, à medida que os desenvolvimentos arquitetônico e estrutural permitiram a construção de obras mais arrojadas, leves e esbeltas, a fim de conseguir resultados mais fiéis das propriedades do vento natural, para aplicações à construção civil.

4.2 A SIMULAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO VENTO NATURAL

A melhor maneira de demonstrar a importância de simular corretamente os recursos as medições do vento natural que são determinadas ao comparar medições feitas em edifícios reais e em ambientes fechados. Um modelo simplificado foi testado em um túnel de vento, com base em vários estudos comparativos, isto já foi feito antes e concluiu-se que não existem regras ou parâmetros gerais e seus valores numéricos permitem converter os resultados dos testes em fluxo de ar uniforme e suave, corresponde à ação dos ventos naturais (BLESSMANN, 1991, p. 90).

Segundo Blessmann (1991, p. 90), as principais características do vento são quatro, que devem ser considerados ao estudar:

- Curva de velocidade média, dependendo da rugosidade do terreno e a ampla área a barlavento de um edifício;
- A intensidade do componente longitudinal da turbulência, que é uma medida de energia Dinâmica total envolvida nas flutuações da velocidade do vento (rajadas);
- Macro- escala ou escala integral da componente longitudinal da turbulência, representa o tamanho do maior vórtice de vento incidente;
- O espectro de potência da explosão ou a densidade espectral da variância de flutuação, que representa a distribuição de frequência da energia cinética contida na explosão;

Em relação à interferência eólica, de modo geral, o efeito seu efeito diminui com o aumento da rugosidade do terreno, ou seja, a turbulência aumenta com o aumento da rugosidade, mas a velocidade média diminui e, quanto mais acidentado for o terreno, menor será a pressão. No entanto, às vezes mudar a turbulência pode causar alterações significativas no campo de pressão, invertendo a situação (**Figura 5**).

Figura 5 – Ensaio com emprego de blocos paralelepípedicos



Fonte: Website Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 2017.

4.3 CONFORTO DOS USUÁRIOS

Conforme Blessmann (1989, p.48), os usuários não devem perceber as oscilações dos prédios para poderem dizer que o projeto é bom, pois em estruturas esbeltas e em casos de ventos de grande intensidade, é comum haver uma leve percepção, relacionada à amplitude

e frequência das oscilações, e é proporcional à aceleração do movimento do prédio. Abordar esse problema de forma quantitativa é bastante complexo, uma vez que a sensibilidade humana à vibração de uma construção depende de fatores físicos e psicológicos.

Vale ressaltar que tornar a estrutura mais rígida para reduzir a amplitude raramente resolve o problema, pois quanto mais rígida, maior será a sua frequência e pode continuar causando a mesma sensação de enjoo ou desconforto em pessoas mais sensíveis.

4.4 CONFORTO DOS PEDESTRES

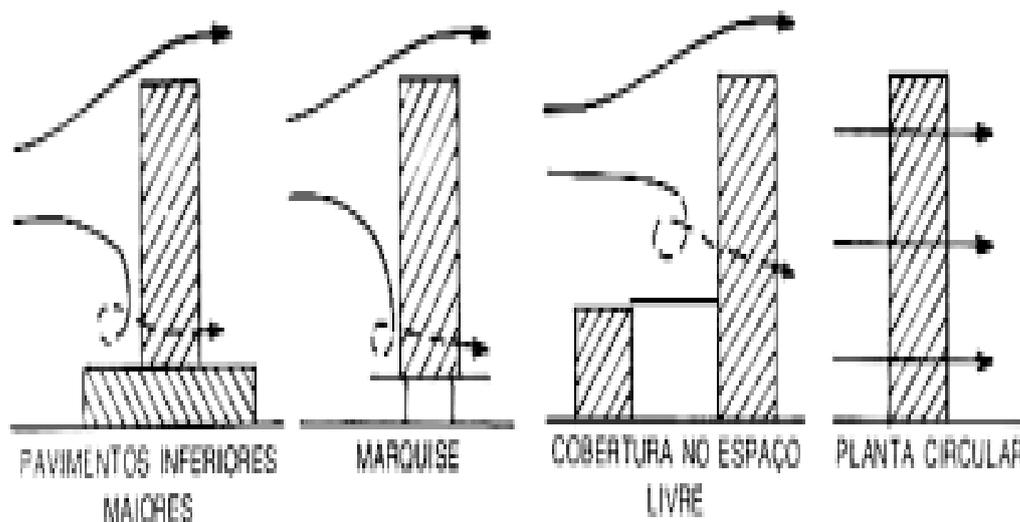
Em determinadas situações, ocorrem rajadas de vento de alta velocidade próximas ao solo e edifícios, o que causa desconforto e insegurança para os pedestres. É importante dedicar atenção, portanto, a esses problemas sempre que um edifício tiver pelo menos o dobro da altura dos prédios vizinhos, localizados no lado pelo qual o vento sopra.

Segundo Blessmann (1989, p. 55), embora haja variações conforme a área, peso, condições físicas, posição do corpo e direção do vento, de modo geral, é considerado que rajadas de vento em torno de 20 m/s (72 km/h) podem causar lesões físicas. A distribuição vertical das pressões na face voltada para o vento, que está diretamente relacionada à pressão dinâmica do local, aumenta à medida que a altura acima do terreno acresce. A partir do ponto de estagnação na fachada voltada para o vento, ocorre um fluxo descendente por causa do gradiente de pressão e esse fluxo penetra no vórtice de base, resultando em altas velocidades próximas ao solo. As velocidades e pressões dinâmicas próximas ao ponto de estagnação serão maiores e, quanto mais alto for o edifício, maior as velocidades próximas ao terreno, uma vez que o gradiente entre essas duas regiões também aumentará.

Além disso, um edifício mais baixo localizado a barlavento pode aumentar a velocidade devido à interação entre o vórtice de sua base e o rastro do menor. Esse problema é comum em prédios com formato paralelepípedo. A sua pressão horizontal distribuída é causada pela diferença de pressões entre a esteira, composta por faces laterais e de sotavento, e a baixa pressão, ligados à região com pressões relativamente altas, próxima à base da fachada de barlavento. Essa baixa pressão na esteira é proporcional à velocidade do vento no fluxo livre, acima do vórtice de topo do edifício, que aumenta com a altura acima do terreno. Portanto, quanto mais alto o edifício, maior será essa velocidade, resultando em pressões mais baixas na esteira e velocidades mais altas, induzidas pelo gradiente horizontal de pressões.

Diante disso, conclui-se que fachadas planas expostas perpendicularmente ao vento sem a proteção de edificações vizinhas, devem ser evitadas. Além disso, modificar a orientação do edifício ou adotar outras medidas, como reduzir a altura ou alterar a forma arquitetônica, podem contribuir para evitar essas altas velocidades (Figura 6).

Figura 6 –Sugestões para evitar altas velocidades próximo ao terreno



Fonte: BLESSMANN (1989, p. 54).

4779

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os tuneis de ventos são essenciais para as análises de grandes estruturas, podendo avaliar com mais precisão os efeitos eólicos nos edifícios e pontes e auxiliar profissionais da área de construções. Contudo, ao analisar melhor cargas dinâmicas do vento sobre os edifícios, que podem exceder os níveis estruturais convencionais, projetistas de estruturas podem, em certos casos, pedir uma avaliação nos tuneis de vento e modelagem de computador no intuito de determinar a tensão de cisalhamento máxima na base, que é a flexão máxima e distribuição de pressões na estrutura entre andares. Esses dados permitem que o pesquisador colete informações sobre a maneira como afetam oscilações do vento, podendo, assim, proporcionar um conforto e segurança que possa, de certa forma, melhorar a percepção de quem utiliza essas estruturas.

Um único exemplo prático não pode ser utilizado como parâmetro geral. No entanto, este trabalho reforça a certeza de que as técnicas experimentais são mais satisfatórias para estimar a força eólica em estruturas altas, especialmente quanto a sua incidência. Isso ocorre pois de acordo com o disposto na norma brasileira (NBR 6123/1988) não seria eficiente

calcular esses esforços de forma gerais, mas analisar cálculos individuais preliminar os feitos com o método normativo e, se possível, economizar em alguns elementos de construção. Sendo que nem sempre será possível economizar no custo da estrutura, pois em certos casos é melhor investir para não prejudicar futuramente o empreendimento, pois uma construção sem o seu devido senso de segurança e que visa apenas o valor financeiro muitas vezes ocasionais problemas que afetam o empreendimento imobiliário.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse artigo tem como finalidade orientar de forma básica assuntos relacionados à força eólica do vento, variação de altura e de velocidade. Para tal, levou-se em consideração normas nacionais e artigos científicos importantes na área de engenharia civil, trazendo um ponto informativo sobre o tema abordado.

REFERÊNCIAS

CHING, Francis D. K.; ONOUYE, Barry S.; ZUBERBUHLER, Douglas. Sistemas estruturais ilustrados: padrões, sistemas e projeto. Porto Alegre: Bookman, 2010.

BLESSMANN, Joaquim. Aerodinâmica das construções. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1983. 4780

BLESSMANN, Joaquim. Ação do vento em edifícios. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1989.

LOREDO-SOUZA, Acir M. Ação estática do vento sobre o Empreendimento Planolar Barra Tower Balneário Camboriú, SC. Laboratório de Aerodinâmica das Construções, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Relatório Técnico. Porto Alegre. Julho, 2007. 93p.

LOREDO-SOUZA, Acir M.; NÚÑEZ, Gustavo J. Z.; ROCHA, Marcelo M. Uso do túnel de vento como ferramenta de projeto no design aerodinâmico. Revista Design & Tecnologia, v. 4, p. 10-23, 2012.

LOREDO-SOUZA, Acir M.; SCHETTINI, Edith B. C.; PALUCH, Mario J. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. IV Escola de Primavera de Transição e Turbulência. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABCM), 2004, v. 4, p. 137-163.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. NBR 6123 (NB-599). Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.