

ANÁLISE DA AÇÃO DO VENTO NA ESTRUTURA DE EDIFICAÇÕES

Fellype Augusto Ramos de Lima,

*Bacharelado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA
(fellype.augustto@outlook.com)*

Raphael de Souza Santos

*Bacharelado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA
(raphael.097@live.com)*

Agnaldo Antônio Moreira Teodoro da Silva

*Professor Mestre do Curso de Engenharia Civil da Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA
(agnaldo.silva@docente.unievangelica.edu.br)*

Wanessa Mesquita Godoi Quaresma

*Professora Mestra do Curso de Engenharia Civil da Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA
(wanessamgq@gmail.com)*

RESUMO

Nas últimas décadas a construção civil sofreu grande avanço, dessa forma surgiram estruturas mais ousadas de maiores dimensões e menos densas, gerando a necessidade de aprimorar os cuidados com os projetos e execução. Assim, as edificações cada vez mais altas e esbeltas estão sujeitas a solicitações dinâmicas, um exemplo, é através de fenômenos meteorológicos como o vento, que influencia de maneira complexa na estrutura. De modo que a aerodinâmica das estruturas se torna um assunto muito relevante, de forma que, com auxílio dos túneis de vento os projetistas vêm cada vez mais aprimorando suas estimativas na hora de projetar e analisar as forças produzidas pelas rajadas. Por meio dessas novas técnicas, é possível com o auxílio da norma estimar os valores dos carregamentos pela força vento ao que realmente acontece com a estrutura. Neste trabalho, tem como objetivo utilizar o túnel de vento juntamente com um simulador de fluxo de ar virtual seguindo as diretrizes normativas, e comparar os resultados em modelo reduzido de um estudo de caso de um empreendimento composto por 8 edificações, usando o princípio com ou sem vizinhança, no que diz respeito aos conceitos envolvendo os efeitos das correntes de ar em prédios.

PALAVRAS-CHAVE: Vento. Edificações esbeltas. NBR 6123/1988. Aerodinâmica.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da evolução, a humanidade se expandiu por novos territórios, aumentando seu conhecimento, e desenvolvendo-o em novas áreas. Na engenharia civil, técnicas, linguagens, materiais e conceitos sofreram mudanças significativas no decorrer do tempo, e dessa forma as construções se tornaram cada vez mais complexas. Porém, devido à proporção que os edifícios possuem, surgem novos desafios aos projetistas estruturais, e um deles, é em função de um fenômeno meteorológico, que é o comportamento da estrutura sob ação de cargas vento.

No território brasileiro, mesmo utilizando os recursos da norma, falta conhecimento específico nessa área e aplicabilidade eficaz, pois simples rajadas intensas em estruturas e coberturas leves já podem provocar grandes acidentes. A NBR 6123 (ABNT, 1988) fornece apenas dados para cálculo em edifícios de geometria simples, em contraponto a isso, a arquitetura das construções sofre inovação a cada momento e para entender cada estrutura, deve-se produzir a maquete e realizar o ensaio em túnel de vento, sendo então necessário uma análise mais específica.

No Brasil, por mais que tenha a norma em vigor composta com o mapa de isopletas, mostrando as velocidades básicas do vento, ainda assim ele é mal compreendido, devido a norma ser da década de 80 e até o momento não ter publicado uma revisão, ou seja, a norma está defasada. Um estudo realizado por Beck e Corrêa (2012), ambos professores da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, propõe uma atualização das velocidades básicas utilizando estações presentes em aeroportos. Assim sendo, percebe-se que as construções da atualidade necessitam de melhores métodos para análise da ação do vento, sendo proposto investimentos em coleta de dados e utilização de softwares para avaliação.

2 METODOLOGIA E JUSTIFICATIVA

O trabalho foi feito com base em pesquisas de sites, artigos, teses, e publicações relacionadas a ação do vento. As selecionadas dentre elas foram, as que propõem os efeitos das cargas de ar e suas consequências, principalmente na área da construção civil. A abordagem se deu sobre ação em edificações, com fundamentos da NBR 6123 (ABNT, 1988). Utilizando destes conceitos, foram elaborados ensaios com maquetes de um empreendimento composto por 8 edificações em túnel de vento através do aparelho da instituição de ensino e comparado com o software da Autodesk em versão estudantil de simulação de vento. Por fim, foi mostrado os efeitos que as correntes de ar causam nas estruturas do empreendimento, e assim o comportamento sobre aerodinâmica delas.

Ao projetar uma edificação muito se pensa na questão, da estrutura, da hidráulica, e da elétrica, parâmetros como, números de pessoas na habitação, local da construção, e relação de quantidade de carga que a estrutura irá sofrer, são fatores importantes que muitas vezes faltam detalhes a levar em consideração. Por exemplo, o fator de carga do vento que é deixado de lado por muitos projetistas, por considerar que no Brasil a edificação não sofre com este fenômeno de forma significativa ao conforto do usuário, ou mesmo não desenvolver ensaios, para melhor fundamento na hora de dimensionar a mesma. Visto que ao longo dos anos, as edificações estão cada vez mais alcançando novos patamares em suas alturas, de modo que as cargas produzidas pelo vento se intensificam à medida que altura da construção aumenta, logo o conforto do usuário pode ser prejudicado, e também a estrutura pode sofrer mal dimensionamento. De maneira que, por mais que exista a norma para consulta, ela está ultrapassada por não atualizar seus dados desde a sua apresentação na década de 80, assim suas informações, como o mapa com a velocidade básica do vento ficam obsoletos.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3.1 DEFINIÇÃO DO VENTO

De acordo com Blessmann (1995), o sol aquece o planeta terra de forma não uniforme, conseqüentemente o geóide sofre variações de temperatura em suas regiões, portanto alguns locais aquece e a pressão atmosférica diminui e o ar quente expande, enquanto outros lugares permanecem frios e o ar denso, assim gerando movimentação das massas de ar em que a aquecida eleva-se para outras regiões enquanto a fria se desloca da área de maior pressão para ocupar o espaço deixado. Dessa forma, o deslocamento das massas de ar de zonas de alta pressão para baixa pressão produz o vento.

3.2 DINÂMICAS DO VENTO

Segundo Azevedo (2016), o carregamento dinâmico é compreendido como todo carregamento em que o tempo é uma variável ao qual interfere na relação de aplicação da carga, ou seja, pode ser entendido como a intensidade da carga, podendo ser constante ou não, variando de acordo com o tempo. Para o projetista estrutural, interpretar esse fenômeno é um grande desafio devido a sua complexidade, pois sofre dificuldades ao propor carregamento variável na estrutura em função do tempo.

Então, o vento pode ser caracterizado como um carregamento dinâmico, porém é frequente os casos em que o mesmo é considerado um carregamento estático equivalente na estrutura, ou seja, uma carga aplicada gradativamente e sem variação de intensidade ao longo do tempo. Ao qual em situações em que a estrutura demonstra uma ação dinâmica moderada, ocorre um superdimensionamento da mesma, ou na ação inversa, possui uma resposta intensa no carregamento dinâmico, logo podendo causar o colapso estrutural. Para modelar a ação dinâmica do vento é necessário entender alguns dos seus principais efeitos, Blessmann (2005) diz respeito da energia cinética das rajadas, martelamento, desprendimento de vórtices e aerodinâmica por galope.

3.2.1 Energia cinética das rajadas

Segundo Blessmann (2005), o primeiro estudo feito de forma racional para determinar os efeitos dinâmicos das rajadas de vento foi divulgado pelo Rausch (1933 *apud* BLESSMANN, 2005), que baseou nos estudos estatísticos de Föppl de maneira que esse método foi incluído a norma alemã da época. De acordo com os registros da época, Rausch representou o comportamento das rajadas do vento, relacionando a pressão dinâmica do vento ao decorrer do tempo. Dentre seus estudos, ele explica que uma rajada média tem sua pressão elevada até certo ponto, permanece constante por uma determinada duração e depois volta a cair. Após um período, surgem outras rajadas que permanecem constantes, aumentam e diminuem de acordo com o tempo, mas conservando a pressão dinâmica média. Para Rausch, não se pode concluir que exista uma periodicidade das rajadas, nem que sua duração seja sempre a mesma. Ou seja, não se pode considerar que sua força aconteça no mesmo período de tempo e nem com a mesma intensidade ou mesma duração, assim a força do vento não pode ser considerada como efeito perigoso causadora de ressonância. Para chegar à essas conclusões primeiramente foi observado rajadas únicas para depois fazer um estudo de rajadas variadas.

3.2.2 Martelamento

Segundo Simiu e Scanlan (1996 *apud* CARRIL JR., 2000), o martelamento corresponde com a excitação da estrutura pela flutuação da velocidade do vento. Quando a corrente original do vento é alterada por algum obstáculo na frente da estrutura, isso gera esforços dinâmicos associados a turbulência na mesma, denominado de martelamento de esteira. Nessa situação, com a geração de turbulência, a frequência excitadora pode condizer com umas das frequências das vibrações naturais da estrutura, assim gerando efeitos dinâmicos significativos.

3.2.3 Desprendimento de vórtices

Blessmann (2005) mostra que, com a variação da forma geométrica da estrutura pode haver um desprendimento alternado de vórtices, com uma frequência bem definida. É conhecido como Vórtices de Kármán, os quais produz forças oblíquas em correlação à direção do vento médio. Seções como, retangular, triangular, ou que possuem arestas vivas, estão sujeitas a excitações mais intensas pelo desprendimento de vórtices, do que as seções circulares.

Segundo Labegalini *et al.* (1992), os Vórtices de Kármán apresentam uma configuração de sentidos alternados quando um fluido escoar em volta de um obstáculo, sendo que a esteira atrás da obstrução não é regular.

3.2.4 Aerodinâmica por galope

De acordo com Blessmann (2005), galope é um fenômeno causado em estruturas leves e flexíveis de pouco amortecimento ao qual podem sofrer oscilações de instabilidade aerodinâmica, e conforme a velocidade do vento aumenta, a amplitude das oscilações também, sem um limite superior. Dentre os números de seções usuais na construção civil, como prismas de seção retangular, triangular e quadrada, por exemplo, são potencialmente sensíveis a este efeito. Em conformidade, o galope possui características de sua intensidade ser violenta e um súbito aparecimento, e acontece quando uma certa velocidade do vento é excedida, denominada de velocidade de disparo, gerando oscilações transversais à direção do vento. No decorrer da oscilação, o ângulo de incidência do vento está em constante mudança, e em resposta a esta incidência variável, pode ser provocado uma força na direção e sentido do movimento, que extrai a energia do vento e mantém o movimento oscilatório.

Blessmann (2005) indica algumas formas de reduzir as oscilações por galope, dentre elas está, a mudança da forma ou orientação da estrutura, de tal maneira que os coeficientes aerodinâmicos se tornem estabilizantes. E outro modo, é aumentar o amortecimento interno da estrutura, já que a velocidade de disparo é proporcional ao amortecimento, e certas estruturas possuem o amortecimento cada vez menores, fazendo com que a velocidade de disparo se assemelhe com a velocidade de projeto.

3.3 EFEITO DO VENTO EM EDIFICAÇÕES

Em um sistema estrutural de uma edificação, consideramos primeiramente, como transferir aos apoios, as cargas mortas, como o peso próprio da estrutura, e também as cargas acidentais, tais como cargas de serviço ou de sobrecarga. Porém fatores ambientais, como os ventos, são capazes de desestruturar os elementos de transmissão de cargas de gravidade. Ching *et al.* (2010) define que os ventos ocasionam um carregamento dinâmico, entretanto podem ser analisados como cargas estáticas

equivalentes, e geralmente tem mudanças rápidas em fatores de magnitude e ponto de aplicação, e também o efeito da sua carga se intensifica à medida que a altura aumenta.

3.3.1 Regime de escoamento

Segundo Ching *et al.* (2010), as forças produzidas pelas cargas de vento são consequência da energia cinética do movimento de uma massa de ar, que produz pressões diretas (positivas) ou sucção (negativas), o que impõem esforços a qualquer obstáculo em seu caminho, particularmente nas estruturas, e na sua vedação externa. A pressão direta na edificação ocorre quando a superfície que recebe a carga do vento está em posição perpendicular ao percurso do mesmo, ou seja, paredes a barlavento, já na pressão negativa, são superfícies laterais consideradas sotavento, que são contrárias ao barlavento, no qual ambas as pressões podem causar estragos em coberturas e fachadas dos edifícios.

Segundo Cook (1990 *apud* CARPEGGIANI, 2004), para estruturas que estão alinhadas na direção do vento são definidos três regimes diferentes de escoamento, sendo eles, regime de escoamento de corpo isolado, regime de escoamento deslizante e regime de escoamento de interferência de esteira.

No regime de escoamento de corpo isolado, os edifícios sofrem de maneira independente com o vento, pois as estruturas estão afastadas de tal modo que cada uma atua de maneira isolada. Forma-se um vórtice chamado de pé de fachada em volta de cada edifício individualmente e o escoamento decorrente da esteira recola ao solo, antes mesmo de chegar à próxima edificação. Nessa situação, a distância de afastamento é denominada de x , que é superior à somatória dos comprimentos de separação a barlavento e de recolamento a sotavento, assim o escoamento é tratado como se o edifício estivesse isolado, tendo a formação completa da esteira, com carga positivas e negativas (CARPEGGIANI, 2004).

Já no regime deslizante, forma-se um vórtice estável entre os edifícios, pois estão próximos suficientes, assim o vento flui pelo topo das estruturas como se fossem um único obstáculo. E as edificações posicionadas a sotaventos, individualmente, possui forças muitas pequenas, visto que a estrutura está imergida na esteira do primeiro (CARPEGGIANI, 2004).

E o regime de escoamento de interferência de esteira, é uma versão intermediária entre o regime de corpo isolado e o regime deslizante. Ou seja, o espaço entre as edificações é pequeno demais para a formação completa da esteira, entretanto, é muito grande para criação de vórtices estabilizados (CARPEGGIANI, 2004).

3.3.2 Influência das proporções

Segundo Ching *et al.* (2010), o projeto de edificações mais alargadas do que altas é conduzido principalmente pelas forças de gravidade verticais. Assim, o impacto de dimensionamento de suas componentes através das cargas de vento é baixo, no entanto devem ser consideradas. E numa edificação, o perfil e a forma são capazes de aumentar ou diminuir os efeitos do vento. Assim, quando um edifício possui um perfil aerodinâmico por exemplo, em que apresenta formas arredondadas ou curvas, apresenta menos resistência às cargas de vento do que em relação a uma forma retangular, com superfícies retas.

3.3.3 Efeitos de vizinhança

A presença de construções vizinhas pode influenciar os coeficientes aerodinâmicos, deste modo, um obstáculo próximo a estrutura altera o efeito do vento sobre a mesma. Assim, alterando as pressões, forças, e os momentos torçores. De modo geral, estes efeitos são característicos de cada circunstância, logo as normas propõem os coeficientes aerodinâmicos se referindo a construções isoladas (CARPEGIANI, 2004).

A NBR 6123 (ABNT, 1988) propõe no anexo G três principais maneiras de como a presença de edificações vizinhas altera as forças de vento, que são, o efeito Venturi, a deflexão do vento na direção vertical e a turbulência da esteira.

3.3.3.1 Efeito Venturi

Este efeito é descrito como um afinilamento do vento, visto que as formas, dimensões e orientações das construções vizinhas pode acelerar o escoamento do ar entre as paredes confrontantes, como resultado alterando as pressões exercidas. Sobretudo, este efeito tem a característica de aparecer principalmente em construções próximas, os picos de sucção ocorrem nas paredes confrontantes, próximas às arestas de barlavento (ABNT, NBR 6123/1988).

3.3.3.2 Deflexão do vento na direção vertical

Este fenômeno acontece, quando parte do vento incidido a barlavento na fachada de edificações altas é defletido para baixo, desta maneira, aumentando a velocidade do mesmo em regiões próximas ao do terreno. Através deste efeito, as construções mais baixas próximas a estas zonas podem sofrer com cargas de vento excessivas (ABNT, NBR 6123/1988).

3.3.3.3 Turbulência da esteira

Segundo a NBR 6123 (ABNT, 1988) este efeito, é quando uma construção localizada à sotavento de outra, sofre com a turbulência gerada por esteiras de uma edificação a barlavento. A turbulência pode causar efeitos dinâmicos chamados de efeitos de golpe que provoca mudanças nas pressões, e se dá principalmente, em estruturas com coberturas e painéis de vedação composto de materiais leves.

3.3.4 Conforto do usuário

A interferência do vento não é só na segurança estrutural de uma edificação, mas também nas condições de uso da mesma, já que as oscilações geradas pelas rajadas podem interferir na relação do nível de conforto do usuário. Assim, em certos casos os níveis de oscilações podem ser imperceptíveis, no entanto, também podem chegar à valores que causam sensação de mal-estar ou náusea para pessoas mais sensíveis. Fontes (2003) complementa que mesmo enrijecendo a estrutura, pode acontecer de nem sempre resolver o transtorno, já que, assim reduz a amplitude de aceleração, porém aumenta a frequência, o que pode continuar o efeito desagradável.

3.3.5 Torção

Conforme Ching *et al.* (2010), a torção pode estar em estruturas de qualquer altura, entretanto o comportamento fica crítico em edificações altas, desta maneira, a torção de um único pavimento seria aceitável, porém este efeito se concentra sobre vários pavimentos o que acumula e resulta na rotação total da estrutura.

Fontes (2003) acrescenta que as cargas de torção podem acontecer devido a diferença de distribuição de pressão ou também pela assimetria arquitetônica da estrutura. No entanto, complementa que através de ensaios em túneis de vento vem comprovando que edificações com o eixo de simetria torcional, geométrico, e estrutural coincidentes podem sofrer cargas significativas de torção. Que são consequências de um vento oblíquo ou, por um que atua perpendicularmente a uma das faces, assim pode haver distribuição não simétrica das pressões através do resultado da turbulência.

3.4 AERODINÂMICA DAS EDIFICAÇÕES

Aerodinâmica segundo o dicionário Michaelis (2019) é parte da mecânica que trata do movimento do ar e de outros fluidos gasosos, bem como das forças que agem sobre corpos sólidos, isto é, estuda a dinâmica dos corpos que se movem dentro do fluido (ar). Dentro do assunto são estudadas as forças de sustentação e de arrasto, pois elas interagem em corpos em movimento ou parados. Essa ciência é utilizada para projetar aviões, carros, edificações, e entre outros objetos que estão em muito contato com o vento e precisam da aerodinâmica para adquirir estabilidade. Sendo assim, o vento ao entrar em contato com a superfície de qualquer objeto, tende a forçá-lo ao movimento na mesma direção, ou seja, sempre que o vento contorna um objeto seu campo de velocidade gera em toda a superfície um campo de tensões, a que se encontra atuando sobre todo o objeto.

Para Martins (2018) os carregamentos gerados pelas pressões aerodinâmicas flutuam constantemente, uma vez que o vento atua em forma de rajadas. A resposta do edifício ocorre tanto na direção longitudinal da incidência do vento quanto na direção transversal. Ela é composta das respostas dinâmica e estática, sendo que a primeira leva em consideração atuação das rajadas de vento.

No que diz questão ao formato da edificação, Ching *et al.* (2010) demonstram que edificações com perfis aerodinâmicos, representadas por formas arredondadas ou curvas, usualmente oferecem menor esforço às cargas de vento do que as retangulares, com predomínio de superfícies retas, o que implica diretamente no tipo de esforço aerodinâmico, isso significa que o perfil e a forma são variáveis, com grande influência sobre os efeitos de pressão causados pelo vento em uma edificação, podendo aumentá-los ou diminuí-los.

3.4.1 Aeroelasticidade

A aeroelasticidade conforme Lopes (1992) tem como objetivo o estudo da interação entre as forças aerodinâmicas e as forças elásticas, constituindo um domínio científico inicialmente explorado pela engenharia aeronáutica, e posteriormente por outras áreas da engenharia preocupada com o estudo de escoamentos em torno de objetos imersos, isto é, a aeroelasticidade estuda a parte dos fenômenos em que as forças aerodinâmicas e o movimento das estruturas interagem de maneira significativa.

3.4.2 Arrastamento

Sendo principal força a ser analisada dentro do âmbito da aerodinâmica, Loredou-Souza *et al.* (2012) explicam que o arrastamento pode ser descrito como uma ação estática ocasionada pela incidência do vento nas edificações. Essa força acontece no eixo longitudinal da edificação, na direção da corrente. Sendo assim, a medida que o arrastamento é menor, os esforços na edificação também serão menores, contudo, pode

se dizer que uma simples análise da força de arrasto pode reduzir o consumo de gastos com ferragens e concreto, assim diminuindo no orçamento da construção.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 TÚNEL DE VENTO

O aparelho para a prova de vento utilizado neste trabalho, corresponde ao da marca Heliotec, com o comprimento total de 5 m e com seções de 40x40x100 cm da câmara de ensaio. Tal instrumento se apresenta na instituição de ensino UniEvangélica – Centro Universitário de Anápolis.

4.2 TÚNEL DE VENTO VIRTUAL

Neste trabalho, com o intuito de complementar a elaboração e dados acerca do estudo sobre aerodinâmica, e também ajustar alguns parâmetros devido a limitação do aparelho da Heliotec, foi usado um software de versão estudantil que simula o túnel de vento, disponibilizado pela empresa Autodesk. O programa *Flow Design*, produz uma modelagem sobre o fluxo de vento em torno de conceitos criados por engenheiros e arquitetos.

4.3 EMPREENDIMENTO

Para realização deste experimento, foi escolhido um empreendimento dentro do município de Anápolis no interior do estado de Goiás para elaboração do estudo de caso, com o objetivo de uma análise aerodinâmica. Foi desconsiderado possíveis aberturas como janelas e sacadas, sendo assim, os modelos foram elaborados usando a projeção da área construída de cada edificação. O empreendimento é composto de 8 torres com dimensões iguais, de modo que o modelo com o tamanho real está descrito posteriormente.

O ensaio partiu do conteúdo estudado anteriormente, baseando na arquitetura das estruturas, sendo que, a escolha do empreendimento teve como critérios, possuir estruturas semelhantes e simétricas, sendo próximas umas das outras, além disso estar situada em terreno plano, e ser de uso residencial. Por fim, a análise será feita observando todas as 8 estruturas do empreendimento como um todo, e também como apenas uma única edificação de maneira isolada.

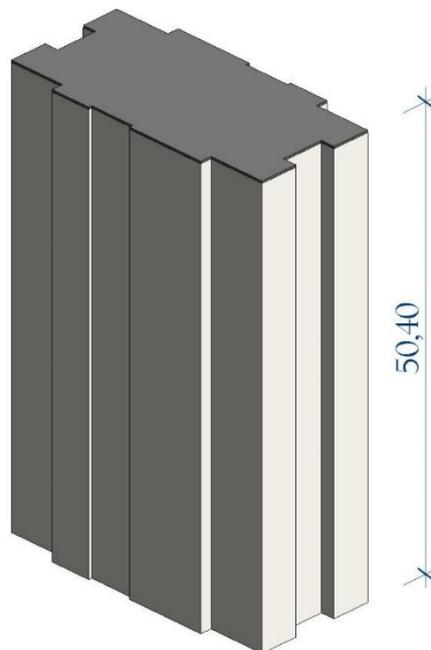
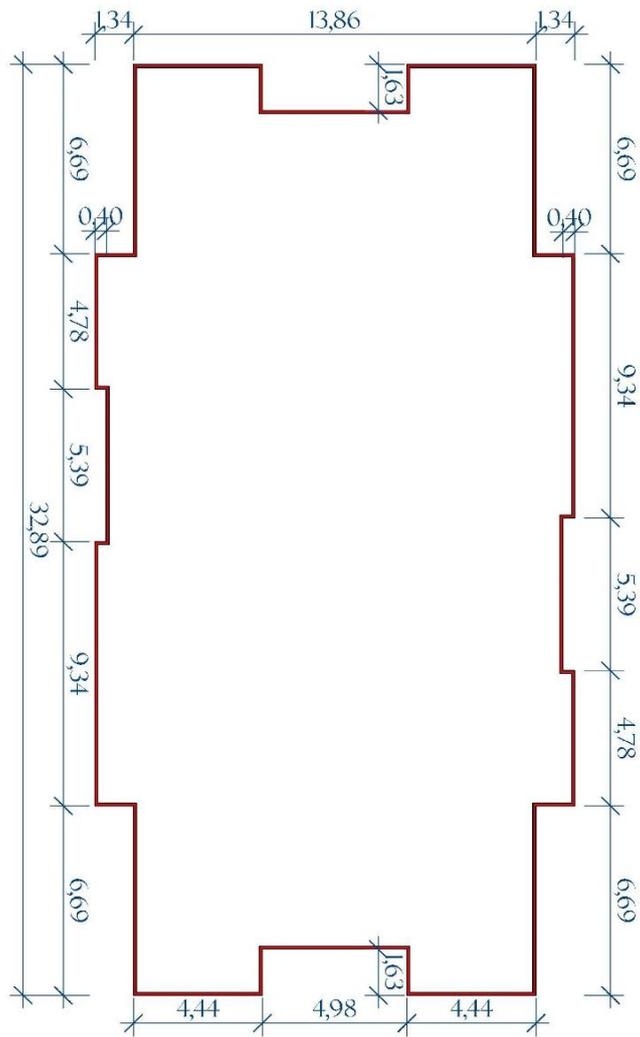
4.4 MODELO FÍSICO

As maquetes fabricadas para o ensaio no aparelho presente na instituição de ensino, foi desenvolvida de maneira que as dimensões foram reduzidas 252 vezes do tamanho real. Foi utilizado o painel de fibras de média densidade como material das maquetes, também conhecido popularmente como MDF, com placa de 6 mm de espessura em corte à laser.

4.5 MODELO VIRTUAL

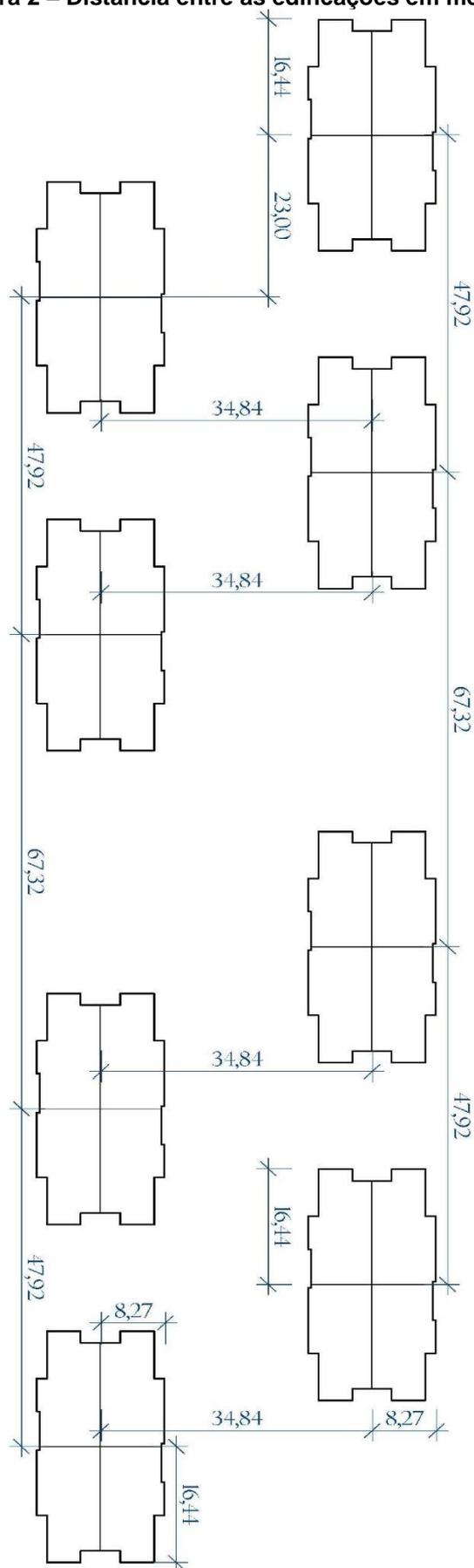
Este modelo foi elaborado no programa Revit para o experimento na simulação do túnel virtual, e exportado em modelo 3D no formato fbx para o Flow Design, de forma que possui a proporção real de todo o empreendimento (Figura 1 e 2).

Figura 1 – Dimensão da estrutura em metros



Fonte: Próprios autores.

Figura 2 – Distância entre as edificações em metros



Fonte: Próprios autores.

5 ANÁLISES DA AÇÃO DO VENTO

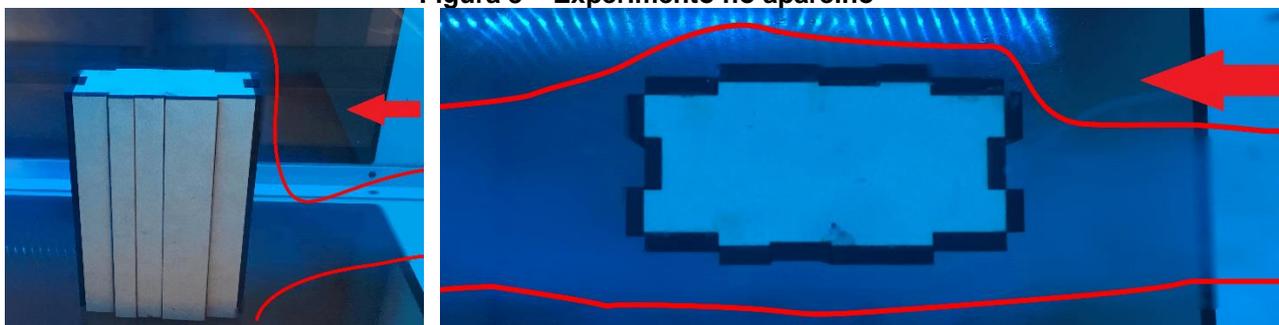
5.1 COMPARAÇÃO ENTRE OS TÚNEIS DE VENTO

Através da simulação das correntes de ar feita pelo aparelho e o programa, obteve-se os ensaios com incidência de vento paralela ao sentido longitudinal do empreendimento, ou seja, em ângulo 0° . Dessa forma, a configuração do software *Flow Design* foi definida na escala em metros, e no dispositivo da Heliotec a potência do exaustor foi estabelecida em 30%, logo sendo possível realizar uma comparação entre métodos.

5.1.1 Observação na estrutura isolada

A Figura 3 apresenta a prova no aparelho, e infelizmente a capacidade da máquina para gera a fumaça não é tão preciso e nem potente. Mas, ainda assim foi possível ver a influência das correntes de ar na maquete, de modo que para facilitar a percepção na imagem a mesma foi editada, do qual as linhas vermelhas representam o limite do escoamento e as setas apresentam o sentido do vento. Sendo assim, percebe-se que neste exemplo o escoamento do vento é intenso e direto na estrutura, de maneira que as faces de barlavento e sotavento sofrem com forças acentuadas.

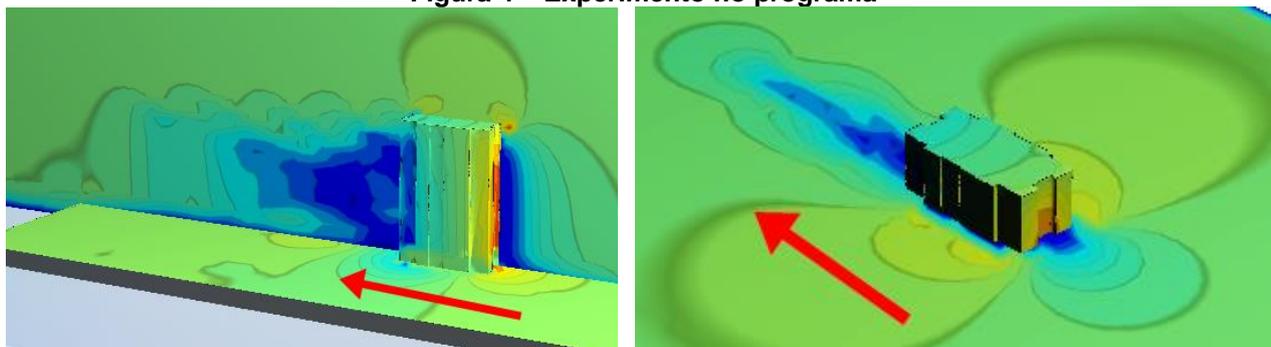
Figura 3 – Experimento no aparelho



Fonte: Próprios autores.

Comparando com o ensaio anterior, na Figura 4 foi visto as mesmas características do fluxo, porém no programa é possível evidenciar em diferentes tonalidades efeitos subsequentes. Em cor azul mostra o escoamento e a turbulência gerada no fluido, e na medida em que se afasta do edifício, tende ao seu estado original respectivamente mudando o tom até chegar ao verde.

Figura 4 – Experimento no programa



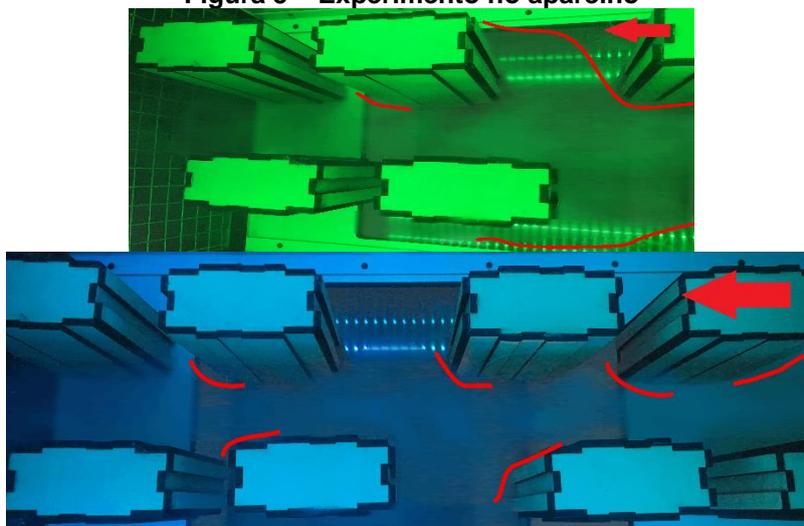
Fonte: Próprios autores.

Contudo, foi possível compreender que o software preenche as limitações da máquina, sendo visível de certo modo as possíveis pressões exercidas na maquete virtual, com cores variando de azul turquesa, amarelo e vermelho. Já no âmbito do escoamento é evidente a modelagem do fluido sendo semelhante ao do equipamento, sua variação da velocidade e turbulência causada pela resistência da edificação são caracterizadas também por cores informativas levando em tom verde claro o fluxo sem interferência, ao verde escuro e até azul com turbulência.

5.1.2 Observação em todo o empreendimento

Diante da Figura 5, seguindo o sentido do vento de acordo com a seta em vermelho, foi observado que possui intenso escoamento entre as edificações, principalmente entre a primeira fileira com a segunda, e entres os cantos das miniaturas foi notado o desvio das correntes de ar para os lados perpendiculares à incidência. Por fim, pode observar devido a acentuada corrente entra as fileiras à possível capacidade de interferir no conforto do usuário.

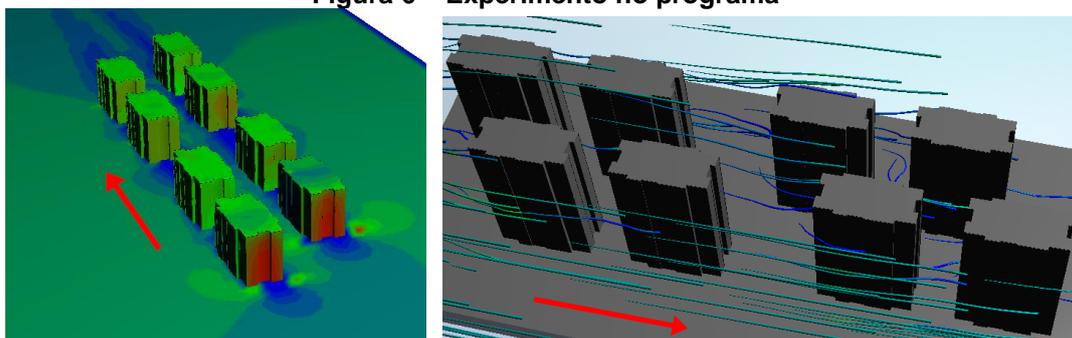
Figura 5 – Experimento no aparelho



Fonte: Próprios autores.

Na Figura 6, temos as correntes de ar atuando semelhante ao ensaio anterior no instrumento, sendo que na vista gerada pelo programa, demonstra intensa pressão na face de barlavento, principalmente nas primeiras estruturas, preenchidas de vermelho na imagem. Já nas arestas dos modelos foi visto que houve uma aceleração do vento, em coloração verde claro, de maneira que causou influência nos edifícios posteriores, e também no interior entre as fileiras ocorreu o escoamento das correntes.

Figura 6 – Experimento no programa



Fonte: Próprios autores.

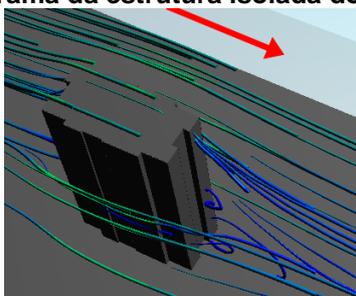
5.2 EFEITOS OBSERVADOS

Usando os princípios apresentados previamente, foi feita observações através de provas empregadas no software da Autodesk visando obter como é o comportamento da estrutura tanto isolada quanto associadas ao empreendimento. Destes experimentos foram obtidas imagens para melhor demonstração desses efeitos e suas características, gerando uma comparação entre as edificações como um todo e também como única, tendo em vista apresentar suas diferenças.

5.2.1 Análise na estrutura isolada

Na Figura 7, podemos observar que a medida em que o vento escoar ao redor do edifício, ocorre uma formação de vórtices com sentido alternados intitulado de Vórtices de Kármán, como consequência da estrutura ter geometria retangular. Essas excitações têm como características seguir a mesma direção da corrente original e surgir após à estrutura.

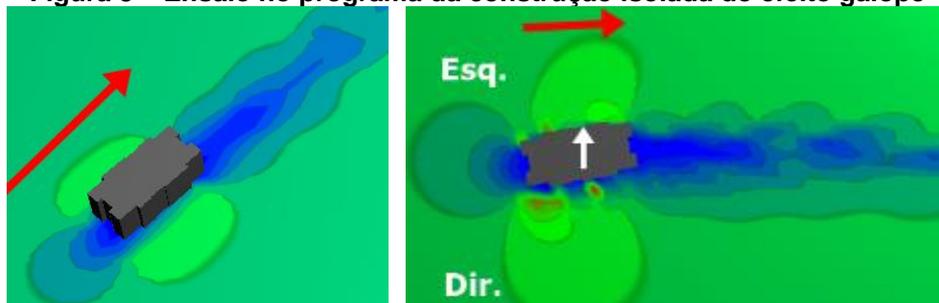
Figura 7 – Ensaio no programa da estrutura isolada do efeito Vórtices de Kármán



Fonte: Próprios autores.

Seguindo com os ensaios, verificamos uma alteração na influência da velocidade do vento em relação a amplitude da direção do mesmo, caracterizado como efeito de galope. Levando em consideração que a direção do vento está em constante mudança, variamos sua angulação para 10° para melhor observamos. A Figura 8 exemplificada bem esse efeito, o primeiro ensaio (imagem na esquerda) tem angulação 0° , podemos observar nenhuma mudança da velocidade do vento nas laterais da estrutura. Já no segundo ensaio (imagem na direita) com angulação de 10° , pode observar uma maior incidência do vento na face voltada para a direção da corrente de ar original, demonstrando maior velocidade na estrutura na face da esquerda do que na face da direita, com isso podemos considerar que a estrutura sofreu uma variação de pressão, sendo um diminuição de pressão na lateral esquerda e um aumento da mesma na lateral direita, assim gerando oscilações transversais à direção do vento de acordo com a seta em branco a seguir.

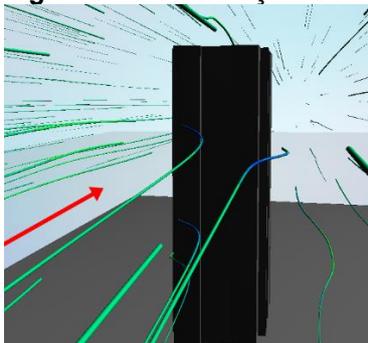
Figura 8 – Ensaio no programa da construção isolada do efeito galope



Fonte: Próprios autores.

De fato, as proporções de uma edificação influenciam na questão aerodinâmica, por ter seção retangular, apresenta maior arrasto em comparação com uma de seção circular, sendo assim, quanto maior altura e esbeltez da edificação, maior será sua tendência a torção. Como podemos ver na Figura 9.

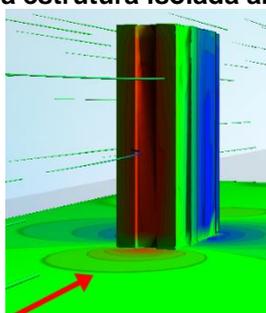
Figura 9 – Ensaio no programa da construção isolada explorando a torção



Fonte: Próprios autores.

A Figura 10 demonstra o regime de escoamento devido as pressões geradas pelo vento sendo que, em barlavento temos pressões diretas (positivas) exibida em cor vermelha e a sotavento temos pressão de sucção (negativas) em cor azul, representadas abaixo.

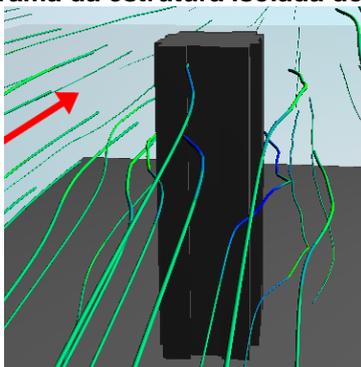
Figura 10 – Ensaio no programa da estrutura isolada analisando o regime de escoamento



Fonte: Próprios autores.

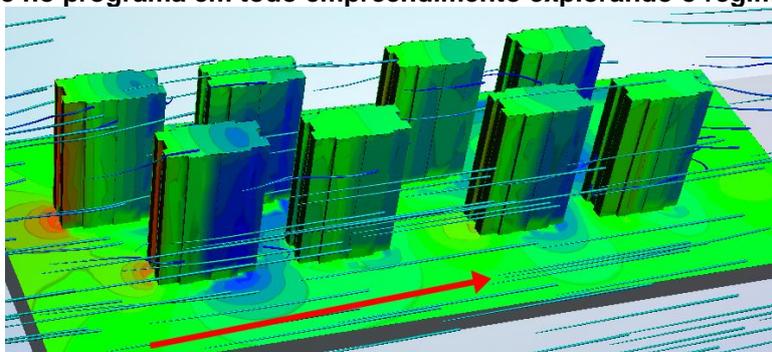
Em conformidade com a Figura 11, podemos observar que a estrutura não sofre com deflexão do vento na direção vertical, pelo fato do vento incidido em barlavento da edificação não estar sendo desviado para baixo. Devido ao formato da estrutura, a face analisada é pequena e estreita, com isso as esteiras acabam contornando a edificação ao invés de defletir para baixo, neste caso evitando o aumento da velocidade do vento em locais próximos ao terreno.

Figura 11 – Ensaio no programa da estrutura isolada do efeito da deflexão do vento



Fonte: Próprios autores.

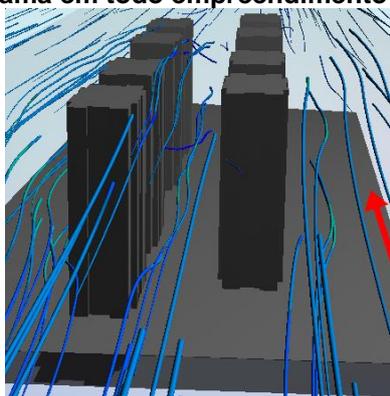
Figura 14 – Teste no programa em todo empreendimento explorando o regime de escoamento



Fonte: Próprios autores.

Dentro dos efeitos de vizinhança temos o efeito Venturi, que ocorre quando há construções muito próximas das outras fazendo com que ocorra um afunilamento das esteiras nas paredes confrontantes, conseqüentemente surgem picos de sucção próximo as arestas da edificação de tonalidade em verde claro mostrado na Figura 15.

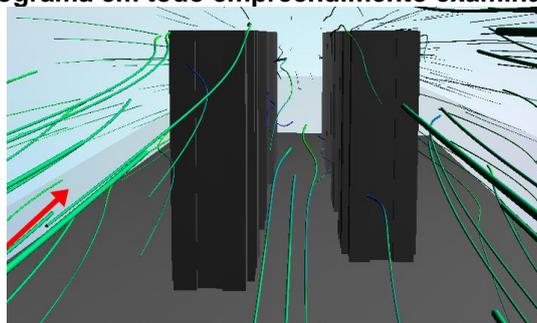
Figura 15 – Teste no programa em todo empreendimento atentando ao efeito Venturi



Fonte: Próprios autores.

Outro efeito de vizinhança é quando ocorre a deflexão do ar para baixo, e da mesma maneira que na estrutura isolada, não ocorreu na estrutura em conjunto pois depende basicamente da face em barlavento, e como podemos ver na Figura 16 por ser tratar de edificações muito estreitas, o vento acaba contornando a estrutura e não concretizando o efeito.

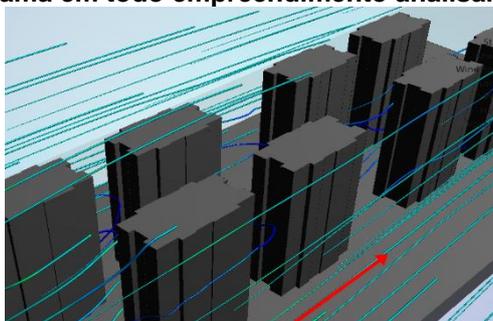
Figura 16 – Teste no programa em todo empreendimento examinando o efeito de deflexão



Fonte: Próprios autores.

Na Figura 17 é possível observar o efeito de turbulência de esteira, as estruturas posteriores sofrem pelos efeitos causados pela anterior, essas turbulências geram efeitos de golpe e assim provocam mudanças de pressão.

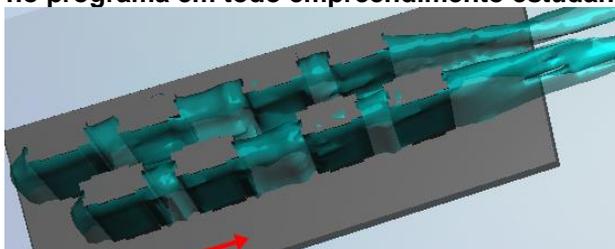
Figura 17 – Teste no programa em todo empreendimento analisando a turbulência de esteira



Fonte: Próprios autores.

Dentro os efeitos que requerem maior análise, temos o arrastamento, pois está diretamente ligada a proporção da edificação. Outro fato é que está inteiramente ligada a aerodinâmica, por isso requer ensaios para melhor entendimento de seus efeitos, a Figura 18 representa a influência do vento, se levarmos em consideração os efeitos de torção, podemos analisar que as estruturas que estão à frente são as que sofrem maior parte das cargas de vento, assim sofrendo mais com os efeitos de torção.

Figura 18 – Teste no programa em todo empreendimento estudando o arrastamento



Fonte: Próprios autores.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o avanço da construção civil, surgem a cada dia novas técnicas e conceitos a serem considerados, assim aparecem novos desafios aos projetistas, e o vento por se comportar de maneira complexa necessita de estudos especiais, como a utilização da norma, ensaios em túnel ou em simuladores de escoamento do vento. Através do embasamento teórico pode se observar as características do vento e suas variações, os efeitos causados nas estruturas de edificações, também foi abordado a maneira como os corpos sólidos escoam dentro do fluido.

Para compreender efetivamente os efeitos do vento, foi elaborado um estudo de caso, através de um empreendimento na cidade Anápolis, e teve como critério para sua escolha estar em um terreno plano e ser um edifício residencial. Nessa análise foram consideradas duas vertentes, analisando o caso real composta pelas oito estruturas e outro caso com uma única estrutura isolada.

Como foi explorado no capítulo das análises da ação do vento, pode observar através dos experimentos a coerência com as referências adotadas. De maneira que, os testes feitos comparando os túneis de vento, mostra que ambos têm a capacidade de demonstrar o fluxo de escoamento, no entanto com suas limitações. No caso do aparelho da instituição, é perceptível alguns efeitos em volta da miniatura, porém sua capacidade de visualizar o vento através da fumaça não é ideal, sendo que as resultantes ficam claras o suficiente no momento em que abrange a simulação do software. Já no programa, as observações feitas foram simplesmente através da modelagem da forma da construção, não levando qualquer aspecto estrutural e material da mesma e, inclusive as cores

adotadas pelo mesmo, sofrem variação em alguns detalhes diferenciando de outros ensaios.

Fica evidente com experimentos que o fluido é maleável e gera cargas, no qual as observações dos sistemas em ambos os ensaios podemos registrar efeitos que podem ocorrer em uma edificação de tamanho real, justificando a importância dos ensaios, sejam eles em túnel real ou virtual. Em ambos os sistemas, sendo ele com o edifício isolado ou em relação ao todo empreendimento, os efeitos em maioria são semelhantes, somente aqueles que os obstáculos são considerados ao redor possuem fluxo complexo, sendo no caso o associado.

Outra observação nos pontos de escoamento e aerodinâmica, a prova no túnel mostrou que de modo geral a estrutura por possuir o aspecto retangular com cantos intensos gera resistência na passagem do ar, e desta maneira em casos de estruturas esbeltas podem gerar torção na mesma. Também foi perceptível ver que internamente entre as edificações em conjunto, gerou-se aceleração do escoamento do ar, de maneira que ficou evidente o afunilamento do vento, como já visto acima de efeito Venturi, assim gerando desconforto ao usuário.

Por fim, o trabalho apresentou características importantes para compreender o fluxo de ar e suas consequências em construções altas. A partir destes estudos é clara a responsabilidade dos projetistas arquitetônicos e principalmente estruturais, pois a forma geométrica, ocupação, tipo de uso, localização em relação à vizinhança, esbeltez, e entre outros, são fatores que leva consigo no momento de dimensionar um prédio.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

AZEVEDO, Domingos Flávio de Oliveira. **Tipos de carregamentos**. 2016. Disponível em: <<ftp://ftpaluno.umc.br/aluno/domingos/engenharia%20auxiliada%20por%20computadores/projeto%20de%20sistemas%20mec%20nicos%20iv/tipos%20de%20carregamentos%20-%202016.pdf>>.

BECK, André T.; CORRÊA, Márcio R. S. **Proposta de atualização das velocidades básicas do vento no Brasil**. 2012. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/184/artigo285952-1.aspx>>.

BLESSMANN, Joaquim. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. 2^o edição – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

BLESSMANN, Joaquim. **O vento na engenharia estrutural**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1995.

CARPEGIANI, Elvis Antônio. **Determinação dos efeitos estáticos de torção em edifícios altos devidos à ação do vento**. 2004. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/6015/000479420.pdf?sequence=1>>.

CARRIL JR., Célio Fontão. **Análise numérica e experimental do efeito dinâmico do vento em torres metálicas treliçadas para telecomunicações**. 2000. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de

Estruturas e Fundações. Disponível em:
<<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-18022002-154920/publico/TDE154920.pdf>>.

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

FONTES, Augusto César Dias. **Importância dos efeitos de vizinhança na resposta dinâmica de um edifício à ação do vento**. 2003. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Disponível em:
<<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7324/000542228.pdf?sequence=1>>.

HELIOTEC. **Túnel de vento didático com injeção de fumaça**. Versão 5. 2014. Disponível em: <http://www.heliodon.com.br/tunel_de_vento_00.html>.

LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI, J. A.; FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. 2º edição - São Paulo: Edgard Blucher, 1992.

LOPES, Adelino Vasconcelos. **A ação do vento e a resposta dinâmica de edifícios altos**. 1992. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/13349/2/Texto%20integral.pdf>>.

LOREDO-SOUZA, Acir M.; NÚÑEZ, Gustavo J. Z.; ROCHA, Marcelo M. **Uso do túnel de vento como ferramenta de projeto no design aerodinâmico**. Porto Alegre: UFRGS, 2012. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/det/index.php/det/article/view/69/45>>.

MARTINS, Yuri Luiz Dias. **Ação dinâmica do vento em edifícios altos**. 2018. Monografia - Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás. Disponível em:
<http://www.eec.ufg.br/up/140/o/A%C3%87%C3%83O_DIN%C3%82MICA_DO_VENTO_EM_EDIF%C3%8DCIOS_ALTOS.pdf>.

MICHAELIS. **Dicionário Online**. Editora Melhoramentos Ltda. Disponível em:
<<http://michaelis.uol.com.br/busca?id=31BZ>>.