

diferentes intensidades e frequências. Com isso, se torna necessário fazer um estudo mais detalhado dos efeitos destas cargas nos edifícios altos, buscando entender a resposta dinâmica da estrutura.

Por mais que o Brasil não esteja sujeito a grandes furacões, o vento alcança velocidades bastante altas, em particular na região sul, provocando vibrações indesejáveis, especialmente em estruturas esbeltas como edifícios altos. Este movimento dificilmente leva as estruturas ao colapso, mas podem comprometer seriamente a utilização desses edifícios, provocando deslocamentos elevados, que podem gerar fissuras em alvenarias ou elementos de fachada, além do desconforto ao usuário com a percepção de vibrações excessivas.

A resposta dinâmica de um edifício alto depende das frequências naturais da estrutura, que variam em função da sua massa e da rigidez. Em geral, a massa é a principal variável analisada quando há necessidade de aumentar a frequência natural da estrutura. No entanto, os edifícios modernos, com materiais estruturais mais resistentes, além de divisórias em *dry-wall* e fachadas com revestimentos leves, possuem menor massa, e por isso estão mais suscetíveis às vibrações. Portanto, hoje em dia busca-se estabilizar as construções através da concepção estrutural, ao invés de contar somente com o peso próprio da estrutura.



Figura 1.2 - World Trade Center (Wikipédia, 2014)



Figura 1.3 - Petronas Towers (Mendes, 2014)

Uma solução que tem sido desenvolvida para reduzir os efeitos dinâmicos na estrutura é a utilização de amortecedores. Existem diversos tipos de amortecedores capazes de absorver a energia transferida para a estrutura por ações dinâmicas. Em geral, esta solução é adotada para estruturas submetidas a sismos, mas já existem casos de sucesso em que são usados amortecedores no combate à ação dinâmica de ventos. Neste estudo, analisa-se a introdução de amortecedores fluidos nas estruturas.

Exemplos de edifícios altos que utilizam amortecedores em sua estrutura são o World Trade Center, em Nova York, EUA, que utilizava amortecedores viscoelásticos em suas ligações, e Petronas Towers, em Kuala Lumpur, Malásia, que utiliza uma combinação de amortecedores do tipo AMS e amortecedores fluidos. Imagens desses dois edifícios são apresentadas nas Figuras 1.2 e 1.3.

1.2. Importância e objetivos do estudo

O projeto de uma estrutura deve atender a três requisitos básicos: estabilidade, resistência e condições de serviço. Portanto, deve-se garantir que a estrutura não sofre deslocamentos elevados, que os seus componentes são resistentes às tensões solicitantes e que a estrutura fornece conforto aos seus usuários. Com o aumento da altura dos edifícios, que muitas vezes vem acompanhado do aumento de flexibilidade e pouco amortecimento, as estruturas estão cada vez mais suscetíveis às vibrações provocadas pelo vento. As estruturas muitas vezes são projetadas de forma a resistir satisfatoriamente às cargas laterais, no entanto ainda sofrem com o elevado nível de vibrações, provocando desconforto aos seus usuários.

Este estudo tem por objetivo investigar o comportamento dinâmico de um edifício alto quando submetido às cargas de vento. Com esta finalidade, analisa-se um caso típico de um prédio de 172,80 metros de altura, com estrutura mista em aço e concreto, através de um modelo computacional utilizando o método dos elementos finitos. São aplicadas cargas de vento que variam em função do tempo, seguindo o método dos ventos sintéticos, desenvolvido por Franco (1993). Em seguida, é analisada a introdução de amortecedores fluidos nessa estrutura, como forma de reduzir a sua resposta dinâmica. São analisadas diferentes configurações

estruturais, visando definir uma distribuição ótima dos amortecedores na estrutura, de forma a alcançar níveis toleráveis de deslocamentos e acelerações, permitindo o conforto dos usuários.

1.3. Revisão Bibliográfica

Blessmann (1998) afirma que o primeiro método racional para determinar o efeito dinâmico das rajadas de vento foi apresentado por Rausch em 1933, sendo incorporado à norma alemã da época. O método proposto por Rausch considerava as rajadas como um fenômeno determinístico e não aleatório, e somava o efeito de diversas rajadas em uma estrutura.

Na década de 1960, Davenport, apud Blessmann (1998), introduziu os conceitos de admitância mecânica e espectro de energia no estudo das pressões provocadas pelo vento nas estruturas, passando a considerar a carga de vento como uma ação não determinística. Davenport também desenvolveu o método do fator de rajada, que determina o pico da resposta dinâmica da estrutura. Este método é usado até hoje em diversas normas técnicas para determinar a ação estática equivalente da carga de vento em estruturas rígidas ou de pequeno porte.

Taranath (1988) apresenta uma visão geral de projetos de edifícios altos. Em seu livro, é analisada a aplicação de cargas de vento segundo as normas canadense (NBC 1980) e americana (ANSI 1982).

Franco (1993) desenvolveu o método dos ventos sintéticos, que simula a variação da carga de vento com o tempo. O método consiste na soma de harmônicos de diversas frequências, com fases aleatórias, de forma a definir a parcela flutuante da velocidade do vento. O método de Franco é baseado no método de Monte Carlo. Obata (2009) define o método de Monte Carlo como uma simulação de variáveis aleatórias, que pode ser usado em diversos problemas na engenharia, além de ser muito usado na área econômica e financeira. Obata (2009) apresenta ainda uma sistematização do método dos ventos sintéticos.

Blessmann (1998) apresenta as diferentes ações provocadas pelo vento nas estruturas. Não só o efeito das rajadas, como também o efeito de martelamento, desprendimento de vórtices e instabilidade aerodinâmica por galope.

Holmes (2001) apresenta um estudo do carregamento devido à ação do vento em diversos tipos de estrutura, com especial atenção à aplicação de cargas

estáticas para simular a resposta de pico da estrutura. São apresentadas também condições e velocidades do vento em diversos países do mundo.

Moreira (2002) apresenta um estudo a respeito da sensibilidade de edifícios de concreto armado a cargas estáticas e dinâmicas, com especial ênfase ao conforto dos usuários e danos que podem ocorrer em estruturas sujeitas a vibrações. Consideraram-se painéis de vedação externos e divisórias no enrijecimento da estrutura, demonstrando que estes têm considerável influência no comportamento de estruturas esbeltas e pouco travejadas.

Lazanha (2003) apresentou um modelo numérico para a análise de estruturas planas sob excitação aleatória induzida pelo vento. Para a simulação de vibrações aleatórias, foi utilizada a análise de Monte Carlo, considerando a função de densidade espectral de potência para as velocidades do vento. Foi definido, assim, certo número de funções harmônicas de carregamento, sendo os ângulos de fase desses harmônicos gerados por um algoritmo pseudoaleatório. Lazanha realizou a integração numérica pelo método de Newmark para obtenção dos resultados e tratou estatisticamente a grande quantidade de dados de resposta para obtenção de conclusões a respeito da possibilidade de ocorrência de eventos desfavoráveis, do ponto de vista da engenharia.

Miguel (2003) apresenta um estudo teórico e experimental de um edifício alto submetido à ação dinâmica do vento. Foi feita uma análise em túnel de vento através de um modelo equivalente de dois graus de liberdade. Os resultados foram comparados às formulações da norma brasileira NBR 6123 e da norma canadense NBCC 1985.

Chavez (2006) estudou, em sua dissertação de mestrado, o comportamento de um edifício alto submetido a cargas dinâmicas de vento. Os carregamentos representativos do vento foram obtidos considerando as características estatísticas relacionadas à natureza do vento, por superposições das funções harmônicas consistentes com um espectro de vento adotado.

Mendis et al. (2007) apresentam em seu estudo um resumo das técnicas avançadas de estudo das cargas induzidas pelo vento, com base na norma australiana. São apresentados os benefícios destas técnicas perante os modelos simplificados, que aproximam a ação dinâmica do vento por uma carga estática equivalente. Na maioria das estruturas analisadas, de baixa e média altura, consideram-se as cargas de vento como estáticas. Este modelo aproximado, no

entanto, pode levar a resultados errôneos e subestimados quando se trata de edifícios altos, segundo os autores do estudo. Além disso, ao se considerar o efeito estático do vento, as respostas dinâmicas da estrutura não são analisadas, tais como efeitos de inércia e amortecimento, ressonância, interferência de outras estruturas e resposta da estrutura na direção transversal ao vento, fatores que são importantes na análise de edifícios altos.

Ferreira (2008) aborda alguns conceitos básicos em relação à ação do vento sobre edifícios altos, como a circulação do vento na camada limite atmosférica, bem como sua interação com as estruturas.

Wahrhaftig (2008) estudou a influência da rigidez geométrica na resposta dinâmica das estruturas sujeitas a cargas de vento, em especial para os casos de torres de telefonia. Foi desenvolvido um modelo matemático simplificado, considerando a não linearidade geométrica devido à esbeltez das peças. Para a comparação dos resultados, foram feitos ensaios dinâmicos em laboratório com um modelo de barras, além do monitoramento de uma estrutura real em campo. Concluiu-se que a consideração da rigidez geométrica pode ter um efeito redutor significativo na capacidade das estruturas.

Beça (2010) estudou cinco espectros de potência apresentados por Kaimal, Simiu, von Kármán, Davenport e Harris, e sua aplicação em uma passarela com 140m de comprimento. Foram obtidas diferenças significativas entre cada um dos espectros analisados.

Em sua dissertação de mestrado, Júnior (2010) estudou o comportamento de estruturas flexíveis submetidas aos efeitos dinâmicos do vento. Foi analisado o método sugerido pela norma NBR 6123 (1988) para o cálculo de estruturas flexíveis, além de ter sido desenvolvido um programa computacional para adoção de tal método. Por fim, apresentam-se soluções, em termos de deslocamento na direção principal do vento, para três exemplos de estruturas flexíveis considerando o modo de vibração fundamental.

Sartori (2010) apresenta um estudo numérico e experimental das parcelas estática e flutuante das cargas de vento atuando em edifícios. Foi feita uma análise das respostas longitudinal e transversal das estruturas. Foram realizados ensaios em túneis de vento, e os resultados comparados com resultados teóricos, obtidos através da metodologia apresentada pela NBR 6123 (1988).

Barboza (2012) estudou o comportamento dinâmico de edifícios mistos (aço-concreto) esbeltos. Foi estudado um edifício de 20 pavimentos, submetido à ação do vento, apresentando os resultados de análises estáticas e dinâmicas, lineares e não lineares para ações de serviço.

Loredou-Souza (2012) estudou a ocorrência de situações de vento extremas no Brasil, tais como um furacão formado no litoral sul brasileiro em 2005 e uma tempestade tropical ocorrida em 2010. A norma brasileira de ventos apresenta um mapa de velocidades médias a ser considerado no cálculo das cargas de vento. No entanto, não há separação entre os tipos de eventos climatológicos. Como os campos de pressões gerados pelos diferentes tipos de eventos climatológicos são diferentes, a norma pode levar a resultados errôneos.

Kwon, Kareem (2013) apresentam uma comparação entre as principais normas técnicas relacionadas às ações do vento existentes no mundo: ASCE 2010 (EUA), AS/NZ 2011 (Austrália e Nova Zelândia), AIJ 2004 (Japão), CNS 2012 (China), NBCC 2010 (Canadá), Eurocode 2010 (Europa), ISO 2009 e IWC 2012 (Índia). Os principais aspectos abordados neste estudo foram relacionados aos limites de serviço, tanto na direção transversal quanto longitudinal. Todos os códigos utilizam a mesma estrutura teórica para a definição dos efeitos provocados pelas cargas dinâmicas. Portanto, foram definidas equações básicas e foram comparados os coeficientes adotados por cada norma.

Morais (2014), em sua dissertação de mestrado, estudou o comportamento estrutural de um edifício de 20 pavimentos misto (aço-concreto), submetido a cargas não determinísticas do vento. Foram analisados três tipos de contraventamento aplicados ao núcleo interno da edificação. No desenvolvimento do modelo computacional foram empregadas técnicas de discretização pelo método dos elementos finitos, assim como será feito neste estudo.

Sousa (2014) apresenta um estudo baseado em modelagem numérica sobre a influência dos painéis de alvenaria de vedação na rigidez e nas características dinâmicas de edifícios em concreto armado. Foram analisados painéis de alvenaria modelados como elementos de casca, e como diagonais equivalentes. Os resultados obtidos validam o modelo de diagonal equivalente, bem como a contribuição das alvenarias na rigidez global da estrutura.

Cachuço (2014) estudou as incertezas acerca da determinação das frequências naturais de estruturas, em especial em edifícios altos de concreto.

Foram comparadas diferentes metodologias para a definição das frequências naturais. Os resultados levam a conclusão de que há uma convergência para diferentes métodos computacionais.

Cargas de vento provocam vibrações nas estruturas que podem gerar grande desconforto aos usuários. Segundo Blessmann (1998), Chang foi pioneiro a estudar a percepção humana às vibrações. Kareem et al. (1999) e Mendis et al. (2007) também abordam este tema em seus trabalhos.

Em função dos grandes deslocamentos que as cargas de vento provocam em edifícios altos, Taranath (1988) apresenta diversas soluções de sistemas para absorção de cargas laterais. Ele conclui que o sistema tubular é o mais eficiente para edifícios altos, embora represente uma perda arquitetônica, uma vez que a fachada fica comprometida.

Kareem et al. (1999) apresentam um conjunto de medidas que podem ser adotadas nos projetos dessas estruturas de forma a reduzir a sua resposta. Suas principais propostas são: enrijecimento do sistema estrutural, onde são apresentadas diversas opções de sistemas com boa resposta lateral, aumento da massa modal da estrutura, modificações aerodinâmicas que facilitem o escoamento do vento pela estrutura e, por fim, introdução de amortecedores à estrutura, sejam eles passivos, ativos, semiativos ou híbridos.

Soong & Dargush (1997) apresentam um vasto estudo sobre a utilização de amortecedores passivos em estruturas. Seu principal foco é o estudo do uso de amortecedores para contenção de sismos, no entanto também apresentam soluções para cargas induzidas pelo vento. Os autores apresentam os principais tipos de amortecedores passivos usados na engenharia. São eles: amortecedores metálicos, amortecedores por fricção, amortecedores viscoelásticos, amortecedores fluidos, amortecedores de massa sintonizada e amortecedores de líquidos sintonizados.

No presente estudo, é analisada a incorporação de amortecedores fluidos à estrutura, como forma de mitigar a resposta da estrutura a cargas de vento. O pioneiro na pesquisa e posterior fabricação desse tipo de amortecedor foi Taylor, tendo publicado diversos estudos sobre o assunto.

Shinozuka et. al. (1992) apresenta em seu estudo resultados analíticos e experimentais que comprovam a eficácia de amortecedores fluidos passivos ou semiativos, alcançando resultados semelhantes aos obtidos por amortecedores ativos.

Soong & Constantinou (1994) apresentam um estudo sobre o uso de amortecedores fluidos aplicados a pórticos ligações engastadas, com o objetivo de absorver a energia introduzida na estrutura através de sismos. Eles comprovam que esses amortecedores são capazes de produzir reduções significativas na resposta da estrutura e, sob condições elásticas, reduzir inclusive os esforços absorvidos pela estrutura.

McNamara (1995) estudou o uso de amortecedores fluidos para reduzir o efeito de sismos em um edifício de seis pavimentos, em concreto armado, com conexões resistentes a momento. A estrutura foi analisada com e sem os amortecedores adicionais. São apresentadas também características que devem ser adotadas no projeto de forma a facilitar a inclusão destes amortecedores, reduzindo os danos provocados por sismos.

Taylor (1999) afirma que os amortecedores fluidos foram desenvolvidos durante a guerra fria, e teve diversos usos para causas militares neste período. Na década de 1990, com o fim da guerra fria, a tecnologia se disseminou, e passou a ser usada comercialmente em diversas estruturas. Taylor apresentou, então, um manual básico sobre a aplicação de amortecedores fluidos em projetos de engenharia, além de apresentar quatro casos reais de sua aplicação.

Taylor (2003) apresenta o estudo de caso do edifício Torre Mayor, localizado na cidade do México. Este foi o primeiro edifício alto no mundo a usar amortecedores fluidos como principal forma de reduzir o efeito de sismos. Esta tecnologia também foi utilizada em outros edifícios ao redor do mundo, após a construção da Torre Mayor.

Souza (2003) apresenta um estudo do controle de vibrações em estruturas esbeltas por meio de sistemas fluido-dinâmicos híbridos, permitindo um controle passivo/ativo. O controle passivo é feito através de amortecedores ALS, com recipientes tubulares em forma de “U”, contendo líquido no seu interior. São apresentados também exemplos de aplicações práticas em que esse sistema foi usado para a redução de oscilações por flexão em estruturas esbeltas submetidas a cargas de vento.

1.4. Escopo do trabalho

No segundo capítulo são apresentados os principais efeitos que os ventos provocam nas estruturas. São estudados modelos de carregamentos estáticos e dinâmicos de forma a simular a ação dos ventos. O carregamento estático foi definido conforme NBR 6123 (1988), enquanto o carregamento dinâmico foi determinado através do método dos ventos sintéticos, e de espectros de potência também apresentados neste capítulo. São apresentados, ainda neste capítulo, critérios para garantir o conforto dos usuários em relação às vibrações do edifício.

O terceiro capítulo trata dos amortecedores aplicados a estruturas, de forma a reduzir os seus efeitos dinâmicos. São apresentados os diferentes tipos de amortecedores estruturais existentes no mercado, com especial atenção aos amortecedores fluidos, que foram considerados nesse estudo. Foi analisada sua eficácia em estruturas existentes, e como considerá-los no modelo numérico.

O quarto capítulo apresenta a análise numérica, em que foi estudado um modelo de um edifício hipotético, sujeito a cargas de vento. Foi feita, primeiramente, uma análise estática, de forma a realizar um pré-dimensionamento das peças da estrutura. A seguir, foi aplicado a um carregamento dinâmico definido pelo método dos ventos sintéticos, por um período de 300 s. São apresentados ainda cinco modelos, em que os amortecedores são aplicados com diferentes configurações na estrutura. Foi analisada a resposta da estrutura para deslocamento, velocidade e aceleração, buscando atingir os critérios de segurança e conforto dos usuários. Ao se atingir esses objetivos, foi feita uma análise da variação do período de aplicação da carga e do crescimento gradual da carga. Analisou-se o comportamento dos amortecedores no caso de um carregamento à ressonância e no caso da vibração livre. Foi estudada também a diferença entre a análise linear e não linear da estrutura.

Por fim, no último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas neste estudo, além de apresentar sugestões de trabalhos futuros.