

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 RELEVÂNCIA DO ESTUDO

A interação entre fenômenos naturais e estruturas feitas pelo homem é foco de muitos campos da engenharia. O vento ocupa uma posição única na engenharia devido às variações espaciais e temporais que demandam abordagens estáticas e dinâmicas para a determinação de cargas. Técnicas que consideram o vento incidente como um processo estacionário são bem estabelecidas; entretanto, a pesquisa continua a salientar a importância de ventos não-estacionários no ambiente construído. Técnicas de modelagem adequadas para ventos transientes não-sinóticos, especificamente aqueles originados de *tempestades convectivas severas*, seguem inadequadamente representadas na maioria das normas de vento. Perfis verticais de velocidades horizontais do vento para eventos de *tempestades elétricas* – termo que é comumente utilizado no lugar de *tempestade convectiva*, apesar de não ter, necessariamente, ligação com a presença de trovões – são disponibilizados por, pelo menos, duas normas do vento. Entretanto, a divergência entre os perfis de cada norma e a falta de turbulência, fatores de rajada e coeficientes aerodinâmicos específicos para tempestades elétricas servem para realçar a necessidade de pesquisa continuada. Várias seções da comunidade global de engenharia do vento estão engajadas em pesquisa para desenvolver modelos de ventos não-sinóticos incidentes e técnicas adequadas para determinar a interação vento-estrutura, que deverão ser introduzidas em futuras normas de vento.

O aperfeiçoamento de técnicas de construção, o projeto estrutural mais inteligente e os avanços em ciências dos materiais levam à nossa tendência de construir mais alto e mais leve. Com isso, vem uma maior vulnerabilidade às cargas de vento devido à flexibilidade aumentada das estruturas. Embora a otimização da estrutura possa ser atingida a partir de investigações no local e geometricamente específicas em túnel de vento, o parâmetro mais importante segue sendo a velocidade de projeto do vento a partir da qual o perfil vertical de velocidades horizontais incidentes do vento é derivado. A velocidade de projeto do vento específica de um projeto é tipicamente derivada de uma velocidade básica do vento regional definida na norma de vento local ou de um estudo especialmente comissionado. Em ambos os casos, e com exceção de regiões afetadas por ciclones tropicais, para as quais simulações

---

numéricas são comumente utilizadas, análises de dados meteorológicos adquiridos em estações meteorológicas de superfície (EMS) são fundamentais para a determinação do clima local ou regional dos ventos. A precisão das velocidades de projeto do vento é crucial para qualquer projeto, dado que erros são amplificados devido à relação quadrática entre velocidade do vento e força.

No Brasil, a norma do vento NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações (ABNT, 1988) detalha a metodologia para a avaliação das cargas de vento. A velocidade básica do vento,  $V_0$ , fornecida na forma de um mapa de isopletas do país, representa a velocidade do vento de uma rajada de 3 segundos que é atingida ou excedida, em média, uma vez a cada 50 anos, a uma altura de 10 m acima do terreno em um campo aberto e plano. A velocidade do vento varia de 30 m/s nas regiões equatoriais até 50 m/s no sul e sudoestes do país, com curvas em intervalos de 5 m/s, conforme apresentado na Figura B.1 do Apêndice B *Mapa de Isopletas da NBR 6123 (ABNT, 1988)*. Investigações feitas por Vieira Filho (1975) e Padaratz (1977) foram responsáveis pela derivação do mapa de velocidades básicas do vento. Os estudos usaram séries de velocidades máximas anuais do vento entre 1950 e 1974 em 49 EMS de aeródromos, com períodos amostrais variando de 4 a 25 anos. Uma análise de valores extremos foi realizada utilizando a distribuição de Fréchet e um único fator de forma médio ponderado foi aplicado a todas estações para gerar o mapa de isopletas.

Mais de 40 anos se passaram desde que o mapa de isopletas foi proposto e, apesar da continuidade da pesquisa em ventos extremos brasileiros, ele permaneceu inalterado durante o período. A princípio, mais de 65 anos de dados estão hoje disponíveis para serem usados em uma análise de valores extremos, além da rede de estações meteorológicas de superfície automáticas (EMS-A) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), comissionada em 2000. Riera e Nanni (1989) analisaram máximas anuais para quatro cidades no Rio Grande do Sul, separando ventos sinóticos estacionários dos eventos de tempestades elétricas com a conclusão de que ventos sinóticos estacionários são relevantes apenas para períodos de retorno inferiores a 10 anos. Santos (1989) expandiu a investigação para 11 cidades na metade sul do Brasil.

Mais recentemente, dois mapas de velocidade básica do vento foram propostos com grande variação entre eles. Almeida (2010) realizou uma análise de valores extremos de Gumbel utilizando máximas anuais originadas de boletins SYNOP de estações meteorológicas brasileiras, com krigagem sendo utilizada para interpolar valores de  $V_0$  entre as estações. As

---

curvas do mapa de isopletas, como apresentado na Figura 1.1, variam de 60 a 90 m/s em intervalos de 5 m/s – magnitudes tipicamente associadas com os ciclones tropicais mais intensos. Infelizmente, parece que o estudo estava livre de processos de controle de qualidade. Uma revisão das fontes de dados utilizadas por Almeida (2010) indica que a ausência de campos de dados em boletins SYNOP pode conduzir à extração errônea dos dados de vento por rotinas de extração automáticas (ver Seções 4.1.1 *METAR*, *SPECI* e *SYNOP (MSS)* e 4.1.3.4 *CPTEC-INPE*). Muitas rotinas de extração automáticas não possuem meios para verificar que o campo dos dados de vento não está presente, uma ocorrência comum em boletins SYNOP, e, conseqüentemente, extraem o dado incorreto. Por exemplo, uma temperatura de 29,6°C é reportada como 296, com a rotina de extração identificando incorretamente os dois últimos dígitos, 96, como a velocidade média do vento em nós (49,4 m/s). O mapa proposto por Almeida (2010) é efetivamente uma interpolação espacial de uma análise de valores extremos baseada em dados errôneos.

Beck e Corrêa (2013) propuseram um mapa de velocidades básicas de vento mais plausíveis, variando de 28-42 m/s. Uma análise de valores extremos de Gumbel foi realizada para conjuntos de máximas anuais em estações no Brasil e em países vizinhos, com um modelo de regressão de quarta ordem ajustado para escalares de  $V_0$  em localizações discretas. Apesar do resultado ser um mapa atraente com curvas suaves em intervalos de 2 m/s, conforme mostrado na Figura 1.1, um exame da metodologia revela alguns pontos de preocupação. Nenhum controle de qualidade é citado no estudo, apesar da identificação de velocidades de vento “estranhas”. Beck e Corrêa (2013) identificaram corretamente sua remoção da observação de velocidades do vento por diversos processos, e declararam que pouco poderia ser feito para qualificar ou descartar dados suspeitos. A fonte de dados meteorológicos, Wolfram, obtém seus dados de um *site* terceiro (ver Seções 4.1.3.1 *NCEI* e 4.1.3.2 *Wolfram*) para o qual erros conhecidos são detalhados nesse estudo. Nenhuma consideração é dada ao número de horas por dia que cada estação opera, frequência de observação, número de anos de operação ou exposição do anemômetro, incluindo altura e rugosidade do terreno. Além disso, fatores de rajada incorretos foram aplicados para gerar rajadas equivalentes a partir de velocidades médias de vento. A suposição incorreta de uma velocidade do vento média sobre 30 segundos foi tomada de Padaratz (1977) e não de documentação oficial que corretamente define uma velocidade de vento média sobre 10 minutos. Por fim, a simplicidade das curvas do mapa é enganosa e nenhuma explicação é dada com relação às grandes diferenças entre as  $V_0$  de

estações discretas e as curvas geradas. Um exemplo extremo é o de  $V_0$  de 50 m/s em Petrolina, PE, que está localizada no nordeste do Brasil e dentro da curva de 28 m/s.

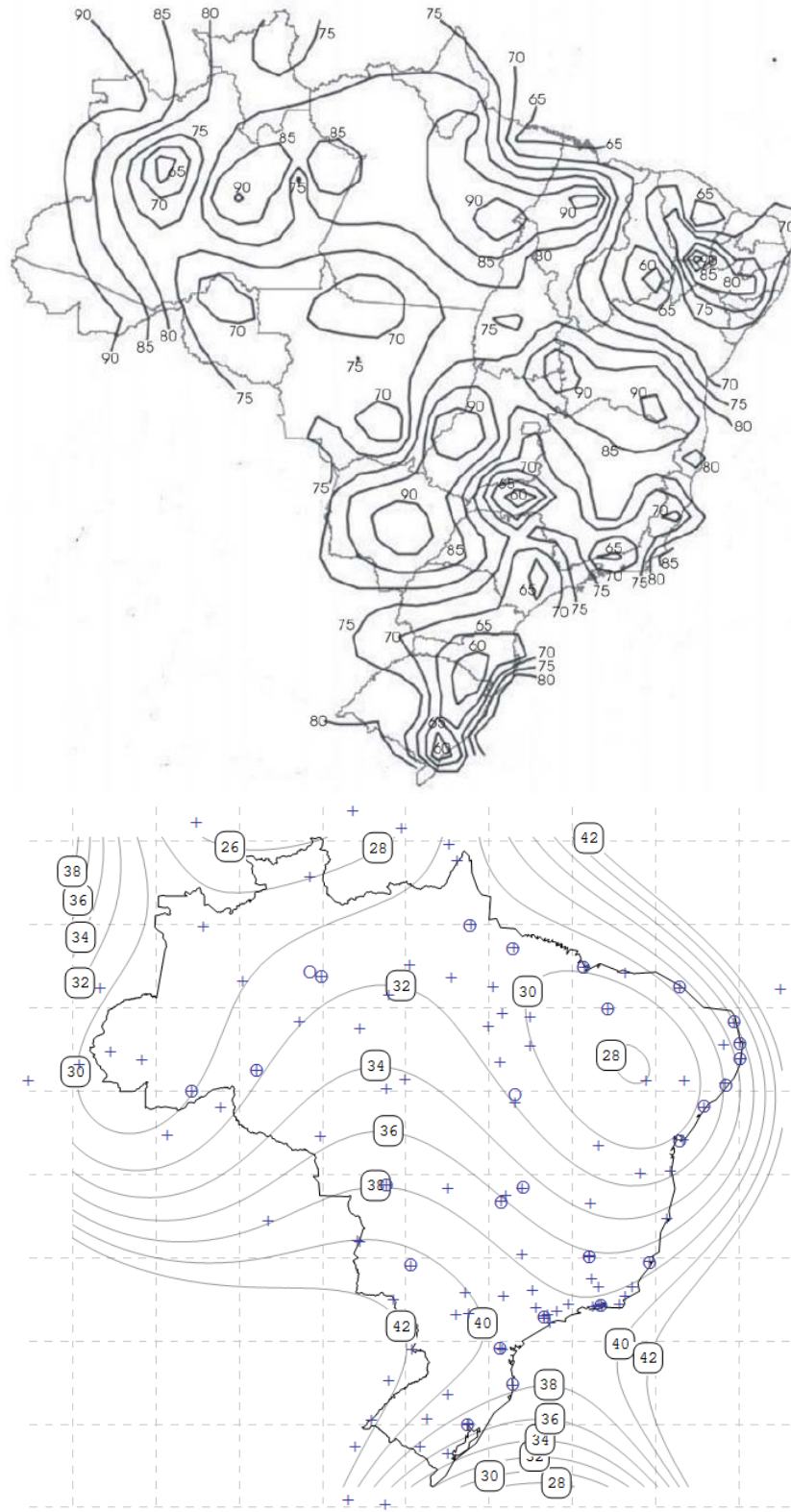


Figura 1.1 – Mapa de isopletas proposto das velocidades básicas brasileiras,  $V_0$  (m/s), acima: Almeida (2010), abaixo: Beck e Corrêa (2013).

Uma falta de perspicácia em engenharia do vento é evidente em ambos Almeida (2010) e Beck e Corrêa (2013). Ambos estudos produziram apenas mapas para um intervalo de recorrência médio de 50 anos e não ofereceram um modelo para determinar velocidades do vento para outras probabilidades de excedência. Padaratz (1977) encontrou problemas parecidos tais como alta variabilidade dos resultados entre estações, ausência de metadados de estações e dados limitados, mas foi capaz de desenvolver um processo racional no desenvolvimento do modelo climático de ventos extremos que protegeu estruturas brasileiras ao longo das últimas quatro décadas.

Holmes et al. (2005) destacou quatro critérios chave que devem ser cumpridos ao determinar o zoneamento de velocidades de ventos extremos para uma nação:

1. o uso dos mesmos instrumentos, ou instrumentos com as mesmas características dinâmicas (tempo ou distância constante);
2. no mesmo tipo de terreno – campo aberto e plano;
3. à mesma altura acima do nível do solo;
4. durante o mesmo período, suficientemente longo, mas preferivelmente maior do que 30-40 anos.

Holmes et al. (2005) reconheceram que esses requerimentos frequentemente não são atendidos. Anemômetros são provavelmente trocados diversas vezes ao longo de décadas. Grandes erros são introduzidos em séries temporais, particularmente na observação de rajadas, sem a devida calibração ou descontinuação do mesmo tipo de instrumento. Similarmente, as condições de exposição relacionadas a alturas e localizações de anemômetros estão sujeitas a alterações com o passar do tempo. É possível fazer a correção para uma altura e rugosidade do terreno padrões, tipicamente 10 m e campo aberto, respectivamente, caso metadados históricos suficientes estejam disponíveis. Também é recomendado por Holmes et al. (2005) excluir dados de anemômetros localizados em centros de cidades. Davenport (1983) identificou diversos erros que poderiam ser introduzidos a qualquer análise climática de ventos extremos, incluindo erros de amostragem para registros curtos, alterações na exposição através de mudanças de altura e invasões de novos empreendimentos, erros instrumentais, erros de arquivamento e mudanças climáticas. Erros causados por mudanças no processo de medição dos métodos convencionais e manuais para os processos digitais e automáticos são desafios mais recentes. Além disso, a revisão da Organização Meteorológica Mundial (OMM) da definição de uma rajada pico como sendo

---

uma média móvel de 3 segundos (Beljaars, 1987) motivou pelo menos dois países a investigarem o intervalo de tempo efetivo de rajada de observações históricas. Na Austrália, isso levou à redefinição da velocidade de rajada pico como uma média móvel de 0,2 segundos (Holmes e Ginger, 2012), e à redefinição como uma média móvel de 1 segundo nos Estados Unidos (Kwon e Kareem, 2014).

O presente estudo foi conduzido com consideração dada aos aspectos supracitados. Uma investigação detalhada em metodologias de ponta e no atual entendimento de ventos extremos e suas medições foi realizada, além da revisão das opções de análises de valor extremo e de avaliações de conjuntos de dados e redes meteorológicas. Dado o grande número de estudos que salientam a ameaça de ventos não-sinóticos a estruturas no Brasil (Loredo-Souza, 2012; Pes, 2015; Ferreira e Nascimento, 2016[b]; Ferreira, 2017; Loredo-Souza et al., 2019), também se aproveitou a oportunidade para separar eventos de ventos extremos por tipo de tempestade em antecipação do desenvolvimento de modelos de vento não-sinótico no futuro próximo.

## 1.2 OBJETIVOS

De modo a produzir modelos climáticos de vento regionais do Brasil para ambos tipos de vento sinótico e não-sinótico, uma série de objetivos deve ser completada.

- Revisão bibliográfica para determinar o atual entendimento da medição do vento e sua caracterização em normas de vento, assim como as melhores práticas na determinação de modelos climáticos de vento regionais a partir de análises de valor extremo;
- Avaliação da operação de redes de observação meteorológica a nível nacional no Brasil e seus associados conjuntos de dados, sejam oficiais ou fornecidos por terceiros;
- Desenvolvimento de algoritmos e métodos para a identificação de dados espúrios e separação de velocidades pico de ventos sinóticos e não-sinóticos;
- Investigação de metadados históricos de todas estações, incluindo altura, coordenadas geográficas, equipamento, processo de observação, de modo a homogeneizar séries temporais de velocidade do vento e determinar períodos apropriados para a análise de valores extremos;
- Determinação de uma técnica apropriada de análise de valores extremos com consideração à qualidade dos dados e da rede de observação. Aplicação de técnica

para extrair conjuntos de rajadas pico não-sinóticas e sinóticas extremas para determinar um modelo climático de ventos extremos;

- Mapeamento de parâmetros meteorológicos associados a ventos sinóticos e não-sinóticos extremos, incluindo mudanças de temperatura e pressão, razões de velocidade do vento, direções predominantes, estações e períodos do dia.
- Integração de modelos climáticos de ventos extremos em localizações discretas de estações para gerar mapas de velocidade básica do vento para ventos sinóticos e não-sinóticos. Um mapa atualizado de  $V_0$  é proposto para implementação em uma revisada NBR 6123.

Ao longo do desenvolvimento do estudo, um número de áreas relacionadas à aquisição de dados meteorológicos e gerenciamento de bancos de dados foram identificadas que requerem melhorias em escala nacional. Recomendações também são feitas sobre a direção de futuras pesquisas, particularmente na área de ventos não-sinóticos, que deveriam ser conduzidas no Brasil. O presente estudo visa ser um novo começo e não a palavra final sobre ventos extremos na região.