



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Caracterização de tornados para projetos de estruturas no Brasil.

Daniel Lemos Mouço¹, Sergio Hampshire de Carvalho Santos², Fernando Artur Brasil Danziger³

¹ Serviço Geológico do Brasil / daniel.mouco@cprm.gov.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro / DES / sergiohampshire@poli.ufrj.br

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE / danziger@coc.ufrj.br

Resumo

Tornados são eventos meteorológicos severos, de difícil previsão e com enorme potencial para causar mortes e danos materiais. Nas últimas décadas, este fenômeno tem se tornado cada vez mais recorrente no Brasil, que registrou mais de 200 tornados nos últimos 30 anos. Atualmente, não há metodologia estruturada para a aquisição e gestão de dados relacionados a estes eventos no Brasil. Em contraste, os Estados Unidos, país mais afetado por este tipo de evento meteorológico no mundo, possui registros oficiais e públicos desde 1950.

Como não há normativo brasileiro que considera este tipo de evento no projeto de estruturas, este trabalho tem como objetivo avaliar quais seriam as principais características de um tornado a ser utilizado em projetos de estruturas resistentes à ação de tornados. O US Regulatory Guide 1.76 Ver. 02 (2016) foi utilizado como base metodológica para o cálculo das ações devido ao vento tornático, à variação de pressão e decorrente dos detritos arremessados contra a estrutura, denominados mísseis tornáticos.

Para a caracterização do tornado, foram avaliadas as principais características intervenientes no processo de formação de tempestades severas causadoras de eventos tornáticos na América do Sul. Foi possível verificar que, apesar de menos intenso, o processo de formação destas tempestades é semelhante ao observado na América do Norte. Comparando informações sobre pluviometria, topografia, distribuição geográfica, temporal e intensidade de tornados, foram realizadas correlações empíricas entre regiões brasileiras e americanas.

A partir destas informações, foi desenvolvida uma análise estatística a partir do banco de dados americano. Velocidades características de tornado e dos mísseis tornáticos, assim como parâmetros de variação de pressão foram calculados para probabilidade de ocorrência de 10^{-5} , 10^{-6} e 10^{-7} anos⁻¹.

Palavras-chave

Tornados; Ações em Estruturas.

Introdução

Segundo Fujita e Pearson (1971), os tornados se derivam de nuvens chamadas Cumulonimbus, que ao acumular muita energia interna, causam ventos fortes, precipitação, relâmpagos, granizo e, eventualmente, tornados. Durante o desenvolvimento destas nuvens, pode haver um fenômeno denominado tesoura de vento, que ocorre quando ventos em altitudes diferentes possuem velocidades e/ou direções distintas. Isso ocasiona um movimento giratório em forma de tubo que, conforme a tempestade se desenvolve, este vórtice se intensifica e forma uma tempestade giratória, denominada supercélula. Caso este vórtice atinja o solo, há a criação do tornado.

Como os tornados são objetos de difícil previsão, a medição das velocidades do vento tornático ainda é um grande desafio para os meteorologistas. Atualmente, são usados sondagens atmosféricas, modelos numéricos, radares meteorológicos, radares Doppler e imagens de satélite para a detecção de tornados. Apesar dos protocolos e tecnologias utilizadas para a sua detecção terem avançado bastante nas últimas décadas, ainda não é possível estimar com qualidade razoável a velocidade do vento em um evento tornático. Métodos indiretos para a medição da velocidade de ventos tornáticos são descritos em NIST (2011). Dentre eles:

- Utilização de uma modelagem computacional utilizando como dados de entrada a retroanálise de árvores derrubadas; e
- Inferência da velocidade do vento através dos indicativos de dano observados no local, usando como base a Escala Fujita Melhorada.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

A Escala Fujita Melhorada (Enhanced Fujita Scale – EF) foi implantada em 2007 pelo NOAA a partir dos resultados da pesquisa de um grupo de trabalho formado por engenheiros e meteorologistas com ampla experiência na classificação de tornados. Sua implantação buscava melhorar as falhas da escala Fujita original e criar uma maneira de correlacionar os resultados com a série histórica já avaliada pela Escala Fujita Original. Foram criadas 28 categorias de Indicadores de Dano (ID) de tornados, que são os possíveis objetos e/ou edificações que os tornados podem danificar durante a sua passagem. Edificações residenciais, comerciais, escolas, armazéns, postos de gasolina, torres e vegetação são alguns exemplos de indicadores de dano presentes na Escala Fujita Melhorada. Para cada ID, existem entre 7 e 12 Graus de Dano (GD), que indicam a severidade dos danos que os ventos tornádicos podem causar. A partir desta qualificação, é possível avaliar qual a faixa de velocidade do vento é esperada.

Os valores de limite superior (LS) e limite inferior (LI) da velocidade do vento levam em consideração a qualidade da construção atingida. Caso a construção siga os códigos americanos de construções resistentes à tornados, é natural avaliar que

Após ser determinada estimativa de vento a partir dos GDs, estima-se a classe do tornado, na escala EF (Enhanced Fujita).

Além de apresentar a Escala Melhorada de Fujita, MCDONALD, MEHTA (2006) traz um protocolo de como proceder à sua classificação. Tal protocolo visa padronizar a classificação pela avaliação da distribuição espacial dos Identificadores de Dano. Desta forma, é possível avaliar a trajetória que o tornado percorreu e se houve mudança de intensidade durante o fenômeno. O protocolo envolve os seguintes passos:

- Realizar uma pesquisa aérea do caminho de danos para identificar possíveis indicadores de danos e definir a extensão do caminho de dano;
- Selecionar vários IDs que tendem a indicar a maior velocidade do vento dentro do dano caminho;
- Localizar esses IDs dentro do caminho de dano;
- Realizar uma pesquisa de campo e examinar cuidadosamente as IDs de interesse
- Seguir as etapas descritas para atribuir a classificação EF para IDs individuais e documentar os resultados
- Considerar as velocidades estimadas do vento de vários IDs, se disponíveis, e chegue a uma classificação da Escala Melhorada de Tornados para o evento do tornado
- Avaliar a intensidade do tornado aplicando o ID com maior classificação, desde que haja evidência de apoio de intensidade de dano semelhante imediatamente em torno do ID.
- Registrar a base para atribuir uma classificação EF-Scale para o evento de tornado
- Registrar outros dados pertinentes relacionados ao evento do tornado.

O protocolo é utilizado como referência na metodologia de aquisição de dados do Serviço de Meteorologia Americano (National Weather Service – NWS) que, através da NWSI 10-64 (2018), estabelece os procedimentos e critérios de qualidade na aquisição e tratamento de dados após eventos extremos. Os dados georreferenciados alimentam um banco de dados em GIS, com a distribuição temporal e espacial dos eventos registrados.

A Figura 1 ilustra aplicação da NWSI 10-64 (2018), mostrando a classificação de um evento tornádico ocorrido em 12/04/2020. Este tornado faz parte do “surto de tornados da Páscoa de 2020”, onde cerca de 140 tornados ocorreram entre os dias 12/04/2020 e 13/04/2020 causando, segundo o NOAA (2020), cerca de 3 bilhões de dólares em danos materiais e 32 mortes. Os eventos mostrados se estenderam por cerca de 170 km, com registros de danos iniciando a cerca de 25 km da cidade de McComb, no Estado do Mississippi. A escala de cores indica a classificação baseada na identificação dos danos causados pelo tornado ao longo da sua trajetória.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

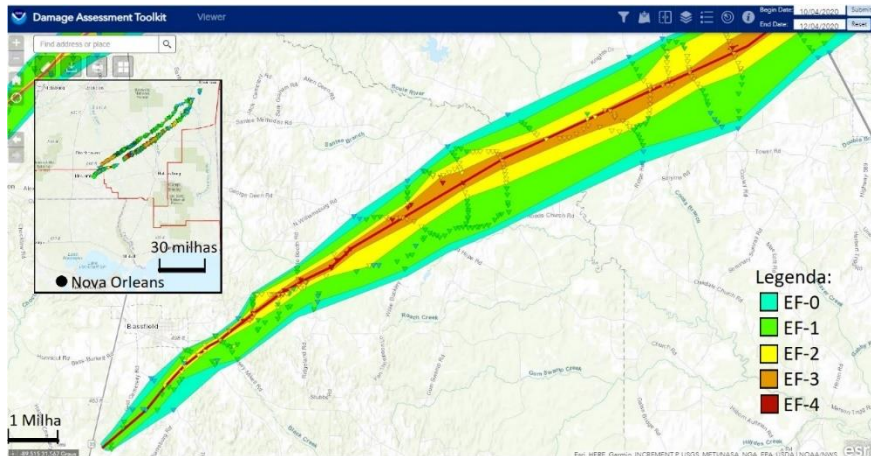


Figura 1 – Aplicação da Escala Melhorada de Fujita

Histórico e caracterização dos tornados nos Estados Unidos

Segundo NASCIMENTO (2005), o processo de formação de sistemas de mesoescala na América do Norte possui muitas semelhanças com o observado na América do Sul. Ambos se formam em regiões de latitude entre 50° e 30° a partir do encontro de correntes de ar com temperaturas e direções distintas. Na América do Norte, os Jatos de Baixos Níveis provenientes da região do Caribe trazem umidade e calor para a região central dos Estados Unidos. Durante os meses de primavera, há uma propensão destes ventos se encontrarem com Jatos Polares que se dirigem ao sul na região de baixa altitude entre os Montes Apalaches e as Montanhas Rochosas. Como estes ventos possuem velocidades e direções distintas, propiciam o desenvolvimento rotacional dentro das nuvens, que eventualmente podem ocasionar tornados.

O relevo, as condições de vegetação e do clima fazem com que os EUA possuam características perfeitas para o desenvolvimento de tornados. Segundo DAVIES-JONES et al (2001), mais de 1200 tornados são registrados no território contíguo dos Estados Unidos todos os anos, fazendo com que este lugar tenha a maior frequência anual de tornados do mundo. As áreas das Grandes Planícies e do Sudoeste Americano são as mais propensas para a formação de tornados já que, segundo CANDIDO (2012), regiões que possuem longa extensão territorial com pequena inclinação do terreno e baixa elevação dentro das latitudes entre 50° e 30° são as mais propensas ao desenvolvimento de tempestades tornáticas. A Figura 2, extraída de NOAA (2021) ilustra a distribuição espacial e a frequência dos tornados na parte contígua dos Estados Unidos.

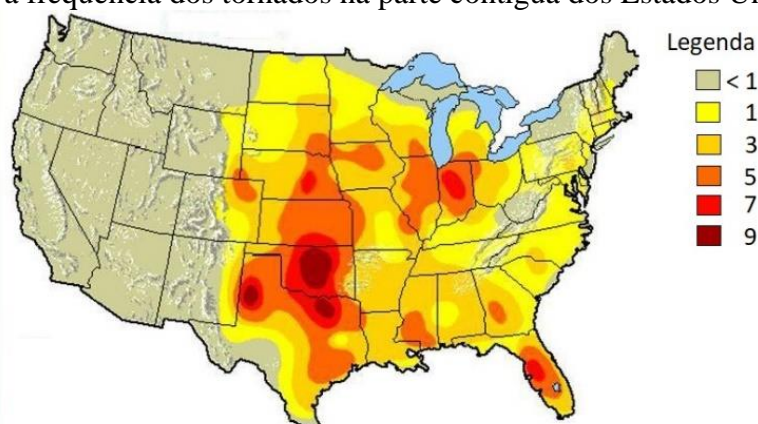


Figura 2 – Número médio de tornados por ano a cada 25000 km²

O NUREG/CR-4461, Rev. 2 (2007) apresenta a metodologia adotada pelo RG 1.76 Rev 02 (2016) para a estimativa das características do tornado a ser considerado no projeto de usinas nucleares. Foi realizada uma



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

análise estatística com mais de 39600 tornados que ocorreram no território contíguo dos EUA entre 01/01/1950 até 31/05/2003. Informações sobre localização, intensidade, comprimento e diâmetro foram levantados para estimar os ventos associados a probabilidade de ocorrência de 10^{-5} , 10^{-6} e 10^{-7} anos⁻¹.

Os dados foram analisados a partir da sua distribuição geográfica. A quantidade e intensidade de tornados foram agrupados em segmentos de área de 1° de longitude por 1° de latitude. Desta forma, foram definidas 3 regiões dos EUA com características de tornados distintas: A Região Oeste abrange a costa do pacífico, a região das Montanhas Rochosas e se estende até a longitude 102°; A Região Leste, que abrange as áreas entre os Montes Apalaches, Grandes Lagos e a costa atlântica; e a Região Central, que abrange a região das Grandes Planícies americanas, onde fica localizada a “alameda dos tornados”, região de maior incidência deste evento no mundo.

A Figura 03 apresenta a distribuição das características dos tornados em função das regiões. São apresentados os valores esperados para o comprimento da trilha de um tornado (Figura 03-a), a largura observada (Figura 03-b) e a área afetada (Figura 03-c). É importante observar que todos os dados estão representados em escala logarítmica, indicando que as características físicas dos tornados perfazem diversas ordens de grandeza.

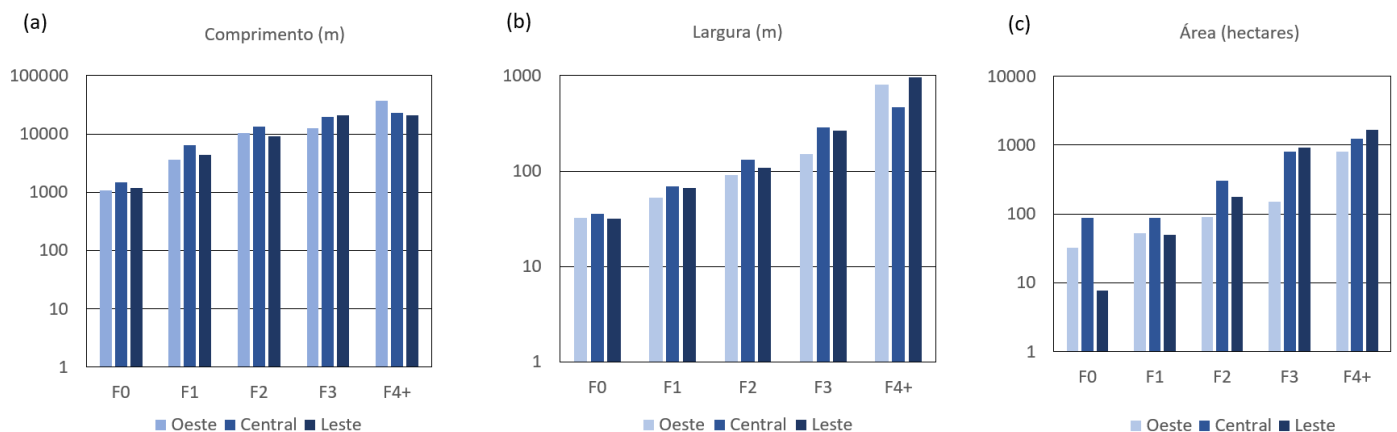


Figura 3 – Características regionais dos tornados nos EUA

Avaliando os dados da Figura 3, é possível verificar que, conforme aumenta a classificação da intensidade de um tornado, seu comprimento, largura e área afetada também aumentam. Apesar de cada uma das regiões americanas possuir características próprias, é possível avaliar esta tendência em todos os dados.

No NUREG (2007), a função de densidade de probabilidade de Weibull foi ajustada na análise dos registros tornádicos. Foi percebido que os dados tornádicos são enviesados, com a moda e a mediana das amostras com ordens de grandeza inferiores à medida aritmética. Desta forma, a melhor medida estatística que representa o comportamento das características dos tornados é o valor esperado.

Histórico e caracterização de tornados no Brasil

No mundo inteiro, há diversas regiões propensas para a formação de tempestades severas que podem desencadear tornados. Segundo CANDIDO (2012), a América do Sul é o segundo lugar do mundo em número de ocorrências deste fenômeno, que normalmente ocorrem entre as latitudes 20°S e 40°S e entre as longitudes 60°W e 40°W. CANDIDO (2009) refere-se à esta região como o “Polígono de Tornados” da América do Sul. Segundo o autor, a posição latitudinal desta área e o seu relevo favorecem o embate de diferentes sistemas atmosféricos que geram eventos extremos e, ocasionalmente, tornados.

Apesar da quantidade de registros de tornados no Brasil ter aumentado significativamente nas últimas décadas, o fenômeno ainda é pouco estudado. Não há uma metodologia estruturada para o registro de eventos tornádicos ou órgão público responsável pela aquisição e guarda dos dados dos eventos, dificultando uma avaliação

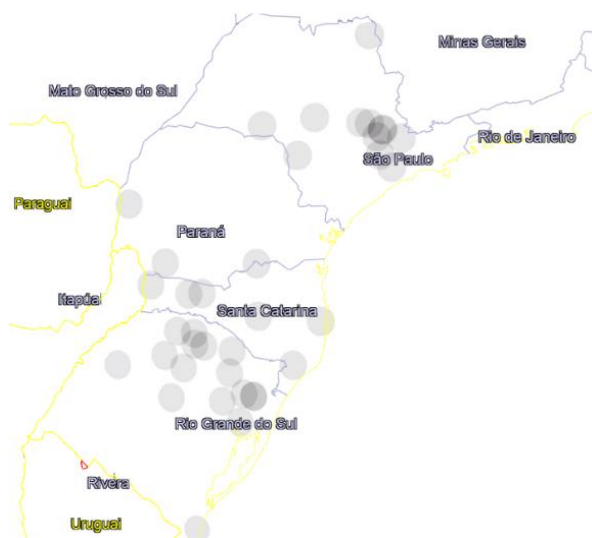
metodológica voltada para a avaliação de efeitos devido a tornados em estruturas. CANDIDO (2012) e IENSSE (2018) apresentam bancos de dados de eventos tornáticos. Os levantamentos realizados pelos autores tinham como principal objetivo levantar a quantidade de tornados nas regiões sul e sudeste, sem abordar a intensidade do evento.

Foram revisitados os bancos de dados supracitados e os cerca de 150 registros de IENSSE (2018) e CANDIDO (2012) foram reavaliados com vistas a classificar os eventos tornáticos através da Escala Melhorada de Fujita. Além das fontes citadas nos trabalhos, foram também consultadas outras fontes, como jornais locais, sites de meteorologia, artigos científicos gerados a partir da análise dos dados dos eventos e vídeos de redes sociais. A partir destas informações, foram avaliados os indicadores de dano presentes, classificados os graus de dano de cada edificação e, finalmente, estimada a classificação do tornado.

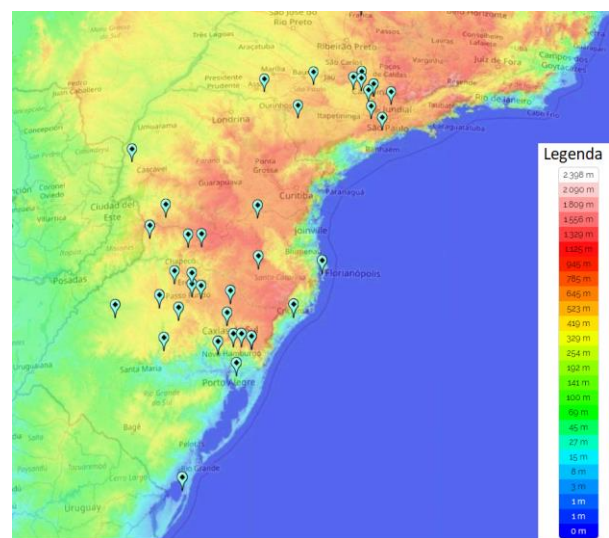
Durante a realização do levantamento, foi percebido que poucos eventos anteriores a 2000 tinham registro digital, dificultando a busca das informações. Outro problema encontrado durante o levantamento foi a falta de informações técnicas sobre as construções, a pouca quantidade de registros fotográficos de toda a localidade afetada ou informações vagas, geradas por pessoas leigas. Foram adotadas algumas premissas para homogeneizar os dados e permitir um tratamento metodológico mais fidedigno:

- Somente seriam registrados tornados na categoria EF-2 ou superiores;
- Tornados sem registro de pelo menos 2 fontes serão considerados de categoria inferior a EF-2;
- Localização do evento tornático como sendo na coordenada geográfica da cidade/localidade, registrada pelo IBGE;
- Desconsiderada as características geométricas dos tornados (raio, extensão e área afetada); e
- Desconsiderados todos os eventos registrados antes de 01/01/2000.

A partir destes critérios, foram obtidos 38 registros tornáticos EF-2+, que estão representados na Figura 04. Estes resultados foram georreferenciados e sobrepostos ao mapa do Google Earth Pro para facilitar sua visualização e o tratamento. A Figura 04-a apresenta as regiões com maior densidade de tornados EF-2+ no período analisado. Os círculos, de raio de 40 km, possuem coloração cinza que, ao serem sobrepostos, representam um tom mais forte de cinza. A Figura 04-b representa os mesmos dados, mas sobre uma base topográfica. Avaliando a legenda, é possível verificar que os eventos tornáticos ocorrem em localidades com elevação média de 350m acima do nível do mar.



(a)



(b)

Figura 4 – Tornados EF2+ no Brasil registrados entre 2000 e 2019. a) Densidade de tornados EF2+ em 20 anos; b) Correlação entre os dados e a topografia.

A partir da sobreposição dos círculos, verifica-se que a região do interior de São Paulo e o norte do Rio Grande do Sul são as regiões de maior densidade de registro destes eventos. A maior parte dos tornados registrados está localizada a oeste da serra do mar. CANDIDO (2012) cita em seu trabalho que as regiões de inclinação inferior a 5% e elevação inferior a 700m são as que possuem maior probabilidade de ocorrência de um evento tornádico. É importante salientar que, pelo fato do tornado ser um evento de curta duração e de difícil detecção pelos instrumentos meteorológicos usuais, seu registro ocorre principalmente a partir de observações. Portanto, áreas menos densamente povoadas, tendem a ter menos registros do que regiões de maior densidade populacional, como o interior de São Paulo ou as Serras Gaúchas.

Avaliação da velocidade máxima dos ventos tornádicos brasileiros

A falta de metodologia unificada para tratamento e aquisição de dados tornádicos no Brasil dificulta o levantamento das características físicas dos tornados nos moldes do que foi apresentado na Figura 03. Poucos tornados brasileiros possuem avaliação do comprimento total, área afetada e raio de ação.

Segundo PEARSON (2016), há uma forte correlação entre a ocorrência de tornados, a topografia e a precipitação anual. Desta forma, será adotada como uma premissa para o desenvolvimento deste trabalho que os tornados brasileiros possam se assemelhar aos tornados dos Estados Unidos, no que tange a correlação entre a sua intensidade e as suas características físicas, desde que as regiões geográficas comparadas tenham densidade de tornados por ano, elevação e precipitação anual média próximas.

Foram divididas as áreas de possível incidência de tornados considerando os limites regionais e as características topográficas. A maior parte dos eventos tornádicos foi agrupado em 2 áreas: o interior do estado de São Paulo (Região 1) e o Oeste dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Região 2). Para ambas as regiões, foi estimada uma densidade de eventos tornádicos de 1 evento EF-2+ por 1.000 km² a cada 2 décadas. Considerando os dados do Google Earth Pro, foi estipulada uma elevação média de 400 m para ambas as regiões. A precipitação média anual, considerando o período de 1980 a 2010 foi obtida através do banco de dados climatológicos do INMET. Para a Região 1, foi obtida uma precipitação média de 1500 mm/ano e para a Região 2 foi obtido um valor de 1900 mm/ano.

O NUREG (2007) apresenta a distribuição dos eventos tornádicos de Categoria F2+ em retângulos de 1° de latitude por 1° de longitude ao longo de todo o território contíguo americano. Como a área destes retângulos varia em função da latitude, foi necessário aplicar uma correção para que fosse possível comparar a distribuição dos eventos tornádicos americanos e brasileiros. A distância “d” entre 2 pontos sobre a superfície terrestre, é calculada utilizando a fórmula de Haversine:

$$d = 2 \cdot r \cdot \sin^{-1} \left(\sqrt{\sin^2(\varphi_2 - \varphi_1) + \cos(\varphi_2) \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \sin^2\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)} \right) \quad (1)$$

onde r é o raio da Terra no equador, λ é a longitude nos pontos final e inicial e φ é a latitude nos respectivos pontos. A partir desta fórmula, é possível calcular a área de cada retângulo de 1° de latitude por 1° de longitude. A Figura 05, obtida a partir do visualizador de bancos de dados do Serviço Geológico Norte Americano (USGS), ilustra os dados utilizados na caracterização das regiões em estudo. As trajetórias dos tornados, obtidas pelo banco de dados do NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) estão apresentadas nas figuras 5-a e 5-b. Sobrepostos a estes dados, estão os dados de topografia disponíveis no Serviço Geológico Norte Americano (USGS) e os de climatologia do Serviço Meteorológico Nacional (WNS).



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

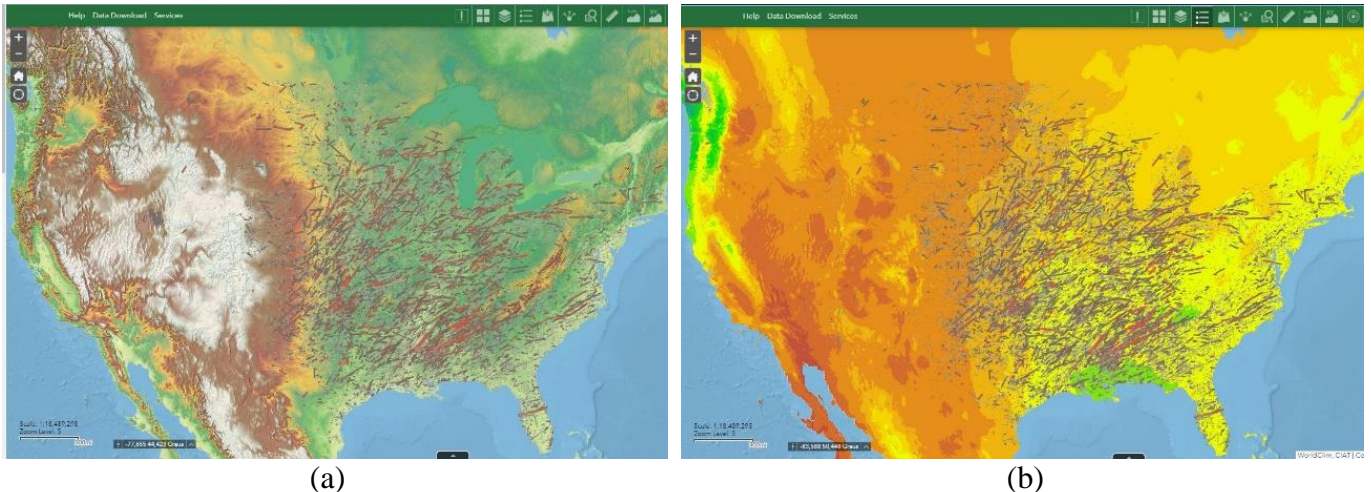


Figura 5 – Rastros dos tornados EF2+ nos EUA entre 1950 e 2020. a) Superposição com topografia; b) Superposição com a climatologia.

Aplicando todos os dados disponíveis, verifica-se que a região entre as latitudes 41°N e 45°N e as longitudes 74°W a 78°W são as que melhor se assemelham às Regiões 1 e 2, em estudo. Esta região possui pluviometria anual de 1250 mm/ano, topografia média de 250m e 1 evento tornádico EF-2+ numa área de 900 km² a cada 20 anos.

Avaliação da velocidade máxima dos ventos tornádicos brasileiros

Segundo o NUREG (2007), a probabilidade anual de uma edificação ser atingida por um tornado é obtida através da probabilidade condicional dela ser atingida por um tornado e deste tornado possuir velocidade do superior a u_0 . São consideradas 2 parcelas para esta avaliação: uma para o cálculo da probabilidade de uma determinada área ser atingida por um tornado e outra que avalia a probabilidade da edificação (ou parte dela) estarem na trajetória de um tornado. Para cada parcela, o cálculo da distribuição de probabilidades da velocidade do vento é modelado a partir da função de densidade de probabilidade de Weibull. A equação 2 apresenta a formulação empregada, onde o vento u_0 encontra-se em milhas por hora.

$$P(u > u_0) = \frac{A_t}{N \cdot A_r} \cdot \text{Exp} \left[- \left(\frac{u_0 - 65}{a_p} \right)^{b_p} \right] + \frac{w_s \cdot L_t}{N \cdot A_r} \cdot \text{Exp} \left[- \left(\frac{u_0 - 65}{a_L} \right)^{b_L} \right] \quad (2)$$

onde A_t é a área total atingida por tornados numa determinada região de área A_r (retângulos de 1° de latitude por 1° de longitude) em N anos, w_s é o comprimento estimado da edificação (foi utilizado na análise $w_s = 200$ pés = 18,5m), L_t é o comprimento total das trilhas dos tornados na área em análise. Os parâmetros a_p , b_p , a_L e b_L são os coeficientes ajustados da distribuição de Weibull para as probabilidades de ocorrência de eventos pontuais e distribuídos, respectivamente.

Segundo os autores, as características físicas dos tornados devem ser ajustadas considerando pelo menos 3 categorias EF diferentes, o que inviabilizaria a aplicação no atual cenário brasileiro, tendo em vista que muitas regiões não possuem registros EF2+. A Tabela 1 apresenta as velocidades máximas do vento que estão sendo recomendadas para o projeto de edificações resistentes a tornados na região brasileira em estudo. Os dados apresentados apresentam intervalo de confiança de 90%.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Tabela 1 – Velocidade máxima do vento tornático para a região em estudo

Probabilidade (anos ⁻¹)	Velocidade máxima (m/s)
10 ⁻⁵	55
10 ⁻⁶	75
10 ⁻⁷	90

Será utilizado o modelo de carregamento previsto pelo USNRC 1.76 (2007) para o cálculo das ações tornáticas em edificações. São considerados 3 tipos de ações sobre a estrutura: o efeito devido ao vento tornático, a queda de pressão decorrente da passagem do vórtice do tornado pela edificação e o impacto de objetos (mísseis) arremessados pelo tornado.

A distribuição espacial do vento tornático é modelada pelo Vórtice de Rankine, que considera um fluxo de ar axissimétrico com velocidade constante ao longo da altura do tornado. A velocidade tangencial (V_t) em um ponto “ r ” distante do centro do tornado é dada por:

$$V_t(r) = V_{m\acute{a}x} \cdot \left(\frac{r}{R_m}\right)^n \quad (3)$$

onde $V_{m\acute{a}x}$ é a velocidade tangencial máxima, que ocorre a uma distância R_m do centro do tornado e n é um parâmetro que, para $r < R_m$, $n = 1$ e, para $r \geq R_m$, $n = -1$. O raio do tornado é estimado em 45,7m.

As velocidades de rotação (V_{rot}) e translação ($V_{Tm\acute{a}x}$) do tornado são estimadas em função da sua velocidade máxima:

$$V_{Rot} = 0,8 \cdot V_{m\acute{a}x} \quad (4)$$

$$V_{Tm\acute{a}x} = 0,2 \cdot V_{m\acute{a}x} \quad (5)$$

Segundo Simiu e Scanlan (1996), a diferença de pressão entre o centro do vórtice e a pressão atmosférica fora da região do tornado é dada pelo cálculo da sua força centrífuga, numa condição denominada balanço ciclostrofico. A pressão do ar, obtida a partir da integração da equação (3), é apresentada na equação (6), onde a densidade do ar é dada por $\rho = 1,226 \text{ kg/m}^3$:

$$p_a(r) = \rho \cdot \frac{V_t^2}{2} \cdot \left(2 - \frac{r^2}{R_m^2}\right) \quad \text{para } r < R_m \quad (6)$$
$$p_a(r) = \rho \cdot \frac{V_t^2}{2} \cdot \frac{R_m^2}{r^2} \quad \text{para } R_m \leq r < \infty$$

Supõe-se que a queda de pressão decorrente do tornado ocorra de modo linear, conforme ele se desloca sobre a edificação com velocidade V_{tr} . Desta forma, a razão da queda de pressão seria obtida através da equação:

$$\frac{dp_a}{dt} = \frac{p_a \cdot V_{tr}}{R_m} \quad (7)$$

Além da passagem do tornado sobre a edificação, o USNRC 1.76 (2007) solicita que seja avaliado o impacto de mísseis tornáticos na estrutura, somando seus efeitos aos causados pela ação dos ventos. A norma cita que vendavais com velocidades superiores a 34 m/s são capazes de suspender pequenos objetos que estão no caminho do tornado, tais como carros, ou pedaços de edificações destruídas. Estes objetos podem atingir qualquer parte da estrutura numa altura inferior a 9m do solo.

O cálculo da velocidade dos mísseis tornáticos (V_m), que está descrito em Simiu e Scanlan (1996) e no NUREG/CR-7004 (2011), considera os mísseis tornáticos como pontos imateriais cuja equação vetorial é apresentada:



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

$$\frac{dV_m}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{C_D \cdot A}{m} \cdot |V_w - V_m| \cdot (V_w - V_m) - gk \quad (8)$$

onde V_w é a velocidade de rotação do tornado, C_D é o coeficiente de arrasto do veículo, A é a área de projeção do veículo na direção normal ao vento, g é a aceleração da gravidade e k é o vetor unitário na direção vertical. Tendo em vista o largo espectro de itens possíveis de serem arremessados por tornados, o USNRC (2007) selecionou 3 tipos com maior potencial de dano: a) mísseis com alta energia cinética e que se deformam ao impactar a edificação; b) mísseis rígidos, que testam a resiliência das estruturas; e c) pequenos objetos rígidos, capazes de passar por aberturas nas barreiras de proteção.

Para efeitos do projeto de estabilidade de estruturas, os mísseis do tipo “c” podem ser desconsiderados e, portanto, não serão abordados neste trabalho. Os objetos do tipo “a” são representados por um tubo de aço, com 460cm de comprimento e diâmetro de 17cm, pesando 130 kgf. A categoria de objetos tipo “b” é representada por um automóvel. Dependendo da velocidade do vento, objetos mais pesados podem ser arremessados. Para velocidade de ventos tornádicos inferiores a 80m/s, será considerado um veículo com 1175kg e, para velocidades superiores, será considerado o veículo mais pesado, com 1810kg. Eles possuem dimensões de 4,5m x 1,7m x 1,5m e 5m x 2m x 1,3m, respectivamente.

A resolução da equação 8 é feita através de métodos computacionais. O National Institute of Standards and Technologies americano (NIST) desenvolveu um aplicativo capaz de calcular a velocidade dos mísseis tornádicos. Como este aplicativo foi inicialmente feito para ser utilizado para mísseis gerados por furacões, foi necessário realizar algumas adaptações, como a correção do incremento da velocidade do ar com a altura (em tornados, este parâmetro é considerado constante) e foi considerado o terreno com a menor rugosidade permitida.

A tabela 2 apresenta as principais características que devem ser consideradas para o tornado de projeto:

Tabela 2 – Características do tornado de projeto

Probabilidade (anos ⁻¹)	Velocidade de translação (m/s)	Velocidade de rotação máxima (m/s)	Queda de pressão (kPa)	Razão da queda de pressão (kPa/s)	Velocidade do míssil tornádico (m/s)
10 ⁻⁵	11	44	2,38	0,57	16
10 ⁻⁶	15	60	4,42	1,45	25
10 ⁻⁷	18	72	6,36	2,50	33

Conclusões

Foi apresentada uma metodologia para obter parâmetros de cálculo para projetos de edificações resistentes à tornados. Atualmente, não há dispositivo normativo nacional para este tipo de evento climático extremo. Apesar da falta de instrumento normativo, foram registrados 37 eventos tornádicos nos últimos 20 anos que foram capazes de causar danos significativos em comunidades inteiras, além de ceifar diversas vidas.

A falta de metodologia para a coleta e o tratamento dos dados de tornados dificultou o desenvolvimento deste trabalho. Foi necessário recorrer a muitas fontes diferentes para conseguir avaliar, da melhor maneira possível, os danos causados pelos tornados nas edificações. Quanto mais antigos os eventos tornádicos, menos informações relevantes para a pesquisa eram encontradas e maior a possibilidade de enviesamento dos dados. A comparação dos fatores topográficos, da distribuição espacial dos tornados e de informações de climatologia forneceram uma correlação empírica já avaliada por outros autores. Foram encontradas poucas regiões nos EUA que se assemelhem à área de estudo brasileira. Muitas das possíveis candidatas localizavam-se periféricamente na distribuição espacial de tornados, sobre as Montanhas Rochosas. Portanto, possuíam maior



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

elevação e menor distribuição pluviométrica do que a região Sul-Sudeste Brasileira. Somente a região de Vermont e New Hampshire, no Noroeste americano possuíam características físicas semelhantes à área em estudo.

A ampliação do banco de dados e a revisão das classificações desenvolvidas neste trabalho permitirão aprimorar a metodologia empregada e aplicar os tratamentos estatísticos realizados nos EUA para a realidade brasileira.

Bibliografia

NWS Damage Assessment Toolkit. <https://apps.dat.noaa.gov> Acessado em 20/01/2021

The National Map. <https://apps.nationalmap.gov/viewer/> Acessado em 22/03/2021

NOAA - Storm Prediction Center. <https://www.spc.noaa.gov/> Acessado em 26/03/2021

CANDIDO, D. H. Tornados e trombas d'água no Brasil: modelo de risco e proposta de escala de avaliação de danos. Tese (Doutorado em Geografia) - UNICAMP. Campinas, 2012.

DAVIES-JONES R., TRAPP R. J., BLUESTEIN H. B. Tornadoes and tornadic storms. In Severe Convective Storms, C. A. Doswell III (ed.), AMS Monograph Vol. 28 No. 50., 167–254, 2001.

Fujita, T.T. Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity". Satellite Mesometeorology Research Program Research Paper Number 91, Department of Geophysical Sciences, University of Chicago 2007.

IENSSE, A. C. A gênese dos eventos tornádicos no corredor sul-americano. Dissertação de mestrado - UFSM. Santa Maria, 2018.

J. R. MCDONALD, K. C. MEHTA. A Recommendation for an ENHANCED FUJITA SCALE (EF-Scale). Wind and Science and Engineering Center, Texas, 2006.

NASCIMENTO, E. L. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil? Revista Brasileira de Meteorologia, v.20, n.1, 121-140, 2005.

NATIONAL WEATHER SERVICE, National Weather Service Instruction 10-1604 Post-Storm Data Acquisition. Abril, 2018

PEARSON K. Topographic Implications for Tornado Climatology. Oberlin College, Ohio, 2016.

SIMIU E., SCANLAN R. H. Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design. 3ª Edição. Editora John Wiley. Nova Iorque, 1996.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, NUREG/CR-4461, Rev. 2, Tornado Climatology of the Contiguous United States. Fevereiro 2007

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, NUREG/CR-7004 - Technical Basis for Regulatory Guidance on Design-Basis Hurricane-Borne Missile Speeds for Nuclear Power Plants. Nuclear Regulatory Research, Washington, 2011.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Regulatory Guide 1.76, Design Basic Tornado for Nuclear Power Plants. Março 2007.