

Cargas de vento e granizo e combinação última - estudo de caso

Wind and hail load and ultimate combination - a case study

Rodrigo Figueiredo Terezo¹, Carlos Augusto de Paiva Sampaio¹, Karla Funfgelt², Gabriel Oliveira Rosa¹, Veraldo Liesenberg¹

RESUMO

O efeito da carga de vento e granizo em edificações não está bem contabilizado sob as atuais disposições de projeto, frente aos eventos climáticos de alta magnitude. Este estudo avaliou o potencial e a dinâmica de destruição pelo vento e granizo em cidades das mesorregiões 3 e 4 do estado de Santa Catarina, locais com alta incidência desses eventos, bem como indicação para construir melhor. Na área de influência do tornado percebeu-se danos em vigas e pilares de madeira e de concreto e colapsos de coberturas. O acúmulo de granizo nas edificações ocasionou falhas em vigas e colapsos de coberturas. Em ambos os eventos, houve destelhamentos principalmente de telhas metálicas e de fibrocimento. A mesorregião 3 se mostra mais propícia a eventos por vento forte, enquanto a mesorregião 4 por granizo. Nesse cenário de carregamento, sugere revisão das equações da NBR 7190-97 para estado limite último.

Palavras-chave: Queda no Ar; Estado Limite Último; Coeficientes; Forças de Arrasto e de Impacto.

ABSTRACT

The effect of wind and hail loads on buildings is not well account for under the current provisions of the design, in the face of high magnitude climate events. This study evaluated the potential and dynamics of destruction by wind and hail in cities in mesoregions 3 and 4 Santa Catarina State, places of high incidence of these events, as well as recommendation to build better. In the area of influence of the tornado damage on beams and at pillars of wood and concrete have been observed and collapses of roofs. The accumulation of hail in building caused failures beams and collapsed roofs. At both events had falling tiles roof, mainly of metal and fiber-cement tiles. The mesoregion 3 show as more prone to strong wind events while mesoregion 4 of hail event. This loading scenario, it suggests a review of the NBR 7190-97 equations for ultimate limit state.

Keywords: Falling in the Air; Ultimate Limit State; Coefficients; Drag and Impact Forces.

¹ Universidade do Estado de Santa Catarina

*E-mail: rodrigo.terezo@udesc.br

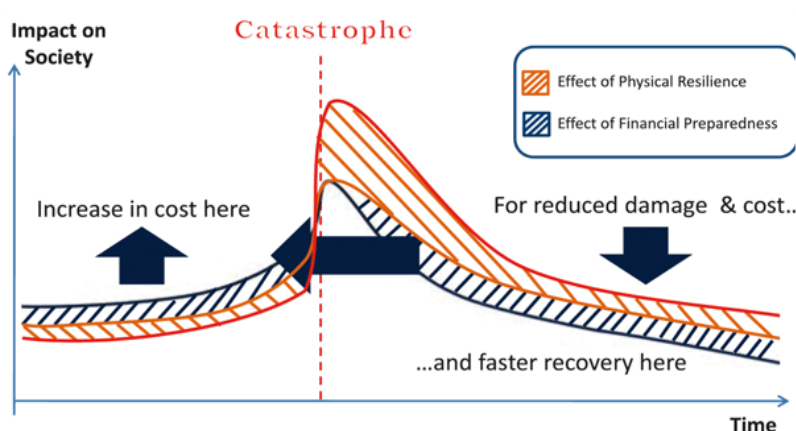
² Instituto Federal Catarinense

INTRODUÇÃO

Os desastres naturais têm dois requisitos de acordo com a definição da *United Nations International Strategy for Disaster Reduction* (UNISDR, 2018). Primeiramente, é necessário que ocorra um evento como chuva forte, ciclone, granizo, terremoto, entre outros, denominado ameaça natural. Em segundo lugar, é necessário que as populações sejam expostas a condições de vulnerabilidade, incluindo as capacidades de prevenção e resposta, bem como aquelas relacionadas às condições de vida da população (trabalho, renda, saúde e educação, aspectos relacionados à infraestrutura como saúde, e seguro de habitação, estradas, saneamento, uso e ocupação do solo, entre outros).

A *World Meteorological Organization* (WMO, 2015) descreveu sobre a estrutura pós-2015 para a redução do risco de desastres, numa abordagem mais ampla e centrada nas pessoas, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Estrutura pós-2015 para redução de risco de desastres



Fonte: WMO (2015, p 2)

Essa nova estrutura mostra que as ações devem estar focadas nas seguintes áreas prioritárias: (1) compreensão do risco de desastre; (2) fortalecimento da governança e instituições para gerenciar o risco de desastres; (3) investir em resiliência econômica, social, cultural e ambiental e (4) melhorar a preparação para uma resposta eficaz para reconstruir melhor.

Numa abordagem sobre o assunto, Borde (2013), Artaxo (2014) descreveram que o número de catástrofes com impactos importantes continua a crescer, impulsionado, em grande parte, pelo aumento da vulnerabilidade a desastres naturais e pelos efeitos das

alterações climáticas, ameaçando as vidas de milhões de pessoas. Um relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014) também destaca que as cidades receberão as maiores catástrofes relacionadas a eventos extremos do clima.

No Brasil, não existe evidência clara de aumento de eventos climáticos extremos nos últimos 20 anos, apesar de serem registrados anualmente muitos eventos de vendavais e até mesmo de granizo. De acordo com o banco de dados NatCatSERVICE (2019), ocorreram cerca de 850 eventos extremos relacionados a ventos e chuvas no mundo entre 2013 e 2017. No Brasil, segundo o banco de dados EM-DAT (2019), ocorreram aproximadamente 22 grandes eventos climáticos extremos em o mesmo período.

Barcellos *et al.* (2016) realizaram uma compilação dos dados relacionados a desastres naturais na cidade de Duque de Caxias/RJ nos últimos 20 anos, correlacionando informações de vulnerabilidades nas comunidades com os fenômenos meteorológicos, enfatizando a análise temporal e espacial das chuvas extremas durante os desastres, com isso, auxiliando e aprimorando ações da Defesa Civil Municipal e medidas de mitigação para cidade.

A norma brasileira NBR 7190 (1997) descreve na seção 5.5.1 que a ação do vento deve ser considerada como usual em estruturas de madeira. Esta ação, quando combinada com as demais cargas permanentes, é considerada como uma variável de curta duração que pode ter sua resistência minimizada pelos coeficientes ψ_0 e ψ_1 ou considerada equivalente a um choque sísmico quando se utiliza $\psi_2 = 0$. Na verificação de segurança em relação ao Estado Limite Último, somente na combinação de ações de longa duração o vento representa uma ação variável principal. Deve-se multiplicar a ação do vento por 0,75. Na seção 5.5.8 menciona-se qual a ação do vento na edificação deve ser considerada de acordo com a NBR 6123 (1988). De acordo com essa regra, no Sul e Sudeste do Brasil as maiores velocidades do vento ocorrem entre 40 e 45 m.s⁻¹ e 30 a 40 m.s⁻¹, respectivamente.

A escala Fujita (Fujita, 1971) mede a intensidade dos tornados, que são medidos pela intensidade dos danos que causam, não pelo seu tamanho físico, estimando a velocidade média do vento.

A *Association of Consulting Structural Engineers - ACSE* (2016), descreve que as tempestades são tipicamente de curta duração, variam em intensidade e são frequentemente associadas a chuvas intensas. Os danos aos edifícios causados pelo granizo ocorrem como danos causados pelo impacto, seja por grandes pedras de granizo

ou por sobrecarga devido a um alto volume de granizo retido e água da chuva. No entanto, o cenário de carregamento com uma grande quantidade de pequenas pedras de granizo (< 20mm) combinado com a chuva pode exceder os requisitos atuais de projeto de código mínimo para telhados. Isso pode levar ao colapso de grandes estruturas que sustentam telhados.

Neste contexto, este estudo teve como objetivos analisar as ocorrências e frequências de ventos e granizos nas mesorregiões 3 e 4 do Estado de Santa Catarina, seu potencial de danos às edificações e aos materiais de construção, propor uma resposta para reconstruir melhor e uma revisão nas equações da NBR 7190 (1997) para a combinação última especial e combinação última excepcional, para as atuais disposições do projeto.

MATERIAIS E MÉTODOS

A Mesorregião 3, localizada no Oeste do Estado de Santa Catarina é formada pela união de 98 municípios, predomina o clima subtropical (Cfb) de acordo com a classificação climática de KÖPPEN, com verões quentes e invernos frios em algumas regiões, precipitação significativa e bem distribuída durante o ano com média de 1.650 mm. As cidades de Xanxerê/SC (26°52'37"S, 52°24'14"W, altitude média de 800 m) e de Ponte Serrada/SC (26°52'19"S, 52°00'57"W, altitude média de 1.067 m) distam entre si de 36,6 km e ambas foram acometidas por um tornado (entre 25°57'41" e 29°23'55" latitude sul; 48°19'37" e 53°50'00" longitude oeste) ocorrido em 20/04/2015, onde provocou sérios danos às edificações urbanas e rurais.

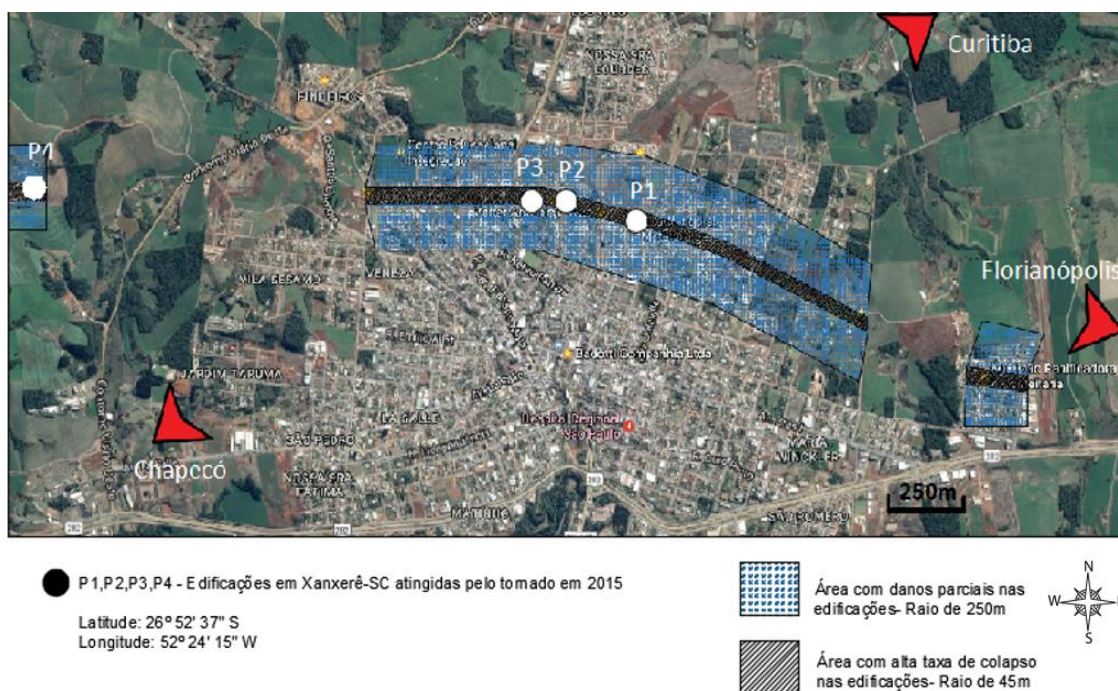
A Mesorregião 4, localizada na Região Serrana do Estado de Santa Catarina é limítrofe de todas as demais mesorregiões e é formada pela união de 30 municípios, predomina o clima subtropical úmido (Cfa) de acordo com a classificação climática de KÖPPEN, não apresenta estação de seca bem definida, nas regiões mais altas as temperaturas atingem facilmente 0 °C. A precipitação média anual é de 1.685 mm, sendo novembro o mês mais chuvoso (média de 213,7 mm) e julho o mês mais seco (média de 50,2 mm). A cidade de Lages/SC (27°49'05"S, 50°20'23"W, altitude média de 940 m) foi acometida por tempestades de granizo ocorridos em 13/10/2014 e 10/11/2017, com pedras do tamanho de uma bola de golfe, ocasionando falhas estruturais significativas em um grande número de edificações e ruína de telhados por não ter suportado o peso das pedras de granizo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diferente do furacão, o tornado tem um tempo de vida de alguns minutos e raramente ocorre por mais do que uma hora. Se formam a partir de uma única nuvem de chuva e podem possuir vários redemoinhos, enquanto os furacões são feitos de diversas nuvens e têm apenas um vórtice.

Em 20/04/2015, ventos fortes atingiram Xanxerê/SC como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Área de influência do tornado de 20/04/2015. Xanxerê/SC



Os danos provocados em algumas edificações urbanas de Xanxerê/SC são mostrados na Figura 3. Na área de influência do tornado foi possível notar uma logística de destruição, ou seja, treliças de aço foram totalmente retorcidas, treliças de madeira quebradas, telhas de aço galvanizado e de fibrocimento (4 mm) foram danificadas, enquanto telhas de concreto e de cerâmicas sofreram poucos danos e resistiram à força do vento (sucção). Materiais desintegrados alcançaram grandes distâncias e provocaram danos em outras edificações. A largura da trilha do tornado foi de aproximadamente de 200 m, pois acima desse valor não se verificou danos significativos às edificações.

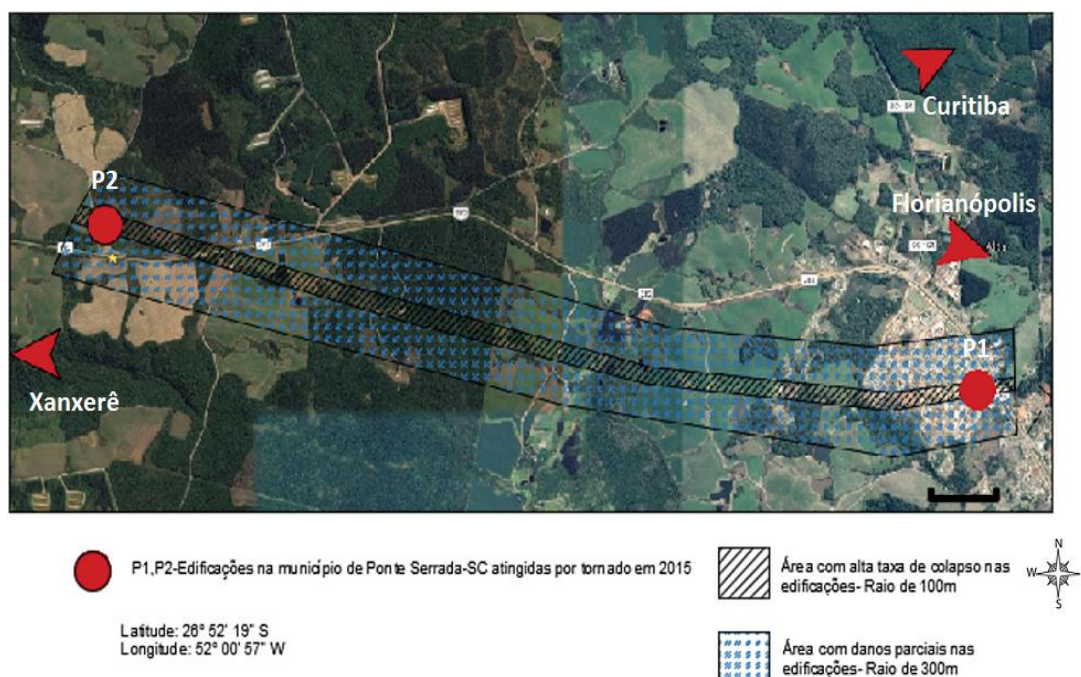
Figura 3 - Danos em algumas edificações de Xanxerê/SC. Tornado de 20/04/2015



P1: ginásio totalmente destruído. P2, P3: edificações em alvenaria destruídas. P4: típico aviário que foi destruído e reformado, na região rural

Também em 20 de abril de 2015, o mesmo tornado atingiu regiões urbana e rural de Ponte Serrada/SC, como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Área de influência do tornado de 20/04/2015. Ponte Serrada/SC.



Os danos provocados em algumas edificações urbanas e rurais de Ponte Serrada/SC são mostrados na Figura 5. Na área de influência do tornado foi possível notar uma logística de destruição, ou seja, pilares pré-moldados de concreto foram cisalhados a 2/3 da altura numa linha de corte a 45°, aproximadamente, galpões foram parcialmente destruídos, paredes e telhados de telhas de fibrocimento colapsaram, ruína total nas coberturas, nas

torres de elevação e nos cabos de aço de ancoragem de silos, plantios de eucaliptos e de pinus sofreram tombamento, arranques ou cisalhamento. A largura da trilha do tornado também foi de aproximadamente 200 m, pois acima desse valor não se verificou danos significativos às edificações.

Figura 5 - Danos em algumas edificações de Ponte Serrada/SC. Tornado de 20/04/2015.



P1

P2

P3

P1: galpões completamente destruídos. P2: galpão de alvenaria. P3: estruturas de silos (concreto e madeira) completamente destruído.

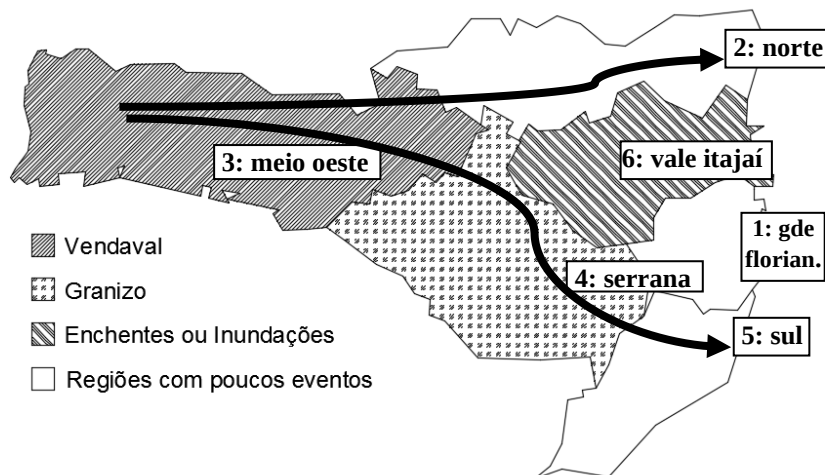
Dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (2015) mostra que o tornado alcançou velocidades entre 100 a 330 km/h por volta das 15 h. Pelos danos provocados nas edificações e nas árvores permite classificar esse tornado em F2 e F3 (Fujita, 1971). A NBR 6123 (1988) mostra nas isopletas que a velocidade básica do vento na região ocorreu entre 40 e 45 m.s⁻¹, inferior à velocidade real que foi entre 27,78 e 87,77 m.s⁻¹.

Quando se contabiliza o número de ocorrências de ventos fortes num período de apenas 04 anos (2013 a 2016), onde ocorreram grandes danos nas edificações e prejuízos econômicos, esses foram predominantes nas mesorregiões 3 e 4, com 16 e 13 eventos, respectivamente. Na mesorregião 3, a atividade de produção é predominantemente agroindustrial e, na mesorregião 4, predomina a indústria de papel e celulose e madeireira. Em ambas as mesorregiões, a madeira e estruturas de madeira são amplamente empregadas para edificações rurais e urbanas.

A Figura 6 mostra a distribuição de eventos climáticos extremos nas mesorregiões do Estado de Santa Catarina. The mesoregion 3 presented 100% events rain and strong wind. June month records the highest occurrences of strong wind/tornado and 75% of the events corresponded only windstorm. Mesoregion with the highest occurrence of windstorms and tornados, corresponding to 48% of total events in the state. While mesoregion 4 presented 100% of the events are rain/hail and wind and, the latter,

corresponde 16% of the total windstorm in the State. The 69% was predominantly hail with predominance on September, October and December month record the occurrences, while and 31% of the events were strong wind.

Figura 6 - Tendência na formação de eventos extremos do clima nas mesorregiões de SC



Em 13 de outubro de 2014, uma severa chuva de granizo ocorreu em Lages/SC e região, com pedras do tamanho de uma bola de golfe (44.0 mm de diâmetro, aproximadamente). Nesse evento, inúmeras telhas de fibrocimento e coberturas de plástico foram perfuradas com destelhamento de um grande número de residências. Em 10 de novembro de 2017, outra severa chuva de granizo ocorreu em Lages/SC e região causando, além dos danos comuns, colapsos de telhados que não suportaram o peso do acúmulo das pedras de granizo, como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Coberturas danificadas por chuva de granizo ocorrida em Lages/SC e região



Granizo consiste numa precipitação sólida de grânulos de gelo de formato esférico ou irregular, raramente cônica, de diâmetro igual ou superior a 5 mm, mais usualmente entre 5 e 15 mm. Considera-se que diâmetros maiores de 20 mm são grandes o suficiente para causar danos materiais (Manual de desastres naturais, 2003). O granizo apresenta densidade menor do que a água, considera-se um valor médio de $9,1 \text{ kN/m}^3$.

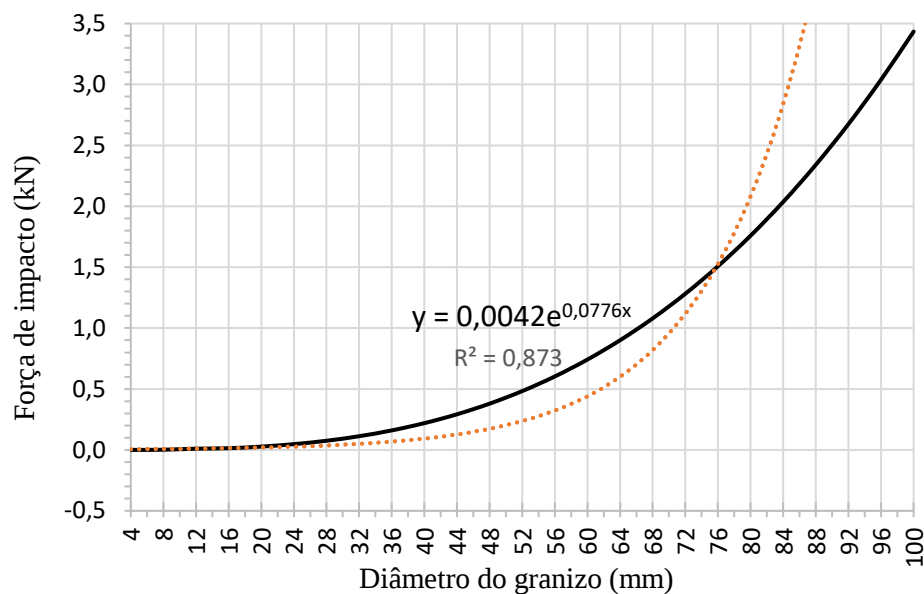
A ACSE (2016) descreve que uma certa quantidade chuva e de granizo em pequenas pedras (< 20 mm) pode exceder os requisitos de projeto de coberturas, levando-a ao colapso, de forma que a inclinação e a existência de obstruções no comprimento do telhado são as principais causas. Cita ainda que numa cobertura de aço é improvável que o granizo deslize em declives menores que 2 graus, nessa situação, uma altura entre 30 a 50 mm de granizo considerando uma densidade de $7,5 \text{ kN/m}^3$, pode assumir uma carga uniformemente distribuída de 0,25 kPa, aproximadamente.

Segundo Halliday *et al.* (2016), quando existe uma força relativa entre um fluido e um corpo, este corpo é submetido a uma força de arrasto. Admitindo que o granizo apresenta uma forma aproximadamente esférica e, considerando $C = 0,70$; $\rho_{\text{ar}} = 1,20 \text{ kg/m}^3$ em condições normais de pressão e temperatura e $\rho_{\text{granizo}} \cong 918 \text{ kg/m}^3$, a massa (g), a velocidade terminal (m/s) e a energia dissipada (J) na interface granizo e telha em função de alguns diâmetros das pedras de granizo é aproximadamente de: $\phi 12$ mm (0,83; 17,11; 0,12); $\phi 20$ mm (3,85; 16,90; 0,55); $\phi 40$ mm (30,76; 23,90; 8,79); $\phi 56$ mm (84,41; 28,28; 33,77); $\phi 100$ mm (480,66; 37,80; 343,43).

Havendo colisão entre dois corpos, esse evento pode ser medido pelo coeficiente de restituição (cr), que representa uma maneira de medir o quanto de energia foi conservada durante a colisão. Na colisão perfeitamente elástica, ($cr = 1$), a energia cinética é totalmente conservada, na parcialmente elástica ($0 < cr < 1$), a dissipação de energia não é máxima e nas colisões inelásticas ($cr = 0$) ocorre a máxima perda de energia cinética durante a colisão (Halliday *et al.*, 2016).

Os danos causados por uma pedra de granizo ao colidir com algum objeto, como por exemplo sua perfuração, dependem da energia cinética máxima no momento da colisão, cujo valor cresce com a quarta potência do raio da pedra. Uma estimativa da força de impacto (considerando colisão inelástica) em função do diâmetro das pedras de granizo é mostrada na Figura 8.

Figura 8 - Força de impacto (kN) de pedras de granizo em função de seu diâmetro (mm)



De acordo com a NBR 15.575-5 (2013), as estruturas principal e secundária, quer sejam reticuladas ou treliçadas, devem suportar a ação de carga vertical concentrada de 1 kN aplicada na seção mais desfavorável, sem que ocorram falhas ou que sejam superados os seguintes limites de deslocamento indicados nessa norma. Nota-se na Figura 8 que tal valor é superado pelo impacto de pedras de granizo de dimensões maiores que 66 mm, considerando colisão inelástica. Se considerar o envelhecimento pela exposição solar dos materiais construtivos, chuva ácida e maresia, os danos podem ser ainda mais negativos nas telhas e nas estruturas das edificações.

As cargas de vento e granizo, cada vez mais, provocam falhas estruturais significativas e danos aos materiais de construção. Nesse cenário de carregamento, baseando nas observações e análises dos eventos extremos do clima ocorridos e descritos, acrescido de análises para ventos fortes e granizo de períodos anteriores, este estudo propõe a aplicação das seguintes equações para as combinações das ações em Estado Limite Último, tomando como base as recomendações da NBR 7190 (1997).

Mesorregião 3 – Combinação última especial

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} \times F_{Gi,k} + \gamma_Q \times \left[F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j,ef} \times F_{Qj,k} \right],$$

onde $F_{Gi,k}$ é o valor característico das ações permanentes ponderadas por $\gamma_{Gi} = 1,3$ para grande variabilidade; $F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável especial de vento com intensidade básica de 70 m/s, correspondendo à escala F3 (Fujita, 1971); $\psi_{0j,ef}$ tomado como correspondente a ψ_2 quando a ação principal $F_{Q1,k}$ tiver um tempo de atuação muito

pequeno, caso da mesorregião 3 com incidência de tornados e, cada uma das ações variáveis são ponderadas por $\gamma_{Qi} = 1,2$, devido a grande variabilidade dos eventos.

As combinações de duração instantânea foram utilizadas quando se considera a existência de uma ação variável especial pertinente à classe de duração imediata. As demais ações variáveis foram consideradas com seus valores prováveis agindo simultaneamente à ação variável especial, esses valores de longa duração, a menos que haja outro critério que os determine. Neste caso, seria prudente usar a escala Fujita para a determinação da velocidade básica do vento de duração instantânea. Diferentemente dos isópleto descritos pela NBR 6123 (1988).

Mesorregião 4 – Combinação última excepcional

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} \times F_{Gi,k} + F_{QExc} + \gamma_{Qi} \sum_{j=2}^n \psi_{0j,ef} \times F_{Qj,k} ,$$

onde $F_{Gi,k}$ é o valor característico das ações permanentes ponderadas por $\gamma_{Gi} = 1,2$ para a grande variabilidade; F_{QExc} é o valor de ação transitória considerada excepcional com o acúmulo de até 20 cm de granizo sobre a cobertura de baixa inclinação, devido à existência de platibanda, conseqüentemente uma carga equivalente a 185 daN/m²; $\psi_{0j,ef} \times F_{Qj,k}$ é o valor reduzido de combinação de cada uma das demais ações variáveis ponderadas por $\gamma_{Qi} = 1,0$ devido à grande variabilidade dos eventos.

CONCLUSÕES

É tendência a ocorrência de ventos fortes, podendo chegar à condição de tornado, predominantemente na mesorregião 3 e, de granizo, predominantemente na mesorregião 4, do Estado de Santa Catarina. Em um provável cenário de carregamento recomenda-se aplicação de correção nas equações para as combinações das ações em estado limite último da NBR 7190 (1997) e o emprego da escala Fujita, ao invés das isopletas, na determinação da velocidade do vento para combinação última das ações. Sugere outros estudos e em diferentes regiões do país onde é recorrente eventos extremos do clima visando: revisar normas e métodos construtivos e um banco de dados para desastres naturais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) por seu apoio financeiro, bem como empresas e prefeituras por sua receptividade e apoio.

BIBLIOGRAFIA

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988) **NBR 6123**. Forças devido ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 66p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997) **NBR 7190**. Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 107p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013) **NBR 15.575-5**. Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas. Rio de Janeiro, 63p.

ACSE - Association of Consulting Structural Engineers (2016) **Hail loading on roofs**. Practice note 19(1): 1-7, Sydney.

ARTAXO, P. Revista USP: **Mudanças climáticas e o Brasil**. São Paulo. n. 103, p. 8-12. 2014.

BARCELLOS, P.C.L.; SILVA, F.P.; VISSIRINI, F.S.B.; TERRA, J.M.; DUTRA, M.R.F.; MAGALHÃES, C.A.; AMARAL, I.C.F. Diagnóstico meteorológico dos desastres naturais ocorridos nos últimos 20 anos na cidade de Duque de Caxias. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v31, n3, 319-329, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778631320150146>

BORDE, A. **The economic impacts of natural disasters**. Oxford University Press, New York, 2013.

EM-DAT – **Emergency Events Database** (2019) The OFDA/CRED International Disaster Database. Available: <https://www.emdat.be> Accessed feb 11, 2019.

FUJITA, T.T. (1971). **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. 42p.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Part A: Global and sectoral Aspects. Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge/New York: Cambridge University Press, 2014.

HALLIDAY D; RESNICK R; WALKER, J (2016). **Fundamentos de Física**. 10ª ed., LTC Ed., 372p., Rio de Janeiro, 2016.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em 2015.

Manual de desastres naturais. v1, Brasília/DF, 2003, 174p.

NatCatSERVICE – Natural Catastrophe Service (2019) **In:** Download center for statistics on natural catastrophes. Available: <https://natcatservice.munichre.com/> Accessed feb 11, 2019.

UNISDR – United Nations International Strategy for Disaster Reduction (2018). **Annual report:** 2017. Geneva, UNISDR, 62p.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Building climate resilience through disaster risk reduction.** Bulletin v64 (1), 2015. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/building-climate-resilience-through-disaster-risk-reduction-0>. Acesso em out. 2015.

Recebido em: 02/03/2022

Aprovado em: 03/04/2022

Publicado em: 06/04/2022