

SOBRE A DEFINIÇÃO DO VENTO PARA PROJETO ESTRUTURAL NA ABNT NBR 6123 (1989) E OUTRAS NORMAS SUL AMERICANAS

Jorge D. Riera

Abstract

Até o início do século XXI as características do vento para fins de projeto estrutural estiveram baseadas em modelos do comportamento das correntes de ar próximas à superfície do solo, observadas nos denominados eventos sinóticos. Porém, estes não são os únicos tipos de vento que provocam dano e até destruição completa de construções, o que exige que as normas e critérios de projeto de estruturas submetidas à ação do vento sejam atualizados com urgência, para incorporar os avanços atingidos na Engenharia do Vento nas últimas décadas. O trabalho descreve sucintamente os fenômenos meteorológicos que causam ventos extremos na camada superficial e merecem tratamento específico em futuras revisões das normas, assim como a evidência já disponível na literatura técnica sobre a distribuição de probabilidade das velocidades máximas anuais dos tipos de vento relevantes. Também é sugerido um modelo simplificado para a determinação dos efeitos nas construções, em geral, do vento ocasionado por correntes descendentes, até o momento não considerado por normas de projeto estrutural no continente sul americano.

KeyWords: *Ação do Vento, Projeto Estrutural, Ventos Sinóticos, Correntes Descendentes, Risco, Probabilidade de Ocorrência.*

INTRODUÇÃO

A ação do vento constitui um fator de fundamental importância no projeto de estruturas, especialmente em caso de construções altas e esbeltas e/ou muito leves. A maioria dos códigos de projeto estrutural admite que, em terreno horizontal e plano, o vetor da velocidade média do vento incidente está orientado em direção paralela ao solo. O modelo que justifica dita hipótese é válido no caso do denominado *vento sinótico*, causado pelo fenômeno meteorológico mais frequente em regiões temperadas, isto é, por Tormentas Extra-Tropicais, também denominadas Sistemas Extensos de Pressão ou eventos *EPS* (*Extended Pressure Systems*) ou por Tormentas Tropicais, (*Hurricanes* ou *Typhoons* quando originadas Oceano Pacífico).

Por outro lado, por razões que serão explicadas posteriormente, efeitos do vento associado às denominadas *correntes descendentes*, típicas de tormentas elétricas em eventos *TS* (*thunder storm*) ou à combinação das primeiras com eventos *EPS* nas denominadas *linhas de instabilidade* (*squall lines*), não foram até agora considerados em normas de projeto estrutural na América do Sul. É pertinente

¹ Professor Convidado,
LDEC, DECIV, EE, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS),
Porto Alegre, RS, Brazil
jorge.riera@ufrgs.br

sublinhar aqui que o campo de velocidade do vento, no caso de que o fenômeno meteorológico seja de tipo *TS*, *difere consideravelmente dos modelos implícitos na maioria dos códigos*, incluindo a Norma NBR 6123 (1988), o que constitui uma óbvia deficiência.

Existem ainda outras diferenças importantes: registros em estações meteorológicas da velocidade do vento durante eventos *TS* *não podem ser considerados amostras de processos estacionários* e, adicionalmente, a componente flutuante da velocidade não é governada pela rugosidade da superfície, como no caso de ventos sinóticos. Considerando que o perfil vertical da velocidade em eventos *TS* é também diferente do adotado para ventos sinóticos, o método estático e a análise dinâmica de estruturas altas e flexíveis submetidas à ação do vento, tanto na NBR 6123 como em outras normas sul americanas sobre o tema, não são usualmente apropriados para estimar a resposta induzida por ventos de origem *TS*.

Em regiões temperadas, *não afetadas por tormentas tropicais*, aproximadamente nove de cada dez observações da velocidade máxima anual do vento, na altura padrão de 10m sobre o nível do solo, acontece durante eventos *EPS*. Conseqüentemente, as velocidades extremas para períodos de retorno superiores aos dez anos são usualmente devidas a eventos *TS*. A necessidade de determinar a distribuição de probabilidade das velocidades máximas anuais associadas a eventos *TS* foi apontada por Riera *et al* (1977), visando à consideração do risco de ocorrência dos mesmos *independentemente* do risco resultante de eventos *EPS*, mas a proposta não foi ainda implementada em Sul América¹. Thom (1967) tinha proposto anteriormente a utilização de séries mistas de registros de ventos causados por eventos *EPS* e por tormentas tropicais, mediante uma distribuição combinada $P_V(v)$. Porém, enquanto as diferenças entre as características do campo de velocidades do vento (perfil vertical, turbulência, etc) em tormentas extra-tropicais e tropicais são relativamente pequenas e permitem a especificação de critérios de projeto similares para ambos fenômenos, a simplificação mencionada não pode ser estendida a ventos devidos a correntes descendentes ou a tornados.

Mais tarde, Riera e Nanni (1989) confirmaram, utilizando dados de 14 estações meteorológicas do sudeste brasileiro, que as velocidades máximas anuais do vento nessa região, atribuídas a eventos *EPS* ou a eventos *TS*, são caracterizadas por *distribuições de probabilidade diferentes*. Em geral, a distribuição de extremos Fisher-Tippett I (Gumbel ou simplesmente Tipo I) apresentou o melhor ajuste às séries disponíveis, tanto para eventos *EPS* como *TS*, mas os parâmetros *são diferentes* e as diferenças são estatisticamente significativas. Já as séries mistas (velocidade máxima anual de ventos *EPS* ou *TS*) para as 14 estações são geralmente melhor representadas pela distribuição de extremos Fisher-Tippett II (Frechet) ou pela distribuição de extremos Fisher-Tippett III (Weibull). Sobre essa base, Riera *et al* (1989) sugerem um esquema para determinar os parâmetros da velocidade de projeto do vento, para cada tipo de fenômeno meteorológico, utilizando funções de interpolação dos parâmetros estimados em pontos nodais definidos pelas localização geográfica das estações de registro.

Evidência adicional sobre a importância no projeto estrutural de ventos causados por correntes descendentes é fornecida por engenheiros envolvidos no projeto e manutenção de linhas de transmissão de energia elétrica. Com efeito, de acordo com CIGRÉ (2002), mais de 80% das falhas de torres e linhas de transmissão atribuídas à ação do vento em climas temperados, são causadas por eventos *TS*.

¹ Estudos recentes no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da UFRGS, Porto Alegre, Brasil, visam viabilizar dito objetivo. Matthew Vallis, sob orientação de A. M. de Loredou Souza, realiza atualmente uma coleta de dados em todo Brasil, classificando cada registro segundo o fenômeno meteorológico.

Desde então o CIGRÉ mantém comitês permanentes de estudo dos efeitos de ventos TS em linhas de transmissão.

Finalmente, é relevante mencionar que na última Conferência Internacional sobre Engenharia do Vento (*14th ICWE - International Conference on Wind Engineering*), realizada em 2015 em Porto Alegre, RS, foram apresentadas mais de vinte contribuições sobre o tema. Letchford (2015), após uma revisão histórica do desenvolvimento do conhecimento sobre o assunto, examina a possibilidade de estabelecer normas de projeto para ventos ocasionados por correntes descendentes. Segundo Letchford (2015), Gomes e Vickery (1978) foram possivelmente os primeiros pesquisadores que reconheceram a necessidade de separar os registros de velocidades extremas do vento atendendo ao tipo de fenômeno meteorológico, sublinhando que análises posteriores confirmaram que as cargas devidas ao vento que dominam o projeto estrutural na maior parte do território dos EUA são devidas a eventos TS (Lombardo, 2012; De Gaetano *et al.*, 2014). Ditos desenvolvimentos resultaram finalmente na inclusão dos efeitos de eventos TS na versão atualizada do mapa de velocidades do vento na norma ASCE 7 (2016), seguindo avanços já incorporados na Norma de Australia/Nova Zelandia AS / NZS 1170.2.

Nos EUA a frequência de ocorrência de eventos TS foi estimada de registros de mais de 1000 estações meteorológicas localizadas principalmente em Aeroportos (Lombardo *et al.*, 2009). A altura dos anemômetros sobre o solo é usualmente 10m, enquanto os registros incluem velocidades médias sobre 2 minutos e velocidades de rajadas (média sobre aproximadamente 3s). O enfoque foi utilizado para quantificar climas ‘mistos’, isto é, contribuições de vários tipos de fenômenos meteorológicos (Twisdale and Vickery, 1992; Lombardo, 2014) na determinação da velocidade de projeto.

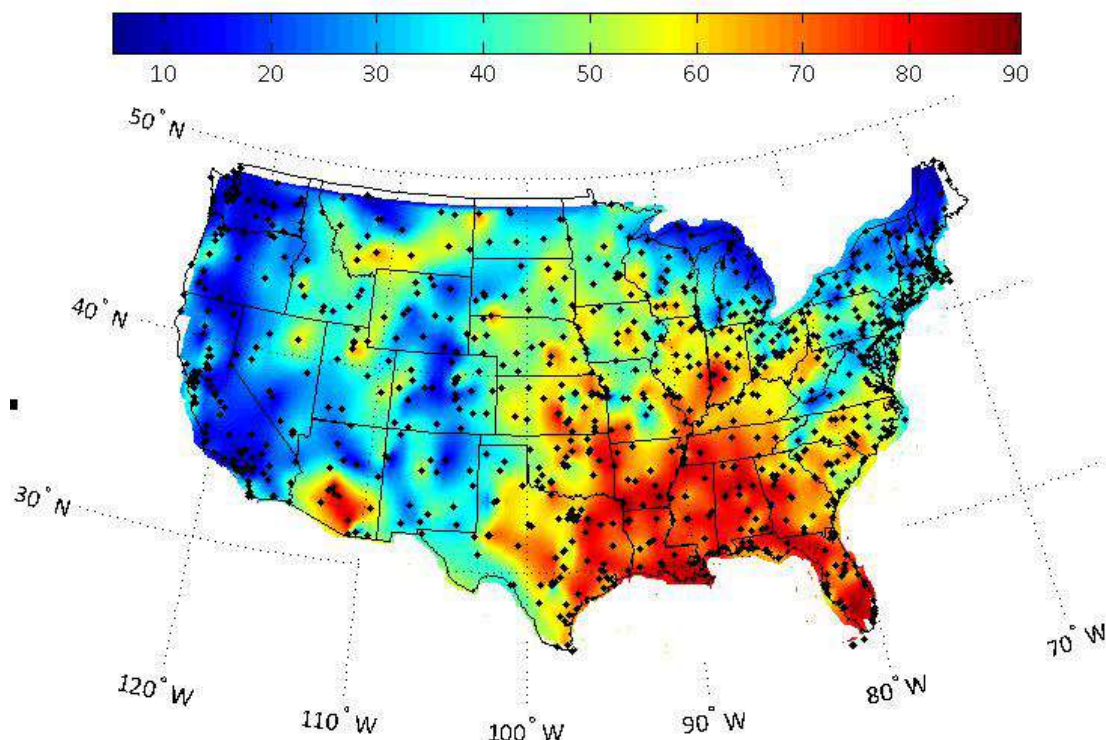


Figura 1. Localização das estações meteorológicas (pontos pretos) e percentual das velocidades máximas anuais causadas por eventos TS nos EUA.(Letchford, 2015)

DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DE EVENTOS EPS, TS E OUTROS

Riera *et al* (1977) concordaram com os argumentos de Gomes & Vickery (1976) sobre a importância da determinação *independente* da distribuição de probabilidade das velocidades máximas anuais causadas por eventos TS, a qual devia ser diferente da resultante de eventos EPS, ou seja, ventos sinóticos. Um antecedente importante já citado é devido a Thom (1967), quem sustenta que populações mistas de eventos EPS e produzidas por tormentas tropicais, isto é, séries de velocidades máximas anuais não classificadas de acordo com o fenômeno meteorológico associado a cada observação, seriam satisfatoriamente ajustadas pela seguinte distribuição de probabilidade $P_V(v)$:

$$P_V(v) = P_E \exp[-(v/\beta)^{-9}] + P_T \exp [-(v/\beta)^{-4.5}] \quad (1)$$

Na qual P_T representa a frequência de ocorrência de tormentas tropicais no quadrado de 5° de longitude-latitude sob consideração e $P_E = 1 - P_T$. Thom (1967) sugere que a eq. (1) é válida globalmente em regiões afetadas somente por tormentas tropicais e extra-tropicais, e requer a determinação de dois parâmetros,² P_T e β . Gomes and Vickery (1976), por outro lado, consideraram que a distribuição das velocidades máximas anuais do vento devido a eventos TS *somente*, deve estar fortemente correlacionada com o número médio de eventos por ano n_s na vizinhança do local de interesse, concluindo a partir de observações numa estação australiana que a distribuição Fisher-Tippett Type I (Gumbel) seria um modelo apropriado. Pouco depois, Riera *et al* (1977) obtiveram por regressão os parâmetros de escala e de forma de uma distribuição $P_V(v)$ das velocidades máximas anuais de ventos TS, de tipo Fisher-Tippett II (Frechet), em função do número médio de eventos por ano n_s indicados a seguir:

$$\beta = 12.66 + 3.76 \ln n_s \quad (\text{m/s}) \quad (2)$$

$$\gamma = 3.36 + \ln n_s \quad (3)$$

Conseqüentemente:

$$P_V(v) = \exp [-(v/\beta)^{-\gamma}] \quad (4)$$

As eq. (2 - 4) constituem aproximações razoáveis da distribuição de probabilidade de ventos TS quando a nuvem cumulonimbus na qual acontece a corrente descendente se desloca com baixa velocidade, isto é, devido à circulação geral da atmosfera. Porém é hoje conhecido que os ventos originados num evento TS isolado do tipo acima mencionado são menos destrutivos que os que acontecem numa *linha de instabilidade (squall line)*, na qual a nuvem é transportada por um evento EPS, acontecendo *uma adição* dos efeitos de ambos fenômenos.

Riera and Nanni (1983) confirmam mais tarde que séries de velocidades máximas anuais de eventos classificados cuidadosamente como de tipo EPS ou TS *efetivamente apresentam* distribuições de probabilidade com parâmetros diferentes. Os estudos foram realizados classificando como EPS ou TS o

² The addition of probabilities in equation (1) requires that the events be mutually exclusive, condition that is satisfied, in principle, by tropical storm winds and winds caused by other meteorological phenomena. The condition is not satisfied, for example, by EPS and TS events, which may occur simultaneously.

fenômeno meteorológico de origem de cada registro nas bases de dados de 8 estações meteorológicas do centro e sul do Brasil. A Figura (2) mostra a distribuição das estações de registro do Serviço de Proteção ao Vôo da Força Aérea Brasileira utilizadas no estudo, nos vértices das cinco regiões (elementos). As velocidades registradas foram classificadas segundo a orientação (oito setores) e o tipo de fenômeno meteorológico (EPS ou TS), resultando em consequência 128 séries de velocidades máximas anuais, de duração variável, mas em todos os casos inferior a 50 anos. Foi verificado que a distribuição Tipo I (Gumbel) apresentou em geral o melhor desempenho no ajuste de dados de eventos EPS e/ou TS, mas a superioridade em relação às distribuições tipo II (Frechet) ou tipo III (Weibull) não foi claramente observável nas séries mistas (velocidades máximas anuais, sem distinção do fenômeno de origem).

Dito resultado está de acordo com uma conclusão lógica: se as distribuições das máximas anuais devidas a eventos EPS e TS são de tipo I (Gumbel), mas com parâmetros diferentes, a distribuição das máximas sem consideração do tipo de fenômeno meteorológico, *não pode ser tipo I*, sendo melhor ajustadas por uma distribuição de tipo II, como fora observado nos estudos iniciais para da NBR 6123 (Padaratz, 1985).



Figura (2) Distribuição das estações de registro do Serviço de Proteção ao Vôo (FAB), nos vértices das cinco regiões (elementos) consideradas.

A Figura (3) apresenta exemplos dos parâmetros observados por Riera *et al* (1989) na Estação de Registro Porto Alegre (RS), na qual se destaca que os valores médios de ventos EPS são ligeiramente inferiores ou da mesma ordem que valores correspondentes a registros TS, mas o desvio padrão dos últimos é claramente superior, explicando a conclusão de que os ventos TS são dominantes para períodos de recorrência mais altos.

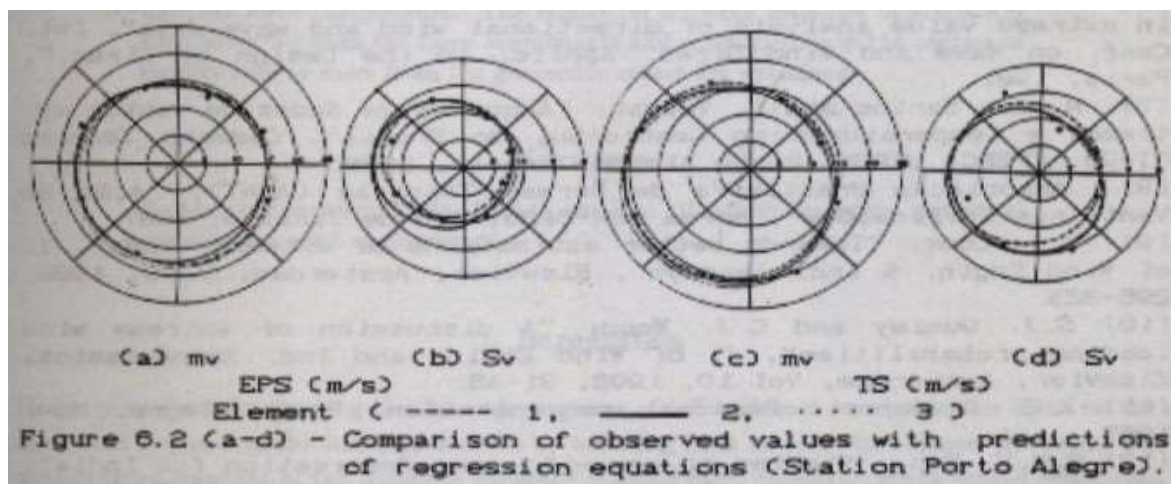


Figura (3) Valor esperado m_v e desvio padrão s_v das velocidades registradas em Porto Alegre (RS), por setor e tipo de fenômeno meteorológico (EPS: esquerda; TS: direita)

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO VENTO NA CAMADA LIMÍTE

Serão resumidas a seguir características básicas do vento nos fenômenos meteorológicos relevantes no território sul americano, isto é, eventos EPS e TS, tais como perfil vertical da velocidade média, características da turbulência e duração, que exercem grande influência na resposta estrutural, visando estabelecer sem qualquer dúvida, que a excitação devida ao vento não pode ser razoavelmente definida com base na componente horizontal da velocidade a 10m de altura sobre o solo, sem especificar ao mesmo tempo, qual é o fenômeno responsável pelo vento.

De fundamental interesse é o *perfil vertical da componente horizontal* do campo de velocidades do vento nas camadas inferiores da atmosfera. No caso de ventos sinóticos, isto é, de eventos EPS, como se admite em forma implícita na redação atual da Norma NBR 6123, o perfil vertical é representado por uma parábola cujo expoente varia com a rugosidade do terreno. A velocidade aumenta em forma monótona com a altura, modelo que coincide pelo menos qualitativamente com a maior parte das instruções normativas em vigor.

Já o campo de velocidades do vento ocasionado por correntes descendentes é um campo 3D e não apresenta simetria, exceto quando o eixo da corrente é vertical, isto é, na ausência de *vento de fundo* ou velocidade de translação da nuvem causadora do evento. Em qualquer caso o perfil depende da posição do eixo vertical da nuvem em relação ao local de interesse. Chen & Letchford (2004) apresentam uma avaliação crítica de modelos do perfil vertical em eventos TS propostos na literatura até esse momento. Oseguera & Bowles (1988) sugerem a equação empírica (5) para determinar a velocidade horizontal média em correntes descendentes:

$$V(z) = (\lambda R^2 / 2r) \{1 - \exp[-(r/R)^2]\} [\exp(-z/z_c) - \exp(-(z/z_d))] \quad (5)$$

Na qual λ representa um fator de escala com dimensão $[T]^{-1}$, z_d uma altura característica (dentro da camada limite), z_c uma altura característica (fora da camada limite), r distância até o eixo vertical do

cilindro descendente e R o raio característico do mesmo. Pouco depois, Vicroy (1992), sugere a seguinte equação para o perfil vertical:

$$V(z) = 1.22 V_{max} [\exp(-0,15 z / z_m) - \exp(-3,2175 z / z_m)] \quad (6)$$

Na eq. (6), V_{max} indica a velocidade máxima no perfil, enquanto z_m representa a altura onde acontece dito valor máximo. Outro modelo é devido a Wood & Kwok (1998):

$$V(z) = 1.55 V_{max} (z/z_0)^{1/6} \{ 1 - \Phi[0,7(z/z_0)] \} \quad (7)$$

Na eq. (7), z_0 representa a altura na qual a velocidade atinge a metade do seu valor máximo, sendo Φ a função de Gauss. Mais tarde, Chay *et al* (2006) introduzem a seguinte modificação da equação sugerida por Vicroy (1991):

$$V(z) = (\lambda r / 2) [\exp(c_1(z/z_m)) - \exp(c_2(z/z_m))] \exp[(2 - (r^2 / r_p^2)^\alpha) / 2\alpha] \quad (8)$$

Na qual λ é um fator de escala, α , c_1 e c_2 constantes, r é o raio, r_p o raio onde acontece a velocidade máxima, z_m a altura sobre o solo onde acontece dita máxima e z uma altura genérica. As Figures 4 e 5 mostram comparações de perfis verticais propostos na literatura, conjuntamente com os resultantes do modelo de Ponte e Riera (2007). Os gráficos da Figura 5 foram normalizados para uma velocidade de 80 m/s a 67 m de altura sobre o solo. Observa-se que os modelos citados reproduzem algumas características reconhecidas de ventos TS, por exemplo, que a velocidade máxima é usualmente observada a alturas inferiores a 100m e que a velocidade decresce mais ou menos rapidamente em elevações superiores, mas ainda apresentam diferenças perceptíveis entre eles. O perfil do modelo de Ponte & Riera (2007) é semelhante ao modelo de Oseguera & Bowles (1988) quando a distância ao eixo da nuvem é próxima a 100m e ao modelo de Vicroy (1992) quando a distância é próxima a 200m.

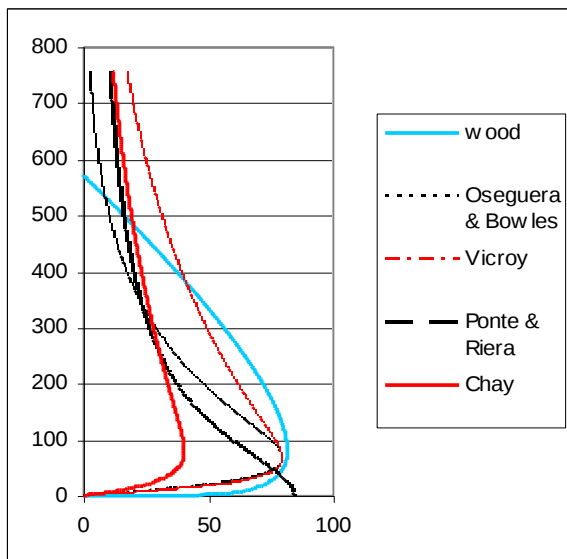


Fig. (4): Perfil vertical a 100m do eixo da nuvem (Ponte e Riera, 2007)

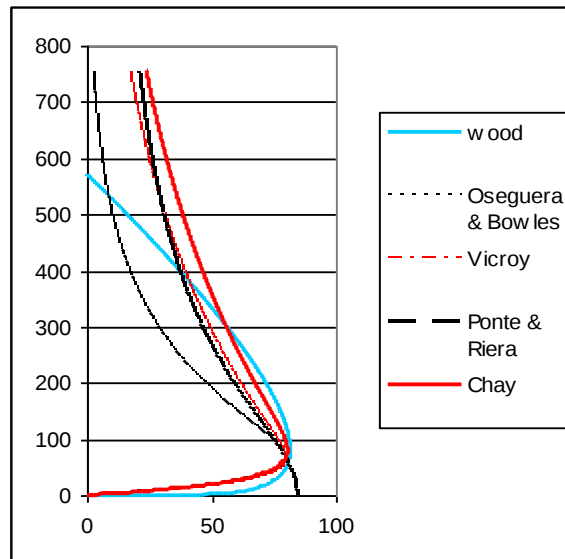


Fig. (5): Perfil vertical a 200m do eixo da nuvem (Ponte e Riera, 2007)

A evidência apresentada ilustra claramente que os ventos *TS* não são caracterizáveis por um único perfil vertical, mas por uma família de perfis, que dependem da distância do centro da nuvem até o local de interesse. Adicionalmente, posto que a nuvem causadora do evento está usualmente em movimento, o problema é complicado pela necessidade de considerar também outro fator: a relação entre a velocidade de translação da nuvem e a velocidade da corrente descendente.

Uma segunda diferença, de fundamental importância, é a seguinte: ventos EPS podem ser considerados processos aleatórios estacionários, o que facilita consideravelmente o desenvolvimento de procedimentos analíticos e/ou numéricos de análise. Dito enfoque foi proposto e desenvolvido por A.D. Davenport e constitui a base dos procedimentos adotados em códigos de projeto para a análise dinâmica de estruturas flexíveis, incluindo nesse grupo o Capítulo 6 da NBR 6123 (1989). A Figura (6) mostra um registro de aproximadamente uma hora de duração de um vento sinóptico, no qual estão indicadas as velocidades médias (em intervalos de 10 minutos). A intensidade da parte flutuante mantém-se aproximadamente constante durante todo o registro e pode ser aproximada, de acordo com o modelo de Davenport, como um processo gaussiano com média zero.

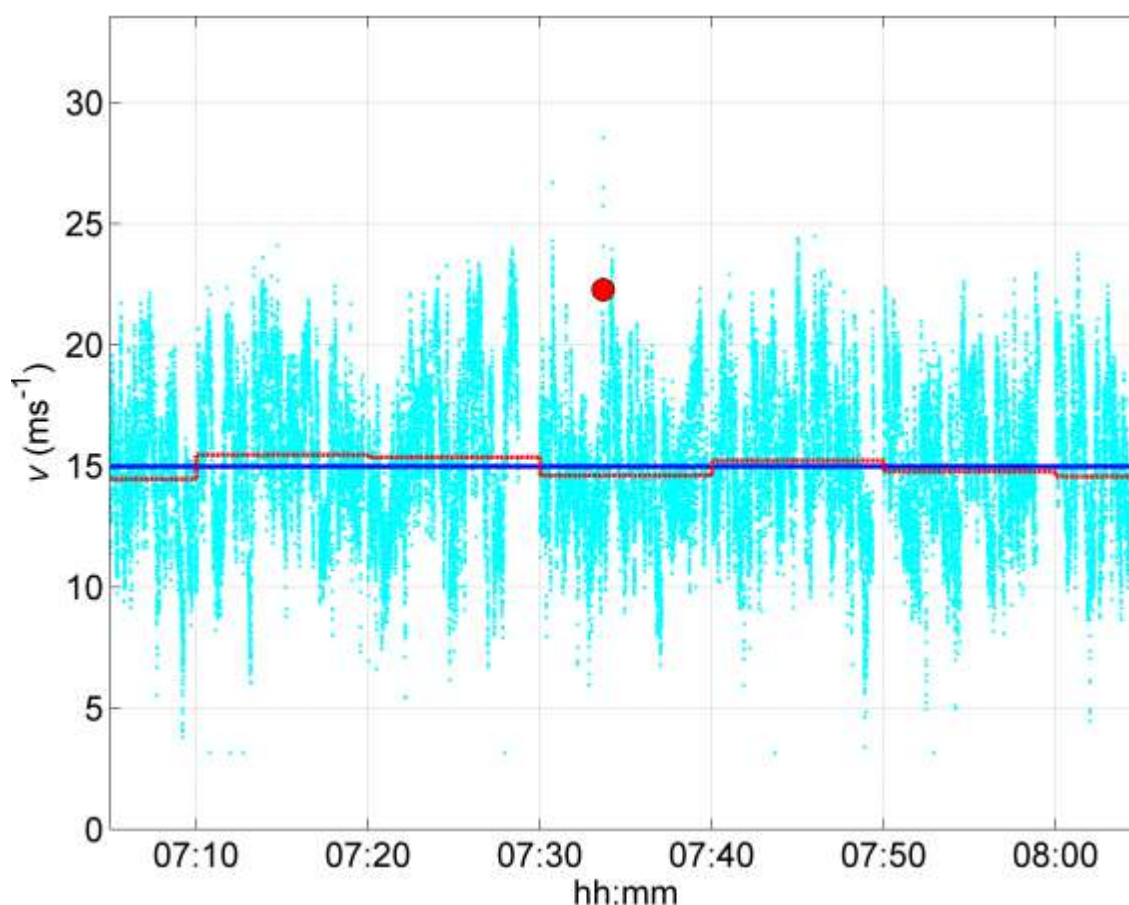


Figura 6. Registro da componente horizontal da velocidade do vento durante evento EPS (vento sinóptico-Port of Savona, Italia, 22/11/2011), mostrando o valor médio V_{EPS} em intervalos de 10min e o valor máximo estimado como a média mais 3 vezes o desvio padrão (Solari, 2015)

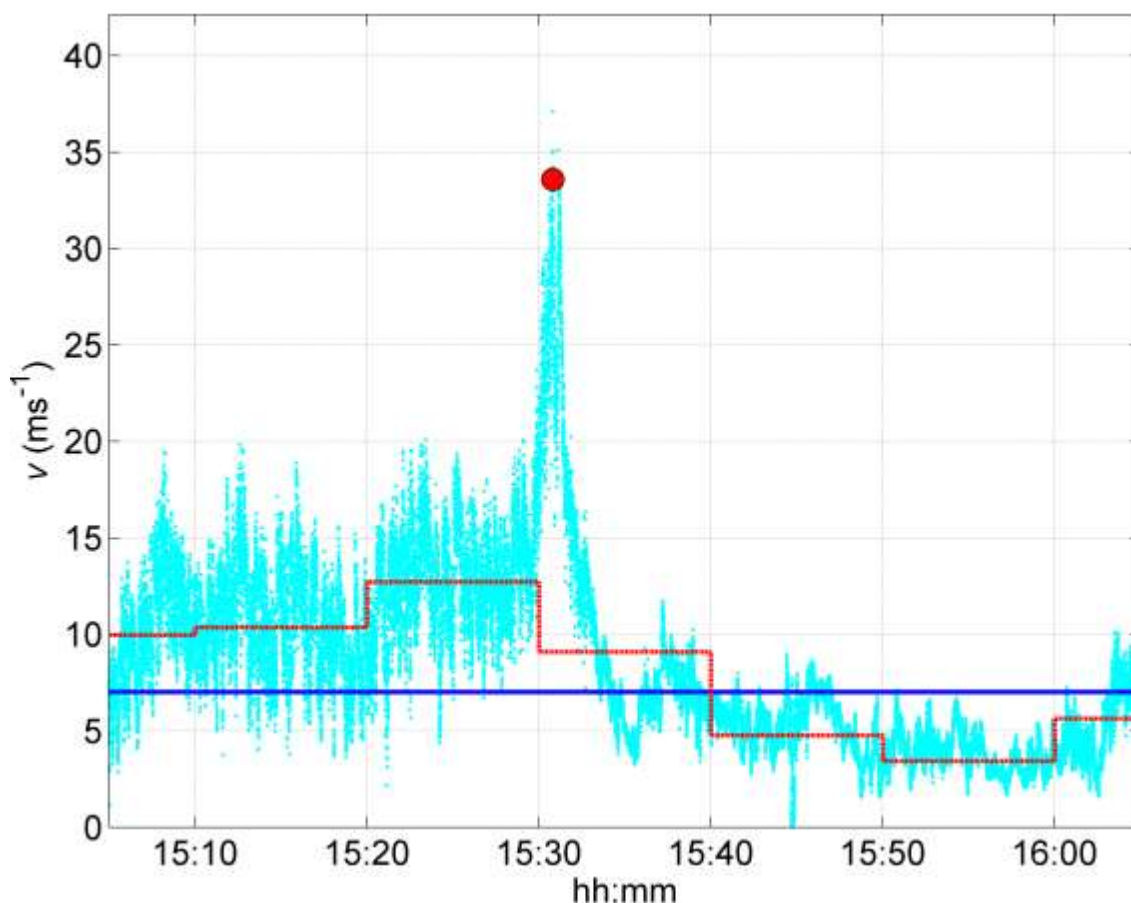


Figura 7. Registro da componente horizontal da velocidade do vento durante evento TS (corrente descendente - Porto La Spezia, Italia, 25/11/2011), mostrando o valor médio ($V_{EPS} \approx 12$ m/s) em intervalos de 10min e o valor máximo estimado por Solari (2015), sendo amplitude do evento $V_{TS} \approx 35$ m/s.

A Figura 7 apresenta registro similar, mas agora de um evento TS, claramente não estacionário. As hipóteses admitidas por Davenport não seriam válidas para a excitação observada entre 15:30 e 15:50 hs, que requerem outro enfoque. Observe-se que foram publicadas recentemente diversas propostas para a consideração do efeito de ventos de origem TS na análise dinâmica de estruturas esbeltas (Solari, 2014; Solari *et al*, 2015a-c; Solari, 2016). Um segundo exemplo de observações do campo de velocidades em evento TS é ilustrado pelas Figuras 8 e 9. A primeira apresenta uma vista da estação meteorológica da Universidade de Passo Fundo (RS), na qual foi construída uma torre de 40m de altura, com anemômetros instalados a 10, 20, 30 e 40m de altura sobre o solo. Registros da componente horizontal da velocidade obtidos durante evento TS de 07/11/2007, durante o qual colapsou a antena de TV existente no mesmo local, são apresentados na Fig. 9. O anemômetro instalado a 10m tinha sido retirado para manutenção. Já o registro a 40m é fortemente influenciado pela componente vertical, que possivelmente superou a intensidade da componente horizontal.



Figura 8. Vista aérea da Estação Meteorológica da UPF (RS) e localização da torre

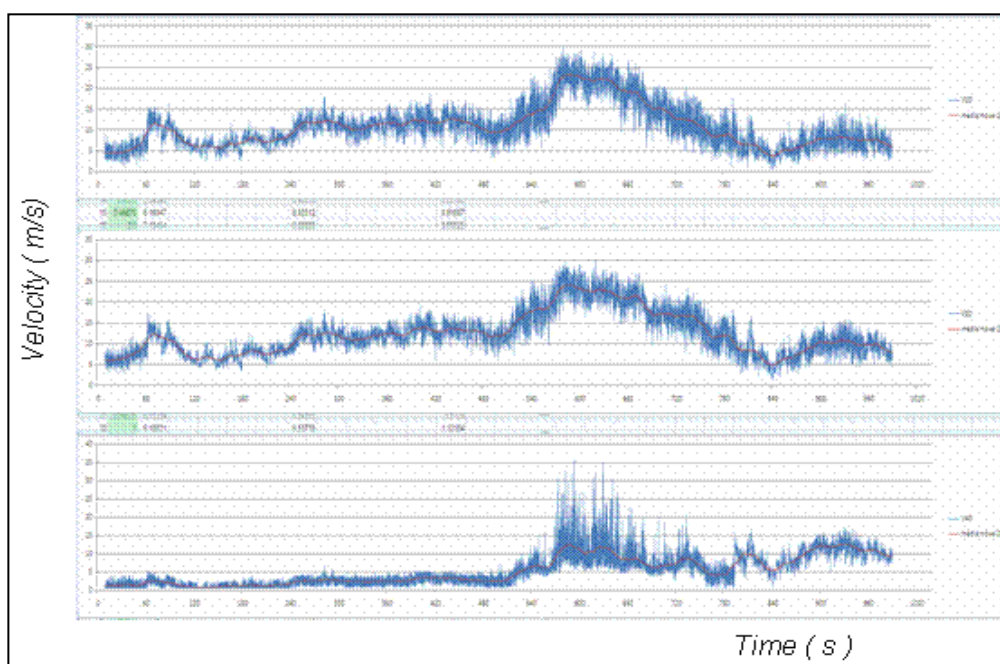


Figura 9. Registros da velocidade do vento (componente horizontal) a 20, 30 e 40 m de altura no evento TS registrado na UPF (RS, Brasil) em 07/11/2007

A Figura 10 mostra registros da componente horizontal da velocidade do vento em evento *TS* analisado detalhadamente por Holmes *et al* (2008), observados em quatro torres. Trata-se claramente de uma linha instabilidade, em que um evento *EPS* com velocidade média da aproximadamente 15m/s transporta o evento *TS*. A situação é a mesma nos registros apresentados nas Figuras 7 e 9 e, como será mostrado posteriormente, constitui a única que precisa ser analisada pelo projetista estrutural. Dos registros da Figura 10 obtém-se, para a Torre 3: $V_{EPS} = 14 \text{ m/s}$, $V_{TS} = 41 \text{ m/s}$; Torre 4: $V_{EPS} = 15 \text{ m/s}$, $V_{TS} = 39 \text{ m/s}$; Torre 5: $V_{EPS} = 13 \text{ m/s}$, $V_{TS} = 35 \text{ m/s}$; Torre 6: $V_{EPS} = 14 \text{ m/s}$, $V_{TS} = 35 \text{ m/s}$.

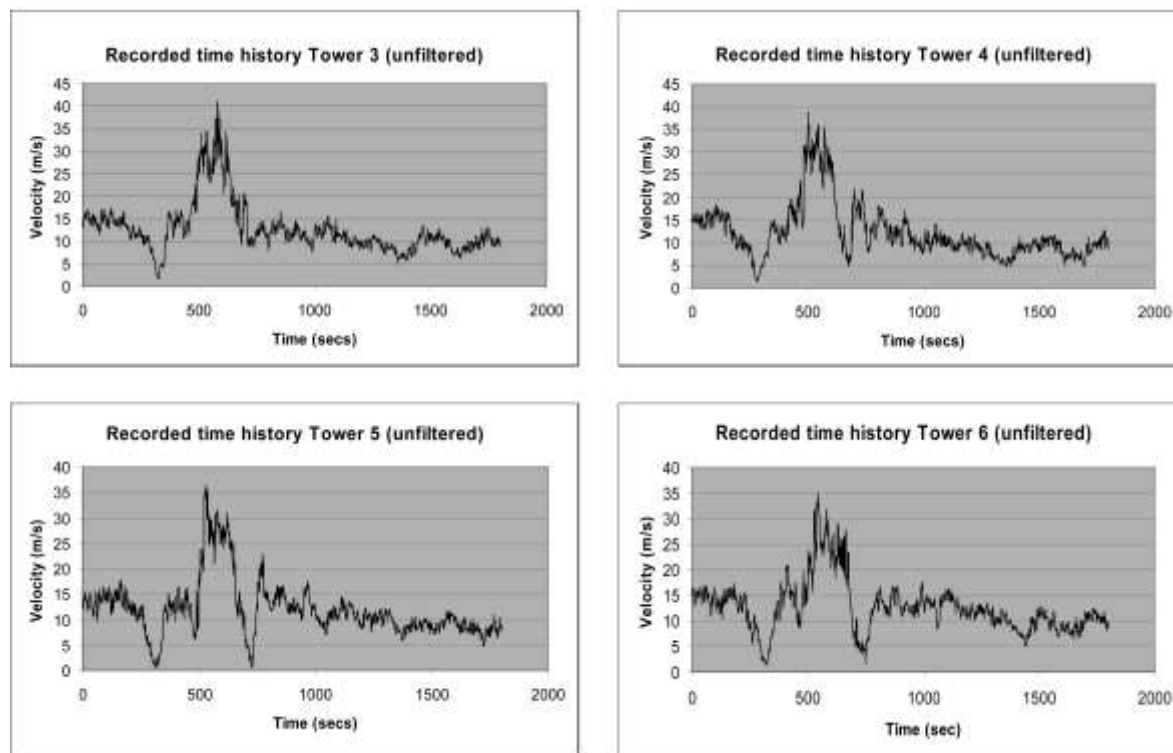


Figura 10. Registros da velocidade do vento (componente horizontal) no evento *TS* de Lubbock-Reese de 2002 (Holmes *et al*, 2008)

Exemplos adicionais, escolhidos entre os dez registros em estações meteorológicas de Uruguay examinadas por Durañona (2015), que apresentaram as velocidades mais altas, são mostrados na Figura 11. Nas primeiras quatro horas de todos os registros se observam velocidades médias do vento *EPS que traslada as correntes descendentes*, na faixa entre 10 e 15 m/s. O valor máximo da combinação entre o vento *EPS* e o vento *TS*, localizado no tempo 0, atinge valores próximos ou pouco acima de 40 m/s. Resulta importante salientar que Riera e Nanni (1983) incluíram valores da velocidade em registros similares aos mostrados nas Figuras 7, 9, 10 e 11, *nas series de velocidades TS*. Aparentemente, dito critério é o usualmente adotado na classificação de velocidades máximas de acordo com o fenômeno meteorológico causante das mesmas, não existindo uma classe específica para eventos *TS* com velocidades de translação acima de aproximadamente 10 m/s, que poderiam ser atribuídas a eventos *EPS*.

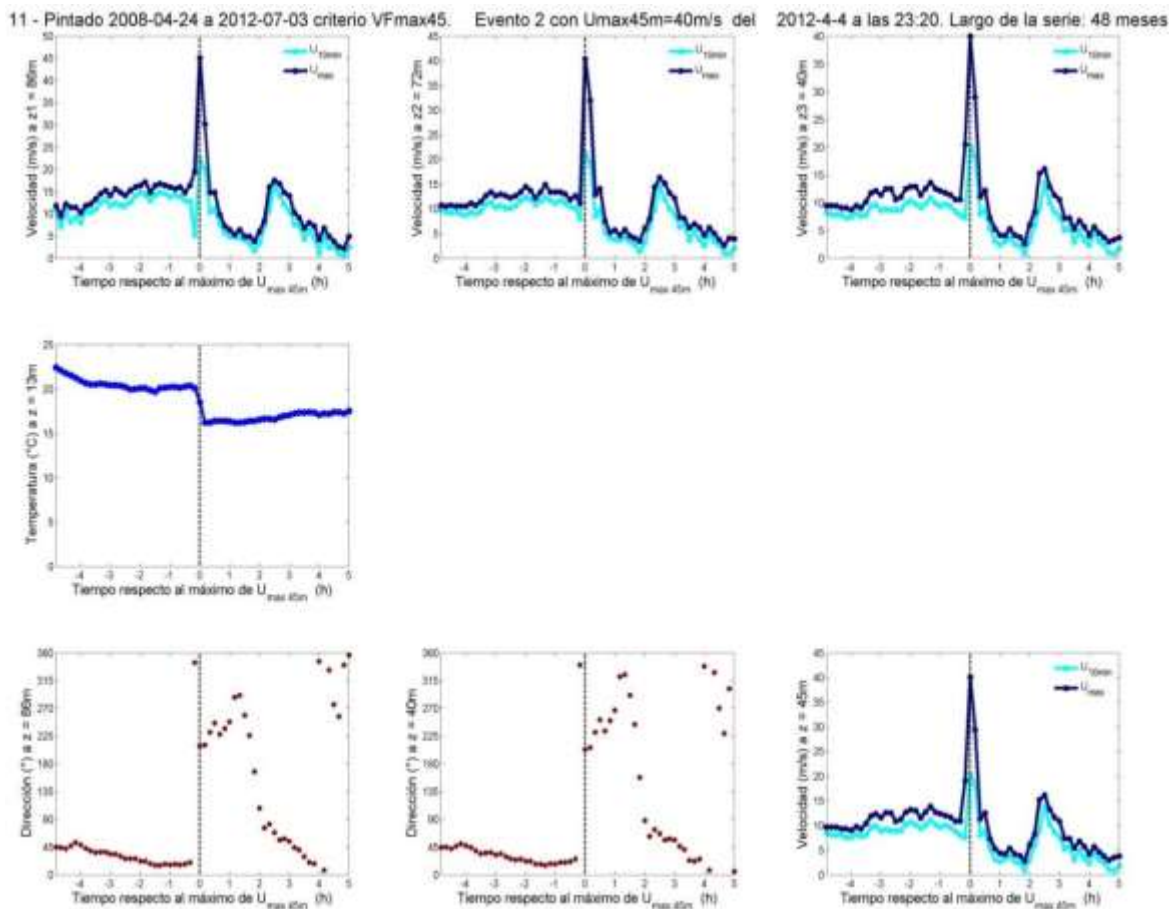


Figura 11. Registros em estações meteorológicas de Uruguay durante eventos *TS* (Durañona, 2015),
Superior: velocidade do vento em m/s; Central: temperatura;
Inferior: orientação do vento.

Dos registros de Figura 11, obtém-se: (de esquerda a direita): Registro 1, $V_{EPS} = 14 \text{ m/s}$, $V_{TS} = 46 \text{ m/s}$; Registro 2: $V_{EPS} = 13 \text{ m/s}$, $V_{TS} = 40 \text{ m/s}$; Registro 3: $V_{EPS} = 12 \text{ m/s}$, $V_{TS} = 40 \text{ m/s}$. A Tabela 1 mostra que a relação V_{EPS}/V_{TS} para os registros examinados previamente varia entre 0.3 e 0.4 e que o valor 0.35 constitui um estimador robusto da média.

Tabela 1. Relação entre velocidade do vento de translação e velocidade *TS* máxima

Caso	$V_{EPS} \text{ (m/s)}$	$V_{TS} \text{ (m/s)}$	V_{EPS}/V_{TS}
1	12	35	0.34
2	14	41	0.34
3	15	39	0.38
4	13	35	0.37
5	14	35	0.40
6	14	46	0.30
7	13	40	0.36

MODELO SIMPLIFICADO DE LINHAS DE INSTABILIDADE

De acordo com a discussão precedente, resulta claro que no caso de correntes descendentes ocasionadas por *nuvens estacionarias ou que se deslocam lentamente*, a componente horizontal da velocidade do vento na altura de referência raramente excede ao redor de 30 m/s (Ponte e Riera, 2007, 2010). Dita velocidade é inferior às velocidades de projeto estrutural nas regiões temperadas da América do Sul baseadas em observações de tormentas extra-tropicais (eventos EPS) e por tanto, não precisa tratamento específico (Fadel Miguel e Riera, 2013). Por outro lado, o risco de ocorrência de ventos intensos numa construção isolada devido a corrente descendente *estacionaria*, isto é, que não faça parte de uma linha de instabilidade (*squall line*), resulta desprezível. Com efeito, a Figura 12 mostra os *rastros* de eventos *TS* na vizinhança de estação meteorológica no centro de região circular de 40 km de diâmetro, durante um ano, em simulações de séries de 50 anos dos efeitos do vento em estruturas de 50m de altura efetuadas por Fadel Miguel e Riera (2013). A área afetada por ventos intensos na maior linha de instabilidade (7 km) mostrada na figura resulta, nesse caso, aproximadamente 100 vezes maior que as áreas dos eventos menores, correspondentes a correntes descendentes quase estacionarias. Como a *intensidade* do evento definida, por exemplo, pela amplitude da velocidade horizontal a 10m de altura sobre o solo, *também seria proporcional a área da zona afetada*, conclui-se que a probabilidade de falha de qualquer construção localizada no centro do círculo ficará definida apenas por *linhas de instabilidade (squall lines)* que passem pelo centro do círculo (local de interesse, situação mais desfavorável para fins de projeto) ou muito próximas ao mesmo. Outras situações podem ser desconsideradas.

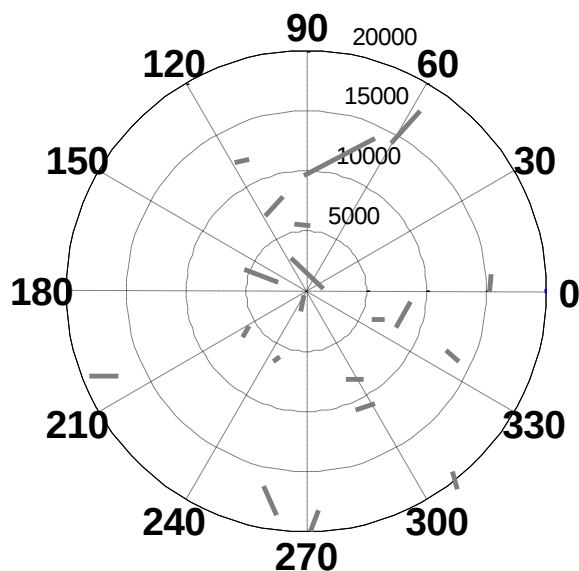


Figura 12. Rastros no solo de 20 eventos *TS* (média anual na região) mostrando uma linha de instabilidade de aproximadamente 7 km de comprimento e três eventos com menos de 1 km.

Seja V_0 a velocidade de projeto para eventos *TS*, definida como a componente horizontal da velocidade máxima a 10m de altura sobre o solo, para um tempo de exposição e probabilidade de ser excedida dado. De acordo com as considerações da seção precedente, a velocidade média de translação da

corrente descendente pode ser estimada como $0.35 V_o$, resultando então a distribuição da velocidade do vento, num plano vertical normal á orientação da velocidade média do vento mostrada na Figura 13.

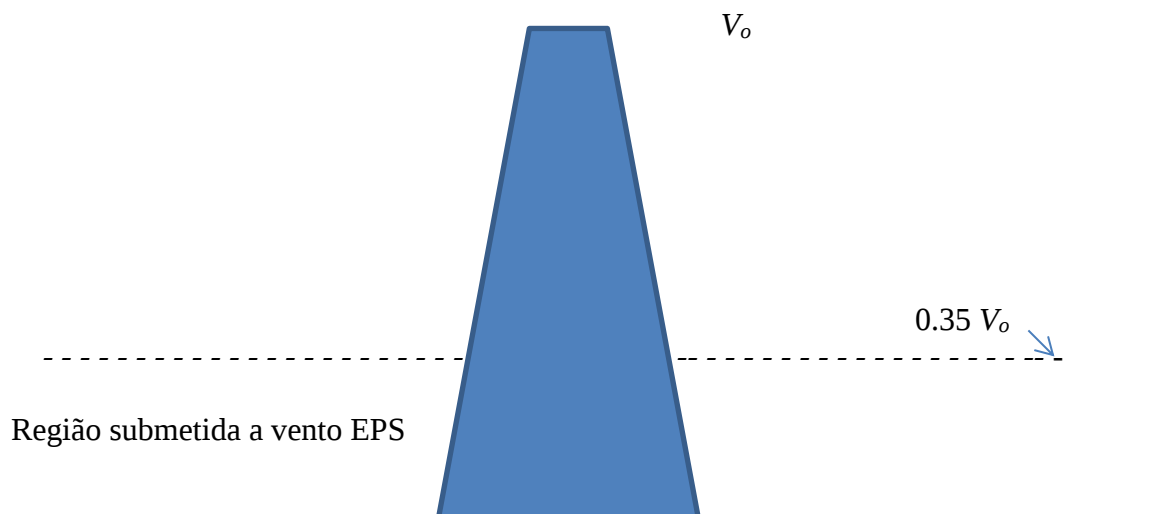


Figura 13. Esquema da distribuição da velocidade na altura de referencia ($z = 10\text{m}$), em seção normal á orientação da mesma, no caso de evento *TS*. Largura da região trapezoidal: no topo d , na base b . Fora da faixa de largura b , a contribuição da corrente descendente á velocidade total é zero.

Em consequência, as velocidades na altura de referencia ($z = 10\text{m}$) indicadas na figura 13 definem a distribuição em altura da componente EPS, de acordo com o perfil vertical e a variação no tempo (componente flutuante) especificadas na norma NBR 6123 para vento bem comportado (*EPS*). A Figura 13 define também o perfil vertical da corrente descendente *TS*, segundo se descreve posteriormente. Se for preciso determinar a resposta dinâmica, pode-se admitir para a componente *TS* a variação no tempo indicada a seguir e ilustrada na Fig. 14.

As expressões propostas por Holmes e Oliver (2000) para descrever a evolução da velocidade de ventos *TS* com o tempo foi utilizada pelo autor com resultados satisfatórios, sendo também sugerida no presente contexto.

$$V(t) = 1,58 V_t [1 - \exp(-t/T)], \text{ para } t \leq T \quad (9)$$

$$V(t) = V_t \exp[-(t-T)/T], \quad \text{para } t > T \quad (10)$$

Nas quais T representa o denominado *tempo característico*, parâmetro que depende de múltiplos fatores, tais como a altura de nuvem causadora do evento, da velocidade de translação e outros (Ponte e Riera, 2007), aumentando com a *intensidade* do evento. A Figura 14 ilustra a evolução da velocidade da velocidade $V(t)$ durante eventos *TS*, enquanto na Tabela 11 se indicam valores sugeridos para o tempo característico.

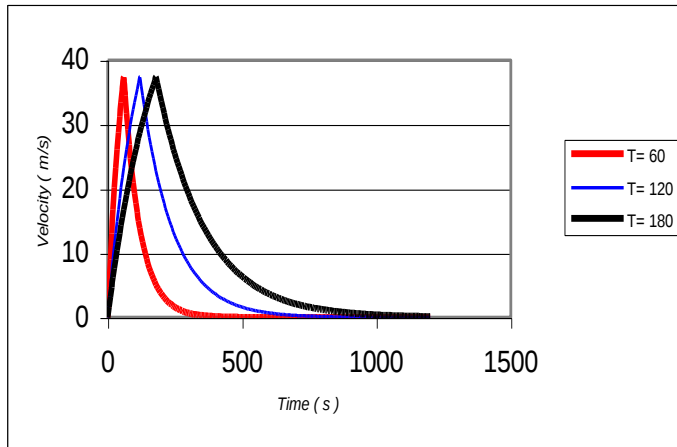


Figura 14. Variação no tempo da componente TS para $V_t = 37.5$ m/s e três valores do tempo característico T .

Tabela 2. Parâmetros das cinco categorias de correntes descendentes (CD)

Designação (CD)	V_o (m/s)	d (m)	b (m)	Altura de V_{max} z_{max} (m)	T (s)
CD 1	$V_o \leq 30$	10	40	20	60
CD 2	$30 < V_o \leq 40$	20	60	40	120
CD 3	$40 < V_o \leq 50$	40	100	80	180
CD 4	$50 < V_o \leq 60$	60	160	120	300
CD 5	$60 \leq V_o$	80	240	160	480

Finalmente, dentro da faixa de solo de largura b admite-se que o perfil vertical da componente horizontal da velocidade é definido pela expressão proposta por Savory *et al* para ventos TS , dada pela equação (11). Fora da faixa de largura b , o perfil vertical depende da rugosidade (tipo de exposição), de acordo com as recomendações usuais para ventos bem comportados (EPS).

$$V(\eta) / V_{max} = \exp(-0.15 \eta) - \exp(-3.2175 \eta), \quad \eta = z / z_{max} \quad (11)$$

Empregando os valores de z_{max} sugeridos na Tabela 2, pode-se determinar V_{max} se for conhecido V_o .

EXEMPLO ILUSTRATIVO DO PROCEDIMENTO PROPOSTO

Foi amplamente justificada a necessidade da determinação da frequência de ocorrência de velocidades extremas do vento, para fins de projeto estrutural, *para cada tipo de fenômeno meteorológico relevante*. São considerados relevantes no continente sulamericano dois tipos de fenômenos: (a) ventos ocasionados em condições de estabilidade vertical da atmosfera (situação típica nas denominadas

tormentas extra-tropicais, ou sistemas extensos de pressão *EPS*) e (b) ventos ocasionados por correntes descendentes combinadas com ventos *EPS*. Observe-se que a descrição do campo de velocidade do vento no caso de tormentas tropicais, que podem afetar o litoral do Brasil, apresenta muita semelhança com o caso (a) e seu tratamento numa norma de vento exigiria somente considerações específicas para avaliação das respectivas probabilidades de ocorrência. Levando também em conta que no Brasil estão atualmente em andamento pesquisas que visam avaliar a probabilidade da ocorrência de eventos de tipo (b), e aqui proposto um procedimento para a determinação dos seus efeitos nas construções.

Um ponto essencial no procedimento acima mencionado é que, similarmente aos esquemas clássicos na Engenharia do Vento, as bases de dados disponíveis consistem em séries de velocidades registradas em estações meteorológicas (usualmente apenas a componente horizontal) a uma altura padrão sobre o nível do solo igual a 10m. As normas atualizadas permitirão então a determinação da *velocidade de projeto* V_o que definirá, para um local especificado, o valor da componente horizontal da velocidade em evento *TS*, caracterizada por uma probabilidade dada de ocorrência em intervalo de tempo também especificado.

No projeto de estruturas submetidas à ação de tornados, o procedimento é inverso ao aqui proposto: se especifica um tornado na escala Fujita-Pearson, por exemplo F3, e depois são adotados para fins de projeto a *velocidade* e outros parâmetros necessários *associados* à escala F3. No presente caso, *é conhecida a velocidade* V_o , o que permite identificar uma escala de corrente descendente, apresentada na Tabela 2. Admita-se que a velocidade seja determinada (por exemplo de um mapa de isopletas) como $V_o = 34$ m/s. A escala CD seria então CD 2, à qual segundo Tabela 2 correspondem $d = 20$ m, $b = 60$ m, $z_{max} = 40$ m e $T = 120$ s. Da equação (11) segue que:

$$V_{max} = V(\eta) / [\exp(-0.15 \eta) - \exp(-3.2175 \eta)], \quad \eta = z / z_{max}$$

Observe-se que sendo $\eta = z / z_{max}$, com $z = 10$ m obtém-se V_o . Logo, substituindo valores calcula-se facilmente $V_{max} = 65.0$ m/s. Observe-se que dita velocidade seria atingida somente numa faixa de 20 m de largura, a partir da qual a velocidade decai rapidamente com a distância ao centro da CD até o valor constante $0.35 V_o = 11.9$ m/s a 10m de altura sobre o solo, mas com o perfil vertical parabólico especificado pela Norma NBR 6123 para ventos *EPS*.

O esquema permite a identificação das características da excitação de estruturas submetidas a ventos *TS*, com base em dados meteorológicos existentes nos países sul americanos em geral. Sua introdução nas normas atuais permitiria a determinação dos efeitos de ventos *TS* em construções com largura perceptivelmente inferior a d , já que em princípio seriam aplicáveis *nesse caso* os mesmos coeficientes de arrasto, sustentação, etc. empregados para ventos *EPS*.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Norma NBR 6123 (1989) contém recomendações para a determinação da ação do vento sinóptico, isto é, causado por Sistemas Extensos de Pressão (EPS) sobre construções, em geral. As recomendações da NBR 6123 não diferem apreciavelmente de outras normas modernas e, com a ressalva acima indicada, precisaria apenas ajustes ou revisão de tópicos isolados.

No entanto, foi apresentada evidência inquestionável de que outros fenômenos meteorológicos, especialmente as denominadas correntes descendentes (eventos TS), são responsáveis pelas velocidades de projeto associadas a baixas probabilidades de ocorrência (períodos de retorno grande) e, em consequência, não podem continuar ignoradas na atualização da Norma. Considerando que as velocidades máximas anuais a 10m sobre o solo em terreno plano (componente horizontal) com período de retorno superior a 10 anos, são usualmente observadas durante eventos TS nas denominadas linhas de instabilidade (*squall lines*), o primeiro passo deve ser a reformulação dos estudos meteorológicos, atualmente em andamento, considerando os ventos identificados como EPS ou TS como *eventos independentes*.

Nesse contexto, é apresentada finalmente uma proposta para definir a área de ação e o perfil vertical, assim como a duração e a evolução da intensidade com o tempo, dos ventos intensos de tipo TS. Os parâmetros sugeridos para as cinco categorias de correntes descendentes (em linhas de instabilidade) estão baseados em evidência teórico-experimental limitada a poderão em consequência sofrer ajustes ou modificações, quando futuros estudos em laboratório e observações de campo estejam disponíveis.

AGRADECIMENTOS

Se agradece o apoio do CNPq e CAPES na elaboração do presente trabalho.

REFERENCIAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1987): Norma NBR- 6123 “*Ação do Vento nas Edificações*”, Rio de Janeiro, 1987.

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991) : NBR – 5419 “*Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas*”, Rio de Janeiro, 1991.

ANSI (American Nuclear Society) (2011). Estimating Tornado, Hurricane, and Extreme Straight Line Wind Characteristics at Nuclear Facility Sites: An American National Standard. ANSI/ANS-2.3-2011. La Grange Park, IL.

AS1170.2 (2002) Structural design actions –Part 2 -Wind actions

AS/NZS 7000 (2010): Overhead Line Design – Detailed Procedures

ASCE Manual 74: Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading

Blessmann, J. (1995): *O Vento na Engenharia Estrutural*, Editora da Universidade, 1ª Edição, Porto Alegre, RS, Brasil..

Caracena,F., Holle.R.L. and Dosswell, C.A.(1977): *Microbursts: A handbook for visual identification*. NOAA, National Severe Storm Laboratories, U.S.A.,December 1977.

CIGRÉ SC22 WG16- (2002) Meteorology for overhead lines- *Draft Report on Current Practices regarding Frequencies and Magnitude of High Intensity Winds*- Aug . 2002

CIGRE TB 256 (2004): ‘Report on Current Practices regarding the Frequencies and Magnitude of High Intensity Winds’

CIGRE TB 350 (2008): “How Overhead Lines Respond to Localized High Intensity Winds – Basic Understanding”

CIRSOC (2001): “Proyecto de Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones”, Editado por INTI, Instituto nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires, Argentina.

Chay, M.T., Albermani, F., Wilson, B.(2006); “Numerical and analytical simulation of downburst wind loads”. *Engineering Structures*, Elsevier, **28**, 240-254.

Chen, Ching, L., Letchford, C.W.(2004), "A Deterministic-Stochastic Hybrid Model of Downburst and its impact on a Cantilevered Structure", *Engineering Structures*, Elsevier, **26**, 619-26.

De Bortoli, M.E.; Riera, J.D. and Paluch, M.J. (2007): “Wind Loads on Tall Buildings in Urban Environments”, 12th International Conference on Wind Engineering, ICWE 12, Cairns, Australia.

De Gaetano, P., Repetto, M.P., Repetto, T., Solari, G. (2014). Separation and classification of extreme wind events from anemometric records, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, (126) 132-143.

Donald, Alan T. & Fox, Robert W. (1995). “*Introdução à Mecânica dos Fluidos*”, Editora Guanabara- Koogan S.A., 4a. Edição.

Durañona, Valeria (2015): “The significance of non-synoptic winds in the extreme wind climate of Uruguay”, 14th International Conference on Wind Engineering (ICWE), June 2015, Porto Alegre, RS, Brasil.(in CD).

Fujita, T.T. (1978), Manual of downburst identification for Project NIMROD, SMPR- 156 . University of Chicago, May 1978.

Fujita, T.T (1985), *The Downburst Microburst and Macrobust* – Report of projects NIMROD and JAWS.

Gomes, L. and Vickery, B.J. (1976): “On thunderstorm wind gusts in Australia, with particular reference to Observatory Hill, Sydney”, *Research Report No. R277*, Civil Engineering Laboratory, University of Sydney.

Gomes, L., and Vickery, B. J. (1978). “Extreme wind speeds in mixed wind climates”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics.*, (2) 331-344.

Holmes, J.D. and Oliver, S.E. (2000): “An empirical model of a downburst”, *Engineering Structures*, Elsevier, **22**, 1167-72.

Holmes, J.D., Baker, C.J., English, E.C., Choi, E.C.C.(2005): “Wind structures and codification”, *Wind and Structures*, **8**, Nº.4, 235-250.

Holmes, J.D.; Hangan, H.; Schroeder, J.; Letchford, C.W. and Orwig, K.D. (2008): “A forensic study of the Lubbock-Reese downwind draft of 2002”, *Wind and Structures*, **11**, 137-152.

Letchford, C.W., Mans, C., Chay, M.T. (2002). Thunderstorms – their importance in wind engineering (a case for the next generation wind tunnel). *J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics.*, (90) 1415-1433.

Letchford, C. W., Chay, M. T. (2002). “Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst. Part B: moving downburst observations”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics.*, (90) 733-753.

Letchford, C.W. and Lombardo, F.T. (2015): “Is codification of non-synoptic wind loads possible?”, Invited Lecture, 14th International Conference on Wind Engineering, June 2015, Porto Alegre, RS, Brasil.(in CD)

Lombardo, F.T. (2012). “Improved extreme wind speed estimation for wind engineering applications”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics.*, (108) 278-284.

- Lombardo, F.T., Smith, D.A., Schroeder, J.L., Mehta, K.C. (2014). “Thunderstorm characteristics of importance to wind engineering”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, (125) 121-132.
- Lombardo, F.T., Main, J.A., Simiu, E. (2009). Automated extraction and classification of thunderstorm and non-thunderstorm wind data for extreme-value analysis. *J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics.*, 97(3), 120-131.
- Lombardo, F.T. (2014). Extreme wind speeds from multiple hazards excluding tropical cyclones, *Wind & Struct.* 19, 5, 467-480.
- Lombardo, F.T. Roueche, D.B., Prevatt, D.O. (2015). Comparison of two methods of near-surface wind speed estimation in the 22 May, 2011 Joplin, Missouri Tornado. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, (138) 87-97.
- Fadel Miguel, L.M. & Riera, J.D. (2013):
- Orwig, K.D. and Schroeder, J.L. (2007): “Near-surface wind characteristics of extreme thunderstorm winds”, *J. of Wind Engineering and Struct. Aerodynamics*, **95**, 565-584.
- Oseguera, R.M. And Bowles, R.L. (1988): “A Simple Analytic 3-Dimensional Downburst Model Based on Boundary Layer Stagnation Flow”. *NASA Technical Memorandum 100632*, July 1988.
- Paluch, M.J.; Toazza, A.; Rocha, M.M.; Marroquim, A.I. (2003): “O laboratório anemométrico da Universidade de Passo Fundo”; *III Workshop Brasileiro de Micrometeorologia*; UFSM,
- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, 201-205.
- Paluch, M.J.; Cappellari, T.T.O.; Riera, J.D. (2007): “Experimental and numerical assessment of EPS wind action on long span transmission line conductors” *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier,
- Ponte Jr, Jacinto (2006), “Modelagem e Simulação do Campo de Velocidades do Vento em Tormentas Elétricas” *Tese de Doutorado*. Promec, UFRGS., Porto Alegre, RS, Brasil, 2005.
- Ponte Jr, J., Riera, J.D. (2007), “Wind Velocity Field during Thunderstorms”, *Wind and Structures*, **10**, number 3,
- Ponte, Jr., J. and Riera, J.D. (2010): “Simulation of extreme wind series caused by thunderstorms in temperate latitudes”, *Structural Safety*, **32**, 131-137.
- Puglia, V.B. and Ramires, L. (2010): “Análise de uma tempestade TS”, *Relatório Técnico*, PPGE, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Riera, J. D., Viollaz, A.J. and Reimundin, J.C. (1977): “Some recent results on probabilistic models of extreme wind speeds”, *J. of Industrial Aerodynamics*, Elsevier, The Netherlands, **2**, 271-287.
- Riera, J.D. and Nanni, L.F. (1989): “Pilot study of extreme wind velocities in a mixed climate considering wind orientation”, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier, The Netherlands, **32**, 11-20.
- Riera, J.D., Viegas, F.B. and dos Santos, M.L.W. (1989) “Probabilistic assessment of wind loading for structural analysis”, *Proceedings, 5th International Conference on Structural Safety and Reliability, ICOSSAR’89*, Innsbruck, Austria, Vol. 1, 55-62, A.A. Balkem, Rotterdam, 1989.
- Riera, J.D. and Rocha, M.M. (1998): “Load definition for wind design and reliability assessments; extreme wind climate”, in *Wind Effects on Buildings and Structures*, (J.D. Riera & A.G. Davenport, Editors), A.A. Balkema, Rotterdam, 1998.
- Savory, E.; Parke, G.A.R.; Zeinoddini, M.; Toy, N. and Disney, P. (2001): “Modelling of tornado and microburst-induced wind loading and failure of a lattice transmission tower”, *Engineering Structures*, **23**, 365–375

Simiu, E. and Scanlan, R.H.: *Wind Effects on Buildings and Structures*, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1996.

Solari, G. (2014). Emerging issues and new frameworks for wind loading on structures in mixed climates. *Wind and Structures*, 19(3), 295-320.

Solari, G., Burlando, M., De Gaetano, P., Repetto, M.P. (2015a). Characteristics of thunderstorms relevant to the wind loading of structures, *Wind & Struct.*,

Solari, G., De Gaetano, P., Repetto, M.P. (2015b). Thunderstorm response spectrum: fundamentals and case study, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*,

Solari, G. (2016): "Thunderstorm response spectrum technique: theory and applications". *Engineering Structures*, Elsevier, 108 (2016) 28–46

Thom, H.C.S. (1967): "Toward a universal climatological extreme wind distribution", *Wind Effects on Buildings and Structures*, Ottawa, Canada, Univ. of Toronto Press, Vol. 1, 669-684.

Twisdale, L.A., Vickery, P.J., (1992). Research on thunderstorm wind design parameters. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, (41) 545-556.

Vicroy, D.D.(1991) "A Simple, Analytical, Axisymmetric Microburst Model for Downdraft Estimation", .NASA TM-104053, DOT/FAA/RD, 91/10, Feb-1991.

Vicroy, D.D.(1992), "Assessment of Microburst Models for Downdraft Estimation",. *Journal of Air craft*, **29**, 1043-8

Wood, G.S., and Kwok, C.S.(1998), "An empirically derived estimate for the mean velocity profile of a thunderstorm downburst", 7th AWES Workshop, Auckland, Australia, 1998

Zhu, S. and Etkin, B. (1985): "Model of the wind field in a downburst", in *Journal of Aircraft*, .22, N°7, 595-601, July 1985

Sites references

WW 2010 on line Gides. University of Illinois .

[http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/svr/comp/out/micro/home.rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/svr/comp/out/micro/home.rxml)

ON THE DEFINITION OF WIND TYPES IN BRAZILIAN ABNT NBR 6123 AND OTHER SOUTH AMERICAN WIND CODES

Jorge D. Riera

Abstract

Until the beginning of the XXI Century, the characteristics of wind for purposes of structural analysis and design, as reflected in wind codes worldwide, were based on the behavior of wind currents in the vicinity of the ground surface, observed in so-called synoptic events. The latter are not the only cause of wind damage to buildings and structures. The absence of any reference to non-synoptic winds in most South American wind codes demand their urgent revision to include recent advances in Wind

Engineering. The present paper briefly describes *downbursts*, a relevant meteorological phenomenon that causes extreme winds in the lower atmospheric boundary layer, resulting in extensive damage to engineering constructions in temperate regions and hence deserving specific consideration in pertinent codes. After a review of studies available in the technical literature concerning the probability distribution of extreme values of the wind velocity and an examination of wind velocity records in a series of downburst events, a simplified model is suggested to describe the wind velocity field in this type of meteorological phenomenon, that is, downbursts within instability lines, which appears to be adequate for inclusion in wind codes.

KeyWords: *Wind Action, Structural Design, Synoptic Wind, Downburst, Velocity Field, Risk, Probability of Occurrence.*

INTRODUCTION

Wind loads play an important role in structural design, especially in case of tall or light constructions. Most codes assume that above plane, horizontal ground, the *mean* velocity vector is constant and parallel to the ground surface. The hypothesis is valid in case of so-called synoptic wind, which are the most frequent type of wind storm in temperate regions, namely extra-tropical storms or Extended Pressure Systems (*EPS*) and in case of tropical storms or hurricanes, also designated typhoons when originated in the Pacific Ocean.

On the other hand, wind effects caused by *downdrafts* or *downbursts*, typical of thunderstorms (*TS*), or of combinations of the latter with an *EPS* event, in so-called *instability* or *squall lines*, have not yet been explicitly considered in wind codes in South America. It is germane to underline at this point that the wind velocity field during squall lines is significantly different from the field assumed in most wind codes, usually based on models valid only for synoptic wind. Important differences between wind originated in *EPS* and *TS* events are the following: records of *EPS* winds may be regarded as samples of *random stationary processes*. Moreover, the frequency content of the process depends on the surface roughness of the upwind terrain. None of these assumptions is valid for *TS* winds. As an obvious consequence, methods prescribed in wind codes for assessing the response of structures subjected to *EPS* winds cannot be directly applied to excitation due to *TS* winds.

In temperate regions, *not affected by tropical storms*, around nine out of every ten observations of the maximum annual horizontal component of the wind velocity at the standard 10m height occur during *EPS* events. In consequence, extreme velocities for return periods that exceed 10 years are almost always due to *TS* events, which should then govern structural design, at least for low construction heights. The practical importance of determining the probability distribution of maximum annual velocities caused by *TS* events, independently of *EPS* winds, was underlined by Riera *et al* (1977), but

not yet implemented in South America, to the author's knowledge³. Thom (1967) had suggested earlier the use of a mixed distribution $P_V(v)$ to predict the occurrence in the USA of extreme winds due to *EPS* events and to hurricanes. Later, Riera e Nanni (1989) examining records of 14 weather stations located in southeastern Brazil, concluded that the maximum annual velocities of wind caused by *EPS* or by *TS* phenomena are characterized by *probability distribution functions with different parameters*. It was found for most annual maximum velocity series, the Fisher-Tippett Type I, also known as Gumbel distribution, presented better fit to the data than either the Types II or III extreme value distributions. On the other hand, Type II or Type III distributions often present better fit to the mixed wind series (maximum annual wind velocities regardless of the type of meteorological phenomenon). For prediction purposes in southeastern Brazil, Riera *et al* (1989) employed interpolation functions in triangular or quadrilateral elements with nodes defined by the locations of the weather stations.

Additional evidence on the importance of winds caused by *TS* events was provided by builders or designers of electrical transmission lines. In fact, according to CIGRÉ (2002), in temperate climates worldwide, more than 83% of failures of transmission towers or lines were caused by downbursts. Finally, at the recent *14th ICWE - International Conference on Wind Engineering*, held in 2015, more than 20 contributions dealt with *TS* winds and their effects. Letchford (2015) discusses the possibility of including in wind codes guidelines for designing structures subjected to downbursts, as proposed already by Gomes & Vickery (1978), who are among the firsts researchers that recognized the need to separate wind velocity records according to the causative meteorological phenomenon. Moreover, recent studies confirm that the wind loads that control structural design in most areas of the continental USA are due to *TS* event (Lombardo, 2012; De Gaetano *et al*, 2014). These developments led to the consideration of *TS* winds in the revised map of wind velocities of ASCE Code 7 (2016), following previous advances of the Australia/New Zealand Standard AS / NZS 1170.2.

The frequency of occurrence of *TS* events at more than 1000 weather stations, located mainly at airports, was reported by Lombardo *et al*. (2009). The height above the ground of recording instruments is usually the standard 10m. The records include however various averaging times, from mean velocities over 2 minutes to gusts (mean over roughly 3 s) (Twisdale and Vickery, 1992; Lombardo, 2014).

PROBABILITY DISTRIBUTION OF EPS AND TS EXTREME VELOCITIES

Riera *et al* (1977) endorsed Gomes & Vickery (1976) arguments concerning the need to determine *independently* the probability distribution of the maximum annual wind velocity caused by *TS* events, which should be different from the distribution of extremes of *EPS* events. The basic argument, that the extremes of different meteorological phenomena cannot reasonably be expected to be characterized by *the same* probability distribution, was implicitly adopted by Thom (1967) in the determination of the probability $P_V(v)$ of the mixed population of extra-tropical (*EPS*) and tropical storms, defined by Eq. (1), in which P_T represents the frequency of occurrence of tropical storms within a square area of 5° longitude-latitude and $P_E = 1 - P_T$. Thom (1967) suggests that eq. (1) is valid globally, in regions

³ Ongoing studies at the Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da UFRGS, Porto Alegre, Brazil, aim at achieving this objective. Matthew Vallis, with the direction of A. M. de Loredou Souza, is presently engaged in data collection and processing for the Brazilian territory, both for *EPS* and *TS* events.

affected only by tropical and extra-tropical storms, requiring the determination of the two parameters⁴, P_T and β . Gomes and Vickery (1976), on the other hand, attempted an assessment of the distribution of annual maximum velocities due to *TS* events in terms of the mean number per year n_s of *TS* events in the vicinity of the site of interest. Data recorded at an Australian weather station suggested that a Type I (Gumbel) distribution presented a satisfactory fit. Shortly afterwards, Riera *et al* (1977) obtained the scale and shape parameters of a Fisher-Tippett Type II distribution in terms of the mean number n_s of *TS* events given by eqs. (2) and (3). The Type II distribution is given by eq. (4).

Riera and Nanni (1983) examined series of maximum annual wind velocities of 8 weather stations in southeastern Brazil, in which each record had been carefully classified as either due to a *TS* or *EPS* event. It should be mentioned that extremes in squall lines, in which the causative cumulonimbus cloud responsible for a *TS* is carried by an *EPS* wind, were classified as *TS*. Figure 1 shows the location of the 8 recording stations of the Brazilian Air Force, at the vertices of five regions (elements). Each observation was classified according to the wind direction in eight sectors and meteorological phenomenon (*EPS* or *TS*), which yielded 128 series of extreme velocities of variable length (depending on the station) but none exceeding 50 years. As anticipated in the Introduction, the Type I (Gumbel) distribution showed better fit, both for *EPS* or for *TS* series, but not for the mixed wind series. This is a logical result, if *EPS* and *TS* winds were in fact distributed according to a Type I law (with different parameters), the maxima of the mixed series *cannot be Type I*. It was verified that in such cases, Type II or III distributions may perform better, as shown also by Padaratz (1985). Figure (3) shows the distribution of meteorological stations of the Serviço de Proteção ao Voo (FAB), at the nodes of the five regions (elements) considered by Riera *et al* (1989) in a detailed study on the occurrence of extreme wind velocities in southeastern Brazil. Figure (3) shows a plot of the parameters (mean and standard deviation) observed at the 8 sectors of the Porto Alegre International Airport. It may be seen that mean values of *EPS* and *TS* recorded velocities do not differ perceptibly, but the standard deviations of the latter are much higher, indicating that *TS* velocities (at 10m height) govern design for large return periods.

BASIC CHARACTERISTICS OF THE WIND FIELD IN *TS* AND *EPS* EVENTS

The basic characteristics of the wind produced by *EPS* and *TS* events, which are most relevant meteorological phenomena in the South American continent, will be briefly reviewed in this section. These are the vertical profile of the mean velocity, the characteristics of turbulence, the duration and other features that may influence the static or the dynamic structural response. The objective of this section is to demonstrate, without a shadow of a doubt, that the wind action on any construction *cannot be reasonably defined* by specifying only the horizontal component of the wind velocity at a 10 m height without defining, at the same time, *which is the meteorological phenomenon responsible for the wind*.

Of fundamental interest is the *vertical profile of the mean velocity*. In case of synoptic winds (*EPS* events), as implied by the present version of Norm NBR 6123 (1988), the profile may be represented by a parabolic function with the exponent defined by the upwind terrain roughness, predicting a

⁴ The addition of probabilities in equation (1) requires that the events be mutually exclusive, condition that is satisfied, in principle, by tropical storm winds and winds caused by other meteorological phenomena. The condition is not satisfied, for example, by *EPS* and *TS* events, which may occur simultaneously.

velocity that increases indefinitely with height. The model coincides with recommendations of most other codes, some of which resort to a logarithmic law and may differ marginally in the coefficients adopted for different degrees of roughness. Note that the mean wind velocity is a function of the vertical coordinate z only, *i.e.* it is a one-dimensional field.

On the other hand, the wind velocity field in a downdraft is, generally, a complex 3D function, characterized by axial symmetry *only* when the axis of the downdraft is vertical, case that occurs when the translational velocity is zero. This case implies that the causative cumulonimbus cloud is stationary, and will later be shown to have negligible interest for engineering design. In any case, the vertical profile of the wind velocity is not unique, depending on the position of the downdraft axis in relation to the location of interest. Chen & Letchford (2004) presented a critical assessment of models for *TS* wind profiles available at the time in the technical literature. Oseguera & Bowles (1988) suggest the empirical equation (5) to determine the mean horizontal velocity in downdrafts, in which λ represents a scale factor with dimension $[T]^{-1}$, z_d a characteristic height (within the boundary layer), z_c a characteristic height (outside the boundary layer), r the distance to the cylinder axis and R its radius. Afterwaeds, Vicroy (1992) proposed eq. (6) in which V_{max} denotes the maximum value of the velocity along the profile and z_m is the height where this maximum occurs. Another model, due to Wood & Kwok (1998), is given by eq. (7), in which z_0 denotes the height where the velocity attains *one half* of its maximum value, while Φ represents the normal distribution (Gauss function). Chay *et al* (2006) introduced in eq. (8) a modification of the equation proposed by Vicroy (1991), where λ is a scale factor, α , c_1 and c_2 constants, r the radius, r_p the radius where the maximum velocity occurs, z_m the corresponding height over the ground surface and z a generic height. Vertical profiles proposed in the literature are compared in Figures 4 e 5, which also shows the predictions of the model of Ponte e Riera (2007). The graphs of Figure 5 were normalized for a velocity of 80 m/s at a 67 m height above ground surface. All the models describe well known features of *TS* Wind fields: for instance, the maximum wind velocity is reached at heights below 100m, decreasing more or less rapidly at higher elevations. Large differences between models may be observed, but these should be expected in view of the fact that even for a single, well defined storm, the velocity profile is not unique. The profile resulting from the model of Ponte & Riera (2007) is similar to the profile of Oseguera & Bowles (1988) for distances to the axis of the downdraft close to 100m and to Vicroy's model (1992) for distances around 200m.

The prediction of *TS* wind fields requires, in addition, consideration of the fact that the cloud causing the downdraft is typically in motion, which introduces the need of determining the ratio between the translation velocity of the cloud and the downdraft velocity. A second difference between *EPS* and *TS* wind, mentioned already in the Introduction, is that in the former the incident wind may be modeled as a random stationary process, which is susceptible to analytical formulations. The assumption was introduced in Wing Engineering by A.G. Davenport, who established the basis of procedures widely adopted in design codes for determining the dynamic response of structures subjected to the action of *EPS* turbulent winds. Chapter 6 of NBR 6123 (1989) is included in this group of codes. In this context, Figure (6) presents a record of a synoptic wind, about one hour long, which also shows the 10 min mean velocities, which vary very little within the one hour interval. The intensity of the fluctuating component has similar behavior, permitting its representation as a stationary Gaussian process with zero mean. On the other hand, Figure (7), also reproduced from Solari (2015), presents the record of a *TS* event, which is obviously transient. Davenport's stationary assumption is not applicable to the interval between 15:30 and 15:50 hs, which requires a different approach. Contributions addressing this last problem were recently published by Solari (2014); Solari *et al*, (2015a-c) and Solari (2016).

A second example of features of the wind velocity field during a *TS* event is furnished by Figures 8 and 9. Fig. 8 shows a view of the Universidade de Passo Fundo (RS, Brazil) anemometric station, which is equipped with a 40m tower, with anemometers installed at 10, 20, 30 and 40m above ground surface. Records of cup anemometers at 20, 30 and 40m obtained on 07/11/2007, during passage of a *TS* storm, are shown in Figure 9. The recorded velocity at 40m is possibly affected by the vertical velocity component and is not reliable. Records of the Lubbock-Reese 2002 *TS* event carefully examined by Holmes *et al* (2008) will be reviewed next. Figure 10 shows the evolution with time of the horizontal velocity component observed in four adjacent towers, revealing the occurrence of an *instability line*, in which a *EPS* storm transports the causative cloud with an approximately $V_{EPS} = 15\text{ m/s}$ mean velocity. From the records of Figure 10 the following velocities were obtained: Tower 3: $V_{EPS} = 14\text{ m/s}$, $V_{TS} = 41\text{ m/s}$; Tower 4: $V_{EPS} = 15\text{ m/s}$, $V_{TS} = 39\text{ m/s}$; Tower 5: $V_{EPS} = 13\text{ m/s}$, $V_{TS} = 35\text{ m/s}$; Tower 6: $V_{EPS} = 14\text{ m/s}$, $V_{TS} = 35\text{ m/s}$. Note that V_{TS} denotes the peak velocity registered during the downburst at the height of the recording instrument.

Three additional examples, randomly selected from the 10 wind segments with higher peak velocity recorded in Uruguay and reported by Durañona (2015), are shown on the top line of Figure 11. During the first four hours of all records, the mean wind velocities due to the *EPS* event *that translates the downdraft* are within the 10 to 15 m/s band. The maximum value due to the combined effect of the *EPS* and *TS* events, located at the reference time

$t = 0$, reaches about 40 m/s. Note that Riera and Nanni (1983) classified records of wind extremes similar to those of Figures 7, 9, 10 and 11, as *TS* events. The criteria appears to be widely employed, but deserves further examination. From the top graphs of Figure 11, the following values follow:(from left to right): Record 1, $V_{EPS} = 14\text{ m/s}$, $V_{TS} = 46\text{ m/s}$; Record 2: $V_{EPS} = 13\text{ m/s}$, $V_{TS} = 40\text{ m/s}$; Record 3: $V_{EPS} = 12\text{ m/s}$, $V_{TS} = 40\text{ m/s}$. It is shown in Table 1 that the ratio V_{EPS} / V_{TS} for the records previously examined range from 0.3 to 0.4. Both the mean and the median of the seven records are close to 0.35.

A SIMPLIFIED MODEL OF A SQUALL LINE

As previously discussed, in case of downdrafts caused by stationary clouds, or by clouds that move very slowly, the horizontal wind velocity component at the 10m reference height cannot exceed about 30 m/s (Ponte e Riera, 2007, 2010). Thus, such *typical* upper bound of the velocity would be below the design wind velocity based on records of extra-tropical storms (*EPS* winds) and hence stationary or quasi-stationary downdrafts do not require any specific code consideration (Fadel Miguel e Riera, 2013). Moreover, the risk that a stationary or quasi-stationary downdraft affects an isolated, standard construction is simply negligible. This contention is explained by Figure 12, which shows the *traces* of simulated *TS* events, in a one year period, in the vicinity of a weather station located at the center of a circular 40 km in diameter region. Repeating the process N times, Fadel Miguel e Riera (2013) were able to simulate N terms series of the maximum annual velocity at the location of the weather station. In the one year picture shown, the area covered by the largest squall-line (about 7 km long) is of the order of 100 times *larger* than the areas of the quasi-stationary downdraft. It follows that the probability of any isolated construction being affected by a quasi-stationary downdraft is approximately *two orders of magnitude* smaller than the probability of the same construction being affected by a squall-line and hence, that consideration of the effects of *quasi-stationary downdrafts may be disregarded by the code*.

Now, let V_o denote *the design velocity* for *TS* winds, defined as the horizontal component of the maximum velocity at the standard 10m height above ground level, for a period of exposure and

probability of occurrence defined by the designer, or specified in the wind code. For recurrence periods of 25 years or more, the *TS* wind would *almost certainly* occur in a squall line, in which case the translation velocity of the downburst may be estimated as

$0.35 V_o$, as discussed in the previous section. On a plane normal to the orientation of the squall line, the horizontal component of the mean velocity at the reference height ($z = 10\text{m}$) may be represented by the simplified diagram shown in Figure 13. For static structural analysis or design, only the peak values (V_o or $0.35 V_o$) and associated vertical profiles are needed. Note that outside the band of width b , the vertical profile and other characteristics of the wind correspond to an *EPS* event, as described in Code NBR 6123 and elsewhere. When dynamic effects are expected, within the narrow band of width b only, the evolution with time of the velocity V_o corresponds to the downburst (Figure 14), and may be determined as described next. For such purpose, expressions (9) and (10) proposed by Holmes e Oliver (2000) were employed by the author with satisfactory fit to observed velocity records, and are herein suggested for use in engineering design. The parameter T , known as *characteristic time* of the *TS* event, depends on several factors, such as the height and other geometrical dimensions of the causative cumulonimbus cloud and the translation velocity, typically increasing with the intensity of the event (Ponte e Riera, 2007). The evolution with time of the velocity is shown in Figure 11 for three typical values of T , while recommended values of the parameter T for three *TS* event categories are indicated in Table 2. Finally, within the band of width b , the vertical profile may be determined by the equation (11), proposed by Savory *et al* (2001) for *TS* winds. Note that, employing the heights z_{max} indicated in Table 2, the value of V_{max} may be determined if V_o is specified.

ILLUSTRATIVE EXAMPLE OF DESIGN PROCEDURE

The need to assess the frequency of occurrence of the extreme wind velocity for purposes of structural analysis and design, *for each meteorological phenomenon of relevance* in the region under consideration, was amply justified in previous sections. For regions of the South American continent below the equator, two types of meteorological phenomena cannot be omitted in future codes specifications: (a) extra-tropical storms or so-called *EPS* winds in general and (b) winds caused by downbursts in so-called *squall lines*. The determination of both static and dynamic effects of winds of group (a), including winds caused by tropical storms which may affect the Atlantic coast of Brazil, is well known and constitutes the body of most existing codes on wind effects on structures in general. On the other hand, in spite of its unquestionable relevance, the determination of the response of constructions, in general, to wind in group (b) is still subject of research. Very few codes describe engineering approaches applicable to *TS* winds.

An essential issue in the problem under discussion is the fact that available data bases of the wind climate in general, *regardless of the storm type of interest*, consist of records of the *horizontal component of the wind velocity at a standard 10m height*. The available data allows then the robust prediction of a design velocity V_o at any site of interest, associated to events of groups (a) or (b). In the first case, the design procedure is already established in Wind Engineering. For the second case, a practical engineering approach was suggested in the paper.

The approach follows an inverse path to the usual scheme in the assessment of the effects of tornadoes, in which case a tornado of a given intensity, for example F3 in the Fujita-Pearson scale, is recommended for structural design in a given location. *The wind velocity* as well as other parameters needed to define the wind field (geometrical dimensions, minimum pressure, etc.), are associated to the

intensity scale, *i.e.* defined in the example by the intensity F3. In case of *TS* winds, the velocity V_o would be known, and may be used to define a downburst intensity scale, for which the parameters indicated in Table 2 are herein suggested. Let $V_o = 34$ m/s be the *TS* design wind velocity. According to Table 2, the resulting intensity at the site would be CD 2, with parameters $d = 20$ m, $b = 60$ m, $z_{max} = 40$ m and $T = 120$ s. According to eq. (11) the maximum velocity, which would occur at 40m height is:

$$V_{max} = V(\eta) / [\exp(-0.15 \eta) - \exp(-3.2175 \eta)], \quad \eta = z / z_{max}$$

Since $\eta = z / z_{max}$, for $z = 10$ m we obtain V_o . It follows that $V_{max} = 65.0$ m/s, at a height of 40m. Moreover, this velocity would occur within a channel 20m wide only, decreasing to the velocity defined by $0.35 V_o = 11.9$ m/s at 10m height and the vertical profile defined by the code for *EPS* winds outside the 60m wide stretch. .

The proposed approach allows the determination of the characteristics of the excitation due to *TS* winds on the basis of meteorological data readily available in most south American countries. The assessment of *TS* wind effects might then be immediately accomplished, at least in cases in which the width of the construction is sufficiently smaller than d , assuming that available drag and lift coefficients, usually determined for *EPS* winds, are still applicable.

CONCLUSIONS

Wind Code NBR 6123 (1988) contains technical prescriptions for the determination of actions on buildings and structures subjected to synoptic wind, *i.e.* caused by *EPS* events. Hence it does not differ perceptibly from CIRSOC 102 (2001) and other codes and, with the above mentioned restriction, needs only revision of isolated topics. However, unquestionable evidence that other less frequent meteorological phenomena, such as downbursts, govern wind design velocities in the low probability region (mean recurrence periods above about 25 years) of temperate regions, leads to the conclusion that their explicit consideration in future code revisions cannot be postponed.

Studies to update the distributions of extreme wind velocities in Brazil, taking into account the meteorological phenomenon that causes each event, are presently under way at LAC, UFRGS, Brazil and other research centers. In the paper, a proposal is advanced to allow the description of *TS* wind fields for purposes of structural design. Relevant parameters to define the area subjected to *TS* wind action, the variation of the velocity with height above the ground surface as well as the evolution with time of the wind velocity are suggested for five downdraft categories. These parameters are based on rather limited theoretical and experimental evidence and are subjected to confirmation and/or adjustments as additional data becomes available.