



Ação do vento e ação sísmica para situações de projeto transitórias

Luciano Jacinto

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, ljacinto@dec.isel.ipl.pt

Luís Oliveira Santos

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, luisosantos@lnec.pt

Resumo

Durante os trabalhos de construção de estruturas novas ou de reabilitação de estruturas existentes, pode suceder que a estrutura fique temporariamente vulnerável à ação do vento ou à ação sísmica, exigindo uma verificação da segurança para essa situação específica. No entanto, tratando-se de uma situação de projeto transitória, com duração relativamente pequena em comparação com o período de vida útil de projeto, faz sentido usar nessa verificação um valor característico da ação inferior ao que se usa numa situação de projeto persistente, pois a estrutura ficará exposta a essas ações durante um período limitado de tempo.

Os eurocódigos estruturais contêm disposições que permitem definir a ação do vento e a ação sísmica em função da duração da situação de projeto transitória. Essas disposições encontram-se dispersas em várias partes dos eurocódigos, o que não facilita a sua utilização. Assim, propõe-se nesta comunicação reunir e analisar essas disposições no seu conjunto.

Serão discutidas, em particular, duas questões importantes: (1) como determinar o período de retorno das ações variáveis (vento e sismo) em função da duração da situação de projeto transitória e (2) como quantificar os valores característicos dessas ações em função do período de retorno.

Palavras-chave: Ação do vento; Ação sísmica; Eurocódigos estruturais; Período de retorno; Situação de projeto transitória

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a NP EN 1990 [1], as situações de projeto (SP) transitórias referem-se a condições temporárias, como as que ocorrem durante a construção ou durante a reabilitação das estruturas. Pode suceder que, durante a fase construtiva ou durante a execução dos trabalhos de reabilitação, a estrutura fique particularmente vulnerável à ação do vento ou à ação sísmica, o que obriga a uma verificação específica da segurança. É o caso, por exemplo, das pontes construídas por consolas sucessivas, as quais, antes da execução das aduelas de fecho e do apoio do tabuleiro nos encontros, estão particularmente vulneráveis a essas ações (Figura 1).



Figura 1. As pontes construídas por avanços em consola estão particularmente vulneráveis à ação do vento e ação sísmica durante a construção

Tratando-se, porém, de situações temporárias, com duração pequena em comparação com a duração de vida útil de projeto, faz sentido usar nessas verificações de segurança valores característicos da ação do vento e da ação sísmica inferiores aos que se utilizam nas SP persistentes, pois a estrutura ficará exposta a essas ações durante um período limitado de tempo.

Em relação à ação do vento, a possibilidade de a reduzir numa SP transitória está implícita na NP EN 1990 [1], Cl. 4.1.2(7), Nota 2: «O valor característico das ações climáticas baseia-se na probabilidade de 0,02 de ser excedida a sua parte variável no tempo durante um período de referência de um ano. Tal é equivalente, para a parte variável no tempo, a um período médio de retorno de 50 anos. Porém, em certos casos, a natureza da ação e/ou a situação de projeto pode implicar outro quantilho e/ou período de retorno, mais apropriados».

Em relação à ação sísmica, essa possibilidade também está prevista na NP EN 1998-1 [2]. A Cl. 5.11.1.5(1) dessa Norma refere que «Durante a montagem de uma estrutura, que deverá incluir contraventamento provisório, não é necessário considerar a ação sísmica como uma situação de projecto. No entanto, sempre que a ocorrência de um sismo possa produzir o colapso de partes da estrutura com graves riscos para a vida humana, os contraventamentos provisórios deverão ser projectados para uma ação sísmica adequadamente reduzida». Esta cláusula deixa assim em aberto a possibilidade de não considerar a ação sísmica durante a fase construtiva; no entanto, se se justificar a sua consideração, o valor da ação deve ser reduzido.

O problema da determinação de valores característicos «mais apropriados» para SP transitórias pode ser dividido em dois problemas principais: (1) que período de retorno se deve utilizar na quantificação dessas ações, função da duração da SP e (2) como calcular o valor característico dessas ações em função do período de retorno desejado. O presente artigo analisa estas duas questões.

2 CONCEITO DE PERÍODO DE RETORNO

O período de retorno de um evento é, recorde-se, a duração média entre ocorrências sucessivas desse evento. Aplicando esta definição ao valor característico de uma ação variável, pode demonstrar-se que o período de retorno, T_R , do valor da ação que tem uma probabilidade p_{e1} de ser excedido em 1 unidade de tempo é o inverso dessa probabilidade [3], isto é:

$$T_R = \frac{1}{p_{e1}} \quad (1)$$

Assim, por exemplo, o valor de uma ação variável que tem uma probabilidade de 0,02 de ser excedido em 1 ano possui um período de retorno de $1/0,02 = 50$ anos, isto é, ocorre em média de 50 em 50 anos.

Mais genericamente, o período de retorno de uma ação variável correspondente a uma probabilidade p_{en} de ser excedido em n unidades de tempo é dado por:

$$T_R = \frac{1}{1 - (1 - p_{en})^{1/n}} \quad (2)$$

Assim, por exemplo, o valor de uma ação com uma probabilidade de 0,10 de ser excedido em 50 anos possui um período de retorno de $1 / (1 - (1 - 0.10)^{1/50}) = 475$ anos. Note-se que a Eq. (1) pode ser encarada como um caso particular da Eq. (2). Efetivamente, se fizermos $n = 1$ nesta última, obtém-se a primeira. O período de retorno é expresso nas unidades de tempo a que se refere o parâmetro n .

3 PERÍODO DE RETORNO A CONSIDERAR EM SITUAÇÕES DE PROJETO TRANSITÓRIAS

Os períodos de retorno a usar na quantificação da ação do vento e da ação sísmica devem ser ajustados à duração da SP transitória. No caso específico de trabalhos na fase construtiva, a EN 1991-1-6 [4] recomenda, para ações climáticas (ação do vento, ação da neve e variações de temperatura), os períodos de retorno indicados na Tabela 1.

Tabela 1. Períodos de retorno recomendados pela EN 1991-1-6 para a determinação dos valores característicos de ações climáticas

<i>Duração da situação de projeto</i>	<i>Período de retorno [anos]</i>
<i>≤ 3 dias</i>	<i>2</i>
<i>≤ 3 meses (mas > 3 dias)</i>	<i>5</i>
<i>≤ 1 ano (mas > 3 meses)</i>	<i>10</i>
<i>> 1 ano</i>	<i>50</i>

Não é claro o critério utilizado na obtenção desses períodos de retorno. Por exemplo, para uma SP com duração de 3 meses, o período de retorno recomendado é de 5 anos, que corresponde a uma probabilidade de excedência em 3 meses de 0,05. Mas, para uma duração de 1 ano, o período de retorno recomendado (10 anos) corresponde a uma probabilidade de excedência em 1 ano de 0,10,

ou seja, o dobro da probabilidade anterior. Verifica-se assim que os períodos de retorno recomendados na EN 1996-1-6 não correspondem à mesma probabilidade de excedência nas diferentes situações, o que se traduz em níveis distintos de fiabilidade nessas situações. Em todo o caso, trata-se de recomendações e, como reconhecido pela própria Norma, os valores podem ser definidos para cada projeto individual.

Naturalmente, outras probabilidades de excedência conduzirão a outros períodos de retorno. A título de exemplo, a Tabela 2 mostra valores de períodos de retorno para diferentes durações da SP, tendo-se considerado em todos os casos uma probabilidade de excedência de 0,05 durante a situação transitória (considerou-se $p_{en} = 0,05$ na Eq. (2)).

Tabela 2. Períodos de retorno correspondentes a uma probabilidade de excedência de aproximadamente 0,05 durante a SP transitória

<i>Duração da situação de projeto</i> <i>[meses]</i>	<i>Período de retorno</i> <i>[anos]</i>
1	2
3	5
6	10
9	15
12	20

4 VALORES CARACTERÍSTICOS PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO

4.1 Ação do vento

A variável básica mais importante para a quantificação da ação do vento nas estruturas é a sua velocidade. Para efeitos da determinação da velocidade do vento, o País é dividido em duas zonas, a saber:

- Zona A: a generalidade do território, exceto as zonas pertencentes à zona B.
- Zona B: os arquipélagos dos Açores e da Madeira, e as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 km de largura ou com altitudes superiores a 600 m.

A cada uma destas zonas corresponde um valor da velocidade do vento, chamado *valor básico da velocidade de referência* e representado na NP EN 1991-1-4 [5] por $v_{b,0}$. De acordo com essa Norma, a velocidade $v_{b,0}$ é a velocidade média em períodos de 10 min, em campo aberto e a uma altura de 10 m acima do terreno, com uma probabilidade anual de ser excedida igual a 0,02. Trata-se assim de uma velocidade com um período de retorno $1/0,02 = 50$ anos. A Tabela 3 mostra os valores da velocidade $v_{b,0}$ especificados no Anexo Nacional do referida Norma.

Tabela 3. Valor básico da velocidade de referência do vento, $v_{b,0}$

Zona	$V_{b,0}$ [m/s]
A	27
B	30

O Anexo Nacional da NP EN 1991-1-4 [5] contém disposições suficientes para a quantificação da velocidade do vento em função do período de retorno. De acordo com esse Anexo, pode admitir-se que os máximos anuais da velocidade de referência do vento seguem a distribuição Gumbel. Ora, como se sabe, a inversa da distribuição Gumbel com parâmetros u e α é dada por: $F_X^{-1}(x) = u - (1/\alpha)\ln(-\ln x)$. Assim, o valor característico da velocidade de referência do vento correspondente a uma probabilidade de excedência p_{e1} em 1 ano é igual a:

$$\begin{aligned} v_b(p_{e1}) &= u_1 - \frac{1}{\alpha} \ln(-\ln(1 - p_{e1})) \\ &= u_1 \left[1 - \frac{1}{\alpha u_1} \ln(-\ln(1 - p_{e1})) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

onde u_1 e α são os parâmetros da distribuição dos máximos anuais da velocidade de referência do vento.

Em particular, para $p_{e1} = 0,02$, obtém-se a velocidade $v_{b,0}$, ou seja:

$$v_{b,0} = u_1 \left[1 - \frac{1}{\alpha u_1} \ln(-\ln(0,98)) \right] \quad (4)$$

Dividindo (3) por (4) obtém-se:

$$\frac{v_b(p_{e1})}{v_{b,0}} = \frac{1 - \frac{1}{\alpha u_1} \ln(-\ln(1 - p_{e1}))}{1 - \frac{1}{\alpha u_1} \ln(-\ln(0,98))} \quad (5)$$

De acordo com o Anexo Nacional da NP EN 1991-1-4, Portugal adotou $1/(\alpha u_1) = 0,11$ (a que corresponde um coeficiente de variação dos máximos anuais de 0,13), pelo que:

$$\begin{aligned} v_b(p_{e1}) &= \frac{1 - 0,11 \ln(-\ln(1 - p_{e1}))}{1 - 0,11 \ln(-\ln(0,98))} v_{b,0} \\ &= [0,7 - 0,077 \ln(-\ln(1 - p_{e1}))] v_{b,0} \end{aligned} \quad (6)$$

Mas, $p_{e1} = 1/T_R$, pelo que:

$$v_b(T_R) = \underbrace{\left[0,7 - 0,077 \ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T_R} \right) \right) \right]}_c \cdot v_{b,0} \quad (7)$$

Esta expressão permite determinar o valor de referência da velocidade do vento em função do período de retorno pretendido. O período de retorno deve ser expresso em anos, pois os parâmetros

da distribuição Gumbel usada referem-se aos máximos anuais. Observe-se que, para $T_R = 50$ anos, obtém-se $c = 1$, ou seja, $v_b(50\text{anos}) = v_{b,0}$, como não podia deixar de ser.

A Tabela 4 mostra os valores do coeficiente c para os períodos de retorno recomendados pela EN 1991-1-6 [4]. Indica-se também o quadrado desse coeficiente, que corresponde ao fator a aplicar à pressão dinâmica do vento, que, como se sabe, é proporcional ao quadrado da velocidade.

Tabela 4. Coeficiente c da Eq. (7) para situações de projeto com diferentes durações

<i>Duração da situação de projeto</i>	<i>Período de retorno [anos]</i>	<i>c</i>	<i>c²</i>
<i>≤ 3 dias</i>	<i>2</i>	<i>0,73</i>	<i>0,53</i>
<i>≤ 3 meses (mas > 3 dias)</i>	<i>5</i>	<i>0,82</i>	<i>0,67</i>
<i>≤ 1 ano (mas > 3 meses)</i>	<i>10</i>	<i>0,87</i>	<i>0,76</i>
<i>> 1 ano</i>	<i>50</i>	<i>1,00</i>	<i>1,00</i>

Assim, por exemplo, para uma SP transitória com a duração de 3 meses, quantificando a ação do vento para o período de retorno recomendado (5 anos), tal corresponde à adoção de uma velocidade de 0,82 da velocidade adotada em situações normais, o que se traduz numa pressão dinâmica de 0,67 da pressão utilizada em situações normais (SP persistente).

4.2 Ação sísmica

No dimensionamento das estruturas em Portugal devem ser considerados dois tipos de sismo, designados sismo tipo 1 e sismo tipo 2. O sismo tipo 1, também designado sismo afastado, é rico em baixas frequências, sendo por isso mais penalizante para estruturas flexíveis e o sismo tipo 2, também designado sismo próximo, é rico em altas frequências, sendo por isso mais severo para estruturas rígidas. No continente, a ação sísmica tipo 1 corresponde a sismos com epicêntrico na região atlântica, e a ação sísmica tipo 2 a sismos com epicentros no território continental. Nos Açores apenas é relevante o sismo tipo 2 (sismo próximo) e na Madeira apenas o sismo tipo 1 (sismo afastado) é relevante.

A variável básica principal para a quantificação da ação sísmica é a aceleração máxima (ou de pico) durante a ocorrência do sismo, observada à superfície de terreno rochoso numa dada localidade. Esta aceleração depende, entre outros fatores, da sismicidade do local. O valor dessa aceleração com uma probabilidade de 0,10 de ser excedido em 50 anos é designada na NP EN 1998-1 por *aceleração de referência* e representada na referida Norma por a_{gR} . Trata-se assim de um valor com um período de retorno de 475 anos.

Para efeitos da determinação dessa aceleração, o território nacional está dividido em 11 zonas sísmicas, 6 zonas para a ação sísmica tipo 1 e 5 zonas para a ação sísmica tipo 2. A cada uma destas zonas corresponde um valor da aceleração de referência, a_{gR} .

Para efeitos da determinação da ação sísmica em SP transitórias é relevante a Cl. 5.11.1.5 da NP EN 1998-1 [2], segundo a qual, na falta de estudos especiais e caso se justifique considerar a ação sísmica, poderá considerar-se esta ação com valor igual a 30% do valor que se utiliza em situações

normais, independentemente da duração da SP. Esta cláusula insere-se na NP EN 1998-1 [2], visando assim fundamentalmente estruturas de edifícios.

No caso das pontes, o Anexo A da EN 1998-2 [6] contém uma metodologia para a determinação da ação sísmica durante a fase construtiva. Essa metodologia, que se descreve de seguida, tem por base a Nota da Cl. 2.1(4) da NP EN 1998-1 [2], segundo a qual poderá considerar-se que a taxa anual de excedência, $H(a_{gR})$, do valor da aceleração de referência a_{gR} é aproximadamente dada por $H(a_{gR}) \approx k_0 a_{gR}^{-k}$, onde k é uma constante, função da sismicidade do local. Note-se que essa expressão é válida para outros níveis de aceleração de pico, a_g , e não apenas a_{gR} , podendo, pois, escrever-se:

$$H(a_g) \approx k_0 a_g^{-k} \quad (8)$$

Em Portugal, de acordo com estudos de perigosidade sísmica [2], a constante k tem os valores que se indicam na Tabela 5.

Tabela 5. Valores da contante k da Eq. (8) [2]

Ação sísmica	k
Tipo 1	1,5
Tipo 2, Continente	2,5
Tipo 2, Açores	3,6

Ora, o período de retorno T_R (em anos) é aproximadamente igual ao inverso da taxa anual de excedência, donde $T_R = (1/k_0) a_g^k$. Desenvolvendo esta expressão em ordem a a_g , obtém-se:

$$a_g(T_R) = (k_0 T_R)^{1/k} \quad (9)$$

Por outro lado, a aceleração de referência a_{gR} refere-se ao período de retorno de 475 anos, isto é, $a_{gR} = a_g(475\text{anos})$, ou seja:

$$a_{gR} = (k_0 475)^{1/k} \quad (10)$$

Dividindo (9) por (10) obtém-se uma expressão útil que permite determinar a aceleração do terreno em função do período de retorno:

$$a_g(T_R) = \underbrace{\left(\frac{T_R}{475} \right)^{1/k}}_c a_{gR} \quad (11)$$

O Anexo A da EN 1998-2 [6] refere que o período de retorno a considerar deve corresponder a uma probabilidade de excedência máxima durante a fase construtiva de 0,05.

Esta é, na essência, a metodologia prevista no referido Anexo para a determinação da ação sísmica em pontes durante a fase construtiva. O parâmetro chave para a aplicação desta metodologia é o coeficiente k . De acordo com o referido Anexo, podem ser usados valores de k entre 1/0,40 e 1/0,30, ou seja, entre 2,5 e 3,3. É claro que o coeficiente k depende da sismicidade do local, pelo que a sua escolha deveria variar de país para país (e dentro de cada país, de local para local).

A título de exemplo, considere-se uma ponte nos Açores, construída por consolas sucessivas, cujo tabuleiro vai ser construído em 9 meses. Quantificando a ação sísmica para uma probabilidade de excedência de 0,05 em 9 meses, tal equivale a um período de retorno de $1/[1-(1-0.05)^{1/9}] \approx 176$ meses, que corresponde aproximadamente a 15 anos. Para este período de retorno e para $k = 3.6$ (sismo tipo 2 nos Açores), obtém-se $a_g = (15/475)^{1/3.6} a_{gR} = 0.38 a_{gR}$. Ou seja, a segurança na fase construtiva seria verificada para uma ação sísmica igual a 38% da ação considerada na verificação da segurança da estrutura durante a sua vida útil.

Como ilustrado neste exemplo, a metodologia descrita no Anexo A da EN 1998-2 é muito fácil de aplicar. Chama-se, no entanto, à atenção para os limites de validade do coeficiente k . De acordo com o documento «Elaboration of maps for climatic and seismic actions for structural design with the Eurocodes» [7], e as referências aí citadas, o referido coeficiente corresponde uma aproximação linear das curvas de perigosidade sísmica (em escala duplamente logarítmica) na gama de períodos de retorno entre 70 e 5000 anos, nas quais a referida aproximação é aceitável. Isto significa que poderá não ser aconselhável usar a metodologia descrita acima no cálculo da ação sísmica para períodos de retorno inferiores a 70 anos, embora a Norma nada refira a respeito desta limitação. Espera-se que em futuras revisões dos eurocódigos este aspeto seja acautelado. Naturalmente, um cálculo mais fiável exigirá a determinação da curva de perigosidade sísmica específica para o local onde se situa a estrutura em estudo.

5 CONCLUSÕES

A eventual vulnerabilidade de uma estrutura à ação do vento ou à ação sísmica durante a sua construção ou durante a sua reabilitação torna necessário ter em consideração a verificação da segurança nestas condições. Contudo, tratando-se de SP transitórias, é legítimo reduzir a ação do vento e do sismo nessas verificações. Esta redução faz sentido e está prevista nos eurocódigos.

No caso da ação do vento (e das restantes ações climáticas), a EN 1991-1-6 recomenda valores do período de retorno a considerar na sua quantificação, em função da duração da SP, e o Anexo Nacional da NP EN 1991-1-4 contém elementos suficientes para a determinação da velocidade de referência do vento em função do período de retorno.

No caso da ação sísmica, se se justificar a sua consideração durante a SP transitória, o Anexo A da EN 1998-2 descreve uma metodologia que permite a determinação do valor da ação a usar na fase construtiva. Porém, como se viu, existem dúvidas sobre a aplicabilidade da metodologia para períodos de retorno baixos. Uma determinação mais fiável passará sempre por recorrer a curvas de perigosidade sísmica específica para o local onde se situa a estrutura em análise.

REFERÊNCIAS

- [1] NP EN 1990 (2009). Eurocódigo — Bases para o projecto de estruturas. IPQ, Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- [2] NP EN 1998-1 (2010). Eurocódigo 8 — Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios. IPQ, Instituto Português da Qualidade, Caparica.

- [3] Ang, A. H. & Tang, W. H. (2007). Probability Concepts in Engineering. John Wiley & Sons, Chichester, 2nd Editions.
- [4] EN 1991-1-6 (2005). Eurocode 1 — Actions on structures. Part 1-6: General actions — Actions during execution. CEN, European Committee for Standardization, Brussels.
- [5] NP EN 1991-1-4 (2010). Eurocódigo 1 — Acções em estruturas. Parte 1-4: Acções gerais. Acções do vento. IPQ, Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- [6] EN 1998-2 (2005). Eurocode 8 — Design of structures for earthquake resistance. Part 2: Bridges. CEN, European Committee for Standardization, Brussels.
- [7] Formichi, P. *et al.* (2016). Elaboration of maps for climatic and seismic actions for structural design with the Eurocodes. JRC Science for Policy Report. Ispra, Italy.