



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil



Acção do Vento em Pontes – Estudo Comparativo RSA/NP EN 1991-1-4

JOÃO FILIPE FERNANDES LOBATO DAS NEVES
Licenciado em Engenharia Civil

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na
Área de Especialização em Estruturas

Orientador:

Doutor Luciano Alberto do Carmo Jacinto (Prof. Adjunto do ISEL)

Júri:

Presidente: Mestre Cristina Ferreira Xavier Brito Machado (Prof.^a
Coordenadora do ISEL)

Vogais:

Doutora Paula Raquel Pires da Cunha Lamego (Prof.^a Adjunta
Convidada do ISEL)

Doutor Luciano Alberto do Carmo Jacinto (Prof. Adjunto do ISEL)

Dezembro de 2015

Acção do Vento em Pontes – Estudo Comparativo RSA/NP EN 1991-1-4

Resumo

O presente trabalho pretende aprofundar o estudo da acção do vento, analisando a quantificação da sua acção a pontes reais. Consiste na discussão da aplicação da norma NP EN 1991-1-4 (Eurocódigo 1 – Acções em estruturas; Parte 1-4: Acções gerais; Acções do vento) e na discussão das diferenças dos resultados obtidos em relação ao Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA), nomeadamente quanto aos valores característicos da acção do vento.

São explicados os principais factores que influenciam a acção do vento em pontes, referenciando diversos estudos recentes e baseando-se nos regulamentos em análise.

É feito um estudo cuidadoso na quantificação da acção do vento segundo o RSA e segundo a NP EN 1991-1-4, em que se discutem e analisam as diferenças encontradas. Em seguida quantifica-se a acção do vento em exemplos reais, usando os dois regulamentos.

A comparação dos resultados obtidos permite verificar que, no caso específico de Portugal, apesar do período de retorno da NP EN 1991-1-4 ser bastante inferior ao do RSA, no Anexo Nacional da NP EN 1991-1-4 os valores relativos à quantificação da acção do vento, nomeadamente no valor básico da velocidade de referência, nas categorias de rugosidade do terreno e nos valores característicos da pressão dinâmica da NP EN 1991-1-4, são da mesma ordem de grandeza ou até superiores aos apresentados no RSA.

Wind Action on Bridges - Comparative Study RSA/NP EN 1991-1-4

Abstract

The present work has the goal of a further study of the action of the wind, analyzing the quantification of their action to real bridges. It consists in the discussion of the application of the norm NP EN 1991-1-4 (Eurocode 1 – Actions on structures; Part 1-4: General actions; Wind actions) and the discussion in the differences of the results obtain by the RSA (Buildings and Bridges Safety and Actions Design Code), regarding to the characteristic values of the wind action.

It is explained the major factors that influence the action of the wind in bridges, on which are referenced by several recent studies. There is still one explanation, concerning to the regulations in study that make to the referred factors.

It is made a careful study in the quantification of the action of the wind according to the RSA and the NP EN 1991-1-4. The differences found are discussed and analyzed. Then, the wind action is quantified to real examples, using the two norms (RSA and NP EN 1991-1-4).

The comparison of the results obtained allow to verify that, in the specific case of Portugal, despite the return period of the NP EN 1991-1-4 being far lower than the RSA, in the National Annex of the NP EN 1991-1-4 the characteristic values of the wind action, particularly in the basic value of the reference wind speed, terrain roughness categories and in the characteristic values of peak velocity pressure of the NP EN 1991-1-4, are the same order of magnitude or even higher than those presented in the RSA.

Palavras-Chave/Keywords

Pontes/Bridges;

Exemplos reais/Real examples;

Acção do vento/Wind action;

Período de retorno/Return period

Fiabilidade/Reliability

Eurocódigo 1 – Acções em estruturas; Parte 1-4: Acções gerais; Acções do vento/
Eurocode 1 – Actions on structures; Part 1-4: General actions; Wind actions;

Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes/ Buildings and
Bridges Safety and Actions Design Code;

Estudo comparativo/Comparative study.

Agradecimentos

Agradeço ao Engenheiro Luciano Jacinto, orientador da minha dissertação, pela disponibilidade, apoio prestado, paciência e partilha de conhecimentos e informação, fundamentais para a sua realização.

À minha mãe, pai, irmã, agradeço pelo incansável apoio incondicional, incentivo e força, indispensáveis para as minhas formações académica e pessoal.

À minha namorada Sofia, agradeço a empatia, compreensão e carinho com que sempre me apoiou.

A todos os meus colegas e amigos, agradeço todo o apoio prestado e companheirismo dedicado na realização do curso ao longo destes anos.

Índice de conteúdos

Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1. Considerações gerais.....	1
1.2. Objectivos do trabalho	9
1.3. Estrutura do trabalho	10
Capítulo 2.....	11
Quantificação da acção do vento segundo a NP EN 1991-1-4.....	11
2.1. Considerações iniciais.....	11
2.2. Zonamento do território	14
2.3. Rugosidade aerodinâmica do terreno	15
2.4. Velocidade do vento e pressão dinâmica	17
2.5. Acções do vento	22
2.6. Coeficiente estrutural $C_s C_d$	26
2.7. A acção do vento em pontes.....	27
2.7.1. Acção do vento no tabuleiro.....	27
2.7.1.1. Coeficientes de força na direcção x (método geral).....	29
2.7.1.2. Forças na direcção x - Método simplificado	34
2.7.2. Acção do vento nos pilares.....	36
Capítulo 3.....	38
Quantificação da Acção do vento segundo o RSA.....	38
3.1. Considerações iniciais.....	38
3.2. Zonamento do território	39
3.3. Rugosidade aerodinâmica do solo.....	39
3.4. Quantificação da acção do vento.....	40
3.4.1. Velocidade média do vento	40
3.4.2. Valores reduzidos da velocidade média do vento	42
3.5. Altura acima do solo a considerar no caso de terrenos inclinados	43
3.6. Determinação dos efeitos da acção do vento.....	44
3.7. Pressão dinâmica do vento	45
3.8. Coeficientes de forma.....	47
3.8.1. Coeficientes de pressão	48
3.8.2. Coeficientes de força.....	48

3.9. Pontes. Coeficientes de força	48
Capítulo 4.....	51
Análise comparativa RSA/EC1.....	51
4.1. Velocidade média do vento	51
4.2. Rugosidade do terreno.....	52
4.3. Pressão dinâmica de pico	53
4.4. Valores Reduzidos da pressão dinâmica	54
4.5. Interpretação dos resultados	54
Capítulo 5.....	55
Casos Práticos	55
5.1. Aplicações	55
5.1.1. Considerações iniciais	55
5.1.2. Exemplos aplicativos:	56
5.1.3. Comparação de resultados.....	66
5.2. Viaduto do Covelo	67
5.2.1. Considerações iniciais	67
5.2.2. Resolução	70
5.2.3. Comparação de resultados.....	78
Capítulo 6.....	79
Conclusões.....	79
Referências Bibliográficas	81

Índice de Figuras

Figura 1 – Movimentos de torção no tabuleiro central um pouco antes da queda (Guerra, João Martins. Acção do vento, 2008)	1
Figura 2 – Movimento de torção máximo no tabuleiro central antes do colapso do tabuleiro (Guerra, João Martins. Acção do vento, 2008)	2
Figura 3 – Queda do primeiro elemento de betão (Guerra, João Martins. Acção do vento, 2008)	2
Figura 4 – Flecha a meio vão do tabuleiro antes da queda (Guerra, João Martins. Acção do vento, 2008)	3
Figura 5 - Colapso do tabuleiro (Guerra, João Martins. Acção do vento, 2008)	3
Figura 6 – Velocidade média e de pico num perfil de velocidade (Leonardo da Vinci Pilot Project, HANDBOOK 3)	13
Figura 7 – Ilustração do aumento da velocidade do vento devido à orografia (EC1 – Anexo A.3, Fig. A.1)	19
Figura 8 – Representação do coeficiente de exposição $c_e(z)$ para $c_o=1,0$ e $k_1=1,0$ (EC1, Fig. 4.2)	21
Figura 9 – Ilustração das pressões/sucções exercidas em superfícies (EC1, Fig. 5.1)	25
Figura 10 – Secções transversais de tabuleiros de construção corrente (EC1, Fig. 8.1)	27
Figura 11 – Direcções das acções do vento em pontes (EC1, Fig. 8.2)	28
Figura 12 – Representação da altura de referência z_e , entre o nível mais baixo do solo e o nível central da estrutura do tabuleiro da ponte (H. Gulvanessian, (2010). Designers' guide to Eurocode 1: Actions on Bridges, p.22)	30
Figura 13 – Coeficiente de força $c_{fx,0}$ para tabuleiros de pontes (EC1, Fig. 8.3)	31
Figura 14 – Tabuleiro com a face exposta ao vento inclinada (EC1, Fig. 8.4)	32
Figura 15 – Altura a considerar para $A_{ref,x}$ (EC1, Fig. 8.5)	32
Figura 16 – Perfil de pressões dinâmicas a adoptar em pilares (H. Gulvanessian, (2010). Designers' guide to Eurocode 1: Actions on Bridges, p.28)	37
Figura 17 – Determinação da altura h , acima do solo, necessária para ter em consideração a configuração do mesmo (RSA, Fig. 1-1)	43
Figura 18 – Equação Piezométrica de Bernoulli (Guerra, João Martins. Acção do vento, 2008)	45
Figura 19 – Valor característico da pressão dinâmica, w_k (RSA, Fig. 1)	47
Figura 20 – Pressões dinâmicas para a zona A segundo o RSA e segundo o EC1 (Jacinto, Luciano. Acção do vento: quantificação de acordo com o EC1)	53
Figura 21 – Exemplo do cálculo da acção do vento segundo o RSA	56
Figura 22 – Acção do vento na sobrecarga	57
Figura 23 – Forças estáticas, equivalentes à acção do vento para o exemplo aplicativo segundo o RSA	57
Figura 24 – Exemplo do cálculo da acção do vento segundo o EC1	58
Figura 25 – Representação forças resultantes da acção do vento no tabuleiro para a situação sem carga de tráfego	59
Figura 26 – Representação forças resultantes da acção do vento no tabuleiro para a situação com carga de tráfego	62

Figura 27 – Coeficiente de força $c_{f,0}$ para cilindros de base circular sem livre escoamento em torno das extremidades e para diferentes valores da rugosidade equivalente k/b (EC1, Fig. 7.28)	64
Figura 28 – Forças estáticas, equivalentes à acção do vento para o exemplo aplicativo segundo o EC1.....	66
Figura 29 – Extensão dos viadutos no Trecho 2 – Nó A32/A41 / Aguiar de Sousa (Parecer da Comissão de avaliação. Conformidade do projecto de execução com a DIA – A41 – Picoto (IC2) / Nó da Ermida (IC25) – Trecho 2 – Nó A32/A41 / Aguiar de Sousa, 2008)	67
Figura 30 – Planta e Perfil Longitudinal do viaduto do Covelo na faixa da direita (Rito, Armando. Projecto de Execução do Viaduto do Covelo, 2008)	67
Figura 31 – Planta do viaduto do Covelo em pormenor (Rito, Armando. Projecto de Execução do Viaduto do Covelo, 2008).....	68
Figura 31 – Alçado do viaduto do Covelo (Rito, Armando. Projecto de Execução do Viaduto do Covelo, 2008)	68
Figura 33 – Dimensionamento do tabuleiro do viaduto do Covelo. (Rito, Armando. Projecto de Execução do Viaduto do Covelo, 2008).....	69
Figura 34 – Dimensionamento dos pilares do viaduto do Covelo. (Rito, Armando. Projecto de Execução do Viaduto do Covelo, 2008).....	70
Figura 35 – Acção do vento na sobrecarga	71
Figura 36 – Forças estáticas, equivalentes à acção do vento para o viaduto do Covelo segundo o RSA	72
Figura 35 – Coeficiente de força $c_{f,0}$ para secções rectangulares com arestas vivas e sem livre escoamento em torno das extremidades do elemento (EC1, Fig. 7.23).....	76
Figura 36 – Coeficiente de redução ψ_r para uma secção transversal quadrada com cantos arredondados (EC1, Fig. 7.24)	76
Figura 37 – Dimensionamento dos pilares do viaduto do Covelo, corte pelo fuste e Pormenor “A”. (Rito, Armando. Projecto de Execução do Viaduto do Covelo, 2008)	77
Figura 40 – Forças estáticas, equivalentes à acção do vento para o viaduto do Covelo segundo o EC1.....	78

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Valor básico da velocidade de referência do vento (NP EN 1991-1-4 – Anexo Nacional NA, Quadro NA.I).....	14
Tabela 2 – Efeitos do terreno – Ilustrações da rugosidade máxima de cada categoria do terreno (EC1-Parte1-1 – Anexo A, Quadro A.1)	15
Tabela 3 – Categorias de terreno e respectivos parâmetros (EC1 – Anexo Nacional NA, Quadro NA–4.1).....	16
Tabela 4 – Procedimentos de cálculo para a determinação das acções do vento (NP EN 1991-1-4, Quadro 5.1)	22
Tabela 5 – Altura d_{tot} a considerar para $A_{ref,x}$ (EC1, Quadro 8.1).....	33
Tabela 6 – Valores recomendados do coeficiente de força C para pontes (EC1, Quadro 8.2) ...	35
Tabela 7 - Valores característicos da velocidade média do vento (Guerra, João Martins. Acção do vento, 2008)	42
Tabela 8 – Coeficientes de força para construções fechadas de forma cilíndrica ou prismática (RSA, Quadro I-XIII).....	49
Tabela 9 – Comparação entre as categorias do terreno no RSA e no EC1.....	52
Tabela 10 – Rugosidade superficial equivalente k (EC1, Quadro 7.13).....	63
Tabela 11 – Esbelteza efectiva λ (EC1 – Anexo Nacional NA, Quadro NA–7.16)	65

Capítulo 1.

Introdução

1.1. Considerações gerais

A acção do vento nas pontes, não sendo em muitos casos uma acção determinante, é sem dúvida uma acção importante a ser considerada, como prova o colapso de algumas pontes devido à mesma. Veja-se o caso da ponte sobre o Estreito de Tacoma. Após a sua abertura ao tráfego, começou a balançar sempre que o vento era mais forte. No dia 7 de Novembro de 1940 a ponte entrou em ressonância. Inicialmente, começou a vibrar em modos longitudinais, ou seja, ao longo do seu comprimento, e pouco tempo depois apareceram os “modos torsionais”, nos quais a ponte balançava para os lados, sofrendo efeitos de torção [1].

Durante ressonância, a amplitude destes modos torsionais aumentou de tal ordem que a ponte acabou por colapsar [1].

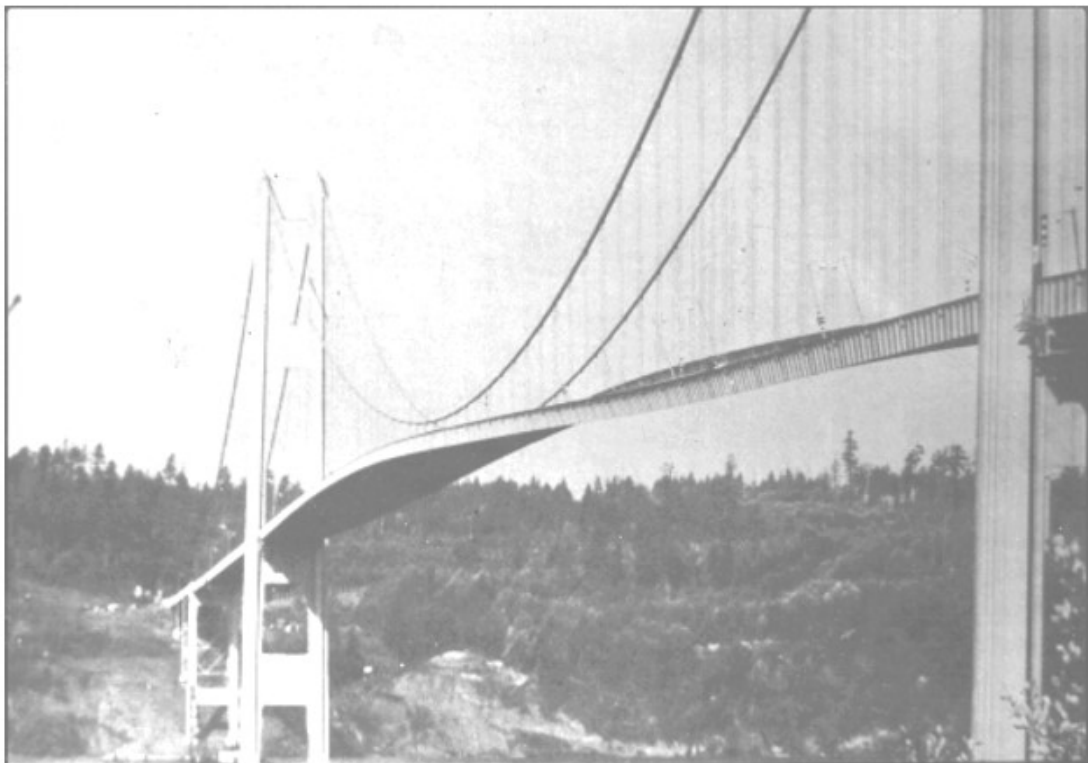


Figura 1 – Movimentos de torção no tabuleiro central um pouco antes da queda (Guerra, João Martins. Acção do vento, 2008)

A gravidade do movimento de torção é revelado na figura 2. Quando o movimento de torção atinge o seu máximo, a diferença de nível entre a elevação do passeio direito e do esquerdo é de 8,5m [1].



Figura 2 – Movimento de torção máximo no tabuleiro central antes do colapso do tabuleiro (Guerra, João Martins. Acção do vento, 2008)

A figura 3 mostra a queda do primeiro elemento de betão, um pouco antes da queda do tabuleiro [1].



Figura 3 – Queda do primeiro elemento de betão (Guerra, João Martins. Acção do vento, 2008)

A figura 4 mostra a flecha a meio vão do tabuleiro antes da queda. No centro a flecha atinge o valor de 13,7m. Esta fotografia foi tirada após a queda do primeiro elemento de betão, um pouco antes da queda do tabuleiro [1].

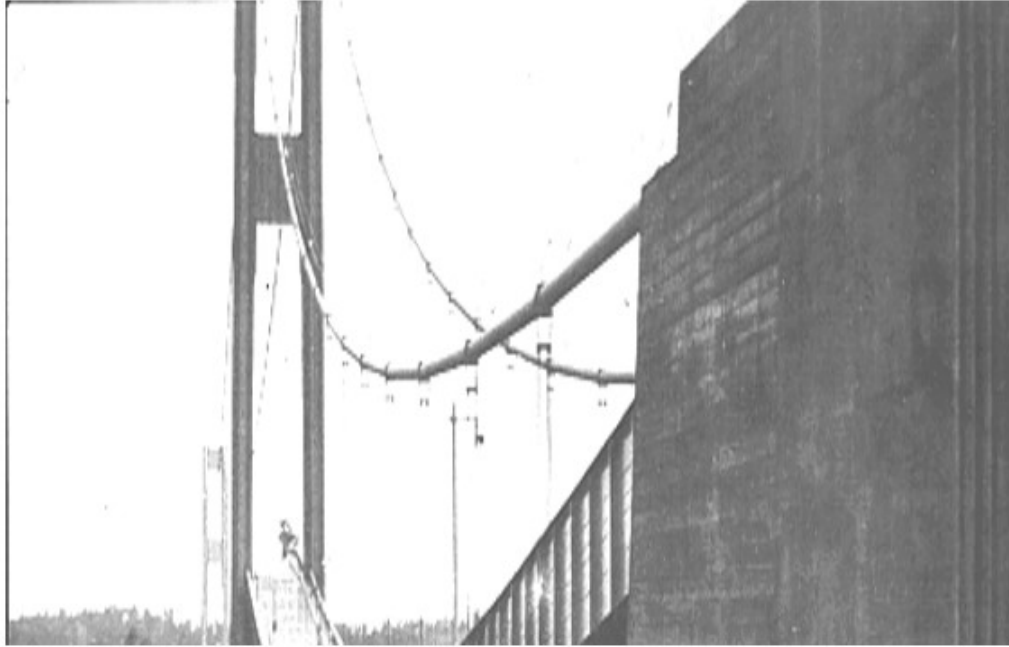


Figura 4 – Flecha a meio vão do tabuleiro antes da queda (Guerra, João Martins. Acção do vento, 2008)

Alguns minutos depois, após a queda do primeiro elemento de betão, o tabuleiro parte-se [1].



Figura 5 - Colapso do tabuleiro (Guerra, João Martins. Acção do vento, 2008)

O aparecimento dos Eurocódigos veio introduzir diferenças importantes na quantificação dos efeitos da acção do vento nas estruturas em geral e nas pontes em particular.

De acordo com a NP EN 1990 [2]: “O valor característico das acções 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.”

Assim de acordo com o pressuposto o valor característico definido tem uma elevada probabilidade de ser atingido durante a vida útil de uma estrutura. Para uma vida útil de projecto de 50 anos, esse valor característico tem uma probabilidade igual a 0,64 de ser excedido.

De acordo com o RSA [3], o valor característico da velocidade do vento tem uma probabilidade muito mais pequena (precisamente 0,05) de ser excedido num período de 50 anos. Esta diferença é conhecida entre os Eurocódigos e o RSA, como é referido pelo próprio Anexo Nacional na N.A.4.3 a) da NP EN 1991-1-4 [4]: “Os valores característicos da velocidade do vento na presente Norma correspondem ao quantilho 0,98 da distribuição de probabilidade dos valores máximos anuais (ou seja, trata-se de valores com uma probabilidade anual de serem excedidos igual a 0,02), ao passo que os valores característicos adoptados no RSA correspondem ao quantilho 0,95 da distribuição de probabilidades dos valores máximos em períodos de 50 anos.”

É portanto legítimo questionar até que ponto esta diferença afecta a fiabilidade das estruturas dimensionadas segundo os Eurocódigos.

Estuda-se nesta dissertação quais as implicações, em termos de fiabilidade, para as estruturas que sejam sensíveis em relação à acção do vento, para um período de retorno de 50 anos, fazendo-se uma análise comparativa entre o Eurocódigo 1 e o RSA.

Enquadramento histórico

RSA

A necessidade de actualizar a regulamentação portuguesa relativa a estruturas de edifícios e pontes, de modo a incorporar os progressos tecnológicos recentes, determinou a elaboração de um diploma que veio substituir o Regulamento de Solicitações em Edifícios e Pontes e que passou a constituir o documento normativo nuclear para a verificação da segurança dessas estruturas [3].

A significativa evolução dos conceitos sobre segurança estrutural impunha que a regulamentação portuguesa neste domínio fosse revista e actualizada em harmonia com os progressos verificados.

Esta orientação conduziu a um regulamento geral de segurança, complementado por regulamentos específicos correspondentes aos diferentes tipos de estruturas e de materiais, sendo adoptado na remodelação dos regulamentos nacionais [3].

Quantificação das acções

A segunda parte deste regulamento trata da quantificação das acções, indicando para cada uma delas os seus valores característicos e os valores dos coeficientes ψ para obtenção dos correspondentes valores reduzidos. Consideram-se para o estudo as acções do peso próprio da estrutura, da temperatura, do vento, da neve, dos sismos e as acções específicas de edifícios e de pontes rodoviárias, ferroviárias e passadiços. Estas acções também figuravam no Regulamento anterior, no entanto, há que assinalar que, em relação a algumas delas, aperfeiçoou-se o modo de definição e quantificação [3].

Assim, no que se refere à acção do vento, consideram-se duas leis de variação em altura do perfil de velocidades, em correspondência com duas condições diferenciadas da rugosidade do solo. Além disso, com vista à determinação dos efeitos da acção do vento sobre as construções, ampliou-se o conjunto de dados relativos a coeficientes de forma, que passaram a cobrir a generalidade das situações correntes na prática [3].

NP EN 1991-1-4

Antecedentes do programa dos Eurocódigos

Em 1975, a Comissão Europeia optou por um programa de acção na área da construção, baseado no artigo 95º do Tratado. O seu objectivo era a eliminação de entraves técnicos ao comércio e a harmonização das especificações técnicas [4].

Durante quinze anos, a Comissão orientou o desenvolvimento do programa dos Eurocódigos, que conduziu à primeira geração de regulamentos europeus já nos anos 80.

Em 1989, a Comissão e os Estados-Membros da UE e da EFTA (European Free Trade Association) decidiram transferir a preparação e a publicação dos Eurocódigos para o CEN (Comité Europeu de Normalização), tendo em vista conferir-lhes no futuro a categoria de Norma Europeia (EN) [4].

O programa relativo aos Eurocódigos Estruturais inclui as seguintes normas, cada uma das quais é, geralmente, constituída por diversas Partes:

- EN 1990 Eurocódigo: Bases para o projecto de estruturas;
- EN 1991 Eurocódigo 1: Acções em estruturas;
- EN 1992 Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão;
- EN 1993 Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço;
- EN 1994 Eurocódigo 4: Projecto de estruturas mistas aço-betão;
- EN 1995 Eurocódigo 5: Projecto de estruturas de madeira;
- EN 1996 Eurocódigo 6: Projecto de estruturas de alvenaria;
- EN 1997 Eurocódigo 7: Projecto geotécnico;
- EN 1998 Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos;
- EN 1999 Eurocódigo 9: Projecto de estruturas de alumínio.

Estatuto e campo de aplicação dos Eurocódigos

Os Eurocódigos fornecem regras comuns de cálculo estrutural para a aplicação corrente no projecto de estruturas e dos seus componentes, de natureza quer tradicional quer inovadora [4].

Informações específicas da EN 1991-1-4

A EN 1991-1-4 define as acções do vento e apresenta linhas de orientação para o projecto estrutural de edifícios e de outras obras de engenharia civil [4].

Anexo Nacional da EN 1991-1-4

A Norma Nacional da EN 1991-1-4 tem um Anexo Nacional que contem todos os Parâmetros Determinados a nível Nacional para o projecto de edifícios e de outras obras de engenharia civil a serem construídos no país a que diz respeito.

Definição de acção do vento

A norma EN 1990 classifica as acções em relação à sua variação no tempo da seguinte forma:

- Acções permanentes;
- Acções variáveis;
- Acções acidentais.

De acordo com a NP EN 1991-1-4 [4]: “A acção do vento é representada por um conjunto simplificado de pressões ou de forças cujos efeitos são equivalentes aos efeitos extremos do vento turbulento”. As acções do vento devem ser consideradas, segundo a EN 1991, como acções variáveis fixas, salvo indicação em contrário. Variáveis, pois a sua variação de intensidade no tempo não pode ser desprezada e fixas, porque a possibilidade de terem distribuições espaciais diferentes está limitada à superfície de actuação do vento.

Estas acções actuam directamente na forma de pressões, sobre as superfícies exteriores das construções; no caso de construções fechadas, actuam também, indirectamente, sobre as superfícies interiores, devido à porosidade da superfície exterior. Poderão também actuar directamente sobre a superfície interior de construções abertas. Das pressões que actuam sobre elementos da superfície resultam forças perpendiculares à superfície da construção. Além disso, quando o vento varre grandes áreas de construção, poderão desenvolver-se forças de atrito significativas, actuando tangencialmente à superfície [4].

Valores Característicos

As acções do vento calculadas de acordo com a norma NP EN 1991-1-4 são valores característicos. Para as acções variáveis, de acordo com a norma NP EN 1990, o valor característico (Q_k) deve corresponder a um valor superior, com uma certa probabilidade de não ser excedido, ou a um valor inferior, com uma certa probabilidade de ser atingido, durante um determinado período de referência; ou então, a um valor nominal, que poderá ser especificado nos casos em que não seja conhecida a distribuição estatística [2].

Todos os coeficientes ou modelos para a determinação das acções do vento a partir dos valores de referência são escolhidos para que a probabilidade de ocorrência do valor superior não seja excedido, ou seja para que a probabilidade de ocorrência das acções do vento calculadas não seja superior à probabilidade de ocorrência desses valores de referência [4].

Estas acções são determinadas a partir dos valores de referência da velocidade do vento ou da pressão dinâmica. De acordo com a NP EN 1990, os valores característicos das acções climáticas têm uma probabilidade anual de serem excedidos de 0,02, o que corresponde a um período médio de retorno igual a 50 anos. Porém, em certos casos, a natureza da acção e/ou a situação de projecto pode implicar outro quantilho e/ou período de retorno, mais apropriados [2].

1.2. Objectivos do trabalho

O objectivo desta tese final de mestrado consiste na discussão da aplicação da norma NP EN 1991-1-4 à quantificação da acção do vento em pontes, tentando esclarecer os aspectos menos claros ao efectuar uma análise comparativa entre essa norma e o RSA. Quantifica-se a acção do vento a pontes reais e discutem-se as diferenças encontradas nos resultados obtidos em relação ao RSA, nomeadamente no que se refere aos valores característicos da acção do vento.

Os valores característicos da acção do vento, de acordo com o RSA [3], no que se refere à sua velocidade, têm uma probabilidade de 5% de serem excedidos em 50 anos, o que corresponde a um período de retorno de aproximadamente 1000 anos. Por outro lado, os valores característicos especificados na NP EN 1991-1-4 são valores que têm uma probabilidade de 2% de serem excedidos num ano, o que corresponde a um período de retorno de 50 anos. Tratam-se de valores com uma grande probabilidade de ocorrência durante a vida útil das estruturas, quando comparados com os valores de probabilidade de ocorrência prescritos no RSA. Surgem assim algumas dúvidas em relação aos valores projectados através dos Eurocódigos, especialmente em estruturas em que o vento seja um factor preponderante. Isto levanta questões pertinentes, de saber até que ponto estruturas dimensionadas segundo a NP EN 1991-1-4 são menos fiáveis a nível de dimensionamento, que estruturas dimensionadas segundo o RSA [5]. Esta e outras questões serão abordadas nesta dissertação.

1.3. Estrutura do trabalho

No 2º Capítulo quantifica-se a acção do vento segundo a norma NP EN 1991-1-4. Enumeram-se e descrevem-se os principais factores que influenciam a acção do vento segundo esta norma. Faz-se referência a diversos estudos que aprofundam o conhecimento destes factores abordando o cálculo da acção do vento a pontes reais.

No 3º Capítulo quantifica-se a acção do vento segundo o RSA. São descritos pormenorizadamente os modelos da acção do vento previstos neste regulamento. Explica-se como é que cada modelo actua sobre a estrutura ou elemento estrutural. A descrição inclui ainda a composição e intensidade com que o efeito da acção do vento actua sobre pontes reais.

O 4º Capítulo é dedicado a uma análise comparativa entre a NP EN 1991-1-4 e o RSA. Após quantificada a acção do vento, segundo os dois regulamentos, discute-se as diferenças encontradas. Estas diferenças resultam dos efeitos produzidos pelos modelos de cada regulamento na aplicação da acção do vento. Exploram-se aspectos de como a influência da velocidade média do vento, da rugosidade do terreno e dos valores reduzidos da pressão dinâmica têm no efeito da acção do vento sobre a estrutura.

No 5º Capítulo a acção do vento é calculada para um exemplo aplicativo, com base num caso real, segundo a regulamentação nacional actualmente em vigor – RSA e segundo as normas europeias, como a NP EN 1991-1-4. Quantifica-se a acção do vento em cada regulamento e interpreta-se as diferenças encontradas nos resultados obtidos, nomeadamente, no que se refere aos valores da acção do vento para o caso do tabuleiro sem carga de tráfego, com carga de tráfego (situação com veículos) e para o caso da acção do vento nos pilares. O 5º Capítulo diz também respeito ao caso prático em estudo que, nesta situação, se refere ao cálculo da acção do vento num viaduto (viaduto do Covelo) segundo os dois regulamentos estudados anteriormente (RSA e EC1). Efectua-se, pelo mesmo método segundo cada regulamento, a quantificação da acção do vento, interpretando-se os resultados obtidos.

O 6º Capítulo é dedicado à conclusão do trabalho. São apontadas as principais diferenças no cálculo da acção do vento segundo os dois regulamentos e no que isso se poderá reflectir em termos de fiabilidade no dimensionamento de uma estrutura, para um e para outro regulamento, no cálculo desta acção.

Capítulo 2.

Quantificação da acção do vento segundo a NP EN 1991-1-4

Neste capítulo são apontadas as principais disposições da Norma NP EN 1991-1-4 (2010), abreviadamente designada por EC1-1-4, ou simplesmente EC1.

Casos não abrangidos pela Norma [6]:

- Construções com altura superior a 200m;
- Tornados;
- Mastros espiados (caso tratado na EN 1993-3-1);
- Postes de iluminação (caso tratado na EN 40).

Para os casos específicos de pontes, a norma não abrange:

- Pontes com vão superior a 200m;
- Pontes suspensas e de tirantes.

De acordo com a CL 3.5 (1), o EC1 cobre a resposta dinâmica devido à turbulência do vento em ressonância com as vibrações da estrutura na direcção do vento, segundo um modo de flexão cuja configuração tem o mesmo sinal em todos os pontos [4].

2.1. Considerações iniciais

A acção do vento nas construções depende fundamentalmente da [6]:

- a) Velocidade do vento;
- b) Forma das construções;
- c) Características dinâmicas da estrutura.

A velocidade do vento, por seu lado depende da:

- a) Localização geográfica da estrutura;
- b) Altura da estrutura acima do terreno;
- c) Rugosidade do terreno.

Apesar de se tratar de uma acção dinâmica, a acção do vento pode ser quantificada na maior parte das vezes por meio de *forças estáticas equivalentes*, F_E , dadas pela fórmula geral:

$$F_E = c_f q_p A$$

Onde:

c_f – representa o coeficiente de forma;

q_p – é chamada pressão dinâmica de pico;

A – é uma área de referência.

A pressão dinâmica de pico à altura z acima do terreno é dada por:

$$q_p(z) = c_e(z) q_b$$

Onde:

c_e – é o chamado coeficiente de exposição;

q_b – é a chamada pressão dinâmica de referência, dada por:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2$$

Este é o método base previsto na NP EN 1991-1-4. O método estático, já previsto no RSA, baseia-se na equação da Mecânica dos Fluidos, que permite determinar a força F a que fica sujeito um corpo quando imerso num fluido com velocidade v [6]:

$$F = \frac{1}{2} c \rho v_b^2 A$$

Onde:

c – designado por *coeficiente de forma*, ou *coeficiente aerodinâmico*, é um coeficiente adimensional, determinado experimentalmente, recorrendo aos chamados *ensaios em túnel aerodinâmico*;

ρ – é o parâmetro da massa específica do fluido. No caso do fluido em questão ser o ar, toma-se geralmente $\rho = 1.25 \text{ Kg/m}^3$;

v_b – é a chamada velocidade de referência da acção do vento;

A – é uma área de referência, em geral considerada igual à projecção do corpo no plano perpendicular à velocidade do fluido.

A fórmula acima é dimensionalmente homogênea, isto é, pode ser usada com qualquer sistema de unidades. Adoptando o SI, tem-se [6]:

$$[F] = \frac{Kg}{m^3} (m/s)^2 \times m^2 = Kg \times m/s^2 = N$$

$\frac{1}{2} \rho v_b^2$ É designada, como se viu anteriormente, de *pressão dinâmica*. Pode-se dizer que a força devida ao vento é dada pelo produto de três grandezas [6]:

$$\text{Força} = (\text{Coeficiente de forma}) \times (\text{pressão dinâmica}) \times (\text{área de referência})$$

A velocidade do vento cresce em altura e considera-se geralmente nula na vizinhança do terreno. A figura 6 ilustra um perfil típico de velocidades do vento:

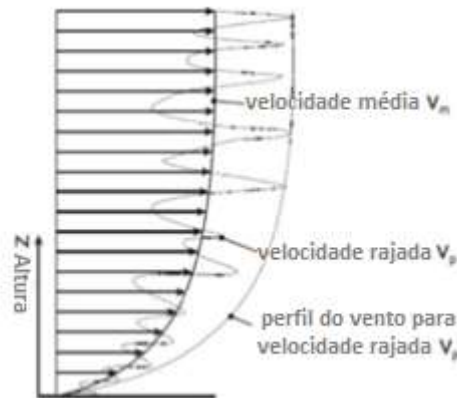


Figura 6 – Velocidade média e de pico num perfil de velocidade (Leonardo da Vinci Pilot Project, HANDBOOK 3)

A altura da construção é um parâmetro importante na quantificação da acção do vento. Por outro lado, deve distinguir-se entre *velocidade média* e *velocidade de pico*, ou *velocidade de rajada (gust velocity)* isto é, a velocidade com e sem o efeito da *turbulência*. Para efeitos da segurança das estruturas, é a velocidade do pico que interessa [6].

2.2. Zonamento do território

A variável básica mais importante para a quantificação da acção do vento é a sua velocidade. Para efeitos de quantificação do valor básico da velocidade de referência do vento, $v_{b,0}$, o EC1, à semelhança do RSA, divide o País em duas zonas [4]:

Zona A – generalidade do território, excepto as regiões pertencentes à zona B.

Zona B – arquipélagos dos Açores e da Madeira e as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 Km de largura ou altitudes superiores a 600 m.

No caso, porém, de locais situados na zona A cujas condições de orografia determinem exposição ao vento particularmente desfavorável, como pode acontecer em alguns vales e estuários, devem ser considerados como pertencentes à zona B.

O critério em que se baseou a divisão do território em dois tipos de zonas fundamenta-se na análise dos registos meteorológicos existentes, que permitiu atribuir àquelas zonas, para a mesma probabilidade de ocorrência, intensidades do vento suficientemente diferentes.

O valor de $v_{b,0}$ a ser considerado para cada uma das zonas do País consta no Quadro seguinte [4]:

Tabela 1 – Valor básico da velocidade de referência do vento (NP EN 1991-1-4 – Anexo Nacional NA, Quadro NA.1)

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

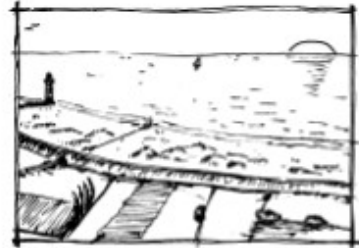
2.3. Rugosidade aerodinâmica do terreno

A variação da velocidade do vento com a altura depende fortemente da presença de obstáculos que afectam o escoamento do ar. Para ter em conta a influência desses obstáculos no perfil de velocidades, o Anexo Nacional do EC1 define quatro categorias de terreno, ilustrados na tabela 2 [6]:

Tabela 2 – Efeitos do terreno – Ilustrações da rugosidade máxima de cada categoria do terreno (EC1-Parte1-1 – Anexo A, Quadro A.1)

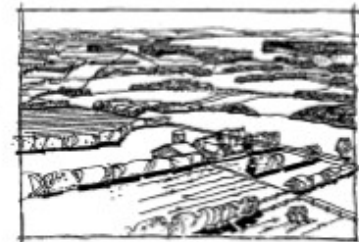
Categoria de terreno I

Mar ou zona costeira exposta aos ventos de mar



Categoria de terreno II

Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura



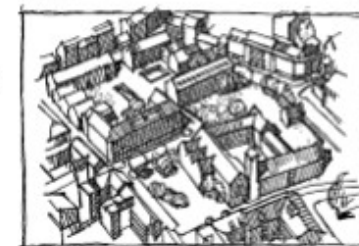
Categoria de terreno III

Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: aldeias, zonas suburbanas, florestas permanentes)



Categoria de terreno IV

Zona na qual pelo menos 15 % da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m



O coeficiente de rugosidade deve ser determinado através do procedimento recomendado no EC1, tendo em consideração as quatro categorias de terreno caracterizadas na Tabela 3, referente ao Quadro NA-4.1 do EC1 [4]:

Tabela 3 – Categorias de terreno e respectivos parâmetros (EC1 – Anexo Nacional NA, Quadro NA-4.1)

Categoria de terreno		z_0 [m]	z_{min} [m]
I	Zona costeira exposta aos ventos de mar	0,005	1
II	Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura	0,05	3
III	Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: zonas suburbanas, florestas permanentes)	0,3	8
IV	Zona na qual pelo menos 15 % da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m	1,0	15
<i>NOTA 1: As categorias de terreno II, III e IV estão ilustradas em A.1.</i>			
<i>NOTA 2: O coeficiente de rugosidade, $c_r(z)$, é ilustrado na Figura NA.1.</i>			

A categoria do terreno pode depender da direcção do vento. O terreno pode ser de um tipo, para uma determinada direcção do vento e de outro tipo, para outra direcção. A categoria de terreno a considerar para uma dada direcção do vento depende da rugosidade do solo nessa direcção e da extensão com rugosidade de terreno uniforme dentro de um sector angular de 30°, definido por $\pm 15^\circ$ em relação à direcção do vento [6].

No caso de existir na direcção de barlavento (designa lado de onde sopra o vento. Sotavento designa o lado oposto), o NA, de acordo com a CL NA-4.3.2 (2), estabelece o seguinte critério:

Se a construção está situada na proximidade de uma alteração de rugosidade do terreno, a qual ocorre a uma distância [4]:

- Inferior a 2 km, com transição de uma superfície de categoria I,
- Inferior a 1 km, com transição de um terreno menos rugoso de categoria II ou III, deverá ser utilizada a categoria de terreno menos rugosa na direcção de barlavento.

As zonas de pequena área (inferior a 10 % da área da zona considerada) que tenham uma rugosidade diferente poderão ser ignoradas.

2.4. Velocidade do vento e pressão dinâmica

Uma vez definidas as condições locais da estrutura (zona e categoria do terreno) determina-se a *velocidade de referência do vento*, que é dada por [4]:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}$$

Em que:

v_b – valor de referência da velocidade do vento, definido em função da direcção do vento e da época do ano a uma altura de 10m acima da superfície de um terreno da categoria II;

$v_{b,0}$ – valor básico da velocidade de referência do vento, é o valor característico da velocidade média do vento referida a períodos de 10 min, independentemente da direcção do vento e da época do ano, a uma altura de 10 m acima do nível do solo em terreno do tipo campo aberto, com vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura;

A velocidade de referência do vento, $v_{b,0}$, tem um período de retorno de $1/0,02=50$ anos, a que corresponde uma probabilidade de 0,64 de ser excedida em 50 anos. Trata-se, portanto, de uma velocidade com uma grande probabilidade de ser atingida durante a vida útil de uma dada estrutura.

c_{dir} – é um coeficiente relacionado com a direcção do vento, considerando-se em geral que $c_{dir}=1,0$;

c_{season} – é o *coeficiente de sazão*, considerando-se normalmente que $c_{season}=1,0$.

A velocidade média do vento (isto é, a velocidade sem o efeito da turbulência) a uma altura z acima do solo, $v_m(z)$, depende da rugosidade do terreno, da orografia e do valor de referência da velocidade do vento, v_b , e deverá ser determinada através da seguinte expressão [3]:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b$$

Em que:

$c_r(z)$ – coeficiente de rugosidade;

$c_0(z)$ – coeficiente de orografia, considerado igual a 1,0 salvo especificações em contrário.

O coeficiente de rugosidade $c_r(z)$ tem em conta a variabilidade da velocidade média do vento no local da construção em resultado [4]:

- Da altura acima do nível do solo;
- Da rugosidade do terreno a barlavento da construção, na direcção do vento considerada

A determinação do coeficiente de rugosidade à altura z é definido através da expressão e baseia-se num perfil de velocidades logarítmico [4]:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \quad \text{para } z \leq z_{min}$$

Em que:

z_0 – comprimento de rugosidade;

k_r – coeficiente de terreno dependente do comprimento de rugosidade z_0 , calculado através de:

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07}$$

Em que:

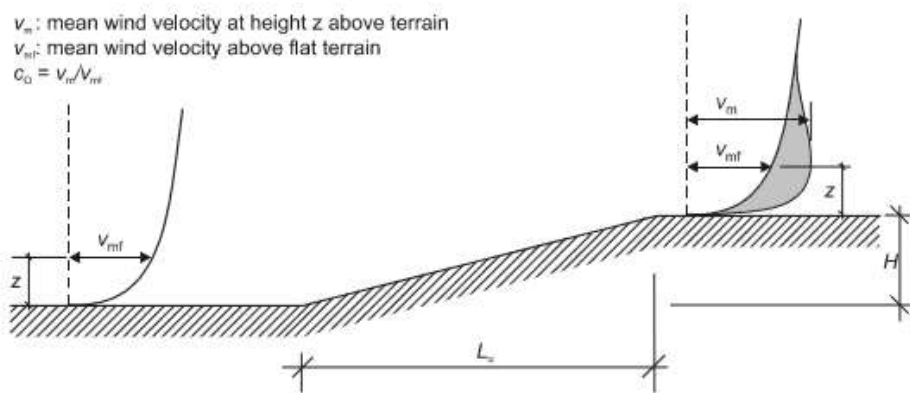
$z_{0,II}=0,05$ (categoria II do Quadro 4.1 do EC1, adaptado ao Quadro NA – 4.1 do Anexo Nacional NA do EC1);

z_{min} – altura mínima definida no Quadro NA – 4.1 do Anexo Nacional NA do EC1;

z_{max} – a ser considerado igual a 200m;

z_0 e z_{min} dependem das categorias do terreno. No Quadro NA – 4.1 do Anexo Nacional NA, que substitui o Quadro 4.1 do EC1, são fornecidos valores recomendados em função de quatro categorias de terreno representativas.

Nos casos em que, devido à orografia, as velocidades do vento sejam aumentadas em mais de 5%, os efeitos correspondentes deverão ser considerados utilizando o coeficiente $c_0(z)$, designado de *coeficiente de orografia*. Nos casos correntes, em que os efeitos da orografia poderão ser desprezados, onde o declive médio a barlavento é inferior a 3° o *coeficiente de orografia* é tomado com valor unitário. O terreno a barlavento se tiver uma distância até 10 vezes a altura do elemento orográfico isolado poderá ser tomado em consideração. O *coeficiente de orografia* deve ser quantificado de acordo com o procedimento recomendado fornecido no Anexo A.3 (cálculo numérico dos coeficientes de orografia).



Legenda:

mean wind velocity at height z above terrain velocidade média do vento à altura z acima do solo
 mean wind velocity above flat terrain velocidade média do vento sobre terreno plano

Figura 7 – Ilustração do aumento da velocidade do vento devido à orografia (EC1 – Anexo A.3, Fig. A.1)

A intensidade de turbulência à altura z , $I_v(z)$, é definida como o quociente entre o desvio padrão da turbulência e a velocidade média do vento, dada pela seguinte expressão [4]:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{para} \quad z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad \text{para} \quad z < z_{min}$$

Onde:

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I$$

Em que:

c_0 – coeficiente de orografia. Para o caso de um terreno plano $c_0(z)=1,0$;

k_I – coeficiente de turbulência. O valor de k_I poderá ser fornecido no Anexo Nacional e o seu valor recomendado é 1,0;

z_0 – comprimento de rugosidade, fornecido no Quadro NA – 4.1 do Anexo Nacional NA, que substitui o Quadro 4.1 do EC1.

A Pressão dinâmica de pico à altura z , $q_p(z)$, a qual resulta da velocidade média e das flutuações de curta duração da velocidade do vento, obtém-se a partir da expressão [4]:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b$$

Em que:

ρ – massa volúmica do ar, que depende da altitude, da temperatura e da pressão atmosférica previstas para a região durante situações de vento intenso. Os valores de ρ poderão ser fornecidos no Anexo Nacional e o seu valor recomendado é 1,25 kg/m³.

$c_e(z)$ – coeficiente de exposição indicado em 4.5 no EC1 é dado pela expressão:

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b}$$

q_b – pressão dinâmica de referência, dado através da expressão:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2$$

E assim temos:

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2$$

Substituindo as expressões temos:

$$c_e(z_e) = \frac{q_p(z_e)}{q_b} = \frac{[1+7 \cdot I_v(z_e)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z_e)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2} \Leftrightarrow$$

$$c_e(z_e) = \frac{\left[1+7 \cdot \frac{k_I}{c_0(z_e) \cdot \ln(z_e/z_0)}\right] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (c_r(z_e) \cdot c_0(z_e) \cdot v_b)^2}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2} \Leftrightarrow$$

$$c_e(z_e) = \left[1 + 7 \cdot \frac{K_I}{c_0(z_e) \cdot \ln(z_e/z_0)} \right] \cdot (c_r(z_e) \cdot c_0(z_e))^2 \Leftrightarrow$$

$$c_e(z_e) = \left[1 + 7 \cdot \frac{K_I}{c_0(z_e) \cdot \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right)} \right] \cdot \left[k_r \cdot \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right) \cdot c_0(z_e) \right]^2 \Leftrightarrow$$

$$c_e(z_e) = \left[1 + 7 \cdot \frac{K_I}{c_0(z_e) \cdot \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right)} \right] \cdot \left[0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \cdot \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right) \cdot c_0(z) \right]^2.$$

Considerando o caso de um terreno plano e uma categoria de terreno do tipo II, em que $c_0(z_e)=1,00$ e $z_{0,II}=0,05$ e um coeficiente de turbulência igual a 1,00 (O valor recomendado no Anexo Nacional é $k_f=1,0$); vem:

$$c_e(z_e) = \left[1 + \frac{7}{\ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right)} \right] \cdot \left[0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{0,05}\right)^{0,07} \cdot \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right) \right]^2$$

De seguida é apresentado um gráfico que mostra os coeficientes de exposição $c_e(z)$ em função da altura z acima do terreno, para a zona A e considerando $c_0(z_e)=k_f=1,00$.

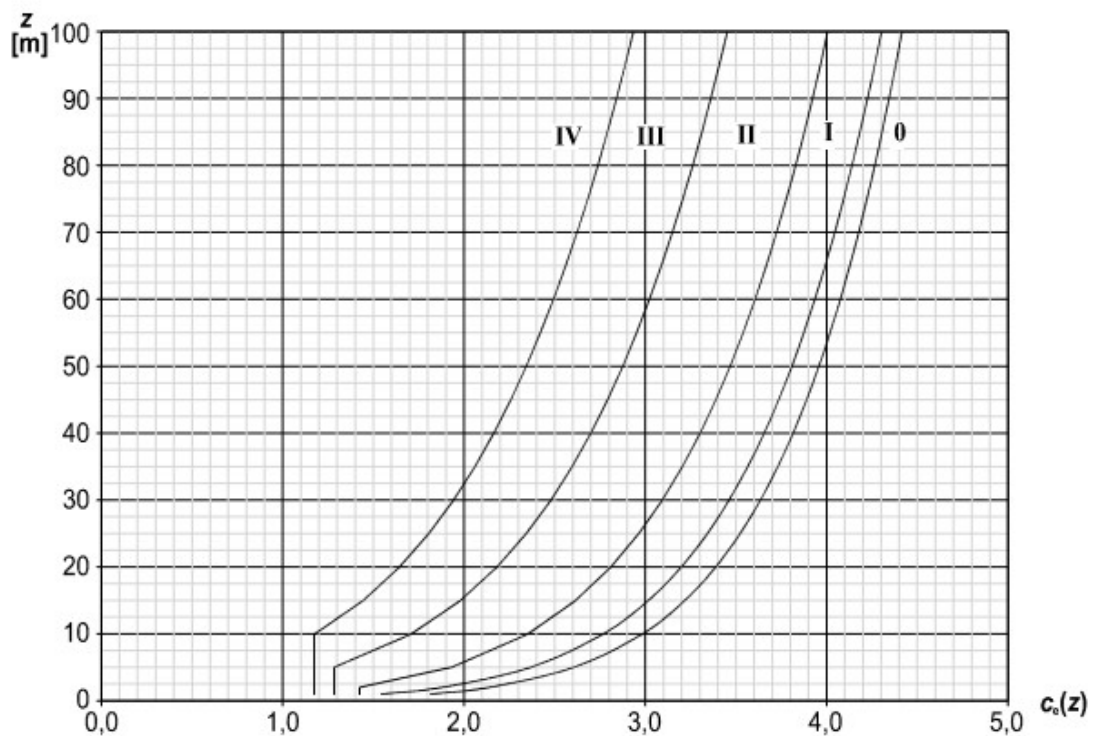


Figura 8 – Representação do coeficiente de exposição $c_e(z)$ para $c_0=1,0$ e $k_f=1,0$ (EC1, Fig. 4.2)

2.5. Acções do vento

As acções do vento sobre as construções e os elementos de construção devem ser quantificadas tendo em conta as pressões exteriores e as pressões interiores devidas ao vento [4].

Tabela 4 – Procedimentos de cálculo para a determinação das acções do vento (NP EN 1991-1-4, Quadro 5.1)

<i>Parâmetro</i>	<i>Referência</i>
<i>Pressão dinâmica de pico q_p</i> - valor de referência da velocidade do vento v_b - altura de referência z_a - categoria de terreno - valor característico da pressão dinâmica de pico q_p - intensidade de turbulência I_z - velocidade média do vento v_m - coeficiente de orografia $c_o(z)$ - coeficiente de rugosidade $c_r(z)$	4.2(2)P Secção 7 Quadro 4.1 4.5(1) 4.4 4.3.1 4.3.3 4.3.2
<i>Pressões exercidas pelo vento (sobre revestimentos, ligações e elementos de construção, por exemplo)</i> - coeficiente de pressão exterior c_{pe} - coeficiente de pressão interior c_{pi} - coeficiente de pressão resultante $c_{p,net}$ - pressão exterior exercida pelo vento: $w_e = q_p c_{pe}$ - pressão interior exercida pelo vento: $w_i = q_p c_{pi}$	Secção 7 Secção 7 Secção 7 5.2(1) 5.2(2)
<i>Forças exercidas pelo vento sobre as construções (cálculo dos efeitos globais do vento, por exemplo)</i> - coeficiente estrutural $c_s c_d$ - força exercida pelo vento F_w calculada a partir de coeficientes de força - força exercida pelo vento F_w calculada a partir de coeficientes de pressão	Secção 6 5.3(2) 5.3(3)

Como se viu anteriormente, para quantificar as forças resultantes do vento é necessário multiplicar as pressões dinâmicas de pico pelos coeficientes de forma, de acordo com a seguinte fórmula [6]:

$$\text{Força} = (\text{Coeficiente de forma}) \times (\text{pressão dinâmica}) \times (\text{área de referência}).$$

Os coeficientes de forma dividem-se em dois grupos:

- Coeficientes de força, c_f ;
- Coeficientes de pressão.

A principal diferença entre os coeficientes de força e os coeficientes de pressão é que os coeficientes de força já integram todos os efeitos relevantes para os coeficientes de forma, incluindo forças de atrito [6].

Os coeficientes de pressão, por sua vez, dividem-se em:

- Coeficientes de pressão exterior, c_{pe} ;
- Coeficientes de pressão interior, c_{pi} .

A pressão exercida pelo vento nas superfícies exteriores, w_e , é obtida através da expressão seguinte [7]:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe}$$

Tal que:

$q_p(z_e)$ – pressão dinâmica de pico;

z_e – altura de referência para a pressão exterior;

c_{pe} – coeficiente de pressão para a pressão exterior.

A pressão exercida pelo vento nas superfícies interiores, w_i , é obtida através da expressão seguinte [7]:

$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi}$$

Tal que:

$q_p(z_i)$ – pressão dinâmica de pico;

z_i – altura de referência para a pressão interior;

c_{pi} – coeficiente de pressão para a pressão interior.

A força exercida pelo vento, F_w , sobre uma construção ou algum elemento de construção é determinada pela soma vectorial das forças $F_{w,e}$, $F_{w,i}$ e F_{fr} , calculadas a partir das pressões exteriores e interiores e das forças de atrito, resultantes do atrito do vento paralelamente às superfícies exteriores [4].

Forças exteriores:

$$F_{w,e} = c_s c_d \cdot \sum_{\text{superfícies}} w_e \cdot A_{ref}$$

Tal que:

$$\sum_{\text{superfícies}} w_e = c_{pe} \cdot q_p(z_e)$$

Forças interiores:

$$F_{w,i} = \sum_{\text{superfícies}} w_i \cdot A_{ref}$$

Tal que:

$$\sum_{\text{superfícies}} w_i = c_{pi} \cdot q_p(z_i)$$

Forças de atrito:

$$F_{fr} = c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr}$$

Onde:

$c_s c_d$ – é chamado coeficiente estrutural, quantificado mais à frente.

w_e – é a pressão exterior na superfície individual à altura z_e

w_i – é a pressão interior na superfície individual à altura z_i

$q_p(z_e), q_p(z_i)$ – são pressões dinâmicas de pico para as alturas de referência z_e e z_i .

A_{ref} – é a área de referência da superfície individual;

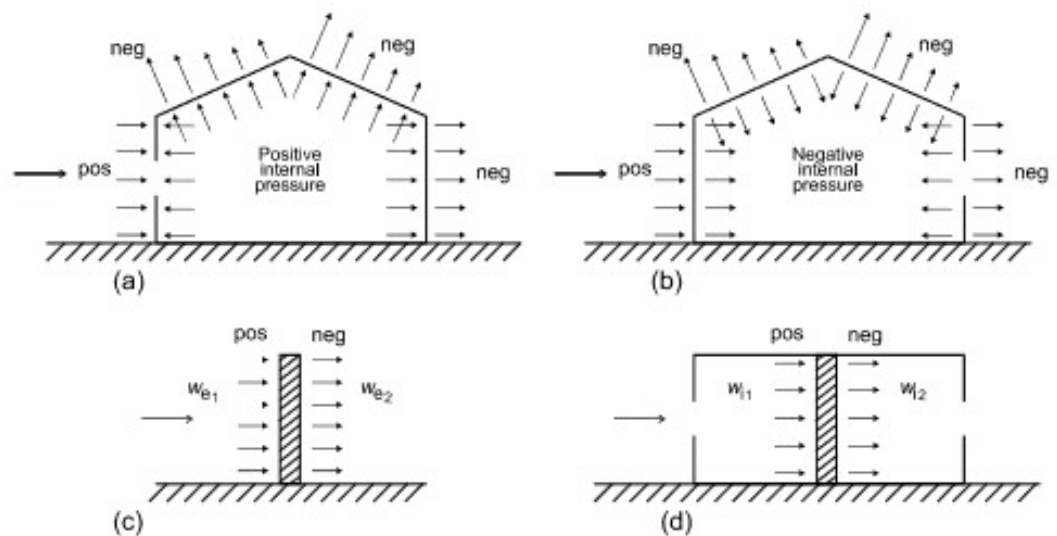
c_{fr} – é o coeficiente de atrito;

A_{fr} – é a área de referência para efeitos de cálculo das forças de atrito.

De acordo com a CL 5.3 (4), p. 32 do EC1 [4]: “Os efeitos do atrito do vento sobre a superfície podem ser ignorados quando a área total de todas as superfícies paralelas em

relação ao vento é igual ou inferior a 4 vezes a área total de todas as superfícies exteriores perpendiculares ao vento”.

No caso dos edifícios é necessário calcular pressões exteriores e interiores. A pressão que resulta de um elemento é a diferença entre as pressões que actuam sobre as faces opostas tendo em conta os seus sinais. Utiliza-se a seguinte convecção de sinais: quando as forças são exercidas contra a superfície de uma parede, a pressão é positiva; quando as forças actuam segundo o sentido que se afasta da superfície da parede, a pressão é considerada negativa, sendo designada de sucção [4].



Legenda:

Positive internal pressure	Pressão interior positiva
Negative internal pressure	Pressão interior negativa

Figura 9 – Ilustração das pressões/sucções exercidas em superfícies (EC1, Fig. 5.1)

2.6. Coeficiente estrutural $C_s C_d$

O coeficiente estrutural $c_s c_d$ tem em conta o efeito de redução na acção do vento devido à não simultaneidade na ocorrência das pressões de pico sobre a superfície (c_s) em conjunto com o efeito das vibrações da estrutura devido à turbulência (c_d) em ressonância com a estrutura.

O coeficiente estrutural $c_s c_d$ poderá ser decomposto num coeficiente de dimensão c_s e num coeficiente dinâmico c_d [7].

O coeficiente $c_s c_d$ pode ser considerado igual à unidade, ou seja $c_s c_d = 1$, nos seguintes casos [4]:

1. Edifícios com altura inferior a 15m;
2. Elementos de fachada e cobertura cuja frequência própria seja superior a 5Hz;
3. Edifícios de estrutura porticada que contenham paredes resistentes e cuja altura seja inferior a 100m e a 4 vezes a dimensão do edifício na direcção do vento;
4. Chaminés de secções transversais circulares e com altura inferior a 60m e a 6,5 vezes o seu diâmetro.

Para outras obras de engenharia civil (excepto as pontes, consideradas em 2.9) e para chaminés e edifícios não abrangidos pelos limites referidos no ponto 3 e 4, $c_s c_d$ deverá ser determinado a partir do procedimento pormenorizado para o coeficiente estrutural $c_s c_d$, prescrito em 6.3 no EC1 ou através do Anexo D do EC1.

2.7. A acção do vento em pontes

2.7.1. Acção do vento no tabuleiro

- Tipos de tabuleiros, com secções transversais representadas na figura seguinte, que são abrangidos pela Norma [4]:

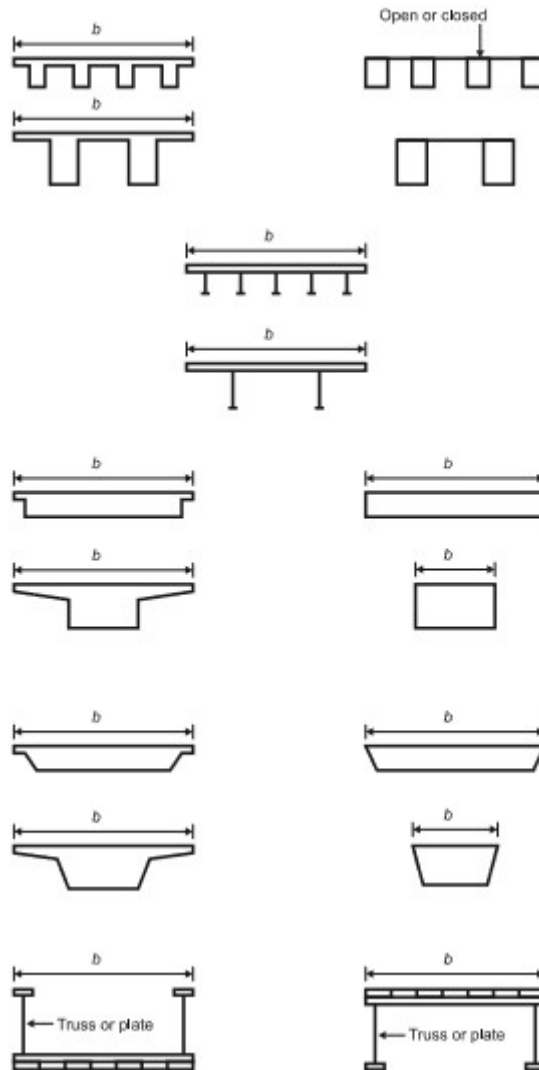


Figura 10 – Secções transversais de tabuleiros de construção corrente (EC1, Fig. 8.1)

Legenda:

Open or closed	Aberto ou fechado
Truss or plate	Treliça ou viga de alma cheia

No que diz respeito à aplicabilidade do método previsto pela Norma (análise estática equivalente baseada em coeficientes de força) convém ter presente o seguinte [4]:

1. As acções do vento para as pontes em arco, pontes tirantes, pontes suspensas e pontes com curvatura acentuada não são cobertas pela norma. Estas são referidas no Anexo Nacional.
 2. A norma refere-se a tabuleiros com altura constante, no entanto, o NA refere que podemos aplicar a norma, com as devidas adaptações, a tabuleiros com altura variável.
 3. De acordo com a Nota 1 do NA da CL NA-8.2(1), o método é aplicável e dispensa a utilização de métodos de análise dinâmica se o vão for inferior a 125m.
- Considera-se que no tabuleiro $c_s c_d = 1$ e que o sistema de eixos coordenados usados na Norma é o seguinte [8]:

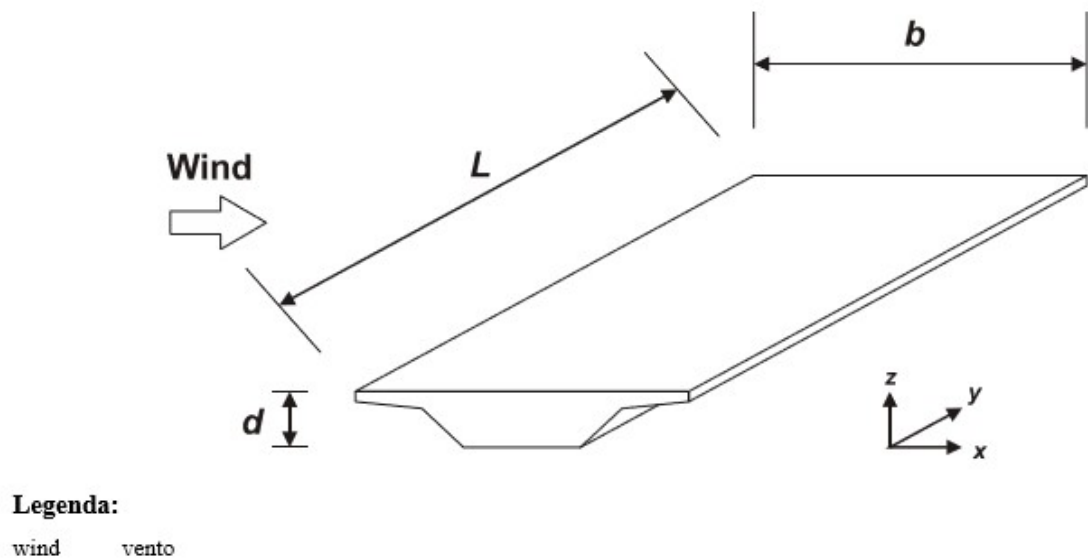


Figura 11 – Direcções das acções do vento em pontes (EC1, Fig. 8.2)

Conforme representado na figura 11, as acções do vento em pontes produzem forças nas direcções x , y e z , onde:

- Direcção x – direcção paralela à largura do tabuleiro, perpendicular ao tramo;
 b – largura, na direcção x
- Direcção y – direcção ao longo do tramo;
 L – comprimento, na direcção y ;
- Direcção z – direcção perpendicular ao tabuleiro;
 d – altura, na direcção z .

De acordo com a Norma, CL 8.1 (3), p. 89 do EC1 [4]: “As forças produzidas nas direcções x e y devem-se a vento soprando em direcções diferentes e, normalmente, não são consideradas em simultâneo. As forças produzidas na direcção z podem resultar de vento soprando numa larga gama de direcções; no caso de estas forças serem desfavoráveis e significativas, deverão ser consideradas simultaneamente com as forças produzidas em qualquer outra direcção.”

2.7.1.1. Coeficientes de força na direcção x (método geral)

Força = (Coeficiente de forma) \times (pressão dinâmica) \times (área de referência).

Equação da Mecânica dos Fluidos, que permite determinar a força F a que fica sujeito um corpo quando imerso num fluido com velocidade v :

$$F = \frac{1}{2} c \rho v^2 A$$

Para calcular as forças actuantes, na direcção x , aplicam-se as formulações anteriores, considerando $c_s c_d = 1$:

$$F_{w,x} = c_{f,x} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref,x};$$

$$\text{Com } q_p(z_e) = \frac{1}{2} \rho v_b^2 c_e(z_e).$$

Substituindo esta expressão na expressão acima, temos:

$$F_{w,x} = \frac{1}{2} \rho v_b^2 c_e(z_e) \cdot c_{f,x} \cdot A_{ref,x}.$$

Substituindo o produto $c_e(z_e) \cdot c_{f,x}$ por C tem-se:

$$F_{w,x} = \frac{1}{2} \rho v_b^2 \cdot C \cdot A_{ref,x};$$

Com:

$$C = c_e(z_e) \cdot c_{f,x}.$$

Ainda referindo a Norma CL 8.3.1 (6), p. 93 do EC1 [4]: “A altura de referência z_e poderá ser considerada como a distância entre o nível mais baixo do solo e o nível central da estrutura do tabuleiro da ponte, não considerando as outras partes das áreas de referência (como por exemplo, os guarda-corpos).”

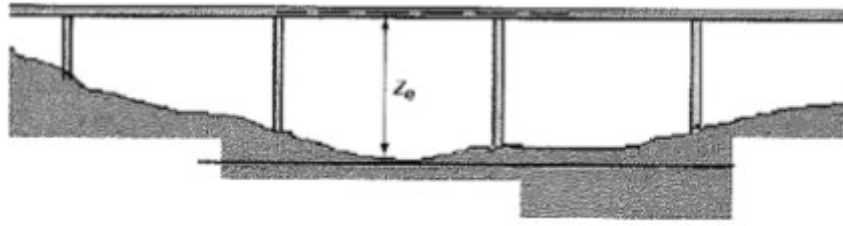


Figura 12 – Representação da altura de referência z_e , entre o nível mais baixo do solo e o nível central da estrutura do tabuleiro da ponte (H. Gulvanessian, (2010). *Designers' guide to Eurocode 1: Actions on Bridges*, p.22)

Os coeficientes de força para as acções do vento, na direcção x , em tabuleiros de pontes são determinados por [8]:

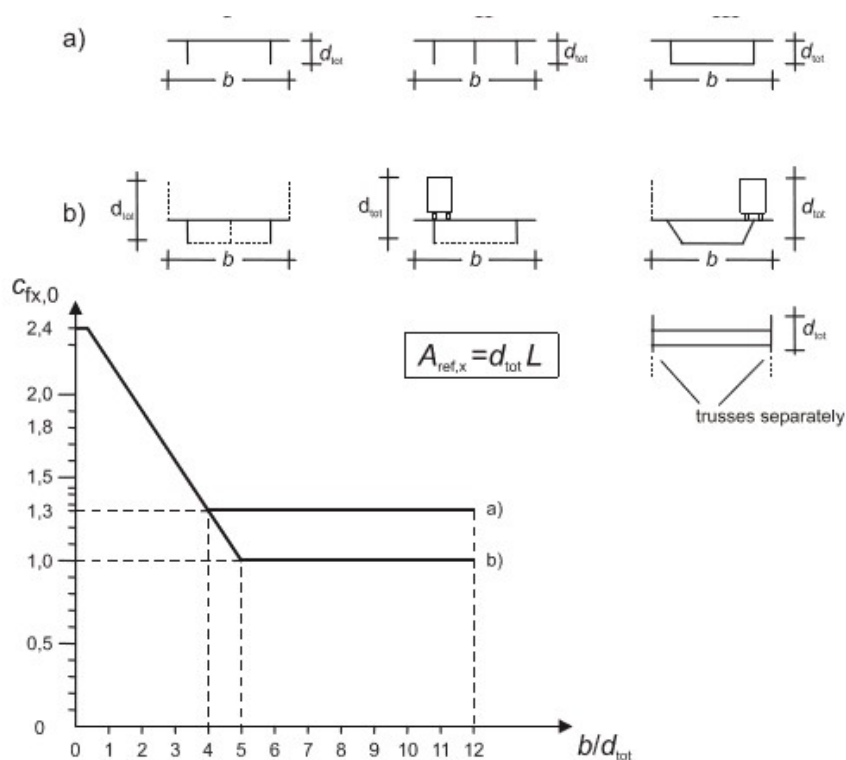
$$c_{f,x} = c_{fx,0}$$

Em que:

$c_{fx,0}$ – é o coeficiente de força para a situação sem livre escoamento em torno das extremidades

Nota 1: No tabuleiro de uma ponte verifica-se que o escoamento de contorno nas extremidades não é livre, dado que o escoamento é desviado apenas ao longo de dois lados (sobre e sob o tabuleiro).

Nota 2: Para situações normais, $c_{fx,0}$ pode ser considerado igual a 1,3. Em alternativa, $c_{fx,0}$ poderá ser obtido na figura 13:



Legenda:

bridge type

trusses separately

a) construction phase, open parapets (more than 50 % open) and open safety barriers

b) solid parapets, noise barrier, solid safety barriers or traffic

tipo de ponte

treliças a considerar separadamente

a) fase de construção, guarda-corpos vazados (com mais de 50 % de aberturas) e guardas de segurança vazadas

b) com guarda-corpos ou guardas de segurança não vazados e barreira anti-ruído ou tráfego

Figura 13 – Coeficiente de força $c_{fx,0}$ para tabuleiros de pontes (EC1, Fig. 8.3)

Correcções a efectuar a $c_{fx,0}$ [4]:

- “Nos casos em que a face exposta ao vento é inclinada em relação à vertical, o coeficiente de arrastamento $c_{fx,0}$ pode ser reduzido 0,5% por grau de inclinação em relação à vertical, α_I , com uma redução máxima de 30%.” (CL 8.3.1 (2), p. 91 do EC1)

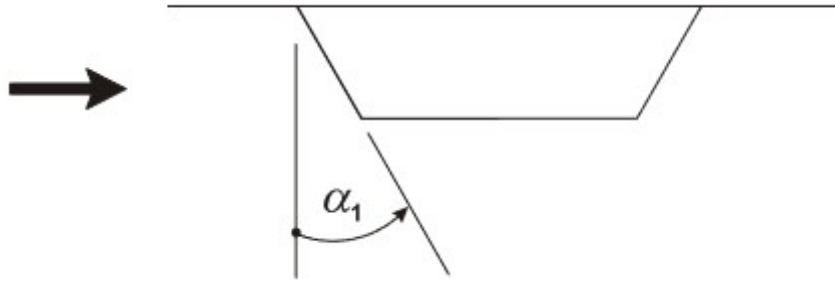


Figura 14 – Tabuleiro com a face exposta ao vento inclinada (EC1, Fig. 8.4)

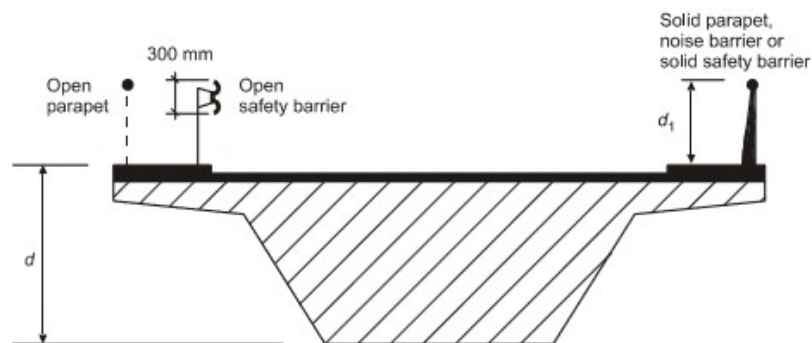
- “Nos casos em que o tabuleiro tem uma inclinação transversal, $c_{fx,0}$ deverá ser aumentado de 3% por cada grau de inclinação, com um máximo de aumento de 25%.” (CL 8.3.1 (3), p. 92 do EC1)

Para as áreas de referência, $A_{refx,0}$, considera-se:

$$A_{ref,c} = d_{tot}L,$$

Onde se determina d_{tot} com base nas seguintes cláusulas [4]:

1. Para combinações de acções sem carga de tráfego (CL 8.3.1 (4), p. 92 do EC1), as áreas de referência $A_{refx,0}$, devem ser calculadas com base no valor aproximado de d_{tot} , definido na Figura 15 e na Tabela 5 (EC1, Quadro 8.1):



Legenda:

Open parapet

Open safety barrier

Solid parapet, noise barrier or solid safety barrier

Guarda-corpo vazado

Guarda de segurança vazada

Guarda-corpo não vazado, barreira anti-ruído ou guarda de segurança não vazada

Figura 15 – Altura a considerar para $A_{ref,x}$ (EC1, Fig. 8.5)

Tabela 5 – Altura d_{tot} a considerar para $A_{ref,x}$ (EC1, Quadro 8.1)

Barreiras de segurança	num lado	nos dois lados
Guarda-corpo vazado ou guarda de segurança vazada	$d + 0,3 \text{ m}$	$d + 0,6 \text{ m}$
Guarda-corpo não vazado ou guarda de segurança não vazada	$d + d_1$	$d + 2d_1$
Guarda-corpo vazado e guarda de segurança vazada	$d + 0,6 \text{ m}$	$d + 1,2 \text{ m}$

- a) Para tabuleiros de vigas de alma cheia, a soma de [4]:
- A área frontal da viga principal de barlavento,
 - A área frontal das partes das outras vigas principais que se projectem abaixo da viga principal de barlavento,
 - A área frontal da parte de uma cornija, passeio ou via balastrada que se projecte acima da viga principal de barlavento,
 - A área frontal de guarda-corpos ou guardas de segurança não vazados ou de barreiras anti-ruído, quando existam, situada acima da área descrita na alínea anterior ou, na ausência de tais equipamentos, a área correspondente a uma altura de 0,3 m para cada guarda-corpo vazado ou guarda de segurança vazada;
- b) Para tabuleiros de vigas treliçadas, a soma de [4]:
- A área frontal de uma cornija, passeio ou via balastrada,
 - A área das projecções em alçado das partes cheias de todas as vigas treliçadas principais que estejam situadas acima ou abaixo da área descrita na alínea anterior,
 - A área frontal de guarda-corpos ou guardas de segurança não vazados ou de barreiras anti-ruído, quando existam, situada acima da área descrita na primeira alínea ou, na ausência de tais equipamentos, a área correspondente a uma altura de 0,3 m para cada guarda-corpo vazado ou guarda de segurança vazada;
- Há que ter em atenção, pois a área de referência total não deverá exceder a correspondente à de uma viga de alma cheia equivalente com a mesma altura total, incluindo todas as suas projecções;
- c) Durante a construção de tabuleiros com várias vigas principais, antes de a laje da plataforma de rotação ser colocada: a área frontal de duas vigas principais [4].

2. Para combinações de acções com carga de tráfego (CL 8.3.1 (5), p. 93 do EC1) são conforme é especificado em 1 com a seguinte modificação: em vez das áreas acima descritas em a) no 3º ponto e no 4º ponto e em b) no 3º ponto, deverá considerar-se o seguinte no caso de as áreas resultantes serem maiores [4]:
- a) Para pontes rodoviárias, uma altura de 2 m a partir do nível da plataforma de rodagem e ao longo do comprimento mais desfavorável, independentemente da posição das cargas verticais de tráfego;
 - b) Para pontes ferroviárias, uma altura de 4 m a partir do nível superior dos carris, ao longo do comprimento total da ponte.

2.7.1.2. Forças na direcção x - Método simplificado

Quando não existe necessidade de se estabelecer um procedimento de cálculo de resposta dinâmica, a força na direcção x produzida pelo vento é obtida através da seguinte expressão [7]:

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{ref,x}$$

Em que:

v_b – valor de referência da velocidade do vento;

C – coeficiente de força do vento; $C = c_e(z_e) \cdot c_{f,x}$, em que c_e é o coeficiente de exposição indicado em 4.5 no EC1 e $c_{f,x}$ é o coeficiente de força para as acções do vento, na direcção x , fornecido em 8.3.1(1) no EC1;

$A_{ref,x}$ – área de referência, indicada em 2.7.1.1;

ρ – massa volúmica do ar.

Os valores de C estão especificados no Anexo Nacional na NA.2.3 – Princípios e Regras de Aplicação com prescrições a nível nacional, u) e são fornecidos os valores recomendados na Tabela 6 [4]:

Tabela 6 – Valores recomendados do coeficiente de força C para pontes (EC1, Quadro 8.2)

b/d_{tot}	$z_e \leq 20 \text{ m}$	$z_e = 50 \text{ m}$
$\leq 0,5$	6,7	8,3
$\geq 4,0$	3,6	4,5

Este Quadro baseia-se nas seguintes hipóteses:

- terreno de categoria II de acordo com o Quadro 4.1;
- coeficiente de força $c_{f,x}$ de acordo com 8.3.1(1);
- $c_o = 1,0$;
- $k_t = 1,0$.

Para valores intermédios de b/d_{tot} e de z_e , poderá ser efectuada uma interpolação linear.

De acordo com anexo nacional NA em NA.8.3.2 (1), na p. 159 do EC1 [4]:

Para $z_e \leq 50\text{m}$ com terrenos diferentes da categoria I, devem ser utilizados os valores recomendados; caso contrário, ou seja, para terrenos $z_e > 50\text{m}$ da categoria I, o coeficiente C deve ser calculado através da expressão $C = c_e(z_e) \cdot c_{f,x}$, considerando que $c_{f,x}$ é determinado de acordo com o método geral para o cálculo dos coeficientes de força na direcção x , expresso em 8.3.1(1) na p. 90 do EC1 e calculando o coeficiente de exposição, c_e , indicado em 4.5 no EC1, para a categoria de terreno e altura de referência em causa.

Para o cálculo de C , caso o $c_{f,x}$ seja avaliado através da Fig. 8.3 do EC1, deve ser escolhida o caso a) que está em coerência com os valores do Quadro 8.2 do EC1 e em relação a c_e deve considerar-se $z_e \geq 20\text{m}$ e, caso o terreno não seja da categoria I, deve considerar-se como sendo da categoria II.

Ou seja, para o cálculo de quantificação de forças devido ao vento em tabuleiros de pontes, considera-se sempre que:

- $z_e \geq 20\text{m}$;
- Rugosidade no máximo Tipo II.

2.7.2. Acção do vento nos pilares

Para as acções do vento nos tabuleiros de pontes e nos seus pilares de apoio deverá ser identificada a direcção mais desfavorável do vento sobre o conjunto da estrutura, para o efeito considerado.

Deverão ser feitos cálculos para situações de projecto transitórias correspondentes às fases de construção em que não é possível qualquer transmissão ou redistribuição horizontal das acções do vento no tabuleiro. As situações transitórias de execução são mais críticas que as situações persistentes para os pilares e para certo tipo de tabuleiros, com métodos de execução particulares [4].

Os efeitos do vento nos pilares deverão ser calculados utilizando o formato geral onde, para o vento actuante nos pilares, poderão usar-se os coeficientes de força que são especificados em 7.6, 7.8 ou 7.9.2 do EC1.

Nestas secções é calculada a força, devido ao vento actuante nos pilares, através da seguinte expressão [8]:

$$F_w = c_s c_d \cdot \sum_{\text{superfícies}} (c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref})$$

Em relação à altura de referência z_e , *Calgaro et al.* (2010), baseado no 7.2.2 do EC1 (coeficientes de pressão para paredes verticais de edifícios de planta rectangular), sugere [8]:

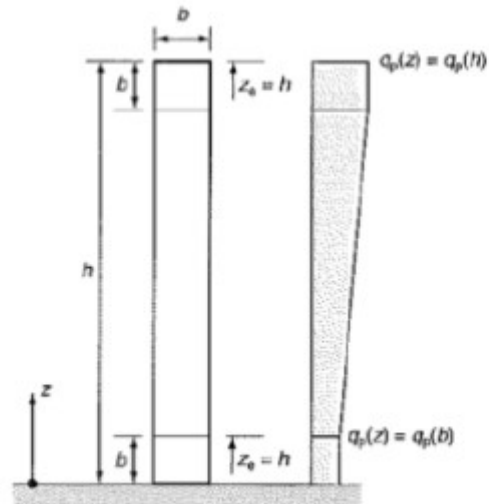


Figura 16 – Perfil de pressões dinâmicas a adoptar em pilares (H. Gulvanessian, (2010). *Designers' guide to Eurocode 1: Actions on Bridges*, p.28)

No caso da construção ser por avanços em consola, deve considerar-se, na fase construtiva, a possibilidade de assimetria das acções do vento, especificado em 7.1.2 na p. 37 do EC1, Pressões e forças assimétricas ou em oposição. De acordo com a CL 7.1.2 (2) b), da p. 37 do EC1, o procedimento consiste [4]: “Em contabilizar a assimetria do carregamento, eliminando a acção de cálculo do vento nas partes da construção em que a sua acção produza um efeito benéfico.”

Capítulo 3.

Quantificação da Acção do vento segundo o RSA

3.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são resumidas as principais disposições do regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (2004), abreviadamente designado por RSA.

Segundo o 22º artigo do RSA [3]: “A acção do vento resulta da interacção entre o ar em movimento e as construções, exercendo-se sob a forma de pressões aplicadas nas suas superfícies.”

O vento pode ser, na generalidade das situações, considerado como actuando na horizontal, devendo admitir-se que pode ter qualquer rumo [3].

Para a determinação dos efeitos do vento nas estruturas, a partir da quantificação desta acção nos termos em que é dada no art.º 22º do RSA, é necessário considerar as características geométricas e dinâmicas da estrutura e ainda a interacção do escoamento do ar com a construção, o que implica o emprego de meios de análise relativamente complexos [3].

A determinação dos efeitos da acção do vento nas estruturas pode ser efectuada por métodos analíticos ou experimentais, tendo em conta a quantificação apresentada no art.º 22º do RSA e as características aerodinâmicas das estruturas [3].

Nos casos correntes, a determinação dos esforços devidos ao vento pode também ser efectuada, de forma simplificada, supondo aplicadas às superfícies da construção, pressões estáticas obtidas multiplicando a pressão dinâmica do vento, definida no art.º 24º do RSA, por adequados coeficientes aerodinâmicos – coeficientes de forma – definidos como é indicado no art.º 25º. Deve notar-se que este processo simplificado não conduz a resultados satisfatórios para estruturas com frequências próprias de vibração muito baixas (<0,5 Hz), ou que sejam susceptíveis de instabilidade aerodinâmica ou de vibrações significativas em direcção transversal à da actuação do vento [3].

Mais à frente serão apresentados elementos para a determinação desta acção. Serão definidos os valores característicos e reduzidos da velocidade média do vento em função da altura acima do solo.

3.2. Zonamento do território

Zonamento do território é o critério em que se baseou o parcelamento do território em dois tipos de zonas. Fundamenta-se na análise dos registos meteorológicos existentes, que permitiu atribuir àquelas zonas, para a mesma probabilidade de ocorrência, intensidades de vento suficientemente diferenciadas [3].

Para efeitos da quantificação da acção do vento, considera-se o país dividido em duas zonas distintas [3]:

Zona A – a generalidade do território, excepto as regiões pertencentes à zona B

Zona B – os arquipélagos dos Açores e da Madeira e as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5km de largura ou a altitudes superiores a 600m.

Porém, no caso de locais situados na zona A cujas condições de orografia determinem exposição ao vento particularmente desfavorável, como pode acontecer em alguns vales e estuários, devem ser considerados como pertencentes à zona B [3].

3.3. Rugosidade aerodinâmica do solo

A variação da velocidade do vento com a altura depende fortemente da rugosidade aerodinâmica do solo, que está relacionada com as dimensões e a distribuição dos obstáculos nele existentes e que afectam o escoamento do ar na sua vizinhança [3].

Para ter em conta a variação da acção do vento com a altura acima do solo consideram-se dois tipos de rugosidade aerodinâmica do solo. Esta é uma consideração esquemática, que resulta da dificuldade de caracterizar objectivamente a multiplicidade das situações que podem ocorrer. A rugosidade aerodinâmica do solo varia consoante as dimensões e distribuições dos obstáculos nele existentes, mas a atribuição de um tipo de rugosidade ao solo em que se localiza uma construção poderá depender da direcção do vento.

Neste sentido, o RSA define dois tipos de rugosidade [3]:

Rugosidade do tipo I – locais situados no interior de zonas urbanas em que predominem edifícios de médio e grande porte.

Rugosidade do tipo II – restantes locais, nomeadamente zonas rurais e periferia de zonas urbanas.

É de salientar que dependendo do lado em que o vento actua, para zonas de transição entre um ambiente urbano e um ambiente rural – chamadas *zonas de periferia*, o mesmo local poderá ser considerado como tendo Rugosidade do tipo I ou Rugosidade do tipo II. Assim, se o vento actuar do lado da zona urbana, o local é considerado como tendo uma rugosidade do tipo I e se actuar do lado da zona rural, o local é considerado do tipo II [1].

3.4. Quantificação da acção do vento

A acção que o vento exerce sobre as estruturas depende de vários factores, entre os quais a grandeza e distribuição da velocidade do vento e as características das estruturas. É por isso necessário definir os valores característicos e reduzidos da velocidade do vento em função da altura do solo.

3.4.1. Velocidade média do vento

A velocidade média do vento é definida, no RSA, em função da altura acima do solo e é referida a intervalos de tempo de 10min [3].

A variação da velocidade média do vento com a altura acima do solo é dada através da seguinte fórmula [1]:

$$v = v_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^{\frac{1}{a}}$$

Em que:

h_0 – altura em que se deixa de sentir a rugosidade do solo (igual a 10m, independentemente do tipo de rugosidade);

v_0 – velocidade do vento correspondente à altura h_0 ;

a – parâmetro que depende da rugosidade do solo;

v – velocidade do vento (m/s);

h – altura acima do solo (m).

O valor da velocidade v_0 e do parâmetro $1/a$ dependem da rugosidade local [1]:

Rugosidade tipo I	$v_0=18m/s$	$1/a= 0,28$
Rugosidade tipo II	$v_0=20m/s$	$1/a= 0,20$

Os valores característicos da pressão dinâmica do vento para a zona A são obtidos a partir dos valores característicos da velocidade de rajada do vento, definidos em função da altura acima do solo, h , pelas seguintes expressões [3]:

$$\text{Solos com rugosidade do tipo I} - v = 18 \left(\frac{h}{10} \right)^{0,28} + 14$$

$$\text{Solos com rugosidade do tipo II} - v = 25 \left(\frac{h}{10} \right)^{0,20} + 14$$

Em que a altura, h , é expressa em m e a velocidade, v , é expressa em m/s .

Nestas expressões, a primeira parcela representa a velocidade média do vento e a segunda parcela tem em conta as flutuações da velocidade resultantes da turbulência do escoamento [3]. Para as flutuações da velocidade resultantes da turbulência do escoamento, o RSA prevê a adição na segunda parcela de 14 m/s .

Estes valores da velocidade média do vento são respeitantes à zona A do território nacional. Para a zona B o RSA impõe que estes valores sejam incrementados de 10% nos valores característicos da velocidade de rajada, ou seja, para a zona B, os valores a considerar devem ser obtidos multiplicando por 1,1 os correspondentes valores indicados para a zona A [3].

Note-se que tanto para a zona A como para a zona B, para alturas acima do solo inferiores a 15m no caso de terrenos com Rugosidade do tipo I, e inferiores a 10m no caso de terrenos com Rugosidade do tipo II, consideram-se constantes os valores característicos da velocidade média e iguais a 20m/s para o tipo I e 25m/s para o tipo II [3].

Em relação a estruturas identicamente solicitadas pelo vento, o art.º 22º do RSA prevê que qualquer que seja o seu rumo (como por exemplo estruturas com simetria de revolução), os valores característicos da velocidade do vento a considerar devem ser obtidos multiplicando por $\sqrt{1,3}$ os valores característicos anteriormente definidos (corresponde a um acréscimo de 14% em relação a estes valores) [3].

A Tabela 7 resume os valores característicos da velocidade média do vento para a zona A e zona B, nos terrenos com Rugosidade do tipo I e do tipo II [1]:

Tabela 7 - Valores característicos da velocidade média do vento (Guerra, João Martins. Acção do vento, 2008)

Velocidade Média do Vento (m/s)		Zona A		Zona B	
		Rugosidade Tipo I	Rugosidade Tipo II	Rugosidade Tipo I	Rugosidade Tipo II
Altura (h)	h < 10 m	$v_A = 20 + 14 \text{ m/s}$	$v_A = 25 + 14 \text{ m/s}$	$v_B = 1.1 v_A$	$v_B = 1.1 v_A$
	h < 15 m		$v_A = 25 \left(\frac{h}{10}\right)^{0.20} + 14$		
	h ≥ 15 m	$v_A = 18 \left(\frac{h}{10}\right)^{0.28} + 14$			

3.4.2. Valores reduzidos da velocidade média do vento

Os valores reduzidos da velocidade média são obtidos multiplicando os valores característicos pela raiz quadrada dos coeficientes ψ . O RSA define os seguintes valores [3]:

$$\psi_0 = 0,4;$$

$$\psi_1 = 0,2;$$

$$\psi_2 = 0.$$

No caso de edificios destinados a escritórios, arquivos, oficinas de indústria ligeira, garagens, auto-silos, ou em caso de projectos em que não esteja definida a posição de paredes divisórias por não se conhecer a compartimentação que o utilizador pretende realizar, e em que a sobrecarga seja a acção base da combinação, deve tomar-se o valor de $\psi_0 = 0,6$ [3].

3.5. Altura acima do solo a considerar no caso de terrenos inclinados

Para determinar a altura h acima do solo é necessário ter em consideração a configuração do próprio terreno [1].

No caso de construções situadas em terrenos inclinados ou na sua vizinhança, a altura h acima do solo a considerar para determinação das pressões dinâmicas, deve ser contada a partir do nível de referência, indicado a tracejado na figura 17.

No caso de ser $\text{tg } \theta \leq 0,3$ o nível de referência coincide com o próprio terreno [3].

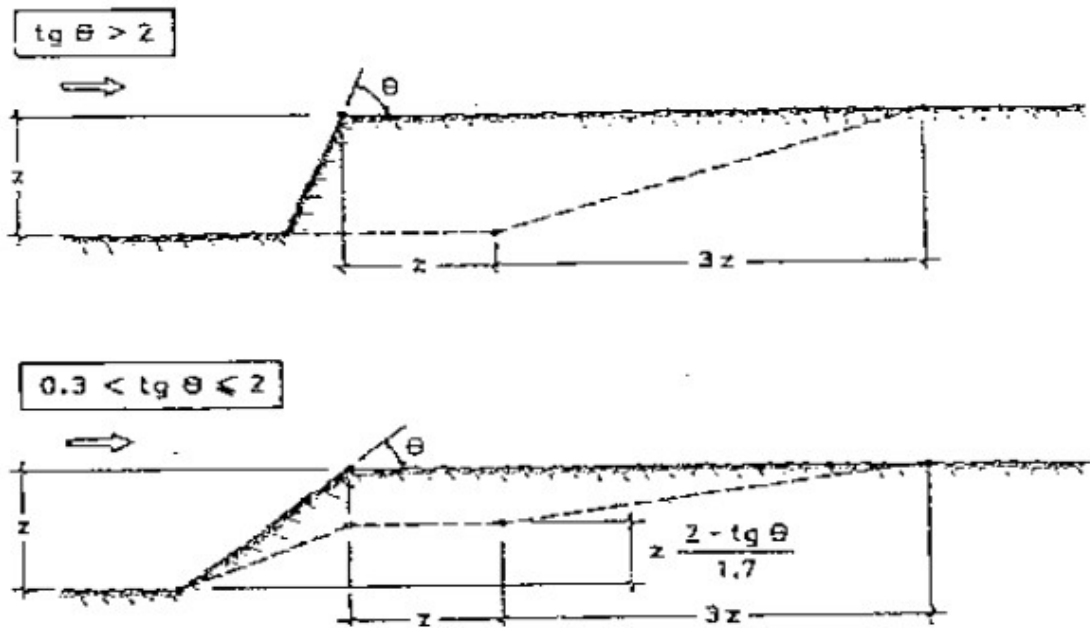


Figura 17 – Determinação da altura h , acima do solo, necessária para ter em consideração a configuração do mesmo (RSA, Fig. 1-1)

3.6. Determinação dos efeitos da acção do vento

Conhecidas as características da acção do vento, a determinação dos seus efeitos sobre uma estrutura pode ser efectuada por métodos analíticos ou experimentais, tendo em conta a quantificação apresentada e as características aerodinâmicas das estruturas [3].

Em relação aos casos correntes, a determinação dos esforços devidos ao vento também pode ser simplificada se forem aplicadas às superfícies de construção as pressões estáticas obtidas, multiplicando a pressão dinâmica do vento (que depende directamente da velocidade do vento) por coeficientes aerodinâmicos adequados – os coeficientes de forma – que caracterizam as formas aerodinâmicas da estrutura, de acordo com a fórmula seguinte [3]:

$$p = w_k \times \delta = 0,613 \times V^2 \times \delta$$

Em que:

p – pressão estática equivalente (variável conforme a altura);

w_k – pressão dinâmica característica devido ao vento (variável conforme a altura);

δ – coeficiente de forma (variável com as características geométricas);

v – velocidade do vento.

Para alguns tipos de estruturas é possível formular processos simplificados de análise que permitam determinar certos efeitos da acção do vento, com aproximação suficiente. É o caso da determinação de esforços, em que se recorre a uma definição estática da acção do vento sobre a construção. No entanto, como foi referido anteriormente, este processo não conduz a resultados satisfatórios para estruturas com frequências próprias de vibração muito baixas (inferiores a cerca de 0,5Hz) ou que sejam susceptíveis de instabilidade aerodinâmica ou de vibrações significativas em direcção transversal à da actuação do vento [3].

3.7. Pressão dinâmica do vento

A pressão dinâmica do vento (w_k) varia com a altura do edifício. Para a determinar é necessário proceder a métodos analíticos. A acção do vento sobre uma dada estrutura depende da velocidade do vento e pode ser determinada através da equação de Bernoulli, que traduz um escoamento em pressão em regime permanente [1]:

$$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = \text{const.}$$

A tradução gráfica desta equação é apresentada na figura 18 [1]:

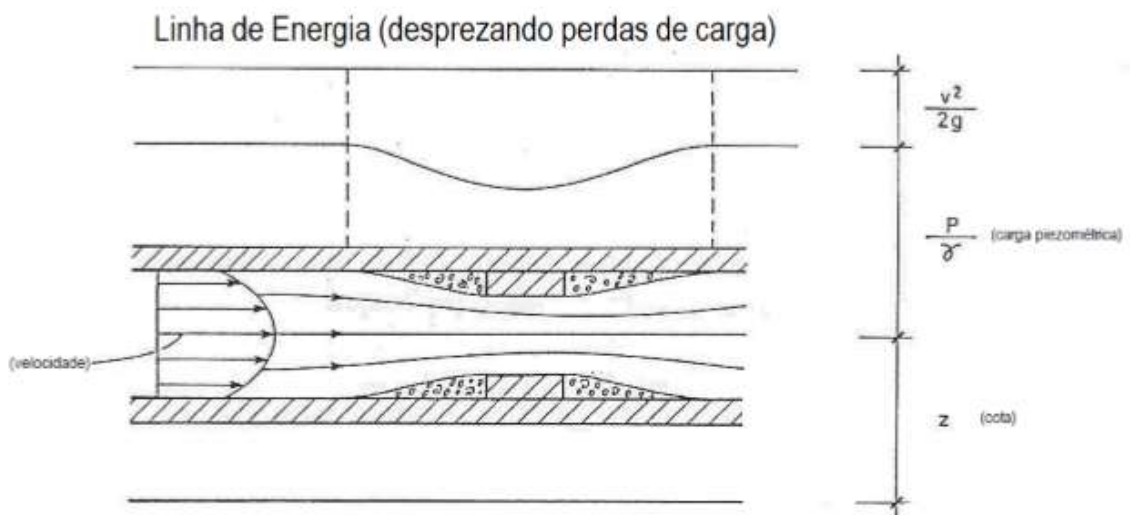


Figura 18 – Equação Piezométrica de Bernoulli (Guerra, João Martins. Acção do vento, 2008)

Considerando dois pontos A e B à mesma cota z e tomando uma velocidade nula num deles (ponto que pertence à superfície da estrutura), tem-se [1]:

$$Z + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = Z + \frac{P_B}{\gamma};$$

Onde:

$$P_B - P_A = w = \frac{v^2 \gamma}{2g};$$

Em que w é a pressão dinâmica na superfície da estrutura.

Fazendo:

$$\frac{\gamma}{g} = 1,225Kg/m^3;$$

Obtêm-se os valores da pressão dinâmica do vento, w_k , que se relacionam com os valores da velocidade, v , pela expressão seguinte [3]:

$$w_k = 0,613v^2$$

Em que a velocidade, v , é expressa em m/s e a pressão, w_k , é expressa em N/m^2 .

A figura 19 mostra a lei da variação da pressão dinâmica do vento, w_k , em relação aos seus valores característicos e em função da altura, h , acima do solo e do tipo de rugosidade do local para a zona A do território nacional [3].

No caso da zona B a velocidade é 10% maior que na zona A ($\times 1,1$) então, para a zona B, os valores característicos da pressão dinâmica (w_k) a considerar obtêm-se multiplicando por 1.1^2 (≈ 1.2) os valores indicados para a zona A [1].

É de realçar que para alturas acima do solo inferiores a 15 metros, no caso de terrenos com rugosidade do tipo I, e para alturas acima do solo inferiores a 10 metros, no caso de terrenos com rugosidade do tipo II, os valores da pressão dinâmica do vento consideram-se constantes quer o edifício em estudo se situe na zona A ou na zona B do território nacional. Esta situação deve-se à dificuldade que existe em quantificar a velocidade do vento na vizinhança imediata do solo, ou seja, até alturas médias dos obstáculos que caracterizam a macro-rugosidade do terreno [3].

Assim, para a grande generalidade dos edifícios que existem em Portugal, caracterizados por uma altura inferior a 10 metros, consoante a rugosidade do terreno, a pressão dinâmica do vento, w_k , é constante e igual aos seguintes valores [1]:

Rugosidade do tipo I: $w_k = 0,70 \text{ kN/m}^2$

Rugosidade do tipo II: $w_k = 0,90 \text{ kN/m}^2$

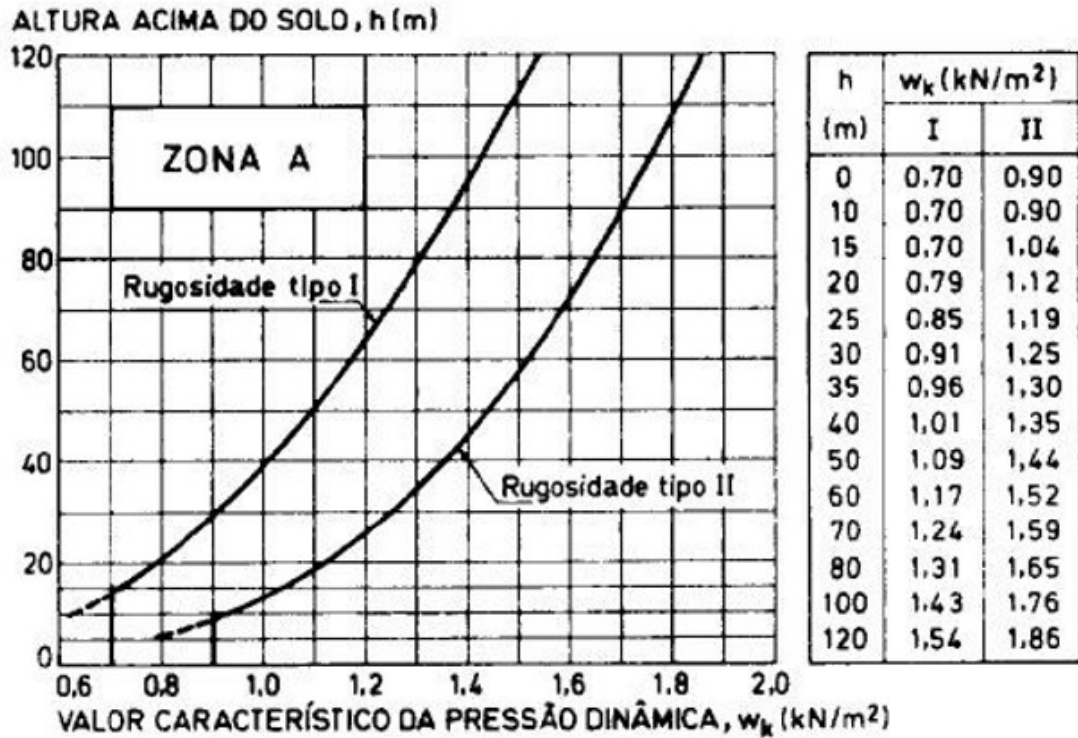


Figura 19 – Valor característico da pressão dinâmica, w_k (RSA, Fig. 1)

Para os tipos de estruturas identicamente solicitadas pelo vento, qualquer que seja o rumo deste (como por exemplo estruturas com simetria de revolução ou estruturas cuja resistência nas diversas direcções seja proporcionada às acções do vento que nessas direcções se exercem), e por força da majoração aí especificada, os valores característicos da pressão dinâmica do vento são obtidos multiplicando por 1,3 os valores indicados na figura 19 [3].

3.8. Coeficientes de forma

Para determinar a acção do vento sobre uma construção é necessário conhecer a pressão dinâmica do vento (w_k), já anteriormente referida, bem como os coeficientes de forma relativos à construção em causa [3].

São considerados coeficientes de forma de dois tipos [3]:

- Coeficientes de pressão;
- Coeficientes de força.

3.8.1. Coeficientes de pressão

Os coeficientes de pressão, δ_p , são definidos para uma superfície particular da construção (ou para uma zona nela localizada) e permitem determinar as pressões, p (que se exercem normalmente às superfícies), pela expressão [3]:

$$p = \delta_p \cdot w$$

Em que:

p – pressão exercida (kN/m^2);

δ_p – coeficiente de pressão;

w – pressão dinâmica do vento.

3.8.2. Coeficientes de força

Os coeficientes de força, δ_f , permitem determinar directamente a força resultante das pressões do vento, F , sobre uma determinada construção ou parte dela, pela seguinte expressão [3]:

$$F = \delta_f \cdot w \cdot A$$

Em que:

F – força resultante;

δ_f – coeficiente de força;

w – pressão dinâmica do vento;





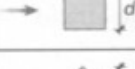


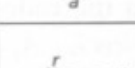

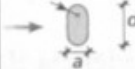
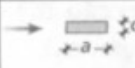

A – área de referência, relacionada com a superfície exposta.

3.9. Pontes. Coeficientes de força

Estas estruturas são, normalmente, constituídas por vários elementos, de variadas formas e dimensões. A diversidade de formas aerodinâmicas que os diversos elementos das pontes podem assumir torna muito difícil, de um modo simplificado, a apresentação dos coeficientes de força a considerar, pelo que é necessário recorrer a bibliografia especializada ou a ensaios em túnel aerodinâmico [3].

No entanto, para o caso de pontes cujos elementos possam ser considerados aerodinamicamente semelhantes aos coeficientes de força nos casos mais comuns, poderão adoptar estes coeficientes para a determinação da acção do vento. Por exemplo, quando os pilares de uma ponte são cheios, podem adoptar-se os coeficientes de força das construções fechadas de forma cilíndrica ou prismática, apresentados na tabela 8 [3].

Tabela 8 – Coeficientes de força para construções fechadas de forma cilíndrica ou prismática (RSA, Quadro I-XIII)

Forma da secção		$d \sqrt{w}^{(*)}$	Esbelteza h/d					
			≤ 1	2	5	10	20	∞
	circular superfície lisa	$< 0,15$	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
		$\geq 0,15$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
	circular superfície rugosa	qualquer	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
	dodecagonal	$< 0,3$	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3
		$\geq 0,3$	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,1
	octogonal	qualquer	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4
	quadrada	qualquer	1,2	1,3	1,4	1,6	1,8	2,0
	quadrada	qualquer	1,0	1,0	1,1	1,3	1,4	1,6
	rectangular $d/a = 1/2$	qualquer	0,8	0,9	1,1	1,2	1,3	1,5
	rectangular $d/a = 2$	qualquer	1,3	1,4	1,5	1,7	1,9	2,1
	$d/a = 1/2$ $r = d/2$	$< 0,08$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
		$\geq 0,08$	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
	$d/a = 2$ $r = a/2$	$< 0,15$	0,8	0,8	0,9	1,0	1,2	1,6
		$\geq 0,15$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
	rectangular $d/a \leq 1/4$	qualquer	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,2
	rectangular $d/a \geq 4$	qualquer	1,2	1,3	1,4	1,6	1,8	2,0

(*) d expresso em metros e w em quilonewtons por metro quadrado.

Para o caso de pilares reticulados podem adoptar-se, para a determinação da acção do vento os coeficientes de força de estruturas reticuladas ou coeficientes de força de perfis, fios e cabos, conforme a situação.

De igual modo, para a determinação da acção do vento sobre o tabuleiro e outros elementos da superestrutura ou elementos a ela associados (guardas, postes de iluminação, fios, tubagens) poderão também utilizar-se os coeficientes de força mais comuns, em conformidade com a situação em estudo, desde que convenientemente seleccionados.

Se o tabuleiro for do tipo laje-vigada ou viga-caixão, considera-se, por simplificação, que os coeficientes de força são os correspondentes à superfície prismática cuja secção rectangular é envolvente da secção do tabuleiro.

Nos casos em que se considera necessário contabilizar a acção do vento sobre os veículos que circulam nas pontes, determina-se tal acção admitindo coeficientes de força de 1,5.

Capítulo 4.

Análise comparativa RSA/EC1

4.1. Velocidade média do vento

Apenas se comparam velocidades e pressões dinâmicas do vento para a zona A do EC1, que coincide com a zona A do RSA. Para a zona B, tanto no RSA como no EC1, verifica-se um aumento de 10% de velocidade em relação à velocidade na zona A.

Em relação aos valores característicos da velocidade média do vento (velocidade sem o efeito da turbulência), no Anexo I do RSA são definidos, para a zona A com rugosidade do tipo II, pela seguinte expressão:

$$\text{Solos com rugosidade do tipo II} - v = 25 \left(\frac{h}{10} \right)^{0,20};$$

Em que h é a altura acima do terreno. Onde para $h=10\text{m}$, tem-se $v=25\text{m/s}$. O valor básico da velocidade de referência do vento apresentado no Quadro NA.I do Anexo Nacional NA do EC1 para a zona A é de 27m/s . Verifica-se que este valor é bastante semelhante ao apresentado no EC1.

Constata-se que apesar do período de retorno do EC1 ser bastante inferior ao do RSA, o valor básico da velocidade de referência no EC1 é mais gravoso que o apresentado no RSA. Não existe uma razão clara para esta diferença, embora se possa admitir que o Anexo Nacional do EC1 foi preparado com base em registos meteorológicos mais recentes e actualizados.

4.2. Rugosidade do terreno

Em relação às categorias de rugosidade do terreno, verifica-se que não existe equivalência entre os dois regulamentos. O RSA apenas tem duas categorias, enquanto que o EC1 prevê 4 [6]:

Tabela 9 – Comparação entre as categorias do terreno no RSA e no EC1

Categorias do terreno segundo o RSA	Categorias do terreno segundo o EC1
I Locais situados no interior de zonas urbanas em que predominem edifícios de médio e grande porte.	I Zona costeira exposta aos ventos de mar
II Restantes locais, nomeadamente zonas rurais e periferia de zonas urbanas.	II Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura.
	III Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: zonas suburbanas, florestas permanentes).
	IV Zona na qual pelo menos 15 % da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m.

Observando a Tabela 9, podemos concluir que [5]:

1. A categoria IV do EC1 corresponde à categoria I do RSA
2. As categorias I, II e III do EC1 podem ser vistas como uma subdivisão da categoria II do RSA, embora a categoria II do EC1 possa também corresponder sensivelmente à categoria II do RSA. Neste caso deixa as categorias I e III do EC1 sem correspondência directa com o RSA. Conclui-se que depende da interpretação que é feita em relação aos quadros de uma e outra norma.

3. Em relação ao facto de apenas existir dois tipos de rugosidade do solo para o caso do RSA, resulta da dificuldade que havia na altura de caracterizar objectivamente a multiplicidade das situações que podiam ocorrer.

4.3. Pressão dinâmica de pico

A pressão dinâmica de pico depende, entre outros factores, das características de rugosidade do terreno, para as quais tanto o RSA como EC1 podem estabelecer várias categorias.

A figura 20 mostra as pressões dinâmicas de pico referentes à zona A, para ambos os regulamentos [6]:

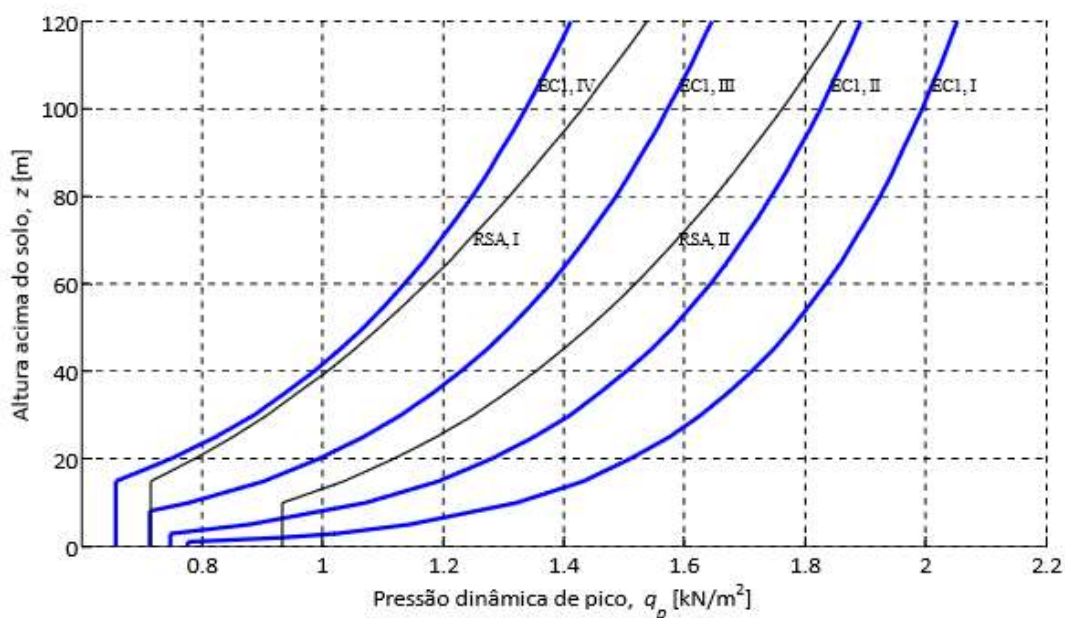


Figura 20 – Pressões dinâmicas para a zona A segundo o RSA e segundo o EC1 (Jacinto, Luciano. Acção do vento: quantificação de acordo com o EC1)

Observando a figura 20, verifica-se que [5]:

1. Em relação à pressão dinâmica associada à categoria IV do EC1 é menos gravosa que a categoria I do RSA, embora as diferenças sejam pequenas;
2. Em relação às outras categorias o EC1 é globalmente mais desfavorável;
3. Para construções com alturas inferiores a 10 metros, o EC1 é tendencialmente menos gravoso que o RSA.

4.4. Valores Reduzidos da pressão dinâmica

Os valores reduzidos da pressão dinâmica do vento deverão ser obtidos através de coeficientes de redução que poderão oscilar ligeiramente consoante o regulamento que estamos a utilizar [6]:

Regulamento	ψ_0	Ψ_1	ψ_2
RSA	0,4*	0,2	0
EC0	0,6	0,2	0

*No caso de edifícios em que a sobrecarga preponderante não é a concentração de pessoas, mas sim a acção de base da combinação, o RSA especifica $\psi_0=0,6$.

Verifica-se uma certa aproximação de valores entre um e outro regulamento.

4.5. Interpretação dos resultados

Verifica-se que existem casos em que o EC1 será menos gravoso que o RSA e que existem casos em que se sucede o contrário, mas tanto num como noutro as diferenças não são significativas e as estruturas nos dois regulamento terão resistências mecânicas semelhantes.

Capítulo 5.

Casos Práticos

5.1. Aplicações

5.1.1. Considerações iniciais

A acção do vento sobre as construções exerce-se sob a forma de pressões. Estas pressões dependem essencialmente de [9]:

- Velocidade do vento;
- Características aerodinâmicas da construção;
- Características dinâmicas da estrutura.

A velocidade do vento depende da rugosidade do terreno e da altura da construção acima do solo [9]. A determinação dos efeitos da acção do vento pode ser feita tanto por meio de análise dinâmica, como por meio de análise estática. O método estático, porém, não conduz a resultados satisfatórios no caso de estruturas muito flexíveis (frequência própria fundamental inferior a cerca de 0,5Hz) nem de estruturas susceptíveis de instabilidade aerodinâmica.

Nalguns casos é admissível considerar um período de retorno da acção do vento inferior ao previsto no RSA. Traduz-se num valor inferior ao da velocidade do vento e, conseqüentemente, num valor inferior ao da pressão dinâmica. Um exemplo destes casos seria uma análise a uma estrutura numa fase transitória, na sua fase construtiva por exemplo, considerando a acção do vento. É admissível usar-se um período de retorno inferior a 1 ano, o que corresponde a uma pressão dinâmica sensivelmente igual a metade da definida no RSA.

O método estático pressupõe, aplicadas às superfícies das construções, pressões dadas por [9]:

$$p_{wk} = \delta \times w_k$$

Em que:

δ – Coeficiente de forma (traduz as características da acção do vento);

w_k – Valor característico da pressão dinâmica.

5.1.2. Exemplos aplicativos:

Ilustra-se a aplicação do método descrito no subcapítulo anterior através do seguinte exemplo:

Quantificar a acção do vento na Passagem Superior indicada na figura seguinte. Considerando:

- Zona A;
- Rugosidade aerodinâmica do tipo II.

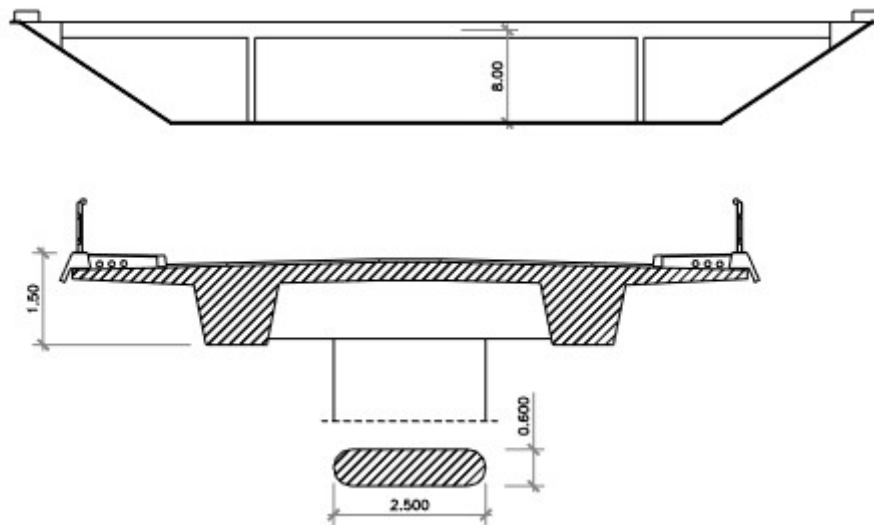


Figura 21 – Exemplo do cálculo da acção do vento segundo o RSA

Resolução segundo o RSA:

Pressão dinâmica do vento: $h = 8,0m \Rightarrow w_k = 0,9KN/m^2$;

(RSA art.º 24, Fig. 1)

Coefficientes de forma:

Tabuleiro (RSA Anexo I Quadro I-XIII)

Esbelteza $h/d = 8/1,5 = 5,3 \Rightarrow \delta = 0,80$;

$p = \delta_p w \Rightarrow p_{w,tab} = 0,80 \times 0,90 \times 1,50 = 1,1KN/m$.

Pilares (RSA Anexo I Quadro I-XIII)

Regime do escoamento $d\sqrt{w} = 0,60 \times \sqrt{0,9} = 0,57 > 0,08$;

Esbelteza $h/d = 8/0,60 = 13,3 \Rightarrow \delta = 0,3$;

$p = \delta_p w \Rightarrow p_{w,pil} = 0,30 \times 0,90 \times 0,60 = 0,16 \text{KN/m}$.

Veículos (RSA art.º 45; Anexo I 3.8)

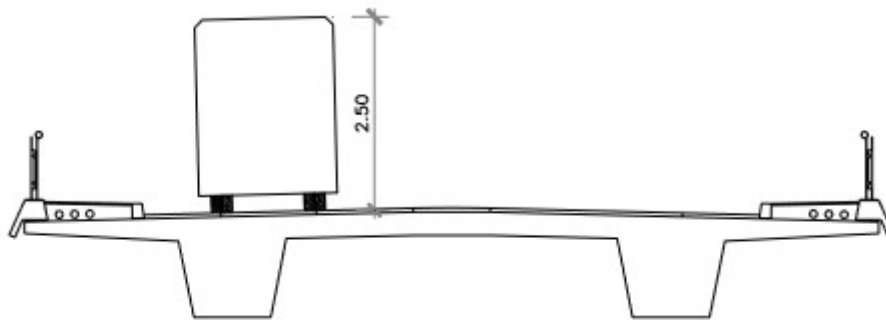


Figura 22 – Acção do vento na sobrecarga

$\delta = 1,5$;

$p = \delta_p w \Rightarrow p_{w,sc} = 1,50 \times 0,90 \times 2,50 = 3,4 \text{KN/m}$.

Em resumo tem-se:

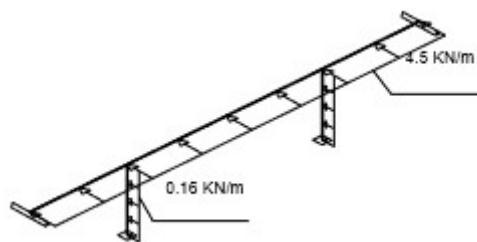


Figura 23 – Forças estáticas, equivalentes à acção do vento para o exemplo aplicativo segundo o RSA

Aplica-se para o mesmo exemplo o cálculo segundo o EC1:

Quantificar a acção do vento transversal actuante na Passagem Superior (PS) representada, considerando Zona A e terreno com rugosidade do tipo II. Considerar ainda valor unitário para o coeficiente estrutural, tanto para o tabuleiro como para o pilar.

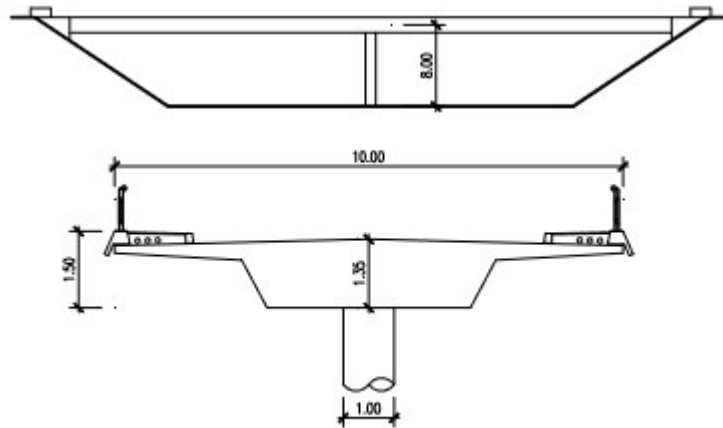


Figura 24 – Exemplo do cálculo da acção do vento segundo o EC1

Resolução segundo o EC1:

Vento no tabuleiro – situação sem carga de tráfego

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{ref,x};$$

Zona A (Quadro NA.I, NP EN 1991-1-4 – Anexo Nacional NA) $\Rightarrow v_{b,0} = 27m/s$;

Considerando $c_{dir}=1,0$ e $c_{season}=1,0$, tem-se:

$$v_b = c_{dir}c_{season}v_{b,0} \Rightarrow v_b = 1,0 \times 1,0 \times 27 = 27m/s;$$

Coeficiente C (Quadro 8.2 EC1; Quadro 8.1, guarda-corpo vazado nos dois lados)

$$d_{tot} = d + 0,60 \Rightarrow 1,50 + 0,60 = 2,10m;$$

$$b/d_{tot} = 10/2,10 = 4,76m;$$

A altura de referência para a pressão exterior exercida pelo vento, z_e , poderá ser considerada como a distância entre o nível mais baixo do solo e o nível central da estrutura

do tabuleiro da ponte, não considerando as outras áreas de referência (por exemplo, os guarda-corpos). Deverá ser considerada igual a h .

Como $z_e = h = 8,0m \leq 20$ e $b/d_{tot} = 4,76m \geq 4,0$; tem-se: $C=3,6$

Área de referência (por metro de tabuleiro)

$$A_{ref,x} = d_{tot} \times 1 = 2,10m^2/m;$$

A massa volúmica do ar, ρ , depende da altitude, da temperatura e da pressão atmosférica previstas para a região durante situações de vento intenso. Os valores de ρ poderão ser fornecidos no Anexo Nacional e o seu valor recomendado é $1,25 \text{ kg/m}^3$.

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{ref,x} = \frac{1}{2} \times 1,25 \times 27^2 \times 3,6 \times 2,10 = 3,4KN/m.$$

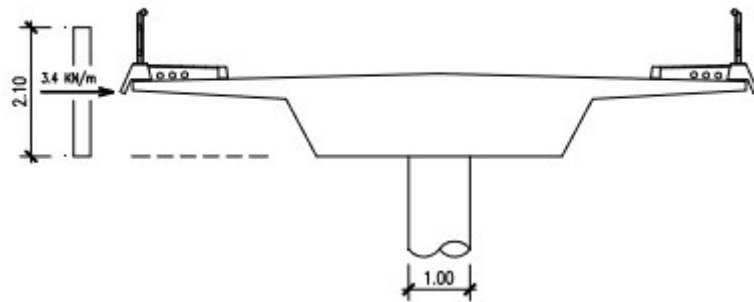


Figura 25 – Representação forças resultantes da acção do vento no tabuleiro para a situação sem carga de tráfego

Vento no tabuleiro – situação com carga de tráfego

Coefficiente $c_{fx,0}$ (Fig. 8.3 do EC1)

Ao valor de d_{tot} , para pontes rodoviárias, deverá considerar-se uma altura de 2 m a partir do nível da plataforma de rodagem e ao longo do comprimento mais desfavorável, independentemente da posição das cargas verticais de tráfego.

$$d_{tot} = d + 2,00 \Rightarrow 1,35 + 2,00 = 3,35m;$$

$$b/d_{tot} = 10/3,35 \approx 3,00m \Rightarrow c_{fx,0} = 1,6 \text{ (Figura 8.3 do EC1, por interpolação);}$$

Coefficiente de exposição, $c_e(z_e)$, considerando $z_e=20\text{m}$:

$$c_e = \frac{q_p(z)}{q_b}; \quad q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2;$$

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b;$$

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{K_I}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)};$$

c_0 – coeficiente de orografia. Para o caso de um terreno plano $c_0(z)=1,0$;

k_I – coeficiente de turbulência. O valor de k_I poderá ser fornecido no Anexo Nacional e o seu valor recomendado é 1,0;

z_0 – comprimento de rugosidade, fornecido no Quadro 4.1 do EC1.

Para um terreno com rugosidade aerodinâmica do tipo II (Quadro 4.1 do EC1)

$$\Rightarrow z_0 = 0,05$$

A velocidade média do vento, v_m , a uma altura z acima do solo, depende da rugosidade do terreno, c_r , da orografia, c_0 , e do valor de referência da velocidade do vento, v_b .

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b;$$

O coeficiente de rugosidade $c_r(z)$ tem em conta a variabilidade da velocidade média do vento no local da construção em resultado:

– da altura acima do nível do solo;

– da rugosidade do terreno a barlavento da construção, na direcção do vento considerada.

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right);$$

k_r – coeficiente de terreno dependente do comprimento de rugosidade z_0

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07};$$

$\Rightarrow z_{0,II} = 0,05$ (depende da categoria do terreno, que no nosso caso é do tipo II)

Substituindo as expressões tem-se:

$$c_e(z_e) = \frac{q_p(z_e)}{q_b} = \frac{[1+7 \cdot I_v(z_e)] \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v_m^2(z_e)}{\frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2} \Leftrightarrow$$

$$c_e(z_e) = \frac{\left[1+7 \cdot \frac{K_I}{c_0(z_e) \cdot \ln(z_e/z_0)}\right] \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot (c_r(z_e) \cdot c_0(z_e) \cdot v_b)^2}{\frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2} \Leftrightarrow$$

$$c_e(z_e) = \left[1 + 7 \cdot \frac{K_I}{c_0(z_e) \cdot \ln(z_e/z_0)}\right] \cdot (c_r(z_e) \cdot c_0(z_e))^2 \Leftrightarrow$$

$$c_e(z_e) = \left[1 + 7 \cdot \frac{K_I}{c_0(z_e) \cdot \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right)}\right] \cdot \left[k_r \cdot \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right) \cdot c_0(z_e)\right]^2 \Leftrightarrow$$

$$c_e(z_e) = \left[1 + 7 \cdot \frac{K_I}{c_0(z_e) \cdot \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right)}\right] \cdot \left[0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,11}}\right)^{0,07} \cdot \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right) \cdot c_0(z)\right]^2 \Leftrightarrow$$

$$c_e(z_e) = \left[1 + \frac{7}{\ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right)}\right] \cdot \left[0,19 \cdot \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right)\right]^2 \Leftrightarrow$$

$$c_e(z_e) = \left(1 + \frac{7}{\ln(20/0,05)}\right) \left(0,19 \cdot \ln\left(\frac{20}{0,05}\right)\right)^2 = 2,81;$$

Coefficiente C

$$C = c_e \cdot c_{x,f} = 2,81 \times 1,60 = 4,50;$$

Área de referência (por metro de tabuleiro):

$$A_{ref,x} = d_{tot} \times 1 = 3,35m^2/m;$$

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{ref,x} = \frac{1}{2} \times 1,25 \times 27^2 \times 4,50 \times 3,35 = 6,9KN/m.$$

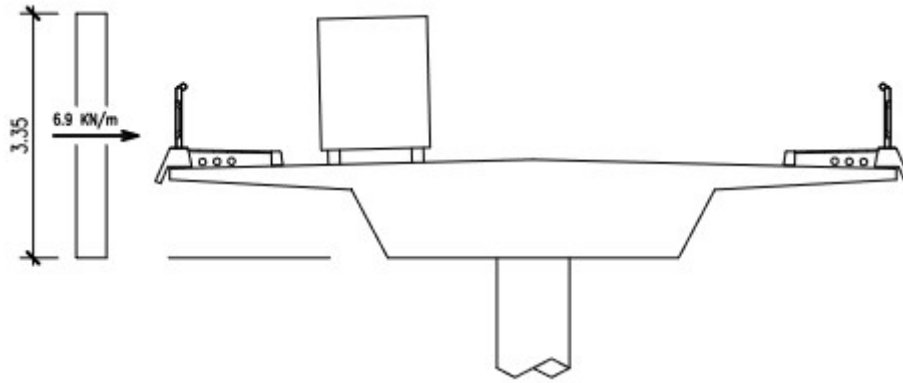


Figura 26 – Representação forças resultantes da ação do vento no tabuleiro para a situação com carga de tráfego

Vento nos pilares

$$F_w = c_s c_d \cdot \sum_{\text{superfícies}} (c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref});$$

De acordo com o enunciado, o coeficiente estrutural, $c_s c_d = 1$;

Coeficiente de exposição, $c_e(z_e)$, para $z_e = 8,0\text{m}$:

$$c_e(z_e) = \left[1 + \frac{7}{\ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right)} \right] \cdot \left[0,19 \cdot \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right) \right]^2 \Leftrightarrow$$

$$c_e(z_e) = \left(1 + \frac{7}{\ln(8/0,05)} \right) \left(0,19 \cdot \ln\left(\frac{8}{0,05}\right) \right)^2 = 2,21;$$

Pressão dinâmica de pico:

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b;$$

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = 2,21 \times \frac{1}{2} \times 1,25 \times 27^2 = 1007\text{N/m}^2 \approx 1,0\text{KN/m}^2.$$

O coeficiente de força determina-se com base no 7.9.2 da pág. 77 do EC1

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda;$$

Em que:

$c_{f,0}$ – coeficiente de força para cilindros sem livre escoamento em torna das extremidades;

ψ_λ – coeficiente de efeitos de extremidade. No anexo nacional são fornecidos valores de λ e de ψ_λ que tenham em conta o efeito da turbulência.

$$R_e = \frac{b \cdot v(z_e)}{v};$$

Em que:

b – diâmetro;

v – viscosidade cinemática do ar ($v=15 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$).

$v(z_e)$ – velocidade de pico do vento definida na Nota 2 da Fig. 7.27 do EC1, à altura de z_e

$$R_e = \frac{b \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot q_p}{\rho}}}{v} = \frac{1,00 \times \sqrt{\frac{2 \times 1007}{1,25}}}{15 \times 10^{-6}} = 2675984;$$

Tabela 10 – Rugosidade superficial equivalente k (EC1, Quadro 7.13)

Tipo de superfície	Rugosidade equivalente k [mm]	Tipo de superfície	Rugosidade equivalente k [mm]
Vidro	0,0015	Betão liso	0,2
Metal polido	0,002	Madeira aplainada	0,5
Revestimento por pintura liso	0,006	Betão rugoso	1,0
Pintura aplicada à pistola	0,02	Madeira serrada, rugosa	2,0
Aço - superfície lisa	0,05	Superfície com ferrugem	2,0
Ferro fundido	0,2	Alvenaria de tijolo	3,0
Aço galvanizado	0,2		

De acordo com o Quadro 7.13 do EC1 (Tabela 10) tem-se:

$k=0,2\text{mm}$ (betão liso)

$k/b = 0,2 \times 10^{-3} / 1,00 = 0,0002$; (b é o diâmetro do pilar)

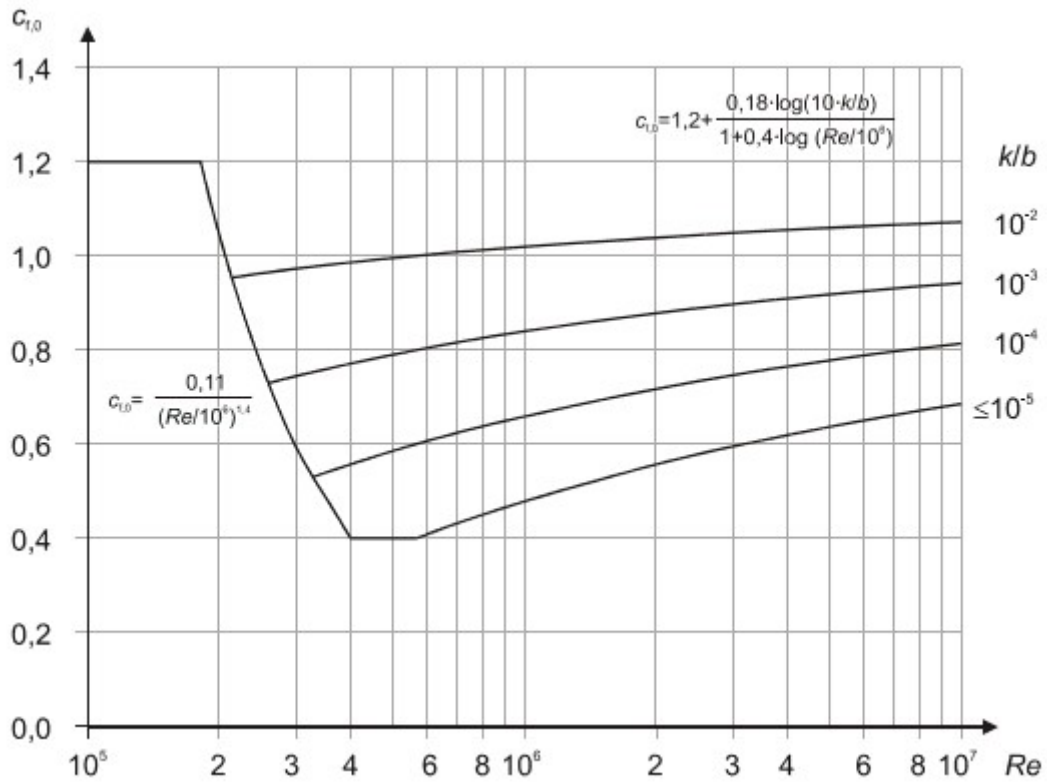
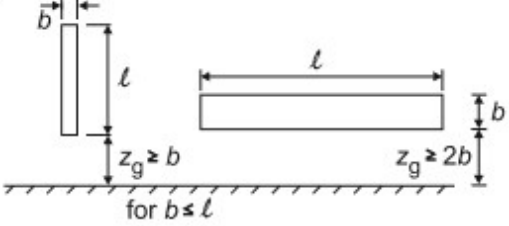
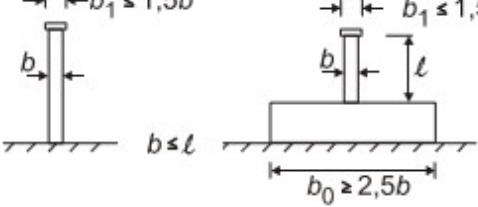
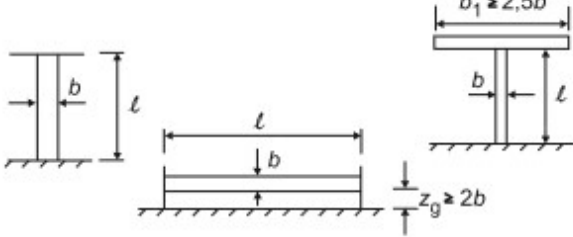


Figura 27 – Coeficiente de força $c_{f,0}$ para cilindros de base circular sem livre escoamento em torno das extremidades e para diferentes valores da rugosidade equivalente k/b (EC1, Fig. 7.28)

De acordo com a Fig. 7.28 do EC1 (Fig. 27) tem-se:

$$c_{f,0} = 1,2 + \frac{0,18 \cdot \log(10 \cdot k/b)}{1 + 0,4 \cdot \log(Re/10^6)} = 1,2 + \frac{0,18 \log(0,002)}{1 + 0,4 \log(2,676)} = 0,785;$$

Tabela 11 – Esbelteza efectiva λ (EC1 – Anexo Nacional NA, Quadro NA–7.16)

N.º	Posição da estrutura, vento perpendicular ao plano da figura	Esbelteza efectiva λ
1		$\lambda = l/b$
2		$\lambda = 2/b$
3		$\lambda = \infty$ ($\psi_\lambda = 1$)

Legenda:

for $b \leq l$ para $b \leq l$

De acordo com o Quadro NA–7.16 (Tabela 11) do Anexo Nacional NA do EC1, considera-se que $\psi_\lambda=1,00$.

Assim tem-se:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 0,785 \times 1,0 = 0,785;$$

A área de referência A_{ref} deverá ser obtida através da expressão:

$$A_{ref} = l \cdot b;$$

Em que:

l – comprimento do elemento estrutural considerado;

b – diâmetro da secção do pilar.

Área de referência (por metro de pilar):

$$A_{ref,x} = b \times 1 = 1,00m^2/m;$$

Assim a força nos pilares devida ao vento tem o seguinte valor:

$$F_w = c_s c_d \cdot \sum_{superfícies} (c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}) = 0,785 \times 1,00 \times 1,00 = 0,785KN/m.$$

Em resumo tem-se:

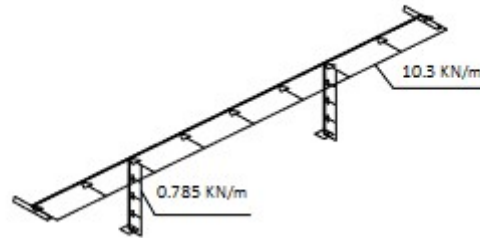


Figura 28 – Forças estáticas, equivalentes à acção do vento para o exemplo aplicativo segundo o EC1

5.1.3. Comparação de resultados

Verifica-se que os valores apresentados, através do cálculo segundo o EC1, são em certos casos quase 5 vezes mais gravosos que os apresentados pelo RSA:

Vento no tabuleiro – situação sem carga de tráfego

$$F_w(\text{segundo o EC1}) = 3,4KN/m \approx 3 \times F_w(\text{segundo o RSA}) = 3 \times 1,1 = 3,3KN/m$$

Vento no tabuleiro – situação com carga de tráfego

$$F_w(\text{segundo o EC1}) = 6,9KN/m \approx 2 \times F_w(\text{segundo o RSA}) = 2 \times 3,4 = 6,8KN/m$$

Vento nos pilares

$$F_w(\text{segundo o EC1}) = 0,785KN/m \approx 5 \times F_w(\text{segundo o RSA}) = 5 \times 0,16 = 0,8KN/m.$$

	RSA	EC1
Tabuleiro	1,1 KN/m	3,4 KN/m
Veículos	3,4 KN/m	6,9 KN/m
Pilares	0,16 KN/m	0,785 KN/m

5.2. Viaduto do Covelo

5.2.1. Considerações iniciais

O Presente estudo refere-se ao Trecho 2 – Nó A32/A41 / Aguiar de Sousa – do Viaduto do Covelo. Esta obra de arte encontra-se em Aguiar de Sousa, no concelho de Paredes e inicia-se no Km 7+542 e termina no Km 7+802, tendo uma extensão de 260m [10].

Viadutos

Designação	km inicial	km final	Extensão m
Ponte sobre o rio Douro	1+735	2+475	740
V2 – Viaduto do Covelo	7+542	7+802	260
Ponte sobre o rio Sousa I	10+828	11+138	310
Ponte sobre a rib. ^a do Bustelo	11+769	12+181	412

Fonte: RECAPE

Figura 29 – Extensão dos viadutos no Trecho 2 – Nó A32/A41 / Aguiar de Sousa (Parecer da Comissão de avaliação. Conformidade do projecto de execução com a DIA – A41 – Picoto (IC2) / Nó da Ermida (IC25) – Trecho 2 – Nó A32/A41 / Aguiar de Sousa, 2008)



Figura 30 – Planta e Perfil Longitudinal do viaduto do Covelo na faixa da direita (Rito, Armando. Projecto de Execução do Viaduto do Covelo, 2008)

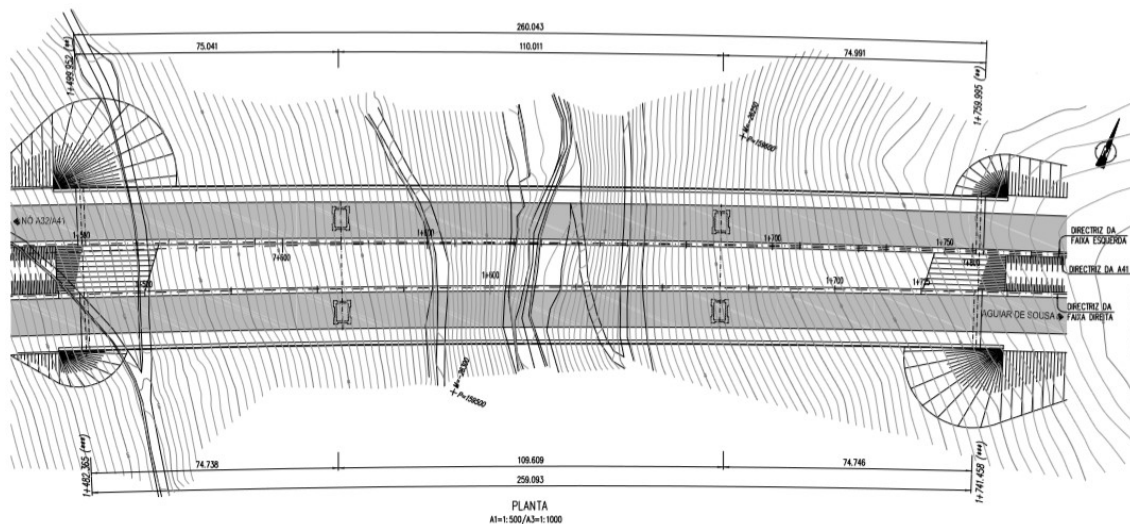


Figura 31 – Planta do viaduto do Covelo em pormenor (Rito, Armando. Projecto de Execução do Viaduto do Covelo, 2008)

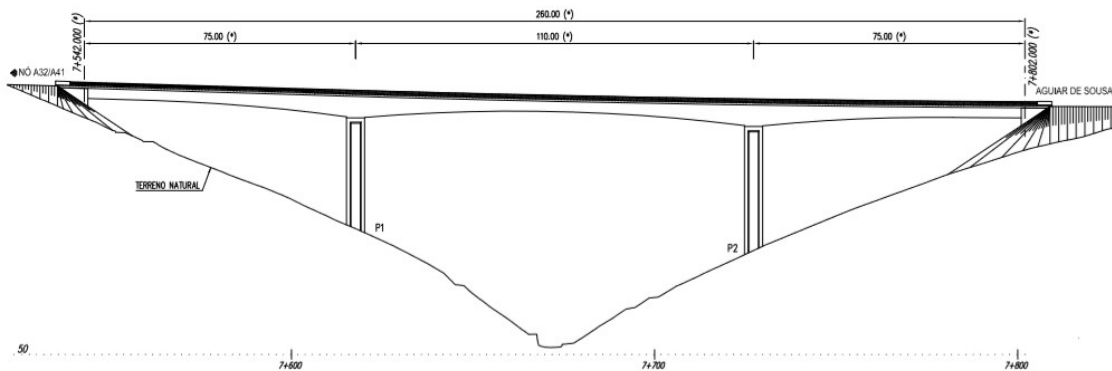


Figura 32 – Alçado do viaduto do Covelo (Rito, Armando. Projecto de Execução do Viaduto do Covelo, 2008)

As figuras 29, 30 e 31 representam, respectivamente, a Planta e Perfil Longitudinal na faixa da direita, a Planta em Pormenor e o Alçado do viaduto do Covelo.

O viaduto é o caso prático que se irá abordar, onde será feita uma quantificação da acção do vento na obra de arte indicada.

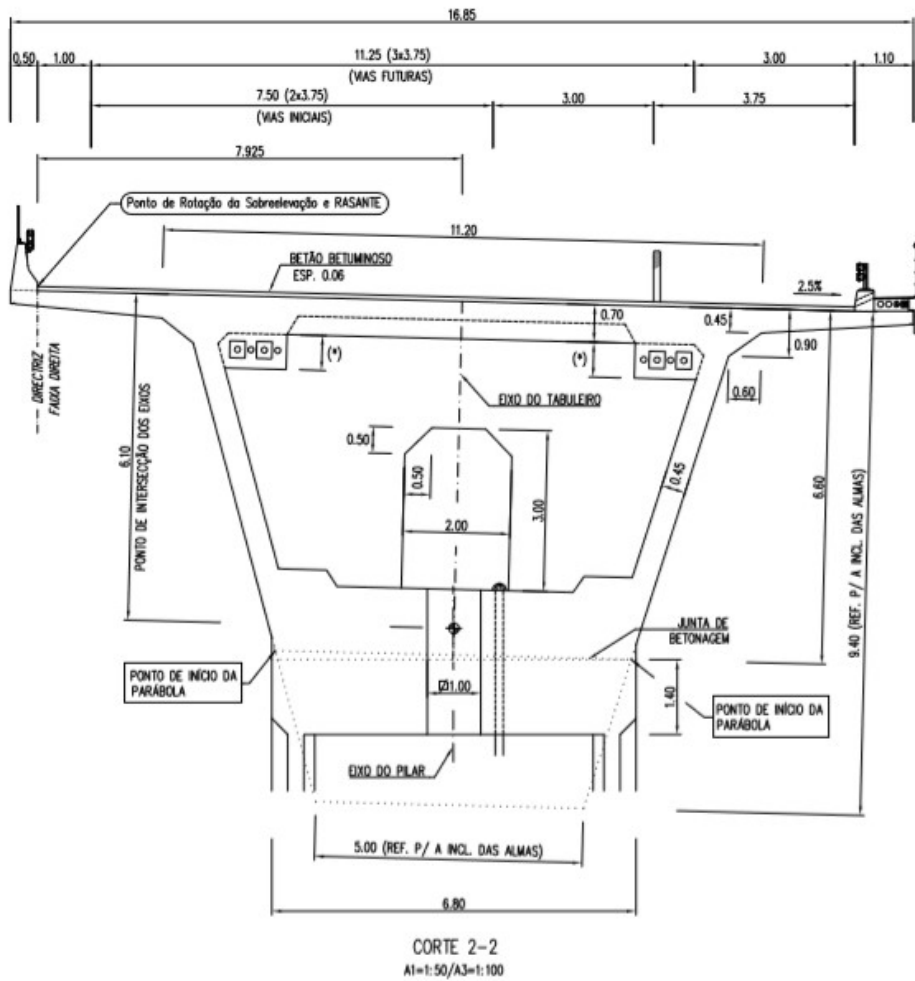


Figura 33 – Dimensionamento do tabuleiro do viaduto do Covelo. (Rito, Armando. Projecto de Execução do Viaduto do Covelo, 2008)

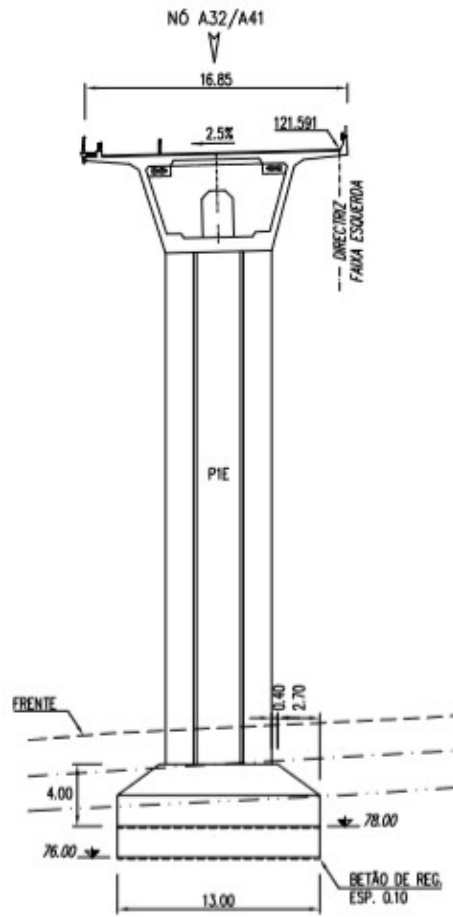


Figura 34 – Dimensionamento dos pilares do viaduto do Covelo. (Rito, Armando. Projecto de Execução do Viaduto do Covelo, 2008)

5.2.2. Resolução

A aplicação do método estático pressupõe aplicadas às superfícies das construções, pressões dadas por:

$$p_{wk} = \delta \times w_k$$

Resolução segundo o RSA:

De acordo com a região indicada considera-se que o viaduto:

- Encontra-se na zona A;
- E tem uma rugosidade de terreno do tipo II.

Assim:

Pressão dinâmica do vento: $h = 40m \Rightarrow w_k = 1,35KN/m^2$;

(RSA art.º 24, Fig. 1)

Coefficientes de forma:

Tabuleiro (RSA Anexo I Quadro I-XIII)

Tabuleiro c/ altura variável:

$$3,0 \leq d \leq 6,0 \Rightarrow d = 4,5m$$

Considerando uma secção rectangular variável com $d/a \leq 1/4$, tem-se:

$$\text{Esbelteza } h/d = 40/4,5 = 8,9 \Rightarrow \delta = 0,8;$$

$$p = \delta_p w \Rightarrow p_{w,tab} = 0,8 \times 1,35 \times 4,50 = 4,86KN/m.$$

Pilares (RSA Anexo I Quadro I-XIII)

Considerando uma secção quadrada, tem-se:

$$\text{Esbelteza } h/d = 40/6,8 = 5,88 \Rightarrow \delta = 1,435;$$

$$p = \delta_p w \Rightarrow p_{w,pil} = 1,435 \times 1,35 \times 5,00 = 9,68KN/m.$$

Veículos (RSA art.º 45; Anexo I 3.8)

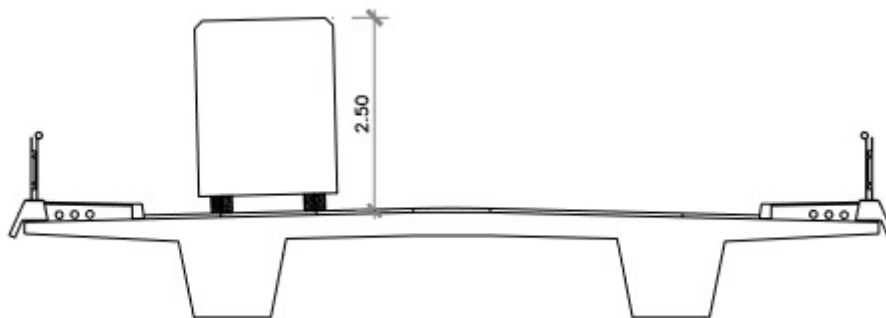


Figura 35 – Acção do vento na sobrecarga

$$\delta = 1,5;$$

$$p = \delta_p w \Rightarrow p_{w,sc} = 1,50 \times 1,35 \times 2,50 = 5,06KN/m.$$

Em resumo tem-se:

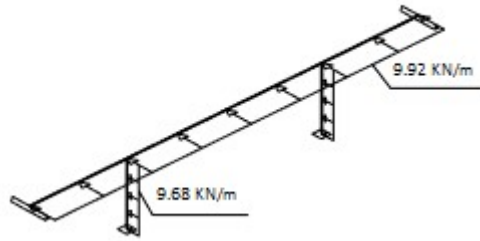


Figura 36 – Forças estáticas, equivalentes à ação do vento para o viaduto do Covelo segundo o RSA

Aplica-se para o mesmo caso prático o cálculo feito segundo o EC1:

Resolução segundo o EC1:

Vento no tabuleiro – situação sem carga de tráfego

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{ref,x};$$

Zona A (Quadro NA.I, NP EN 1991-1-4 – Anexo Nacional NA) $\Rightarrow v_{b,0} = 27m/s$;

Considerando $c_{dir}=1,0$ e $c_{season}=1,0$, tem-se:

$$v_b = c_{dir}c_{season}v_{b,0} \Rightarrow v_b = 1,0 \times 1,0 \times 27 = 27m/s;$$

Coeficiente C (Quadro 8.2 EC1; Quadro 8.1, guarda-corpo vazado e guarda de segurança vazada num só lado)

$$d_{tot} = d + 0,60 \Rightarrow 4,50 + 0,60 = 5,10m;$$

$$b/d_{tot} = 16,85/5,10 = 3,30m;$$

Como $20 \leq z_e = h = 40,0m \leq 50$ e $0,5 \leq b/d_{tot} = 3,30m \leq 4,0$;

$$\text{Para } b \leq 0,5 \quad 6,7 \leq C1 = 7,77 \leq 8,3$$

$$\text{Para } b \geq 4,0 \quad 3,6 \leq C2 = 4,2 \leq 4,5$$

Como $20 \leq z_e = h = 40,0m \leq 50$ e $0,5 \leq b/d_{tot} = 3,30m \leq 4,0$

De acordo com o Quadro 8.2 EC1, tem-se:

b/d _{tot}	Z _e ≤20	Z _e =40	Z _e =50
≤0,5	6,7	C1=7,77	8,3
		C=X	
≥4,0	3,6	C2=4,2	4,5

Por interpolação tem-se: C=4,91

Área de referência (por metro de tabuleiro)

$$A_{ref,x} = d_{tot} \times 1 = 5,10m^2/m;$$

O valor recomendado de ρ é 1,25 kg/m³.

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{ref,x} = \frac{1}{2} \times 1,25 \times 27^2 \times 4,91 \times 5,10 = 11,41KN/m.$$

Vento no tabuleiro – situação com carga de tráfego

Coefficiente $c_{fx,0}$ (Fig. 8.3 do EC1)

Ao valor de d_{tot} , para pontes rodoviárias, deverá considerar-se uma altura de 2 m a partir do nível da plataforma de rodagem e ao longo do comprimento mais desfavorável, independentemente da posição das cargas verticais de tráfego.

$$d_{tot} = d + 2,00 \Rightarrow 4,50 + 2,00 = 6,50m;$$

$$b/d_{tot} = 16,85/6,50 \approx 2,60m \Rightarrow c_{fx,0} = 1,6 \text{ (Figura 8.3 do EC1, por interpolação);}$$

Coefficiente de exposição, $c_e(z_e)$, considerando $z_e=40m$:

$$c_e = \frac{q_p(z)}{q_b}; \quad q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2;$$

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b;$$

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{K_I}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)};$$

Para um terreno com rugosidade aerodinâmica do tipo II (Quadro 4.1 do EC1)

$$\Rightarrow z_0 = 0,05$$

A velocidade média do vento, v_m , a uma altura z acima do solo, depende da rugosidade do terreno, c_r , da orografia, c_0 , e do valor de referência da velocidade do vento, v_b .

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b;$$

O coeficiente de rugosidade $c_r(z)$ tem em conta a variabilidade da velocidade média do vento no local da construção em resultado:

- da altura acima do nível do solo;
- da rugosidade do terreno a barlavento da construção, na direcção do vento considerada.

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right);$$

k_r – coeficiente de terreno dependente do comprimento de rugosidade z_0

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07};$$

$\Rightarrow z_{0,II} = 0,05$ (depende da categoria do terreno, que no nosso caso é do tipo II)

Substituindo as expressões tem-se:

$$c_e(z_e) = \frac{q_p(z_e)}{q_b} = \frac{[1+7 \cdot I_v(z_e)] \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v_m^2(z_e)}{\frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2} \Leftrightarrow$$

$$c_e(z_e) = \left[1 + \frac{7}{\ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right)}\right] \cdot \left[0,19 \cdot \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right)\right]^2 \Leftrightarrow$$

$$c_e(z_e) = \left(1 + \frac{7}{\ln(40/0,05)}\right) \left(0,19 \cdot \ln\left(\frac{40}{0,05}\right)\right)^2 = 3,30;$$

Coeficiente C

$$C = c_e \cdot c_{x,f} = 3,30 \times 1,60 = 5,28;$$

Área de referência (por metro de tabuleiro):

$$A_{ref,x} = d_{tot} \times 1 = 6,50m^2/m;$$

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{ref,x} = \frac{1}{2} \times 1,25 \times 27^2 \times 5,28 \times 6,50 = 15,64KN/m.$$

Vento nos pilares

$$F_w = c_s c_d \cdot \sum_{\text{superfícies}} (c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref});$$

De acordo com o enunciado, o coeficiente estrutural, $c_s c_d = 1$;

Coeficiente de exposição, $c_e(z_e)$, para $z_e = 40,0\text{m}$:

$$c_e(z_e) = \left[1 + \frac{7}{\ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right)} \right] \cdot \left[0,19 \cdot \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right) \right]^2 \Leftrightarrow$$

$$c_e(z_e) = \left(1 + \frac{7}{\ln(40/0,05)} \right) \left(0,19 \cdot \ln\left(\frac{40}{0,05}\right) \right)^2 = 3,30;$$

Pressão dinâmica de pico:

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b;$$

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = 3,30 \times \frac{1}{2} \times 1,25 \times 27^2 = 1504 \text{N/m}^2 \approx 1,5 \text{KN/m}^2.$$

O coeficiente de força determina-se com base no 7.6 da pág. 72 do EC1 (Elementos estruturais de secção rectangular)

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda;$$

$c_{f,0}$ – coeficiente de força para elementos de secção rectangular com arestas vivas e sem livre escoamento em torno das extremidades;

ψ_r – coeficiente de redução para secções quadradas com cantos arredondados; o valor de ψ_r depende do número de Reynolds. Os valores de ψ_r poderão ser fornecidos no Anexo nacional;

ψ_λ – coeficiente de efeitos de extremidade para elementos cujas extremidades sejam livremente contornadas pelo vento. No anexo nacional são fornecidos valores de λ e de ψ_λ que tenham em conta o efeito da turbulência.

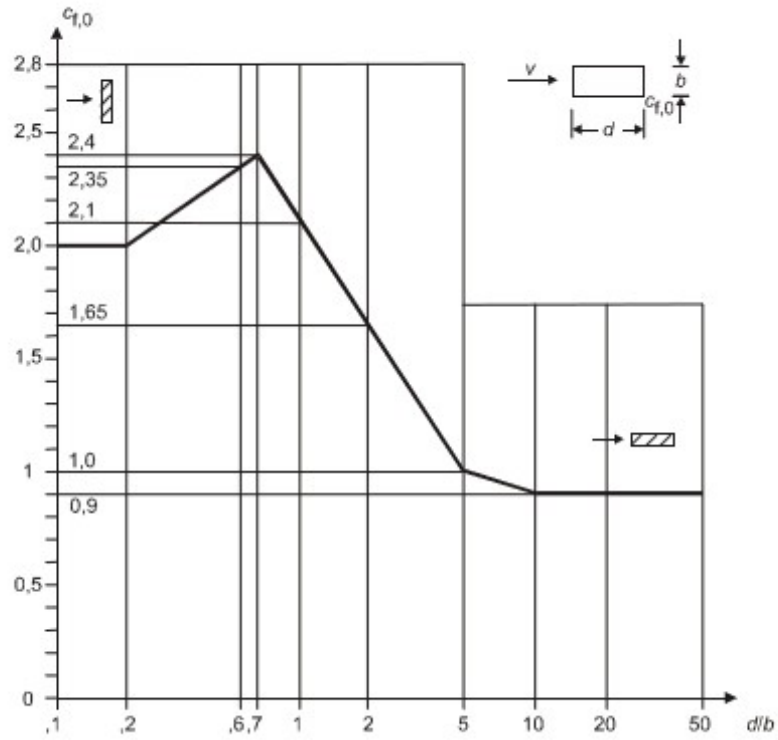


Figura 37 – Coeficiente de força $c_{f,0}$ para secções rectangulares com arestas vivas e sem livre escoamento em torno das extremidades do elemento (EC1, Fig. 7.23)

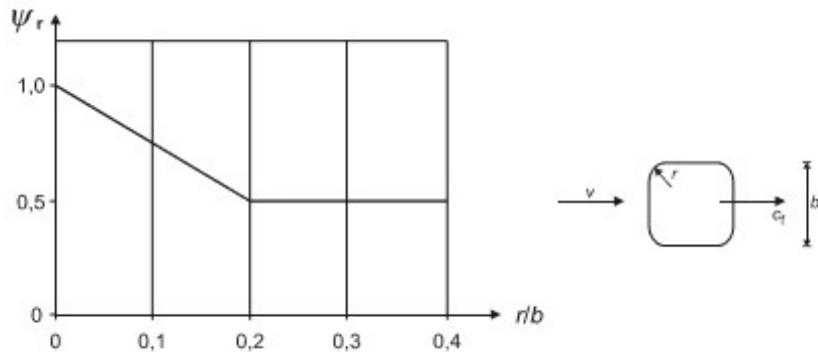


Figura 38 – Coeficiente de redução ψ_r para uma secção transversal quadrada com cantos arredondados (EC1, Fig. 7.24)

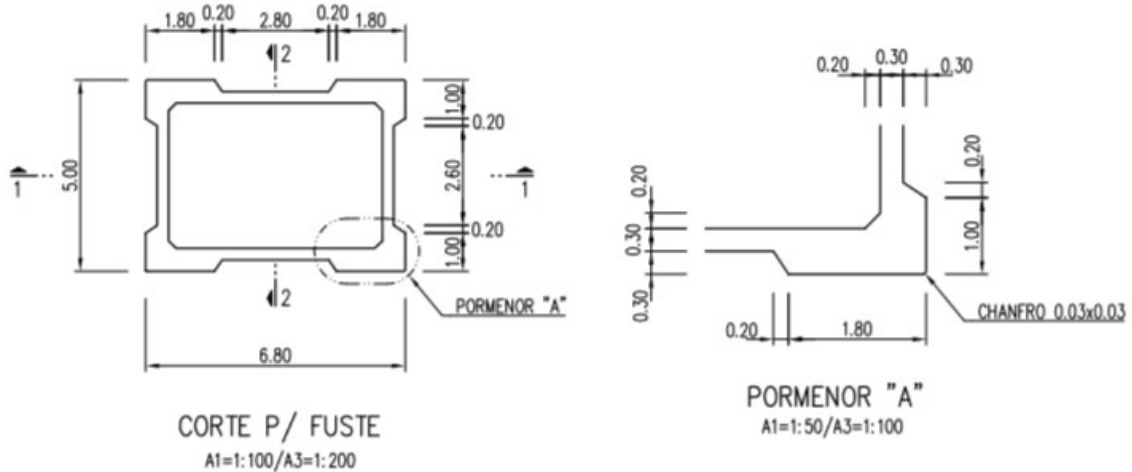


Figura 39 – Dimensionamento dos pilares do viaduto do Covelo, corte pelo fuste e Pormenor "A". (Rito, Armando. Projecto de Execução do Viaduto do Covelo, 2008)

$$d = \sqrt{0,20^2 + 0,20^2} = 0,28;$$

$$r = d/2 = 0,14;$$

$$r/b = 0,14/5 = 0,028 \Rightarrow \psi_r \approx 0,9 \text{ (Figura 36, 7.24 do EC1);}$$

$$d/b = 6,80/5,00 = 1,36 \Rightarrow c_{f,0} \approx 1,9 \text{ (Figura 35, 7.23 do EC1);}$$

De acordo com o Quadro NA-7.16 do Anexo Nacional NA do EC1, considera-se que $\psi_\lambda=1,00$.

Assim tem-se:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda = 1,9 \times 0,9 \times 1,0 = 1,71;$$

A área de referência A_{ref} deverá ser obtida através da expressão:

$$A_{ref} = l \cdot b;$$

Área de referência (por metro de pilar):

$$A_{ref,x} = b \times 1 = 5,00m^2/m;$$

Assim a força nos pilares devida ao vento tem o seguinte valor:

$$F_w = c_s c_d \cdot \sum_{superfícies} (c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}) = 1,71 \times 1,50 \times 5,0 = 12,83KN/m.$$

Em resumo tem-se:

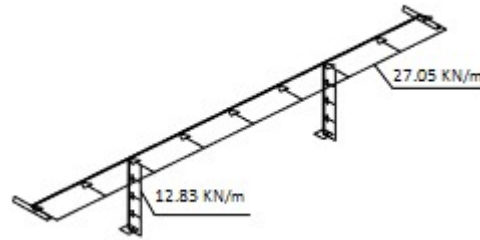


Figura 40 – Forças estáticas, equivalentes à ação do vento para o viaduto do Covelo segundo o EC1

5.2.3. Comparação de resultados

Conclui-se que os valores apresentados, através do cálculo segundo o EC1, são mais gravosos que os apresentados pelo RSA:

Vento no tabuleiro – situação sem carga de tráfego

$$F_w(\text{segundo o EC1}) = 11,41 \text{ kN/m} \approx 2,5 \times F_w(\text{segundo o RSA}) = 2,5 \times 4,86 = 12,15 \text{ kN/m}$$

Vento no tabuleiro – situação com carga de tráfego

$$F_w(\text{segundo o EC1}) = 15,64 \text{ kN/m} \approx 3,0 \times F_w(\text{segundo o RSA}) = 3,0 \times 5,06 = 15,18 \text{ kN/m}$$

Vento nos pilares

$$F_w(\text{segundo o EC1}) = 12,83 \text{ kN/m} \approx 1,5 \times F_w(\text{segundo o RSA}) = 1,5 \times 9,68 = 14,52 \text{ kN/m}.$$

	RSA	EC1
Tabuleiro	4,86 kN/m	11,41 kN/m
Veículos	5,06 kN/m	15,64 kN/m
Pilares	9,68 kN/m	12,83 kN/m

Capítulo 6.

Conclusões

Constata-se que o período de retorno do EC1-1-4, 50 anos, é bastante baixo quando comparado com o período de retorno do RSA, que é de 1000 anos. Esta especificação pode representar um risco acrescido ao colapso de estruturas em que a acção do vento é preponderante, se se comparar com os critérios de referência do RSA.

No caso específico de Portugal, apesar do período de retorno do EC1-1-4 ser bastante inferior ao do RSA, verifica-se que no Anexo Nacional do EC1-1-4 os valores relativos à quantificação da acção do vento, nomeadamente no valor básico da velocidade de referência, nas categorias de rugosidade do terreno e nos valores característicos da pressão dinâmica do EC1-1-4, são da mesma ordem de grandeza ou até superiores aos apresentados no RSA.

O valor básico da velocidade de referência apresentado no EC1 para a zona A é de 27m/s, que está em contraste com os valores característicos da velocidade média do vento (velocidade sem o efeito da turbulência) apresentados no Anexo I do RSA. Considerando a mesma Zona A e uma rugosidade de terreno do Tipo II, tem-se para uma altura de 10m, uma velocidade média de 25m/s.

Em relação às categorias de rugosidade do terreno, verifica-se que não existe equivalência entre os dois regulamentos. O RSA tem duas categorias enquanto que o EC1 prevê 4, o que corresponde a um leque de opções maior para classificar o terreno. Existe uma deficiente equivalência das categorias dos terrenos num e noutro regulamento, visto que para a categoria IV do EC1 corresponde a categoria I do RSA, mas as categorias I, II e III do EC1 podem ser encaradas como uma subdivisão da categoria II do RSA, deixando as categorias I e III do EC1 sem correspondência directa com o RSA. Depende então da interpretação que é feita, em relação aos quadros de uma e outra norma, na análise da categoria do terreno em que está inserida a estrutura.

Em relação a apenas existirem dois tipos de rugosidade do solo para o RSA, resulta da dificuldade que havia de caracterizar objectivamente a multiplicidade de situações que poderiam ocorrer no terreno.

Comparando a pressão dinâmica de pico associada à categoria IV do EC1 com a categoria I do RSA, verifica-se que é menos gravosa, embora as diferenças sejam pequenas. Em relação às outras categorias o EC1 é globalmente mais desfavorável e para construções com alturas inferiores a 10 metros o EC1 é menos gravoso que o RSA.

Uma vez que o período de retorno considerado no EC1 é bastante inferior ao do RSA, seria de esperar que os valores característicos da acção do vento fossem também menores, e não o contrário. Não existe uma razão clara para esta semelhança, embora se possa admitir que o Anexo Nacional do EC1-1-4 foi preparado com base em registos meteorológicos mais recentes que o RSA.

De qualquer forma, aos valores característicos que constam no Anexo Nacional corresponde um período de retorno de 50 anos, o que aumenta de uma forma significativa o risco de ocorrência do colapso de estruturas ou de outros danos sérios a construções que sejam sensíveis à acção do vento.

Em Portugal tem havido um aumento do número e intensidade de fenómenos meteorológicos adversos. Nos últimos tempos verificou-se a ocorrência de alguns tornados, com danos em coberturas e a queda de um pórtico de sinalização numa auto-estrada. É necessário ter atenção a este tipo de fenómenos e às discrepâncias entre os regulamentos quando se faz o dimensionamento de estruturas que sejam sensíveis à acção do vento.

Finalmente, refira-se que os exemplos analisados pelo EC1 conduziram, globalmente, a forças devido à acção do vento significativamente superiores às obtidas pelo RSA, principalmente devido aos coeficientes de forma, já que as pressões dinâmicas são da mesma ordem de grandeza.

Referências Bibliográficas

- [1] – Martins, João Guerra, (2008). *Análise de Estruturas. Acção do vento*. Série Estruturas.
- [2] – EC0. (2009). *NP EN 1990. Eurocódigo – Bases para o projecto de estruturas*. Lisboa: IPQ.
- [3] – RSA. (2004). *Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes*. Lisboa: Porto Editora.
- [4] – EC1-Parte1-1. (2010). *NP EN 1991-1-4. Eurocódigo 1 – Acções em estruturas. Parte 1-4: Acções gerais e acções do vento*. Lisboa: IPQ.
- [5] – Jacinto, Luciano, (2014). *Acção do vento segundo o Eurocódigo 1 – Implicações do período de retorno especificado de 50 anos*. 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas.
- [6] – Jacinto, Luciano, (2014). *Acção do vento: quantificação de acordo com o EC1*. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [7] – N. Cook, (2007). *Designers' guides to the Eurocodes. Designers' guide to EN 1991-1-4. Eurocode 1: Actions on Structures, General Actions. Part 1-4: Wind-Actions*. London: Thomas Telford.
- [8] – H. Gulvanessian, (2010). *Designers' guides to the Eurocodes. Designers' guide to Eurocode 1: Actions on Bridges. EN 1991-2, EN 1991-1-1, -1-3 to -1-7 and EN 1990 Annex A2*. London: Thomas Telford.
- [9] – Jacinto, Luciano, (2004). *Segurança Estrutural. Acções – Folhas da unidade curricular de Pontes e Viadutos*. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- [10] – Parecer da Comissão de avaliação (Agência Portuguesa do Ambiente, Instituto da Conservação da Natureza e Biodiversidade, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento do Norte, Instituto de Gestão do Património Português Arquitectónico e Arqueológico, Direcção Regional de Cultura do Norte, Instituto da Água), (2008). *Conformidade do projecto de execução com a DIA – A41 / IC 24 – Picoto (IC2) / Nó da Ermida (IC25) – Trecho 2 – Nó A32/A41 / Aguiar de Sousa*.