



ACÇÃO DO VENTO SOBRE TORRES – ANÁLISES COMPARATIVAS ENTRE RSA E EUROCÓDIGOS

Rui Travanca^a, Paulo Vila Real^a e Humberto Varum^a

^a *Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro*

Resumo. Neste trabalho indicam-se as principais diferenças que se podem observar ao nível da acção do vento, entre o Regulamento de Segurança e Acções (RSA) e Eurocódigos (EC), quando aplicáveis à análise e dimensionamento de torres. Para tal, procede-se à análise comparativa de diversos parâmetros, colocando-se comentários gerais sobre cada um deles, para um melhor entendimento sobre a sua abordagem e filosofia. Finalmente, são apresentados, confrontados e discutidos os resultados obtidos de acordo com cada uma das normas mencionadas, tendo como base o caso de estudo de uma torre utilizada para radiocomunicações.

1. Introdução

O aumento progressivo da resistência dos materiais utilizados no sector da construção e, como consequência, as alterações verificadas na rigidez, massa e amortecimento das estruturas conduziram forçosamente a uma nova abordagem da acção do vento sobre as construções [1-5]. Por razões económicas e funcionais relativas à sua própria natureza, as torres são estruturas leves, apresentando elevada esbelteza e grande flexibilidade. As acções predominantes a considerar na análise e dimensionamento deste tipo de estruturas são acções de natureza aleatória, nomeadamente, a acção do vento ou a acção combinada do vento e gelo [3-5]. O vento é uma acção dinâmica e as estruturas esbeltas são sensíveis à componente turbulenta do vento. A resposta ressonante torna-se importante quando estas estruturas apresentam uma frequência fundamental abaixo de 1 Hz. Consequentemente, a análise dinâmica torna-se essencial para a determinação da resposta ressonante, que poderá tornar-se significativa comparativamente com a resposta de fundo. O cálculo do efeito dinâmico do vento, de natureza aleatória, sobre estruturas esbeltas, que inclui forçosamente as estruturas em torre, é composto por três etapas fundamentais, designadamente: i) descrição do vento, ii) descrição das propriedades físicas e aerodinâmicas da estrutura, e iii) combinação destes factores para a determinação da resposta da estrutura [3-5]. Neste trabalho indicam-se as principais diferenças que se podem observar ao nível da acção do vento, quando aplicável à análise e dimensionamento de torres, entre o RSA [6] e os Eurocódigos [7,8]. Para tal, realizam-se análises comparativas entre diversos parâmetros. Finalmente, serão apresentados, confrontados e discutidos os resultados, obtidos de acordo com cada uma das normas mencionadas, tendo como base o caso de estudo de uma torre auto-suportada metálica treliçada de base triangular, utilizada para radiocomunicações.

2. Análises comparativas

2.1 Descrição do vento

Em termos de zonamento do território nacional e para efeitos da quantificação da acção do vento, a metodologia prescrita pela EN 1991-1-4 [7] é igual à adoptada pelo RSA [6], ou seja, considera-se o território nacional dividido em duas zonas distintas (tabela 1).

Tabela 1: Zonamento do território nacional (RSA e EC)

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.

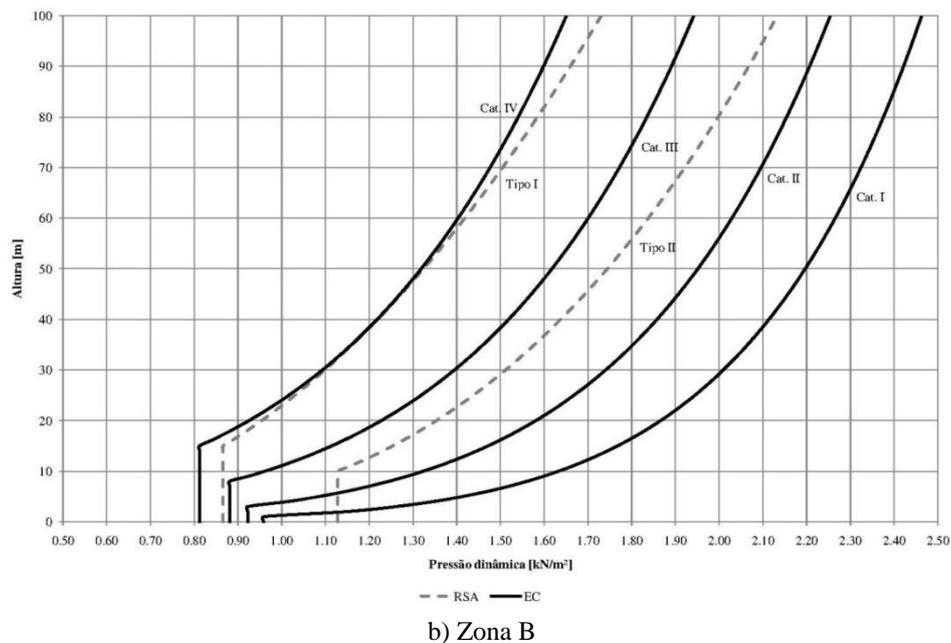
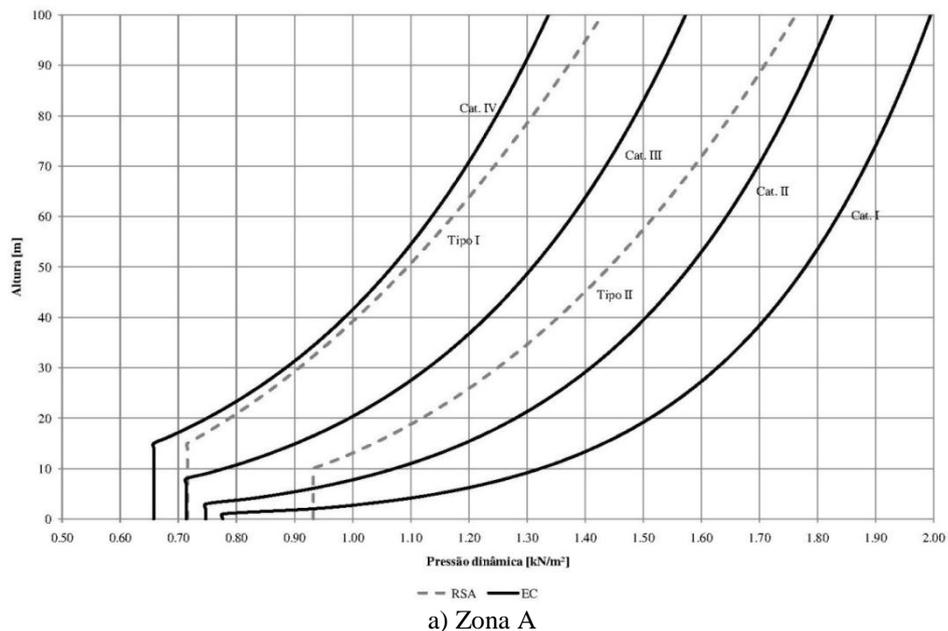
No que diz respeito à velocidade de referência do vento, existem diferenças entre as premissas adoptadas no EC e no RSA. Em primeiro lugar, os valores característicos da velocidade do vento apresentados no EC correspondem ao quantilho 0,98 da distribuição de probabilidade dos valores máximos anuais, ou seja, trata-se de valores com uma probabilidade anual de serem excedidos igual a 0,02. Os valores característicos adoptados no RSA correspondem ao quantilho 0,95 da distribuição de probabilidade dos valores máximos em períodos de 50 anos. Para a zona B, o valor básico da velocidade de referência do vento indicado pelo EC (27m/s) é superior em 11% ao indicado para a zona A (30m/s), procedimento bastante análogo ao definido pelo RSA, que apresenta um valor superior em 9,5%. Por outro lado, o perfil de velocidades médias, do tipo logarítmico, correspondente à categoria de terreno II, conforme é definida no EC, e que assume o papel de categoria de referência, ajusta-se adequadamente a um perfil do tipo potência – função linear de $(z / 10)^\alpha$ – com expoente $\alpha = 0,16$, a que corresponde uma rugosidade de terreno inferior às rugosidades indicadas no RSA ($\alpha = 0,20$ ou $0,28$) [6,7]. O EC possibilita uma maior definição no que diz respeito à rugosidade do solo, apresentando quatro categorias de terreno distintas, enquanto o RSA apenas contempla duas (ver tabelas 2 e 3). Observando as figuras 1-a e 1-b verifica-se que a rugosidade do tipo I, definida pelo RSA, é bastante semelhante à categoria IV definida pelo EC, ambas respeitantes a locais situados em zonas urbanas, onde predominem edifícios de médio e grande porte. Por outro lado, o EC introduz a categoria I, para zonas costeiras expostas aos ventos de mar, tipologia que o RSA não considera. Nas mesmas figuras, também poderá observar-se que o EC faz uma subdivisão da rugosidade do tipo II, tal como preconizada no RSA, em duas categorias distintas, designadamente, as categorias II e III. Na figura 2 é possível notar outro aspecto diferenciador entre o RSA e o EC, designadamente, o EC considera a altura e a categoria de terreno na determinação da componente turbulenta da velocidade do vento, ou seja, no factor de intensidade de turbulência do vento. Com efeito, as perturbações provocadas pela existência de obstáculos influem no livre escoamento do ar, provocando o carácter turbulento do vento, e que revela-se no tempo e no espaço [9-13]. De acordo com o RSA, a componente turbulenta apresenta um valor fixo e pré-determinado de 14 m/s. Para o EC, esse valor, que não se encontra apresentado, depende da altura e da categoria de terreno (rugosidade do solo).

Tabela 2: Rugosidade do solo (RSA)

Tipo I	Rugosidade a atribuir aos locais situados no interior de zonas urbanas em que predominem edifícios de médio e grande porte.
Tipo II	Rugosidade a atribuir aos restantes locais, nomeadamente zonas rurais e periferia de zonas urbanas.

Tabela 3: Categorias de terrenos (EC)

Cat. I	Zona costeira exposta aos ventos de mar.
Cat. 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.
Cat. 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).
Cat. IV	Zona na qual pelo menos 15% da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15m.

**Fig. 1:** Pressão dinâmica (RSA) e pressão de pico (EC)

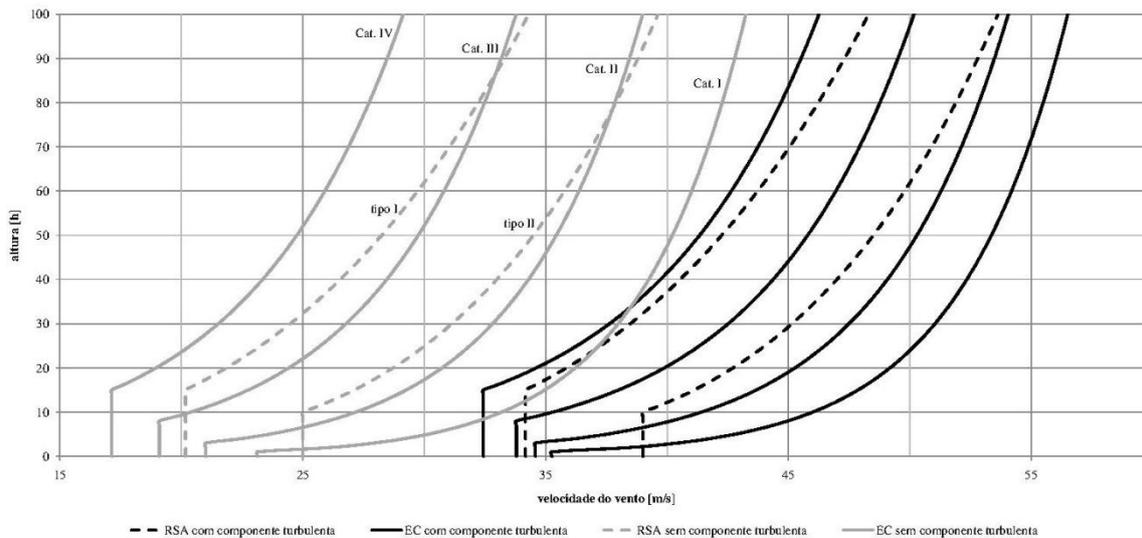


Fig. 2: Velocidade do vento com e sem a componente turbulenta (RSA e EC)

2.2 Orografia

A orografia tem um forte efeito na velocidade do vento dado influenciar o escoamento, provocando uma clara obstrução ao livre escoamento do ar, acelerando o vento junto ao solo. Dado que as torres, pela sua função específica, são geralmente instaladas em pontos elevados, o factor orografia tem uma particular importância neste tipo de estruturas. Os procedimentos contidos no RSA, com correcções ao nível da altura da base da estrutura, estão obsoletos relativamente ao actual estado de conhecimento [4,5,15]. Nas figuras 3-a e 3-b encontram-se ilustradas as metodologias consideradas no RSA e no EC [6,7].

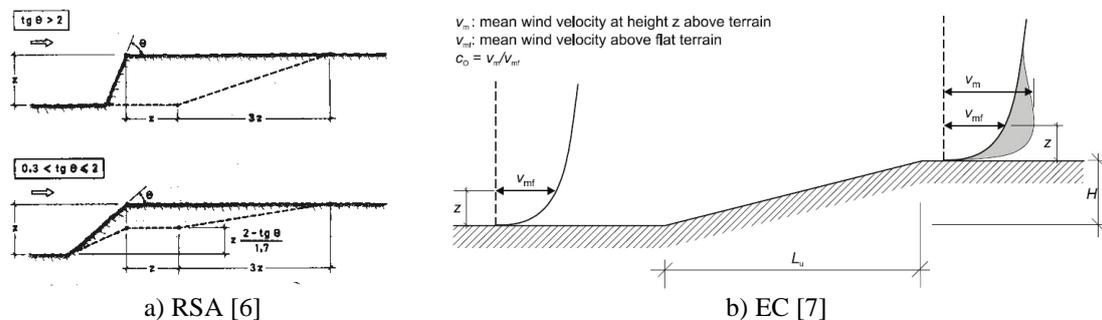


Fig. 3: Efeitos da orografia do terreno

2.3 Coeficientes de força

Os coeficientes de força aplicáveis para torres treliçadas, tal como estabelecido pelo RSA, são, de uma forma geral, mais conservativos do que os apresentados no EC. Isso poderá ser observado através das figuras 4, 5 e 6. Acrescente-se ainda que o EC apresenta métodos para contabilizar de forma implícita um dos aspectos mais difíceis de normalizar, nomeadamente, a resistência ao vento de elementos não estruturais, tais como escadas, cabos, plataformas e/ou antenas, e contrariamente ao que sucede no RSA, que não o faz de uma forma clara. Tal como referido por diversos autores, tem sido usual fazer-se uma análise separada entre os elementos estruturais e não estruturais, não sendo avaliada correctamente a interferência que ocorre entre estes elementos distintos [4,5,16,17].

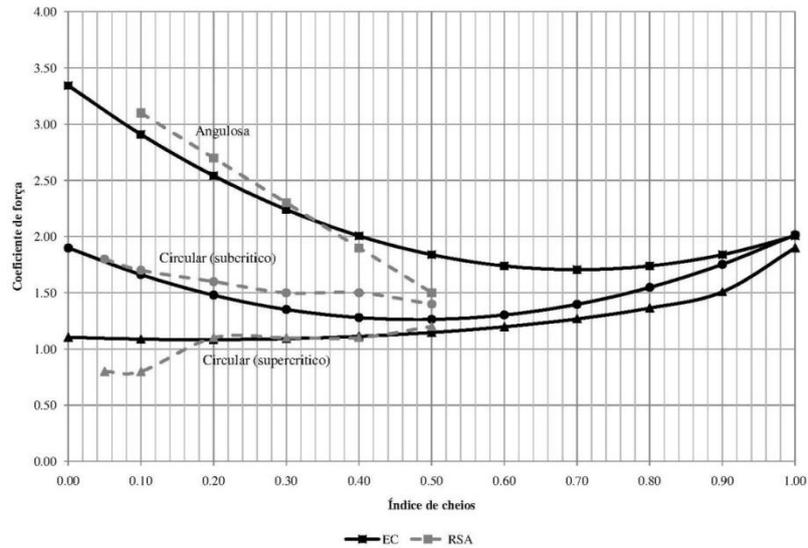


Fig. 4: Coeficientes de força para torres treliçadas de base triangular

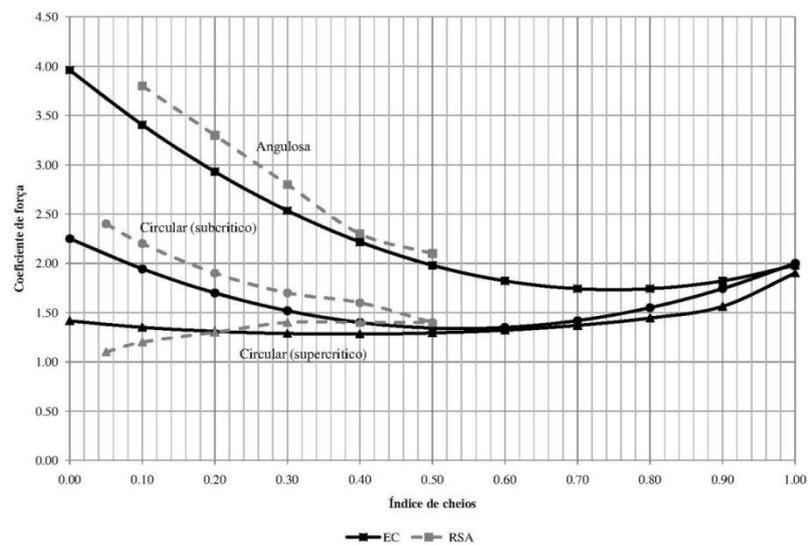


Fig. 5: Coeficientes de força para torres treliçadas de base quadrada (0°)

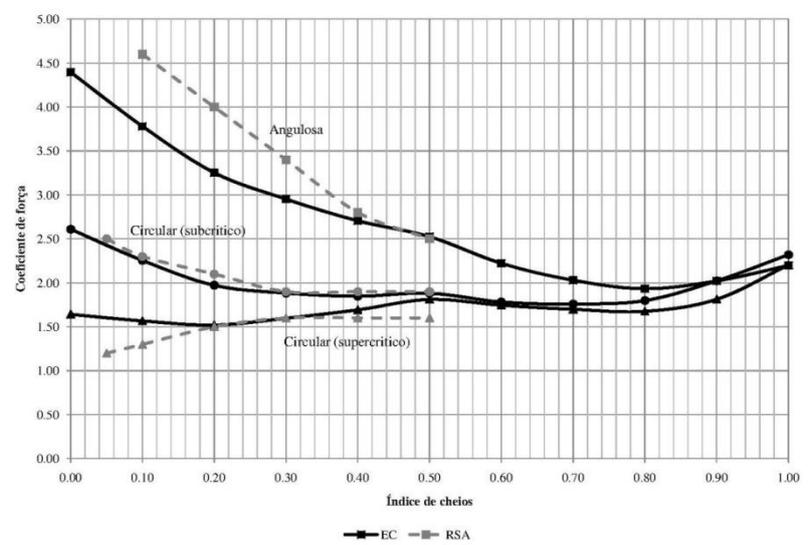


Fig. 6: Coeficientes de força para torres treliçadas de base quadrada (45°)

2.4 Efeitos dinâmicos

A análise dinâmica de torres poderá ser realizada no domínio das frequências, tendo por base o carácter dependente das frequências, tanto ao nível da acção do vento, como das propriedades mecânicas da estrutura. Nesta abordagem, os ventos de rajada são caracterizados numa base probabilística, i.e., usando descrições estatísticas das propriedades relevantes tais como o conteúdo de frequências e a sua organização espacial [4,5]. No entanto, alguns procedimentos mais simplificados poderão ser utilizados. De acordo com o EC, podem ser adoptadas análises quasi-estáticas, recorrendo a adequados factores de resposta de rajada. Estes factores dependem de vários parâmetros, que incluem a frequência fundamental da estrutura, o seu amortecimento e as características do vento. Assim, a pressão de pico é amplificada através da afectação do factor de resposta de rajada, sendo posteriormente tratada como uma acção estática [7,8]. O RSA estabelece uma análise estática que apenas se aplica se a frequência fundamental for superior a 0,5 Hz. Ou seja, a frequência fundamental é utilizada apenas para verificar o domínio de aplicação e validar este procedimento simplificado [6]. Exposto isto, os procedimentos contidos no EC contemplam, mesmo que de forma simplificada, os efeitos dinâmicos, contrariamente ao que sucede no RSA. Consequentemente, não será possível realizar uma comparação directa deste parâmetro. Ainda assim, no caso de estudo apresentado neste trabalho será possível avaliar a interferência deste parâmetro nos resultados obtidos globalmente.

2.5 Torres com montantes inclinados

A velocidade do vento pode ser descrita, em qualquer instante, como o somatório de uma velocidade média e de uma parte fluctuante, esta última relativa à componente turbulenta do vento e que, consequentemente, é variável espacialmente. Assim, será importante referir que deverá ser necessária extrema cautela na obtenção das forças instaladas nas diagonais para torres que apresentem montantes inclinados dado que a aplicação da acção equivalente de rajada em toda a altura da torre poderá revelar-se contra a segurança [4,5]. Por exemplo, observe-se a figura 7-a e determine-se os esforços instalados nas diagonais da base. Calculando o equilíbrio de momentos com base no ponto O, facilmente se conclui que caso as duas parcelas apresentadas na figura apresentem a mesma ordem de grandeza, as forças instaladas nas diagonais irão tomar um valor muito reduzido, o que conduzirá seguramente a um dimensionamento contra a segurança. Assim, o EC prescreve procedimentos que evitem esta situação, aplicando a acção média do vento abaixo do ponto de intersecção e a acção equivalente de rajada acima do ponto de intersecção, ou vice-versa, tal como exemplificado na figura 7-b. O RSA é omissivo a este respeito.

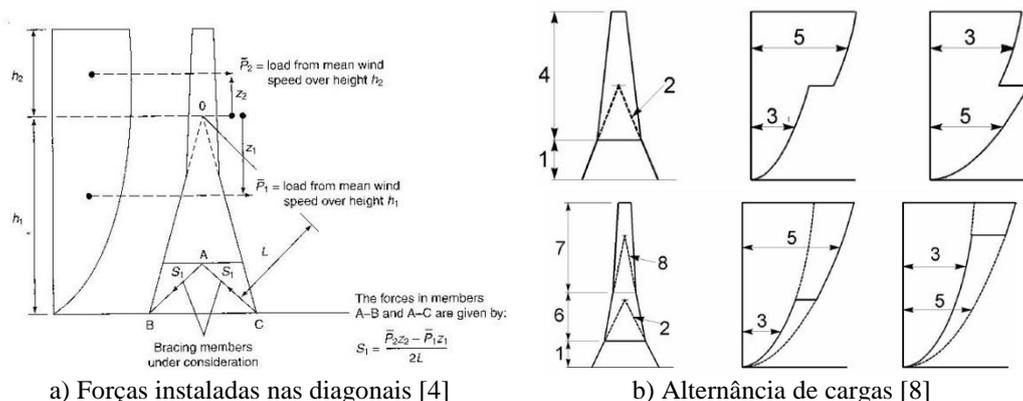


Fig. 7: Torres com montantes inclinados

2.6 Classes de fiabilidade

O EC introduz três classes de fiabilidade (tabela 4), a que correspondem diferentes factores parciais de segurança (tabela 5), aplicáveis tanto a acções permanentes, como a acções variáveis. Este tipo de diferenciação foi estabelecido em 1981, e é seguida pela maioria das normas nesta área [4,5]. O RSA não faz qualquer tipo de distinção pelo que se aplica os factores parciais de segurança utilizados para as estruturas correntes.

Tabela 4: Classes de fiabilidade (EC)

Classe 1	Torres consideradas não vitais e instaladas em campo aberto; torres em que seja improvável a perda de vidas humanas no caso de ocorrência de colapso.
Classe 2	Torres não definidas nas classes 1 e 3.
Classe 3	Torres instaladas em zonas urbanas ou instaladas em zonas onde o colapso possa provocar a perda de vidas humanas; torres consideradas vitais para telecomunicações; torres onde se preveja consequências bastantes severas no caso de ocorrência de colapso.

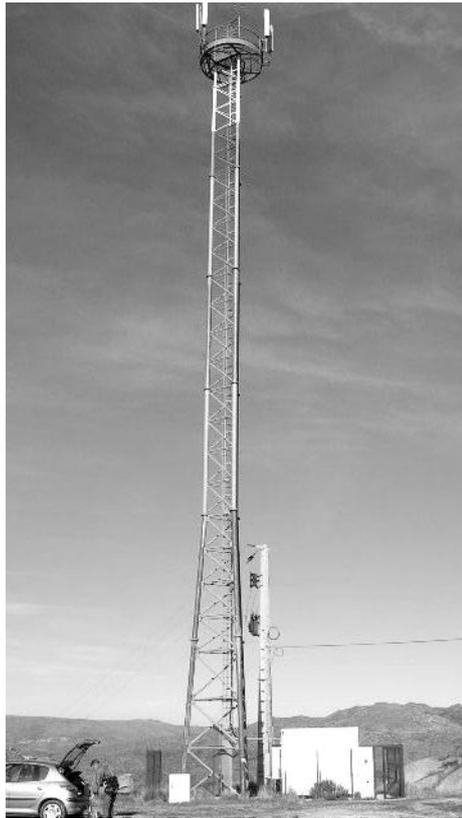
Tabela 5: Factores parciais de segurança (EC)

Tipo de Efeito	Classe de fiabilidade	Acções permanentes	Acções variáveis
Desfavorável	1	1,0	1,2
	2	1,1	1,4
	3	1,2	1,6
Favorável	Todas as classes	1,0	0,0
	Situações acidentais	1,0	1,0

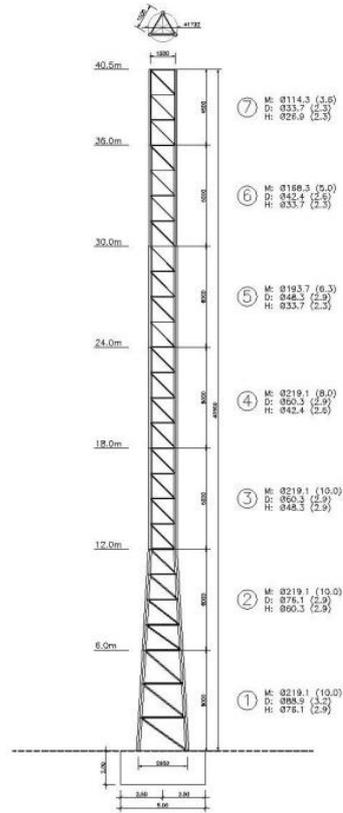
3. Caso de estudo

Como caso de estudo, serão analisados os esforços obtidos para uma torre auto-suportada metálica treliçada de base triangular com 40,5 m de altura total, constituída por perfis metálicos de secção tubular, e utilizada para radiocomunicações, tal como ilustrado nas figuras 8-a e 8-b. Esta análise incidirá somente sobre a acção do vento e sem considerar as áreas expostas de quaisquer elementos não estruturais, tais como escadas, cabos, plataformas e/ou antenas. Pretende-se apresentar, confrontar e discutir as principais diferenças detectadas nos resultados obtidos aquando da utilização destas duas normas distintas, e considerando apenas a acção do vento incidindo sobre a estrutura.

Para este caso de estudo considera-se que a torre encontra-se instalada no distrito de Portalegre, a uma altitude de 200m, numa zona de vegetação rasteira, em meio rural. Para efeitos da quantificação da acção do vento considera-se, portanto, a estrutura inserida em zona A, com rugosidade do solo do tipo II (RSA) e categoria do terreno do tipo II (EC). Para simplificar o caso em estudo, não são contabilizados os efeitos da orografia. Na determinação dos esforços elásticos e frequências naturais utilizou-se o software SAP2000, da Computers and Structures, Inc. O valor obtido para a frequência fundamental é de 1,90 Hz. Na tabela 6 apresenta-se a determinação das forças actuantes devido à acção do vento sobre a estrutura, utilizando o RSA. Nas tabelas 7, 8 e 9 apresenta-se, respectivamente, a determinação do parâmetro estrutural, das áreas expostas e coeficientes de forma e das forças actuantes devido à acção do vento sobre a estrutura, utilizando o EC.



a) Fotografia da torre



b) Croqui da estrutura

Fig. 8: Torre auto-suportada metálica treliçada com 40,5m de altura**Tabela 6:** Obtenção das forças actuantes (RSA)

Painel	h [m]	v [m/s]	w [kN/m ²]	A _{c1} [m ²]	A _{c2} [m ²]	A ₁ [m ²]	A ₂ [m ²]	λ	δ _{fc1}	δ _{fc2}	F [kN]
1	6,00	39,00	0,93	1,42	2,63	4,05	16,61	0,24	1,55	1,13	4,83
2	12,00	39,93	0,98	1,16	2,63	3,79	12,41	0,31	1,50	1,09	4,51
3	18,00	42,12	1,09	0,80	2,63	3,43	10,31	0,33	1,49	1,07	4,37
4	24,00	43,78	1,18	0,76	2,63	3,39	10,31	0,33	1,49	1,08	4,66
5	30,00	45,14	1,25	0,61	2,32	2,93	10,16	0,29	1,51	1,11	4,37
6	36,00	46,30	1,31	0,56	2,02	2,58	10,01	0,26	1,54	1,13	4,13
7	40,50	47,07	1,36	1,36	0,00	1,36	7,26	0,19	1,61	1,08	2,98

Tabela 7: Determinação do parâmetro estrutural (EC)

v _m [m/s]	I _v	L [m]	f _L	S _L	B ²	η _h	η _b	R _h	R _b	R ²	v [Hz]	k _p	c _s ,c _d
34,36	0,15	130,71	7,23	0,04	0,69	10,30	0,55	0,09	0,71	0,24	0,97	3,74	1,02

Tabela 8: Determinação das áreas expostas e coeficientes de forma (EC)

Painel	A _c [m ²]	A _{c,sup} [m ²]	A _s [m ²]	A _c [m ²]	ψ	K ₁	K ₂	c _{f,0,c}	c _{f,0,c,sup}	c _{f,s,0,j}	c _{f,s}	c _f	A _{ref} [m ²]
1	1,42	2,63	4,05	16,61	0,24	0,80	0,24	1,42	1,09	1,20	1,20	1,20	4,05
2	1,16	2,63	3,79	12,41	0,31	0,80	0,31	1,35	1,09	1,17	1,17	1,17	3,79
3	0,80	2,63	3,43	10,31	0,33	0,80	0,33	1,32	1,10	1,15	1,15	1,15	3,43
4	0,76	2,63	3,39	10,31	0,33	0,80	0,33	1,33	1,10	1,15	1,15	1,15	3,39
5	0,61	2,32	2,93	10,16	0,29	0,80	0,29	1,36	1,09	1,15	1,15	1,15	2,93
6	0,56	2,02	2,58	10,01	0,26	0,80	0,26	1,40	1,09	1,15	1,15	1,15	2,58
7	1,36	0,00	1,36	7,26	0,19	0,80	0,20	1,50	1,08	1,50	1,50	1,50	1,36

Tabela 9: Determinação das forças actuantes (EC)

Painel	z [m]	c _r	c _o	v _m [m/s]	I _v	q _p [kN/m ²]	c _f	A _{ref} [m ²]	F _{m,w} [kN]	F _{T,w} [kN]
1	6,00	0,91	1,00	24,56	0,21	0,93	1,20	4,05	1,83	4,62
2	12,00	1,04	1,00	28,12	0,18	1,13	1,17	3,79	2,19	5,14
3	18,00	1,12	1,00	30,20	0,17	1,25	1,15	3,43	2,25	5,13
4	24,00	1,17	1,00	31,67	0,16	1,34	1,15	3,39	2,44	5,51
5	30,00	1,22	1,00	32,82	0,16	1,41	1,15	2,93	2,26	5,11
6	36,00	1,25	1,00	33,75	0,15	1,47	1,15	2,58	2,12	4,83
7	40,50	1,27	1,00	34,36	0,15	1,51	1,50	1,36	1,50	3,46

Na tabela 10 comparam-se os resultados obtidos de acordo com o prescrito em cada uma das normas e tendo como apoio os seguintes parâmetros: i) força de corte basal (F), ii) força axial actuante no montante localizado na base (N₁), iii) força axial actuante na diagonal localizada na base (N₂), iv) força majorada para o montante localizado na base (N_{Sd,1}) e v) força majorada para a diagonal localizada na base (N_{Sd,2}). Apesar da força de corte basal apresentar um acréscimo de 13,5% do valor determinado pelo RSA em relação ao valor do EC, poderá verificar-se que a diferença no esforço de compressão para o montante localizado na base é ainda maior, apresentado um acréscimo de 16,9%. Este acréscimo é justificado pela diferença verificada na distribuição de pressões em altura e, conseqüentemente, das forças aplicadas na estrutura. Mas como se poderá observar, a diferença é ainda maior ao nível das diagonais, ou seja, de 29,6%, justificada não só pela diferente distribuição de pressões em altura, mas também devido à alternância de cargas imposta pelo EC. Mas será ao nível das combinações de acções que estas diferenças se atenuam. Ou seja, para uma classe de fiabilidade 1, as diferenças nas diagonais são ténues (3,7%) e há mesmo uma redução na força de compressão no montante (-6,5%). Considerando uma classe de fiabilidade 2, a diferença no montante é de 9,1% e de 21,0% para as diagonais. No caso apresentado, a classe de fiabilidade 1 seria apropriada, pelo que as diferenças obtidas se poderiam considerar desprezáveis.

Tabela 10: Comparação entre os resultados obtidos

	F [kN]	N ₁ [kN]	N ₂ [kN]	N _{Sd,1} [kN]		N _{Sd,2} [kN]	
				Classe 1	Classe 2	Classe 1	Classe 2
RSA	29,79	239,35	5,77	359,03		8,66	
EC	33,81	279,74	7,48	335,69	391,64	8,98	10,47
Dif.	13,5%	16,9%	29,6%	-6,5%	9,1%	3,7%	21,0%

4. Conclusões

Com este trabalho pretendeu-se apresentar as principais diferenças que se podem observar, entre o RSA e os Eurocódigos, ao nível da acção do vento quando aplicável à análise e ao dimensionamento de torres. Salientou-se o salto, não só quantitativo, mas sobretudo qualitativo entre estas duas normas espaçadas no tempo em quase três décadas. Apesar das diferenças evidentes, apresentadas e discutidas ao longo do trabalho, conclui-se que uma torre auto-suportada metálica treliçada de base triangular, como aquela que é apresentada neste trabalho e nas condições aqui colocadas, dimensionada de acordo com o RSA, verificará a segurança de acordo com os Eurocódigos. Mas o mesmo não se poderá afirmar no caso da classe de fiabilidade ser superior ou em relação a torres que apresentem uma frequência fundamental muito baixa, e em que a resposta seria largamente amplificada, algo que o RSA não contabiliza de forma adequada.

Referências

- [1] Davenport, A., "Past, present and future of wind engineering", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90, 1371-1380, 2002.
- [2] Davenport, A., "What makes a structure wind sensitive?", *Wind Effects on Buildings and Structures*, Riera & Davenport (eds), 1998.
- [3] Smith, B., "50 years in the design of towers and masts. From IASS recommendations to current procedures", *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*, Valencia, 2009.
- [4] Smith, B., *Communication Structures*, Thomas Telford, London, 2007.
- [5] Travanca, R., "*Torres para radiocomunicações. Patologias e dimensionamento*", Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2010.
- [6] RSA, Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, Decreto-Lei n.º 235/83 de 31 de Maio.
- [7] CEN, Comité Europeu de Normalização, "NP EN 1991-1-4, Eurocódigo 1 – Acções em estruturas, Parte 1-4: Acções do vento", 2009.
- [8] CEN, Comité Europeu de Normalização, "EN 1993-3-1, Eurocode 3 – Design of steel structures, Part 3-1: Towers, masts and chimneys – towers and masts", 2006.
- [9] Zuranski, J., "A 100 years of some wind loading provisions in Central and Eastern Europe", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 91, 1873-1889, 2003.
- [10] Kasperski, M., "Specification of the design wind load - A critical review of code concepts", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 97, 335-357, 2009.
- [11] Gatey, D. e Miller, C., "An investigation into 50-year return period wind speed differences for Europe", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 95, 1040-1052, 2007.
- [12] Holmes, J., "Effective static load distributions in wind engineering", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90, 91-109, 2002.
- [13] Kareem, A e Zhou, Y., "Gust loading factor – past, present and future", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 91, 1301-1328, 2003.
- [14] Efthymiou, E., Gerasimidis, S. e Baniotopoulos, C. "On the structural response of steel telecommunication lattice masts for wind loading and combined effects", *Proceedings of the 5th European and African Conference on Wind Engineering – EACWE 5*, Florença, Itália, 19-23 Julho, 2009.
- [15] Ngo, T. e Letchford, C., "A comparison of topographic effects on gust wind speed", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96, 1053-1064, 2008.
- [16] Georgakis, C., Støttrup-Andersen, U., Johnsen, M., Nielsen, M. e Koss, H., "Drag coefficients of lattice masts from full-scale wind-tunnel tests", *Proceedings of the 5th European and African Conference on Wind Engineering – EACWE 5*, Florença, Itália, 19-23 Julho, 2009.
- [17] Carril Jr., C., Isyumov, N. e Brasil, R., "Experimental study of the wind forces on rectangular latticed communication towers with antennas", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 91, 1007-1022, 2003.