



PRINCIPAIS ANOMALIAS OBSERVADAS EM TORRES PARA RADIOCOMUNICAÇÕES EM PORTUGAL

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

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

Resumo. As torres são um dos principais suportes físicos para a instalação de equipamentos de rádio, utilizados para a emissão de ondas electromagnéticas que permitem serviços diversos, tais como rádio, televisão ou comunicações móveis. Em Portugal, na década de 90, houve uma enorme procura por este tipo de estruturas, sobretudo como resultado do enorme crescimento da cobertura para utilização em redes de comunicações móveis. Este trabalho pretende apresentar as principais anomalias observadas neste tipo de estruturas em Portugal.

1. Introdução

As telecomunicações desempenham um papel muito importante, não apenas na sociedade em geral, permitindo e facilitando a comunicação entre pessoas, mas também na economia dos países, sendo um dos segmentos de mercado com maior crescimento, tanto a nível nacional, como a nível internacional.

Em Portugal, na década de 90, observou-se uma enorme procura de torres para radiocomunicações, como resultado do grande crescimento da cobertura para utilização em redes de comunicações móveis. Anteriormente a esta expansão já tinha sido reconhecido internacionalmente que o historial de anomalias neste tipo de estruturas era elevado, comparativamente com outras estruturas de igual importância económica e social [1,2,3,4]. Tendo como base uma amostra de 385 torres existentes e em serviço em Portugal, na sua esmagadora maioria com idades inferiores a 18 anos, neste trabalho analisam-se as principais anomalias observadas, assim como as causas prováveis que lhe deram origem. As informações recolhidas e que servem de base para este estudo englobam projectos de estabilidade, projectos de verificação estrutural e relatórios de inspecção, abrangendo vários operadores, assim como diferentes tipologias de torres. As informações recolhidas e discutidas neste trabalho não se encontram referenciadas por razões de sigilo profissional e/ou por tratarem dados considerados confidenciais. Mas poderá indicar-se que a altura máxima das torres em estudo é de 100m e altura média situa-se nos 35m.

2. Tipologias de torres para radiocomunicações em Portugal

As tipologias de torres utilizadas variam muito entre países devido aos propósitos para que são concebidas. Smith [2] compara países como Dinamarca e Holanda, onde a elevação do terreno é praticamente nula e onde as torres com mais de 250m de altura são comuns, com países como Portugal ou Espanha, onde as torres são muitas vezes implantadas em locais com elevação do solo acima dos 500m, e onde as alturas das torres poderão ir até aos 60m.

O peso de uma torre metálica treliçada e, conseqüentemente, o seu custo, varia aproximadamente com o quadrado da altura. Relativamente a uma torre espiada, esse valor irá variar, de uma forma aproximada, de acordo com a expressão: $H^{1.5}$, em que H é a altura da torre [2].

As torres auto-suportadas, até aos 50m de altura, são geralmente utilizadas em toda a Europa para o suporte de antenas, e apresentam-se mais favoráveis em termos de custo relativamente a torres espiadas, apesar do peso total do aço usado ser superior. Ou seja, a construção, a escavação, o custo do terreno e a subsequente manutenção conduz a uma solução mais económica devido ao desnecessário retensionamento ou mesmo substituição do espiaamento, uma operação que apesar de simples envolve deslocações e tempo, que se tornam proporcionalmente mais dispendiosas no caso de torres espiadas de pequena altura [2]. Mas além da eliminação das espias e, como consequência, a menor ocupação de área do terreno, outra grande vantagem a destacar das torres auto-suportadas metálicas treliçadas encontra-se na elevada rigidez à torção, uma característica importante aquando da utilização de antenas direccionadas (*links*), que impõem uma excentricidade do carregamento devido à acção lateral do vento.

Neste trabalho e para uma melhor apresentação dos resultados obtidos, agruparam-se as torres em seis tipologias distintas, descritas na tabela 1 e ilustradas na figura 1. O termo monopolo, correntemente utilizado no sector das telecomunicações em Portugal, provém do termo em inglês *monopole*, que designa uma estrutura em consola, com secção transversal circular ou poligonal [2].

Tabela 1: Descrição genérica das várias tipologias de torres

TIPOLOGIA 1	Torre auto-suportada metálica treliçada de base quadrada, constituída por perfis metálicos tipo cantoneira, sendo as ligações entre os vários troços realizadas por intermédio de chapas cobrejuntas, e em que as barras diagonais e travessas apresentam-se geralmente aparafusadas.
TIPOLOGIA 2	Torre auto-suportada metálica treliçada de base triangular, constituída, de uma forma geral, por perfis metálicos tubulares, sendo as ligações entre os diversos troços realizadas por intermédio de flanges aparafusadas, e as barras diagonais e travessas poderão ser aparafusadas ou soldadas.
TIPOLOGIA 3	Monopolo auto-suportado, caracterizado por vários troços de perfis metálicos, geralmente, com secção transversal com geometria octogonal, dodecagonal ou hexadecagonal, sendo as ligações entre troços realizada, regra geral, por encaixe forçado.
TIPOLOGIA 4	Monopolo auto-suportado, caracterizado por vários troços de perfis metálicos de secção transversal tubular, ligados entre si por intermédio de flanges aparafusadas.
TIPOLOGIA 5	Torre espiada metálica treliçada de base triangular ou quadrada, apresentando secção constante, constituída, geralmente, por perfis metálicos de secção tubular, para torres de base triangular, ou cantoneiras, para torres de base quadrada.
TIPOLOGIA 6	Esta tipologia abrange todos os outros tipos de torres não mencionados anteriormente, como por exemplo, monopolo auto-suportado em GFRC (<i>Glass Fiber Reinforced Concrete</i>), monopolo auto-suportado com secção transversal tubular quadrada, torre auto-suportada treliçada em material compósito, etc.

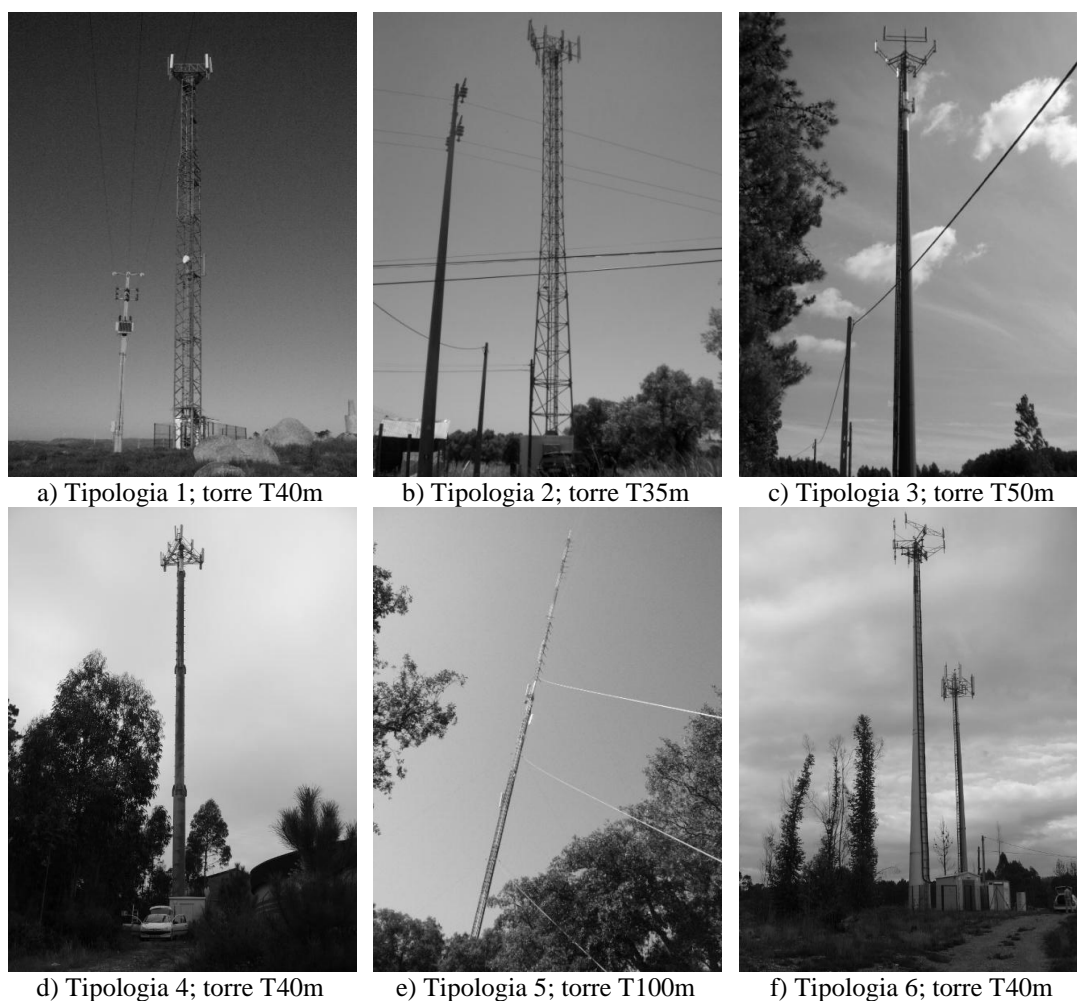


Fig. 1: Tipologia de torres para radiocomunicações

Na tabela 2 apresenta-se a distribuição das 385 torres em estudo de acordo com a sua tipologia e que poderá ser extrapolada para a generalidade do conjunto de torres utilizadas para radiocomunicações em Portugal. Como exemplo disso, uma evidência clara que poderá ser observada através da tabela 2 será a preponderância dos monopolos (tipologias 3 e 4), representando 56,1% do total de torres em análise. Com recurso à mesma tabela poderá verificar-se ainda que as torres auto-suportadas metálicas treliçadas de base triangular ou quadrada (tipologias 1 e 2) perfazem 35,8% do total das torres em estudo. Haverá sempre uma maior apêndice pelos monopolos devido ao menor impacto visual que parecem provocar, aspecto que não será discutido neste trabalho.

Tabela 2: Distribuição das torres por tipologia

Tipologia	Qte.	
1	42	10,9%
2	96	24,9%
3	136	35,3%
4	80	20,8%
5	18	4,7%
6	13	3,4%

3. Principais anomalias observadas

Da análise das anomalias observadas recentemente em torres utilizadas para radiocomunicações em Portugal verifica-se que os erros de concepção, assim como os erros de construção, têm sido as causas mais frequentes para o colapso ou substituição precoce destas estruturas. De forma paralela e nada desconexa do ponto anterior, a pressão do mercado para que sejam fornecidas estruturas mais leves e económicas gerou, em certos casos, estruturas com limitações em termos de segurança à fadiga.

Tendo como base uma amostra com duas centenas de torres em serviço de um operador nacional, Murteira [5] indica as principais anomalias observadas em inspecções de torres para radiocomunicações. Murteira [5] adianta que o fenómeno da corrosão afecta grande parte das torres metálicas observadas, com especial destaque para aquelas que se encontram em ambientes mais agressivos.

De um modo geral e para qualquer estrutura metálica implantada em ambiente não muito agressivo, a prática tem demonstrado que uma camada de zinco com 180 microns (1300g/m²) conduzirá a uma vida útil de 30 anos. Na Dinamarca foram utilizadas espessuras de galvanização mais elevadas, com um mínimo de 250 microns (1800g/m² de espessura) numa série de torres de forma a obter uma vida útil de 50 anos, sem qualquer manutenção [2]. Mas tal como nas restantes estruturas metálicas, a prevenção contra a corrosão inicia-se verdadeiramente nos pormenores construtivos e, no que respeita às torres, estes pormenores incluem a selagem das juntas entre troços ou tamponamento das juntas cegas, como forma de evitar a acumulação de água no interior dos perfis tubulares.

Aparte do exposto, além da deterioração dos materiais, este trabalho irá salientar todos os outros aspectos observados e que coloquem em causa a integridade deste tipo de estruturas.

Para o tratamento dos dados e para uma melhor apresentação dos resultados obtidos, foram definidos cinco níveis distintos de integridade estrutural em função das conclusões contidas nos projectos de verificação estrutural, da análise dos projectos de estabilidade ou dos relatórios de inspecção (ver tabela 3). Interessa mencionar que o nível 2 (“verifica limitada”) significa que houve um compromisso entre o projectista e o operador, no sentido de procurar uma solução para aquela estrutura específica. Em muitos dos casos, esta solução de compromisso implica a diminuição das áreas expostas à acção do vento, com a eliminação de plataformas, substituição de antenas e/ou outros elementos não estruturais.

Tabela 3: Descrição dos níveis de integridade estrutural

NÍVEL 1 “VERIFICA”	A estrutura cumpre todos os requisitos de segurança estrutural, para a carga instalada e tendo em conta as normas aplicáveis.
NÍVEL 2 “VERIFICA LIMITADA”	A estrutura cumpre todos os requisitos de segurança estrutural, para a carga instalada e tendo em conta as normas aplicáveis, mas encontra-se no seu limite de capacidade de carga, pelo que quaisquer acréscimos de carga deverão ser precedidos do reforço da estrutura.
NÍVEL 3 “NÃO VERIFICA”	A estrutura não cumpre todos os requisitos de segurança estrutural, para a carga instalada e tendo em conta as normas aplicáveis, não sendo dadas instruções se a estrutura deverá ser reforçada ou substituída.
NÍVEL 4 “NÃO VERIFICA REFORÇO”	A estrutura não cumpre todos os requisitos de segurança estrutural, para a carga instalada e tendo em conta as normas aplicáveis, sendo dadas instruções explícitas para que a estrutura seja reforçada.
NÍVEL 5 “NÃO VERIFICA SUBSTITUIÇÃO”	A estrutura não cumpre todos os requisitos de segurança estrutural, para a carga instalada e tendo em conta as normas aplicáveis, sendo dadas instruções explícitas para que a estrutura seja substituída.

Tabela 4: Distribuição das torres analisadas por níveis de integridade estrutural

Nível	Qte.	
1	307	79,7%
2	42	10,9%
3	6	1,6%
4	21	5,5%
5	9	2,3%

Da análise global realizada para as 385 torres, e tal como se poderá observar na tabela 4, a maior parcela, mais concretamente, 307 torres (79,7%), enquadra-se no nível 1. As restantes torres, ou seja, 78 torres (20,3%), encontram-se nos níveis 2, 3, 4 ou 5, estando, portanto, limitadas quanto ao uso, com indicação para reforço ou com instruções explícitas para substituição. Para uma melhor compreensão dos resultados serão agora apresentados os resultados das análises de anomalias observadas por tipologias, assim como as causas mais prováveis.

3.1 Principais anomalias observadas em torres da tipologia 1

A tabela 5 mostra a distribuição por níveis de integridade estrutural para as torres enquadradas na tipologia 1, ou seja, torres auto-suportadas metálicas treliçadas de base quadrada. Como se poderá observar na tabela, denota-se uma forte incidência na necessidade de reforço, designadamente, em 14 torres (33,3%), reforço esse que poderá ser realizado com a introdução de cantoneiras combinadas para os montantes e com duplicação das diagonais. Enquadradas no nível 2, ou seja, limitadas quanto ao uso, encontram-se ainda 10 torres (23,8%) mas sempre com a possibilidade de reforço, e com o intuito de ultrapassar esta limitação.

Tabela 5: Distribuição por níveis de integridade estrutural para torres da tipologia 1

Nível	Qte.	
1	17	40,5%
2	10	23,8%
3	1	2,4%
4	14	33,3%
5	0	0,0%

As principais causas apontadas para os problemas que conduzem à necessidade do reforço para as torres desta tipologia são as seguintes:

- Erros na concepção, com especial incidência para a não consideração da acção do vento tal como preconizado pelo RSA [6];
- Acrescentos em altura da torre sem que tenha sido realizado qualquer tipo de reforço da estrutura existente;
- Carregamento excessivo para além da capacidade de carga da estrutura. Sobre este ponto será de referir que estas torres estão enquadradas nas torres pesadas, com grande capacidade de carga e, de uma forma geral, com alturas elevadas.

3.2 Principais anomalias observadas em torres da tipologia 2

Na tabela 6 será possível observar a distribuição por níveis de integridade estrutural para as torres enquadradas na tipologia 2, ou seja, torres auto-suportadas metálicas treliçadas de base triangular. Os resultados indicam para esta tipologia 80 torres (83,3%) enquadradas no nível

1, 12 torres (12,5%) limitadas em relação ao uso e apenas 4 torres (4,2%) apresentando anomalias graves.

Tabela 6: Distribuição por níveis de integridade estrutural para torres da tipologia 2

Nível	Qte.	
1	80	83,3%
2	12	12,5%
3	1	1,1%
4	3	3,1%
5	0	0,0%

Apesar do resultado global obtido para esta tipologia ser francamente positivo comparativamente com outras tipologias, apresentando um número reduzido de anomalias graves, indicam-se as principais causas que conduzem à necessidade do reforço:

- Erros na concepção, com especial incidência para a não consideração da acção do vento tal como preconizado pelo RSA [6];
- Carregamento excessivo para além da capacidade de carga da estrutura;
- Erros na montagem e/ou a eliminação de elementos estruturais, e que comprometem a segurança da estrutura.

3.3 Principais anomalias observadas em torres da tipologia 3

Através da tabela 7 será possível observar a distribuição por níveis de integridade estrutural para as torres enquadradas na tipologia 3, ou seja, monopolos auto-suportados com secção transversal de geometria octogonal, dodecagonal ou hexadecagonal. Através da tabela 7 poderá concluir-se que esta tipologia será a que apresenta uma maior taxa de sucesso, com 129 torres (94,9%) enquadradas no nível 1 e apenas 7 torres (5,1%) enquadradas no nível 2, ou seja, limitadas em relação ao uso. Portanto, para as torres enquadradas nesta tipologia não há qualquer registo de anomalias graves.

Tabela 7: Distribuição por níveis de integridade estrutural para torres da tipologia 3

Nível	Qte.	
1	129	94,9%
2	7	5,1%
3	0	0,0%
4	0	0,0%
5	0	0,0%

Apesar do cenário apresentado ser positivo, será importante salientar que esta tipologia de torres apresenta, de uma forma geral, uma frequência própria bastante mais próxima dos valores mais elevados do espectro do vento, podendo a resposta dinâmica da estrutura ser largamente amplificada. Este assunto não é abordado convenientemente pelo RSA [6].

Realçando esta asserção, será de referir que no âmbito de uma Tese de Doutoramento em curso na Universidade de Aveiro [7], foram realizadas medições em dois monopolos auto-suportados, enquadrados nas tipologias 3 e 4, tal como descritas neste trabalho, com recurso a sensores de aceleração em fibra óptica. O valor obtido para a frequência própria das estruturas foi de 0,6Hz e 0,4Hz, respectivamente. Salientando o exposto, na figura 2 apresenta-se o

colapso de uma torre enquadrada nesta tipologia específica, onde se poderá observar a rotura da chapa metálica.

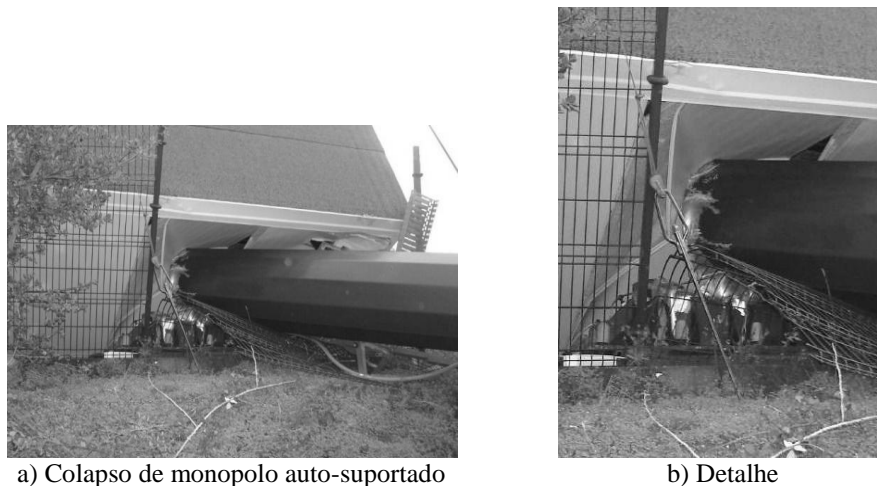


Fig. 2: Colapso de uma torre enquadrada na tipologia 3

3.4 Principais anomalias observadas em torres da tipologia 4

A tabela 8 mostra a distribuição por níveis de integridade estrutural das torres enquadradas na tipologia 4, ou seja, monopólos auto-suportados com secção tubular. Apesar do cenário geral se demonstrar como positivo, com 63 torres (78,8%) enquadradas no nível 1, denota-se uma parcela de 12 torres (15,0%) limitadas em relação ao uso e 5 torres (6,2%) apresentando anomalias graves.

Tabela 8: Distribuição por níveis de integridade estrutural para torres da tipologia 4

Nível	Qte.	
1	63	78,8%
2	12	15,0%
3	3	3,8%
4	1	1,2%
5	1	1,2%

Mas, tal como indicado para as torres da tipologia 3, esta tipologia apresenta também, e de uma forma geral, uma frequência própria bastante mais próxima dos valores mais elevados do espectro do vento, podendo a resposta dinâmica da estrutura ser largamente amplificada.

Também será importante referir que estas torres, em particular aquelas com alturas superiores a 30m são geralmente constituídas, ao nível da base, por perfis metálicos tubulares com uma relação diâmetro/espessura superior a 100. É conhecido que a resistência destes perfis é muito sensível a imperfeições [8,9,10]. Em todos os documentos analisados para este estudo e anteriormente indicados, o fenómeno de instabilidade local de chapas não foi contabilizado, pelo que a resistência destes elementos metálicos de secção tubular de parede fina poderá ter sido sobrestimada.

Outro aspecto a realçar nos diversos documentos analisados e que justifica o cenário demasiado optimista, será a desconsideração de dois fenómenos importantes na análise: a) o desprendimento alternado de vórtices a partir de lados opostos, que origina uma força transversal à corrente de escoamento [2,11] e b) a fadiga [2,12,13,14]. Se a frequência causada pelo desprendimento de vórtices coincidir com a frequência fundamental da estrutura, poderão ser agravadas as vibrações. Como esta condição se verifica para uma velocidade crítica do vento

que, em geral, é uma velocidade observada com frequência, o fenómeno da fadiga poderá tornar-se relevante em função do número de ciclos de carregamento. Como exemplo, coloca-se o caso de colapso de uma torre auto-suportada de secção tubular com 40m de altura, ilustrado na figura 3.

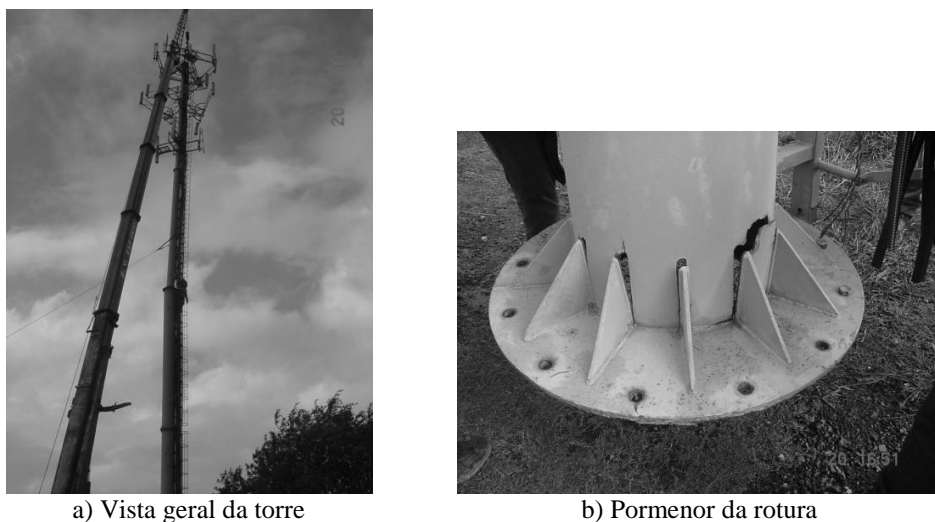


Fig. 3: Colapso de uma torre enquadrada na tipologia 4

Aparte do exposto, apontam-se como principais causas para a necessidade do reforço e/ou substituição precoce:

- a) Erros de concepção, com especial incidência para a não consideração da acção do vento tal como preconizado pelo RSA [6], e/ou a incorrecta avaliação da resistência dos elementos metálicos;
- b) Carregamento excessivo, para além da capacidade de carga da estrutura.

3.5 Principais anomalias observadas em torres da tipologia 5

Na tabela 9 será possível observar a distribuição por níveis para as torres enquadradas na tipologia 5, ou seja, torres espiadas metálicas treliçadas de base quadrada ou triangular. Apesar dos resultados apresentados não o destacarem de forma expressiva, com 12 torres (66,7%) enquadradas no nível 1 e 6 torres (33,3%) apresentando anomalias graves, esta é a tipologia que decerto necessita de uma maior atenção dado o elevado número de colapsos ocorridos nos últimos anos, mesmo em torres com pequena altura.

Tabela 9: Distribuição por níveis de integridade estrutural para torres da tipologia 5

Nível	Qte.	
1	12	66,7%
2	0	0,0%
3	1	5,5%
4	2	11,1%
5	3	16,7%

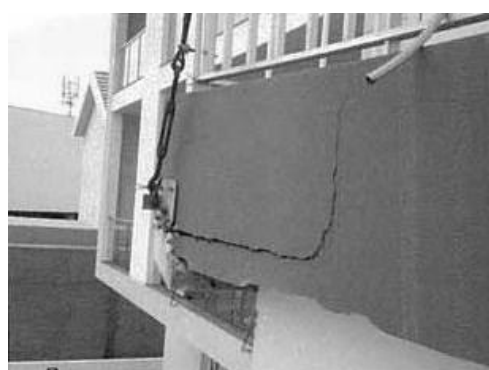
As torres espiadas são estruturas de análise complexa e que levam alguns especialistas a afirmar que “tratam-se das estruturas mais complexas que um Engenheiro pode alguma vez enfrentar”, afirmação que é corroborada pelo enorme número de colapsos verificados [2,3,4]. Infelizmente, dos casos analisados neste trabalho, verifica-se que as anomalias são originadas

por erros de concepção e/ou construção bastante grosseiros, designadamente, espiamentos ineficazes e/ou amarrações deficientes, tal como poderá ser observado nos quatro casos ilustrados nas figuras 4 e 5, tratando-se de torres de pequena altura.

Nas figuras 4-a e 4-b encontra-se ilustrada uma torre espiada metálica treliçada de base quadrada com 15m de altura, com um nível de espiamento aos 9m de altura, composto por duas espas com ângulos de abertura de 180° , ou seja, com um espiamento totalmente ineficaz, tendo sido ainda detectadas outras anomalias graves, designadamente, a amarração inferior das espas em muros de alvenaria que apresentaram forte fissuração, corrosão severa nos montantes conduzindo à degradação dos perfis metálicos. Então a torre foi substituída. Nas figuras 4-c e 4-d apresenta-se uma torre espiada metálica treliçada de base triangular com 15m de altura total e com dois níveis de espiamento, compostos por seis espas com ângulos de abertura de 120° , e onde duas das espas encontravam-se amarradas inferiormente a um perfil metálico disposto em consola.



a) Torre espiada T15m



b) Detalhe da fissuração observada no apoio da amarração inferior.



c) Torre espiada T15m



d) Pormenor do ponto de amarração inferior de duas espas

Fig. 4: Anomalias nos espiamentos e amarrações

Nas figuras 5-a e 5-b é apresentada uma torre espiada metálica treliçada de base quadrada com 21m de altura, e que colapsou devido a anomalias das amarrações inferiores das espas. Nas figuras 5-c e 5-d apresentam-se detalhes de uma torre espiada metálica treliçada de base triangular com 12m de altura, apresentando dois níveis de espiamento, aos 6m e 12m de altura, compostos por três espas por nível, e que colapsou após o ponto de amarração inferior ter provocado o arrancamento do betão, tal como ilustrado nas figuras.



Fig. 5: Anomalias nos espiamentos e amarrações

As principais causas para as anomalias observadas nesta tipologia são as seguintes:

- a) Erros grosseiros na concepção, designadamente, espiamento deficiente, amarrações ineficazes, incorrecta avaliação da resistência dos elementos metálicos, deficiente avaliação da acção do vento sobre a estrutura;
- b) Erros grosseiros na construção, nomeadamente, amarrações inferiores colocadas em paredes de alvenaria, guarda-corpos ou outros elementos frágeis ou não suficientemente rígidos, tensionamento das espigas inadequado ou falta de retensionamento.

3.6 Principais anomalias observadas em torres da tipologia 6

A tabela 10 mostra a distribuição por níveis para as torres enquadradas na tipologia 6, ou seja, todas as torres não enquadradas nas tipologias anteriormente mencionadas. Embora a tabela apresente um cenário que se pode considerar negativo, com 6 torres (46,1%) enquadradas no nível 1, 1 torre (7,7%) enquadrada no nível 2 e 6 torres (46,2%) apresentando anomalias graves, será de referir que esta tipologia engloba apenas 13 torres e que o grande número de anomalias apresentado deve-se, sobretudo, a uma única tipologia de torres, de um único fabricante, que apresentava erros graves de concepção, o que conduziu à substituição das mesmas. Ainda assim, fica mais uma vez registada como causa primária os erros de concepção.

Tabela 10: Distribuição por níveis de integridade estrutural para torres da tipologia 6

Nível	Qte.	
1	6	46,1%
2	1	7,7%
3	0	0,0%
4	1	7,7%
5	5	38,5%

4. Conclusões

Com este trabalho pretendeu-se apresentar as principais anomalias que se podem observar em torres para radiocomunicações em Portugal. Com base numa amostra de 385 torres existentes e em serviço em Portugal, com idades inferiores a 18 anos, foi possível identificar um grande número de anomalias, sendo, na sua grande maioria, imputáveis a erros de concepção, muitos deles grosseiros, pelo que este trabalho vem dar ênfase a estudos desenvolvidos noutros países, onde se constata que o número de anomalias neste tipo de estruturas é elevado pelo que o seu dimensionamento e construção carece de um conhecimento profundo da matéria abordada.

Referências

- [1] Smith, B., “50 years in the design of towers and masts. From IASS recommendations to current procedures”, *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*, Valencia, 28 Setembro - 2 Outubro 2009.
- [2] Smith, B., *Communication Structures*, Thomas Telford, London, 2007.
- [3] Støttrup-Andersen, U., “Masts and towers”, *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*, Valencia, 28 Setembro - 2 Outubro 2009.
- [4] Travanca, R., “Torres para radiocomunicações. Patologias e dimensionamento”, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2010.
- [5] Murteira, A., “Inspeção e manutenção de torres e postes de radiocomunicações”, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 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] Antunes, P., “Sensores ópticos para monitorização dinâmica de estruturas”, Tese de Doutoramento a apresentar à Universidade de Aveiro em 2011 (em fase de conclusão).
- [8] Athiannan, K. e Palaninathan, R., “Experimental investigations on buckling of cylindrical shells under axial compression and transverse shear”, *Sadhana*, 29, 1, 93-115, Fevereiro 2004.
- [9] Cai, M., Holst, J. e Rotter, J., “Parametric study on the buckling of thin steel cylindrical shells under elevated local axial compression stresses”, *16th ASCE Engineering Mechanics Conference*, Seattle, 16-18 Julho, 2003.
- [10] Schneider, W., Höhn, K., Timmel, I. e Thiele, R., “Quasi-collapse-affine imperfections at slender wind-loaded cylindrical steel shells”, *European Conference on Computational Mechanics*, Cracow, 26-29 Junho, 2001.

- [11] Verboom, G. e van Koten, V. “Vortex excitation: three design rules tested on 13 industrial chimneys”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 98, 145-154, 2010.
- [12] Mikitarenko, M. e Perelmuter, A., “Safe fatigue life of steel towers under the action of wind vibrations”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 74-76, 1091-1100, 1998.
- [13] Repetto, M. e Solari, G., “Dynamic crosswind fatigue of slender vertical structures”, *Wind and Structures*, Vol. 5, No. 6, 527-542, 2002.
- [14] Wyatt, T., “Determination of gust action stress cycle counts for fatigue checking of line-like steel structures”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 92, 359-374, 2004.