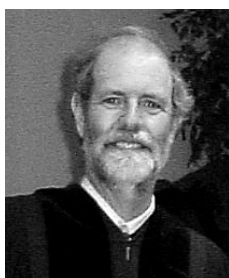


ACTUALIZAÇÃO DAS BASES-DE-DADOS SOBRE FREQUÊNCIAS PRÓPRIAS DE ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS, PONTES, VIADUTOS E PASSAGENS DE PEÕES A PARTIR DE MEDIÇÕES EXPEDITAS *IN-SITU*.



Carlos S. OLIVEIRA
ICIST/IST – Instituto Superior Técnico
Lisboa

SUMÁRIO

A avaliação das frequências próprias de um conjunto variado de estruturas tem vindo a permitir aferir um certo número de parâmetros da modelação matemática dessas estruturas, e a estabelecer dependências relacionais entre frequências próprias e características geométricas com base em amostras de alguma dimensão estatística.

Como se pensa que esta informação é bastante relevante para vários sectores da dinâmica estrutural, apresentam-se os referidos dados relativos a edifícios, pontes, viadutos e passagens de peões: (i) propondo/actualizando algumas leis para obtenção de frequências próprias de várias tipologias de edifícios a partir de dados geométricos; (ii) descrevendo as correlações entre frequências e o vão de obras-de-arte, e (iii) confrontando os níveis máximos de vibração registados para as passagens de peões com os valores preconizados em normas.

1 INTRODUÇÃO

Os recentes desenvolvimentos tecnológicos da instrumentação sísmica para medição do “ruído ambiente” têm possibilitado nos últimos anos uma intensificação da campanha de medição expedita *in-situ* de frequências próprias de vibração dos mais diversos tipos estruturais. Em 1997, foi apresentada uma comunicação ao 3º Encontro de Sismologia e Engenharia Sísmica, Lisboa [1], em que se referiam as medições realizadas em cerca de 250 estruturas. Estas medições encontram-se organizadas numa base-de-dados, onde se anotam as características geométricas mais relevantes de cada estrutura ensaiada e as frequências mais baixas observadas. Desde então para cá a base-de-dados foi praticamente duplicada, constando actualmente cerca de 506 estruturas, sendo 251 edifícios, 185 pontes, viadutos e passagens de peões, e 70 “estruturas de outros tipos”. As estruturas escolhidas cobrem uma vasta gama de soluções estruturais em cada um dos tipos referidos, pelo que se considera ter analisado uma

fatia bastante representativa de muitas obras existentes em Portugal. Incluiu-se nesta base-de-dados alguma informação que foi possível coligir noutras fontes publicadas, o que permitiu ampliar a amostra dos casos analisados. Para o caso das “obras-de-arte”, foram incluídos na base-de-dados ensaios efectuados pelo LNEC [2] ou pelo ICIST/IST [3], que correspondem a cerca de 18% do total.

O objectivo fundamental para a constituição desta base-de-dados é “arrumar” informação importante sobre as propriedades dinâmicas dessas estruturas, permitindo um conhecimento do seu comportamento sob a acção de cargas dinâmicas, sejam elas devido aos sismos ou vento forte (caso dos edifícios), ou devidas também à passagem de veículos ou peões (caso das obras de arte). No caso dos edifícios, o conhecimento que se obtém com estes ensaios é apenas válido para pequenas amplitudes de vibração, sendo necessário adequados cuidados na extrapolação para os casos de maiores amplitudes em que o comportamento se torne manifestamente não linear. No caso das obras de arte, os valores de amplitude obtidos com a passagem de cargas pesadas vêm pôr à prova o comportamento dessas estruturas em condições mais próximas de estados limites mais severos.

Com a informação contida na base-de-dados é possível estabelecer correlações entre as frequências dos principais modos de vibração e algumas das características geométricas e mecânicas das estruturas, o que permite detectar rapidamente alguma anomalia de funcionamento, seja esta devido a dano ocorrido ou alteração das propriedades (massas, rigidez, ligação entre elementos). Permite também verificar a “fiabilidade” dos modelos matemáticos, por comparação das frequências medidas com as resultantes dos modelos analíticos, introduzindo correcções na modelação de forma a aproximá-los melhor da realidade física. Finalmente, permite dar indicações aos projectistas sobre valores que podem utilizar numa primeira caracterização das frequências das estruturas.

O estudo das amplitudes de vibração para diversas estruturas devidas à passagem de determinados tipos de veículos/cargas constitui outra das indicações preciosas para o estabelecimento ou enriquecimento de normativas que gerem a segurança e o conforto deste tipo de estruturas.

O presente trabalho não substitui estudos detalhados de estruturas especiais, para identificação de modos e respectivas frequências, os quais requerem medições simultâneas em vários pontos da mesma estrutura, exigindo um conjunto de transdutores com temporização, e prazos quer de execução *in-situ* quer de tratamento e análise muito mais dilatados que os necessários para estes ensaios expeditos [4, 5].

As “*Estruturas de Outros tipos*”, que incluem igrejas, depósitos elevados de água, faróis, chaminés, entre outros, serão objecto de trabalho futuro.

2 A TÉCNICA DE ENSAIO E TRATAMENTO DOS DADOS ADQUIRIDOS

2.1 Fonte de excitação

Para os edifícios a fonte de excitação usada como acção de “input” é essencialmente o “ruído ambiente”, proveniente do tráfego contínuo, do vento e da actividade no interior do edifício, nomeadamente o movimento de elevadores e outros equipamentos. Em certos casos foi

possível aplicar vibração forçada à custa de movimento ritmado de uma ou duas pessoas, noutros registaram-se os movimentos durante a ocorrência de sismos.

Os ensaios nas pontes e viadutos são realizados em plena operacionalidade da via, com o tráfego que passa na ocasião. Procede-se ao registo de situações diversas (3 a 5 registos) coincidentes com a passagem de diferentes tipos de veículos, fazendo-se sempre que possível um registo sem tráfego. Para todas as situações determinam-se amplitudes máximas registadas, que são função da carga em movimento, velocidade de passagem, da faixa de rodagem onde circula, inclinação da via (a subir ou a descer), da continuidade estrutural do tabuleiro na zona dos pilares, da rugosidade do pavimento e da continuidade nas “juntas”. Os registos dão conta também da duração das maiores vibrações, não tendo sido no entanto recolhida esta informação. A relação das amplitudes com o tipo de veículos deve ser tomada de forma qualitativa, uma vez que nestes ensaios não é possível conhecer, com um mínimo de precisão, a carga e a velocidade dos veículos. A situação é ainda mais complexa quando se dá a passagem simultânea de dois ou mais veículos.

A técnica de ensaio para as passagens de peões é em tudo semelhante à descrita para as pontes e viadutos. Contudo, devido à maior flexibilidade destas estruturas, decidiu-se optar por realizar ensaios-tipo que se passam a descrever: (1) vibração ambiente sem qualquer pessoa a passar; (2) vibração com uma pessoa em passada normal; (3) vibração provocada por salto de uma pessoa a meio vão e vibração forçada segundo cada uma das direcções; (4) vibração provocada por uma pessoa em passo de corrida (“jogging”). Para cada caso é obtida a amplitude máxima de vibração produzida, e a frequência associada.

Vinagre Santos [6] dedicou-se à determinação de espectros de input e “história ao longo do tempo” para várias situações de “passada”, “corrida”, etc., exercidas sobre as passagens de peões pelos seus utentes. O conhecimento destas acções convoluído com os resultados dos ensaios-tipo acima descritos poderão conduzir a situações extremas de utilização destas passagens de peões, podendo determinar-se com algum rigor o nível de segurança e comodidade.

2.2 Ensaio e processamento de dados

A técnica de ensaio e de processamento dos dados, descrita em [1], passa-se resumidamente a explicar. Um acelerómetro de sensibilidade a 5×10^{-2} mg (≈ 0.5 mm s⁻²) e com valores de pico de 0.5 g é colocado no topo do edifício em zona central e/ou numa ponta de molde a poder identificar modos de torção. Por vezes repete-se o ensaio noutros andares, na mesma prumada, para poder identificar 2ºs e 3ºs modos em cada uma das direcções. Cada ensaio consiste na realização de 3 a 5 registos, de 40 a 60 seg de duração, e a uma taxa de amostragem de pelo menos 100 Hz. Nas pontes, um acelerómetro é colocado a meio vão ou terço de vão, na zona de passeio lateral.

O tratamento dos registos consiste essencialmente numa análise no domínio da frequência através do algoritmo da FFT. “Anti-Aliasing”, filtragens, remoção de “DC” e “espúrios”, e outros aspectos do tratamento de sinal, são tidos em consideração para interpretação dos registos. Para os edifícios a análise simultânea dos espectros de amplitude das duas componentes horizontais permite proceder à identificação dos principais modos de vibração da estrutura. Normalmente, e dependendo da complexidade da estrutura, obtém-se com precisão o primeiro modo em cada uma das direcções, transversal e longitudinal. Em muitos casos obtém-

se ainda outros modos superiores, de flexão e às vezes de torção. Num ou outro caso também se determina o amortecimento. Amplitudes do movimento associadas a determinados tipos de “input” são também observadas em casos excepcionais.

Estruturas mais complexas, como é o caso das pontes, exibindo modos com frequências próximas umas das outras, estão fora do alcance desta técnica expedita de análise, sendo apenas possível dar indicação do tipo de modo em estudo. Querendo determinar modos, a tecnologia implica efectuar medições com vários sensores sincronizados, dispostos ao longo da estrutura [5].

Estes ensaios expeditos demoram cerca de meia hora a executar por cada estrutura (e cada ponto de medida), sendo o tratamento e análise feito em gabinete posteriormente, à média de três horas para interpretação e escrita de uma folha de resultados.

3 EDIFÍCIOS

Os edifícios seleccionados para ensaio pretendem cobrir um campo amplo de situações existentes no país desde construções antigas em alvenaria de pedra até edifícios recentes em betão armado de variada tecnologia estrutural. Assim os *edifícios* foram divididos em várias classes (segundo a classificação de Oliveira [7], começando pelos mais antigos, de alvenaria de pedra com pavimentos em madeira (A), depois os edifícios da primeira fase do betão armado (B), surgindo mais tarde os edifícios essencialmente aperticados de betão armado (C), os mistos pórtico-parede (C1) e, finalmente, os edifícios com estrutura parede (C2). Haverá casos de transição onde a nomenclatura junta as classes mais predominantes, como por exemplo A/B, que quer significar os edifícios do período de transição entre alvenaria de pedra com alguns elementos de betão armado. Aparecem ainda as estruturas metálicas (D).

Fazem parte da actual base-de-dados 251 edifícios, praticamente o dobro dos que existiam em 1997 [1]. Os edifícios foram seleccionados por todo o país, incluindo o Arquipélago dos Açores, com maior incidência na região de Lisboa. A grande maioria cai na categoria C/C1, sendo a distribuição em altura a que se mostra na Figura 1.

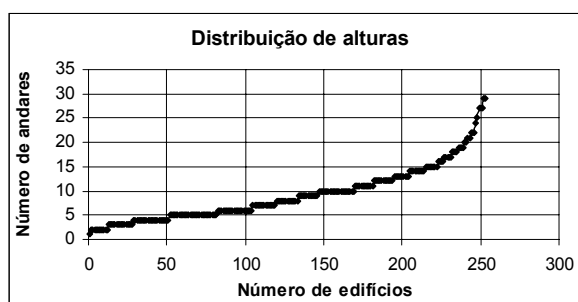


Figura 1: Distribuição dos edifícios por número de andares.

3.1 Análise de alguns resultados

As frequências das estruturas de edifícios dependem essencialmente da classe tipológica e do número de andares, considerando como andares os pavimentos que se comportam como massas oscilantes. Utilizou-se a função mais frequentemente proposta na literatura internacional

que relaciona o período do modo fundamental em qualquer das duas direcções horizontais de forma linear com o número de andares, N , tratando o conjunto total das estruturas e dividindo-as por classes tipológicas. Desdobrou-se também a análise pelas duas direcções principais, “Trans”, “Long”, e por vezes pela “Torção”. Os resultados encontram-se ilustrados nas Figuras 2 e 3, respectivamente, para todo o conjunto de edifícios e para o conjunto das tipologias C2 na direcção transversal. Como se pode observar nestas figuras, a dispersão diminui claramente no segundo caso dada a maior homogeneidade do conjunto destes últimos edifícios. Perante esta constatação, procedeu-se a uma análise por acerto através de mínimos quadrados das diferentes tipologias, apresentado-se no Quadro 1 o valor dos parâmetros e coeficiente de correlação respeitante à lei de variação linear do período com o número de andares.

Os valores agora obtidos para edifícios (Quadro 1) comparam-se bem com as leis desenvolvidas em 1982 e mais tarde em 1997 [1,7], com a excepção do Tipo C, agora com aspecto mais linearizado. Embora a amostra seja muito maior, a dispersão não diminui significativamente, sendo necessário investigar as causas conducentes a tais valores, tais como o efeito da interacção solo-estrutura.

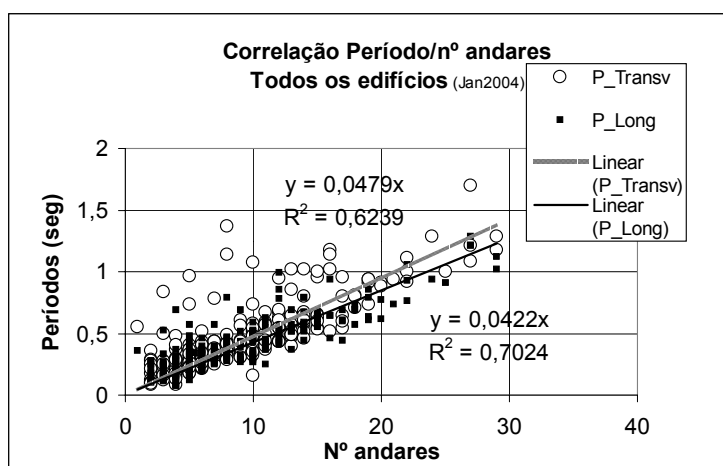


Figura 2: Correlação período/nº de andares para o 1º modo (Trans. e Long.).

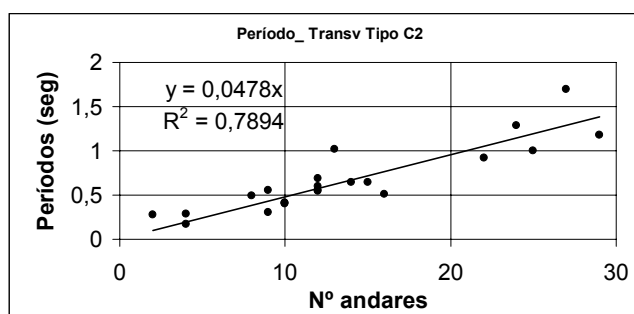


Figura 3: Correlação para o período do 1º modo transversal no caso dos edifícios tipo C2.

A base de dados possui informação suficiente para se ensaiarem outros tipos de correlações para os edifícios, sejam elas (i) com as mesmas variáveis mas usando outras relações funcionais, como por exemplo

$$\text{período}, T = c \cdot \frac{H}{\sqrt{B}} \cdot \sqrt{\frac{H}{H+B}} \quad (H - \text{altura}; B - \text{largura})$$

como sugere a regulamentação francesa; (ii) de outras frequências, 2º modo de translação (f_2), 3º modo (f_3), torção ($f_{\text{torç}}$), relação f_2/f_1 , relação $f_{\text{long}}/f_{\text{transv}}$, função da altura (H), etc.

Quadro 1. Parâmetros da lei dos períodos ($T=aN$) para várias tipologias estruturais

Tipologia	Direcção	Número	a	R^2
Todos	Trans	261	0.0479	0.624
Todos	Long	261	0.0422	0.702
Alvenaria – A	Trans	48	0.0649	0.270
Alvenaria – A	Long	48	0.0548	0.242
Betão arm – B	Trans	18	0.0536	0.736
Betão arm – B	Long	18	0.0498	0.659
Betão arm – C	Trans	193	0.0471	0.618
Betão arm – C	Long	193	0.0420	0.676
Betão arm – C	Torção	56	0.0320	0.352
Betão arm - C1/C2	Trans	125	0.0480	0.652
Betão arm - C2	Trans	20	0.0478	0.789

A Figura 4a ilustra a relação entre períodos na direcção transversal e longitudinal para todos os edifícios, mostrando claramente o aumento da frequência na direcção longitudinal, por vezes devido ao “encosto” entre edifícios nessa direcção. A Figura 4b mostra a correlação da frequência de torção com a da transversal.

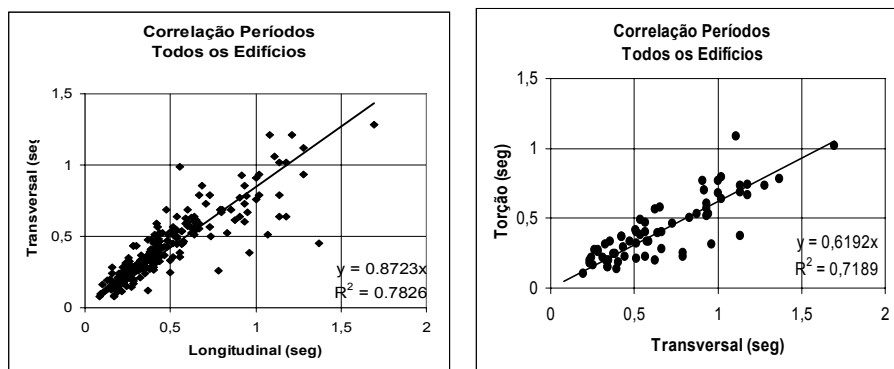


Figura 4: Correlação entre períodos: a) nas duas direcções horizontais (transv/long); b) torção/transv.

O Quadro 2 mostra algumas leis entre frequências para modos mais altos, como referido anteriormente. Os valores obtidos, embora exibindo grande dispersão, são bem indicativos dos padrões que ocorrem nos edifícios em termos de características de vibração.

Quadro 2. Correlações entre frequências de vários modos ($y=ax$)

Tipologia	Rácio f_i/f_1	Número	A	R^2
Todos	Transv ₂ /Transv ₁	34	2.627	0.354
Todos	Torcão/ Transv ₁	65	1.546	0.578
Todos	Transv ₁ /Long ₁	261	0.872	0.783

Os elementos que constam da base-de-dados podem ser explorados de outras formas e utilizados em diferentes situações. Neste trabalho apenas se propôs mostrar os principais dados existentes e estabelecer algumas das correlações mais evidentes. Muito mais informação poderá ser retirada e trabalhada em futuros estudos.

Será interessante referenciar um trabalho realizado com edifícios apenas de tipo C1/C2 em Lisboa, utilizando sensores de velocidade [8], que chegou à função $T=0.043 N$, juntando as frequências nas duas direcções horizontais. O valor 0.043 é cerca de 8% inferior ao indicado agora, iniciando variações no método de cálculo e na selecção dos edifícios, que também fazem parte da presente base-de-dados. Nesse trabalho foi ainda possível determinar uma lei para o amortecimento, do tipo $\xi T=1.1\%$, em que ξ mede a percentagem do amortecimento crítico, baseada em dados com grande dispersão.

3.2 Crítica dos valores obtidos. Discussão.

A análise do Quadro 1 mostra que a lei da variação linear do período com a altura funciona relativamente bem para a globalidade das estruturas ensaiadas, sendo a dispersão inferior no caso dos edifícios mais recentes.

Existe um conjunto de outras situações para explorar, designadamente fazendo uma análise mais fina das classes tipológicas ou utilizando outros parâmetros ligados à geometria. Trabalho futuro irá debruçar-se sobre estas e outras questões que se podem facilmente retirar da base-de-dados. Relativamente ao primeiro ponto, pode referir-se, a título de ilustração, que a frequência dos edifícios Pombalinos e até meados do séc XIX, no grupo de 5 a 7 pisos, apresentam frequências menores que edifícios da época 1920-1940 em cerca de 70% na direcção “Transv” e 80% na “Long”. Estes, por sua vez apresentam frequências ainda menores que os de 1940-50, em cerca de 70% (Quadro 3).

Quadro 3 : Alguns exemplos de frequências médias em edifícios típicos

Tipos	Nº de andares	Frequências médias (Hz)
Pombalinos+meados séc XIX	5-7	2.3-3
1920-1940	4-7	3.7-3.8
1940-1950	3-6	5-5.5

3.3 Outras informações pertinentes ao comportamento dinâmico de edifícios

As observações que constam da base-de-dados foram conseguidas praticamente na sua totalidade a partir de registos de ruído sísmico. Houve, no entanto, três casos de registos durante sismos, com amplitudes de 5 a 10 vezes o valor do ruído médio e que confirmaram o valor das frequências dos modos mais baixos.

3.4 Influência das paredes de enchimento

Numa outra observação constata-se que as frequências medidas são em geral muito superiores (até cerca de cinco vezes) às frequências obtidas no cálculo analítico “vulgar” dos gabinetes de projectos. Baptista et al. [9] mostraram que é possível, por cálculo detalhado, entrando com a contribuição das paredes de enchimento, atingir valores que não se afastam mais de 5% dos medidos *in-situ*. Para tal é necessário introduzir escoras na diagonal representando as paredes de enchimento, elementos rígidos para representar as espessuras nas intersecções pilar-viga (contribuição até 20%), e introduzir as escadas como elemento estrutural (contribuição até 5%).

É reconhecido que a influência das paredes de enchimento no aumento das frequências dos edifícios depende da “quantidade” de paredes não-estruturais e da “quantidade” de paredes estruturais existentes, sendo esse aumento tanto maior quanto maior for a “quantidade” das primeiras e menor a “quantidade” das segundas. Experimentalmente, este efeito foi verificado como se reporta nos Quadros 4 a 6, havendo um aumento de cerca de 180% para o caso de estrutura sem paredes, 150% numa situação intermédia e 120% para o caso da existencia de maior “quantidade” de paredes resistentes. Estes valores experimentais não atingem os números acima citados pois correspondem a medições efectuadas sobre estruturas em construção.

Quadro 4: Edifício de BA* de 9 pisos “sem paredes resistentes”

Tipo de modo	Sem paredes de alvenaria	Com paredes de alv.	Aumento (%)
Transversal	0.88 Hz	1.73 Hz	196
Longitudinal	1.27	2.15	169

Quadro 5: Edifício de BA* de 8 pisos “com algumas paredes resistentes”

Tipo de modo	Sem paredes de alvenaria	Com paredes de alv.	Aumento (%)
Transversal	1.27 Hz	1.68 Hz	132
Longitudinal	1.17	2.05	175
Torção	1.18	2.64	224

Quadro 6: Edifício de BA* de 9 pisos “com bastantes paredes resistentes”

Tipo de modo	Sem paredes de alvenaria	Com paredes de alv.	Aumento (%)
Transversal	2.15 Hz	2.64 Hz	125
Longitudinal	1.76	1.86	107

*BA – betão armado

3.5 Influência da amplitude do movimento

O comportamento sísmico de edifícios não passa apenas pelo regime de pequenas amplitudes do movimento. Torna-se, portanto, indispensável compreender o efeito da amplitude nas frequências devido essencialmente ao comportamento não linear do edifício e dos solos de fundação. Dos poucos exemplos de edifícios instrumentados que foram sujeitos a movimentos de alguma intensidade, verifica-se uma queda da frequência durante o decurso da própria excitação, havendo alguma recuperação após o sismo, Quadro 7. Após o sismo, a frequência retomou valores para cerca de 78% dos iniciais. Alguns trabalhos nos Estados Unidos, a partir de registos no sismo de San Fernando, 1972 e Northridge, 1994, apontam na mesma direcção.

Quadro 7: Queda máxima da frequência durante um sismo intenso*

Tipo de modo	1º modo	2º modo	3º modo
E-W	45%	50%	50%
N-S	40%	45%	
Torção	60%	50%	

*Imperial County Service Building, Imperial County Earthquake, 1979, PGA=220 cm/s².

4 PONTES E VIADUTOS ENSAIADOS

A cerca de centena e meia de pontes e viadutos ensaiados correspondem a um conjunto de largo espectro que encontramos actualmente nas diversas estradas e em algumas vias ferroviárias portuguesas.

Começando pelas tecnologias mais antigas, foram ensaiadas pontes de alvenaria de pedra do final de séc. XIX, princípios do séc XX, com arcos de 10 a 60 m, pontes metálicas em treliça espacial para tráfego rodoviário e ferroviário, com vãos de 20 a 60 m, de betão armado dos anos 1920-50 em arco “bow string” com vãos de 30 a 50 m, em arco de grande vão (40 a 270 m), pontes de betão armado dos anos 1950-60 de laje vigada com vãos de 40 a 60 m, estruturas construídas nos últimos 20 anos, de utilização nas auto-estradas ou cruzando estas (passagens superiores), com grande variedade de formas e estilos. Fazem parte deste último grupo as pontes de betão armado, por vezes pré-esforçado em caixão, com vigas pré-fabricadas ou betonadas *in-situ*, os grandes arcos, as pontes de tirantes e uma ponte suspensa. Quanto às passagens superiores, embora se encontre uma imensidade de diferentes soluções, os vãos são quase sempre da mesma ordem de grandeza, dos 20 aos 40 m.

Fazem parte da base-de-dados as principais características das pontes, viadutos e passagens de peões ensaiados, organizadas por ordem cronológica do ensaio. Para além das características gerais geométricas e mecânicas, são apresentadas as frequências dos modos fundamentais em cada uma das direcções transversal, longitudinal e vertical, e identificadas outras frequências importantes incluindo modos de torção. Na trabalho Costa *et al.* [10], foi possível, para um conjunto de estruturas metálicas treliçadas em arco, identificar claramente diversos modos de vibração.

Para alguns casos registaram-se as amplitudes do movimento correspondentes a diversas situações de tráfego. Esta informação pode ser estendida a outros casos por nova análise dos registos efectuados pelo autor.

Na Figura 5a dá-se conta da estatística dos vãos de todas as obras-de-arte analisadas, onde é notório que os vãos entre 20 e 100 m correspondem a 90% do total da amostra. A Figura 5b, apresenta essa estatística para os casos de passagens de peões.

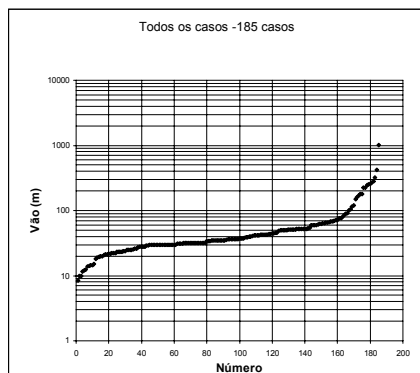


Figura 5a: Estatísticas do parâmetro vão das pontes, viadutos e passagens de peões.

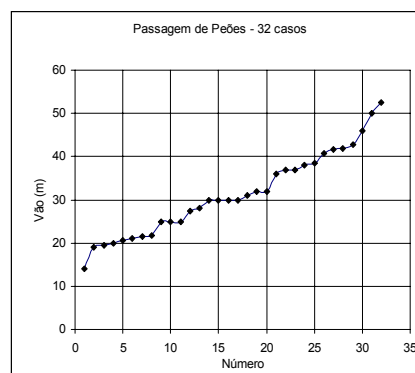


Figura 5b: Estatísticas do parâmetro vão das passagens de peões ensaiados.

4.1 Análise de alguns resultados

Os elementos que constam da base-de-dados podem ser explorados de diversas formas e utilizados em diferentes situações. Neste trabalho apenas se propõe mostrar os principais dados existentes e estabelecer algumas das correlações mais evidentes. Muito mais informação poderá ser retirada e trabalhada em futuros estudos.

A função mais frequentemente proposta na literatura internacional relaciona a frequência do modo fundamental vertical com o comprimento útil do vão, L . Foi o que se fez neste trabalho, tratando o conjunto total das estruturas e dividindo-as por classes tipológicas. Os resultados encontram-se resumidos na Figura 6. Os parâmetros de um acerto por mínimos quadrados para o caso das frequências está apresentado no Quadro 8. Desdobrou-se a análise pelas três direcções principais, “Vert”, “Transv”, e “Long”.

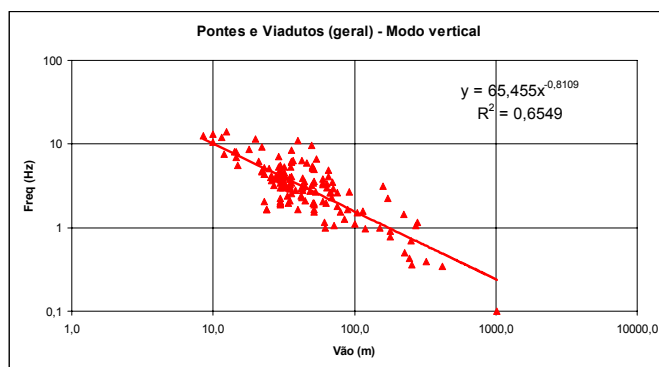


Figura 6: Correlação frequências/ “vão” para o conjunto de todas as pontes e viadutos.

A análise do Quadro 8 mostra que a lei da potência de L funciona relativamente bem para a globalidade das estruturas ensaiadas independentemente do tipo em estudo, sendo a dispersão inferior no caso das vibrações na direcção vertical, aumentando para a direcção transversal, e ainda mais na longitudinal. Quando se desdobram as pontes e viadutos por classes, a correlação

aumenta significativamente, sendo os melhores resultados obtidos com grandes arcos de betão armado e com as pontes atirantadas. Contrariamente ao que se poderia esperar, as pontes metálicas em treliça espacial e as “bow-string” em betão armado apresentam muito maior dispersão.

Quadro 8: Parâmetros da lei ($y=a L^b$), modo vertical (y – frequência, Hz; L – vão maior, m)

Tipologia	Vão maior (m)	Número	A	b	R^2
Todas. Vert	1000	152	65.45	-0.811	0.655
Todas. Trans	1000	152	42.78	-0.748	0.471
Todas. Long	1000	152	21.11	-0.492	0.354
Arcos Bet. Arm.	270	9	529.59	-1.152	0.843
Treliças Metálicas	70	21	28.45	-0.508	0.484
Bow string (BA)	60	12	102.7	-0.822	0.476
Tirantes BA	324	7	25.05	-0.730	0.921
Idem+2 Japão	485	9	15.74	-0.632	0.878

Existe um conjunto enorme doutras situações para explorar, designadamente no que se refere às pontes das auto-estradas em caixão, com vãos na gama dos 25 a 60 m. Trabalho futuro irá debruçar-se sobre estas e outras questões que se podem facilmente retirar da base-de-dados.

5 PASSAGENS DE PEÕES ENSAIADAS

Nos últimos anos, com a construção de auto-estradas ou vias rápidas de grande tráfego surgiram inúmeras passagens de peões com as mais diversas tipologias construtivas. Normalmente a estrutura é constituída por: um elemento horizontal (viga) que vence o vão, apoiada em pilares nas extremidades ou um pouco para o interior; o acesso de qualquer dos lados é feito por escada ou rampa, ou ambos, colocados longitudinalmente ou transversalmente à estrutura. Descrevendo as formas mais generalizadas, pode dizer-se que independentemente do vão (10 a 50 m) se observam: (i) vigas de betão armado com vigas pré-fabricadas e pré-esforçadas, completadas por lajetas de betão que formam o pavimento; (ii) vigas metálicas em caixão, normalmente de secção trapezoidal ou rectangular, apoiadas em pilares de secção circular oca; (iii) vigas metálicas de secção “aberta”, providas de septos exteriores, apoiadas em pilares circulares; (iv) vigas em treliça espacial, de perfis metálicos e chapa de pavimento, formando uma secção “aberta” ou “fechada”, apoiadas em pilares de betão, circulares metálicos, ou treliças verticais. Casos diferentes dos expostos, como seja uma estrutura treliçada em arco, uma lâmina de betão em catenária, ou mesmo estruturas betonadas em obra, são pouco usuais em Portugal.

A base-de-dados contém informação relevante para a geometria e condições fronteira destas estruturas, desde as dimensões principais, tipo de secções, pilares e localização das escadas ou rampas. Estes elementos são essenciais para uma boa caracterização dos principais modos de vibração. Com base em diversos parâmetros (L , h , I_x , I_y , m_z , etc.) é possível elaborar sobre as frequências nas três direcções do espaço e correlacioná-las com os valores medidos. Na maior parte dos casos, apenas 2 ou 3 parâmetros são suficientes para explicar as observações efectuadas. Neste trabalho apenas se procurou analisar o parâmetro *comprimento da Viga*, como condicionador da frequência vertical, como se pode observar nas figuras que se seguem.

Para além das três frequências correspondentes aos modos fundamentais nas direcções transversal, longitudinal e vertical, para muitos casos foi possível identificar outras frequências cujos modos apresentam contribuições importantes nessas direcções, frequências de torção, amplitudes de vibração nas três direcções, e, num caso ou outro, coeficientes de amortecimento.

5.1 Análise de alguns resultados

Os principais resultados obtidos encontram-se nas Figuras 7 e 8, em que se correlacionam as frequências dos primeiros modos com o comprimento do vão (L) para as várias tipologias descritas.

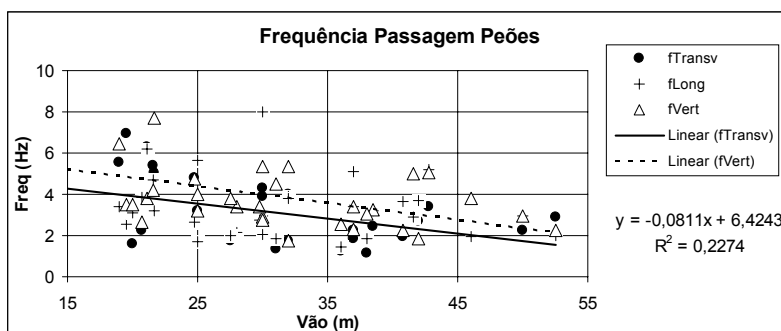


Figura 7: Correlação freq/“vão” para o conjunto de todas as passagens de peões. (eq.-dir. vert)

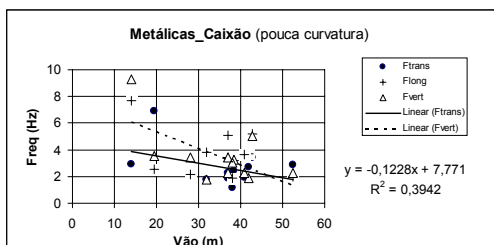


Figura 8a: Correlação frequências/“vão” para o conjunto das passagens de peões ensaiadas com Viga Metálica. (eq.-dir. vert)

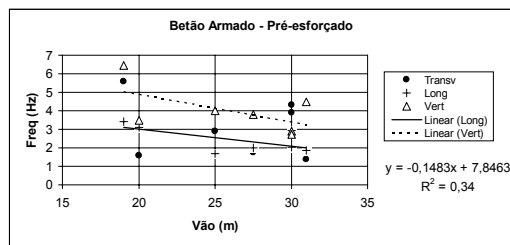


Figura 8b: Correlação frequências/“vão” para o conjunto das passagens de peões ensaiadas com Viga em Betão armado. (eq.-dir. vert)

A frequência do modo vertical é relativamente fácil de correlacionar com o vão para os casos de viga metálica e treliça espacial. Já o mesmo não se observa para o caso de vigas de betão armado, onde a dispersão neutraliza qualquer análise que se pretenda fazer, a não ser que se seja mais selectivo no estabelecimento de sub-grupos. Relativamente a este último caso, pode apenas afirmar-se que na gama dos 20 aos 32 m as primeiras frequências nas três direcções se encontram na de gama 1.5 a 4.5 Hz, sendo as frequências na vertical superiores às das outras duas direcções.

Quanto à frequência do modo transversal, a influência do posicionamento das escadas é marcante, pois deve vir juntar-se à deformabilidade/massa da viga mais pilares nessa direcção. Na direcção longitudinal a situação depende ainda mais do posicionamento da escada, uma vez que os elementos importantes para a frequência nessa direcção são os pilares.

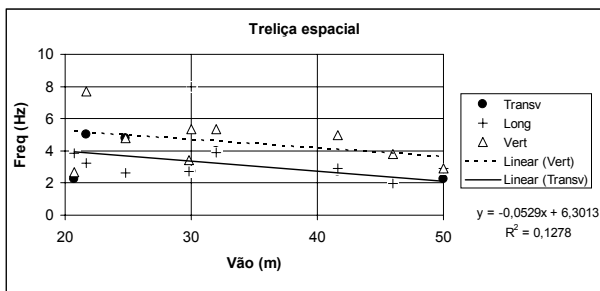


Figura 8c: Correlação frequências/ “vão” para o conjunto das passagens de peões com Viga em treliça espacial. (eq. – dir. vert)

Em termos de amplitudes, os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 9, onde se apresentam as acelerações máximas registadas na direcção vertical para as situações de passagem de uma pessoa e de vibração forçada também provocada por uma pessoa. Os valores para as oscilações transversais e longitudinais são inferiores (cerca de 1/3 e 1/9, respectivamente), embora apresentem um padrão semelhante, Figura 10. A representação foi feita em função da frequência do modo mais baixo, e verifica-se que as estruturas em betão armado apresentam oscilações muito inferiores, cerca de três vezes, quer em relação às estruturas em treliça ou caixão metálico.

Como se pode observar das Figuras 9 e 10, as amplitudes das estruturas metálicas ultrapassam largamente os padrões recomendados na regulamentação internacional, como designadamente refere a EN1990 (2002) em que os máximos de aceleração nunca devem ultrapassar 70 mg na vertical e 20 mg na horizontal, em condições de uso normal. Outras normas são mais flexíveis, fazendo a aceleração máxima ($a_{m\acute{a}x}$) depender da frequência f_1 , $a_{m\acute{a}x} \leq 0.5 f_1^{0.5}$. [11].

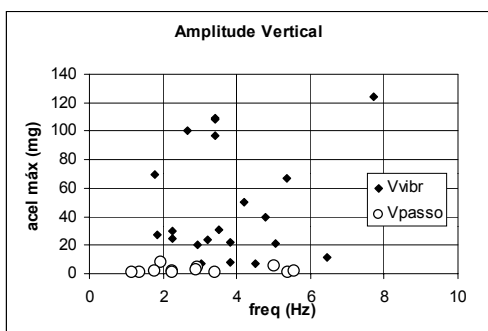


Figura 9: Amplitudes máximas registadas na vertical em função da frequência para os ensaios de uma pessoa a passar e de vibração forçada.

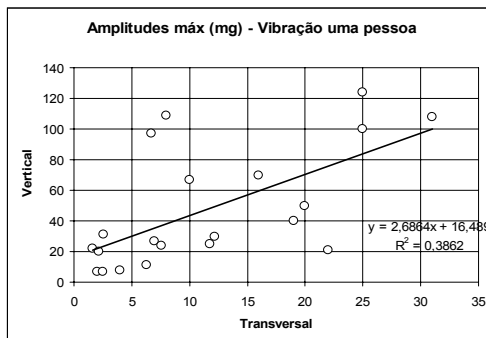


Figura 10: Amplitudes máximas na vertical e horizontal para o caso da vibração forçada.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Sobre Edifícios

O método expedito utilizado apresenta grandes vantagens para se conseguir uma caracterização rápida das frequências das estruturas mais simples, podendo obter-se com precisão as correspondentes aos modos mais baixos. Contudo, para estruturas mais complexas o método mostra as principais frequências mas poderá ser incapaz de identificar com segurança os modos a que dizem respeito.

Sempre que se pretenda fazer um estudo dinâmico de uma estrutura existente, este método pode ser extremamente vantajoso para se poder avançar com maiores certezas sobre o modelo desenvolvido. A determinação das frequências pode corrigir algo sobre o modelo, como seja módulo de elasticidade, condições de ligação, etc.

A constituição de uma base-de-dados com a informação sobre as frequências dos principais modos tem-se mostrado do maior interesse para o conhecimento das frequências de diversos tipos estruturais, tendo o incremento do número de casos permitido uma maior confiança nas regressões efectuadas. A dispersão nos dados obtidos continua a ser um dos aspectos mais difíceis de reduzir. Ela deve-se a várias circunstâncias ligadas à estrutura, a elementos não estruturais e ao tipo de solo de fundação. Só procedendo a uma selecção de edifícios muito mais fina, ou entrando com outros parâmetros, é possível reduzir essa dispersão.

Ficou também explícita a influência das paredes de enchimentos em modernos edifícios de betão armado, e a amplitude do movimento de “input”.

Os valores da lei $T=aN$ apresentados nos vários quadros são diferentes dos que se encontram na literatura internacional, aproximando-se mais dos propostos por diferentes investigadores na Europa ou América Latina, mostrando claras variações nos tipos construtivos, materiais utilizados e cargas preconizadas.

6.2 Sobre Pontes e Viadutos

Foi possível estabelecer correlações directas entre as frequências na vertical e o vão das pontes, com bom grau de significância. Esse grau de correlação decresce quando se analisam as frequências na direcção transversal, e mais ainda na direcção longitudinal. Tal efeito deve-se ao facto do parâmetro fundamental ser o vão, sendo a frequência na vertical mais independente das condições de apoio que as frequências na transversal, e mais ainda na longitudinal.

As diferenças entre as frequências de cálculo (nos poucos casos em que estas existem) e as medidas são relativamente pequenas (15 a 20%). As medições efectuadas garantem que os resultados obtidos são válidos para o caso das grandes amplitudes do movimento, o que não coloca restrições sobre a influência do comportamento não linear.

6.3 Sobre Passagens de Peões

Mostrou-se que as primeiras frequências modais podem ser efectivamente extraídas a partir dos registos obtidos em ensaios expeditos de ruído ambiente ou forçado com uma estação.

Com base num conjunto vasto de informação é possível estabelecer diversas correlações entre as frequências medidas e parâmetros da geometria da estrutura. Os resultados são ainda essenciais para calibrar modelos numéricos de elementos finitos, ou outros mais simplificados.

Esta é uma das potencialidades e/ou utilidades da prática destas técnicas, associadas a este tipo de ensaios. A informação recolhida, também pode ser utilizada posteriormente para avaliar as condições do comportamento da obra no futuro.

Foi possível averiguar também alguns níveis de amplitude para as situações padrão referidas atrás, reconhecendo-se que em determinadas situações de proximidade de ressonância é fácil atingir amplitudes muito elevadas. Os amortecimentos medidos, mesmo para grandes amplitudes, são reduzidos, da ordem de 0.1 a 0.5% do crítico, o que facilita estas amplificações excessivas. Amplitudes máximas medidas para diversas situações de ensaio mostram para as estruturas metálicas valores muito elevados quando comparados com os recomendados pelas poucas normas existentes, indicando a necessidade de uma revisão criteriosa desta matéria.

A regulamentação existente fica-se pela AASHTO [11], que estabelece limites nas frequências, e pelas Regulamentações Europeias, EN 1990 [12], que estabelecem uma carga (k) devido aos peões de 5 kN/m^2 . Noutros casos a carga máxima está dependente da própria frequência fundamental (f), para reduzir o efeito de ressonância, $k=4/(1+1.5f^2) \text{ kN/m}^2$ [13].

Não se conhecem estudos dinâmicos analíticos sobre esta temática, à excepção de um ou dois casos. Por isso não é possível prever a razoabilidade desses modelos e sua capacidade para reproduzir as frequências medidas. Também se indicia que não existe qualquer avaliação da segurança para as acções sísmicas, antecipando-se sobre esta matéria que a situação das estruturas em betão seja mais gravosa que nas metálicas, devido às massas mais elevadas em jogo, às “deficientes” condições de apoio, muitas delas simplesmente apoiadas, e para mais com frequências em gamas onde o sismo concentra energia. Daí a necessidade de uma urgente análise desta temática.

Este é um primeiro trabalho onde se caracterizam as frequências e vibrações produzidas em passagem de peões. Aplicações aos casos da limitação de frequências para evitar amplitudes excessivas quer na vertical quer na horizontal, devido à passagem dos peões nos seus ritmos e quantidades mais diversas, por acção dos sismos e até por vibrações transmitidas às fundações pelo tráfego que circula por baixo, são outras questões de grande importância para esta matéria.

Relativamente à matéria dos níveis de vibração, e com o intuito de uma redução significativa das amplitudes que possam surgir em dias de grande afluxo pedonal, a instalação de sistemas de absorção de energia (amortecedores viscosos, “Tuned damper”) permitem aumentar o amortecimento da ordem dos 0.5% para 8%, diminuindo claramente a resposta junto da ressonância dessas passagens de peões [14].

7 AGRADECIMENTOS

Agradecem-se a todas as organizações que permitiram acesso às estruturas ensaiadas, bem como a disponibilização de elementos descritivos.

8 REFERÊNCIAS

- [1] Oliveira, C. S.; “Frequências Próprias de Estruturas com base em Medições Expeditas *in-situ*”, 3º ENSES, IST, Lisboa, 1997.
- [2] LNEC; Relatórios Diversos sobre Medição de Frequências em Pontes e Viadutos, Lisboa. 1996.

- [3] ICIST; Relatórios Diversos sobre Medição de Frequências em Pontes e Viadutos, Lisboa. 2003.
- [4] Baptista M. A., Mendes, P., Afilhado A., Campos-Costa A., Afilhado, A., Silva, P., Oliveira C. S.; “Análise Experimental para obtenção das Características Dinâmicas do Edifício da Portugal Telecom no Parque das Nações”, Sísmica 2004, Guimarães, 2004.
- [5] Rodrigues, J.; Campos-Costa A.; “Modal Analysis from Ambient Vibration Survey of Bridges: LNEC experience”, IMAC XVII, Kissimmee, Florida, USA, Feb, 1999.
- [6] Vinagre dos Santos, J.; “Análise Dinâmica de Pontes para Peões”, Tese Mestrado, IST, 1989.
- [7] Oliveira, C. S.; Carvalho, E. C.; “Caracterização Dinâmica de Edifícios por Meio de Medições sobre Protótipos”, Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, LNEC, Lisboa, 1982.
- [8] Navarro, M., Oliveira, C. S. “Evaluación de las Características de Estructuras de Edificios de Hormigon Armado en la Ciudad de Lisboa”, 4ALEGG, Figueira da Foz, 2004.
- [9] Baptista, A., Oliveira C. S.; “Análise Pseudo-Linear de um Pórtico de Betão Armado com e sem Alvenaria sujeito à Acção Sísmica”, 3º Congreso AEIS, Málaga, 2003.
- [10] Costa, A. G., Oliveira, C. S.; “Caracterização Dinâmica de Pontes Metálicas através de Ensaio Expeditos”, 1º Congresso da Construção Metálica e Mista, Porto, 1997.
- [11] AASHTO’s Pedestrian Bridge Guide.
- [12] “EN 1990 – Eurocode: Basis of Structural Design”, Doc. N526, CEN/TC 250, 2002.
- [13] Kazakevitch, et al.; “Influence of Pedestrian load on Dynamics of Bridges”, Footbridge, Paris. 2002.
- [14] Moutinho, C., Cunha, A.; “Controlo de Vibrações em Pontes de Peões através de Amortecedores de Massas Sintonizadas (TMDs)”, JPÉE98, LNEC, 1998.