# ESTUDOS DINÂMICOS DA PONTE DE JINDO

### Caetano, Elsa Sá<sup>1</sup>; Cunha, Álvaro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Prof. Auxiliar, <sup>2</sup>Prof. Associado Agregado Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



#### **RESUMO**

Os fenómenos de interacção dinâmica entre tirantes, tabuleiro e torres de uma ponte atirantada são analisados através do estudo de um modelo físico, sendo realizado sobre este um conjunto de ensaios baseados em técnicas convencionais de Análise Modal, recorrendo à excitação produzida por um excitador electrodinâmico e por uma mesa sísmica. A comparação dos resultados experimentais com resultados obtidos através de modelações por elementos finitos e a realização de simulações numéricas adicionais mostram que, embora para excitações moderadas o comportamento dinâmico dos tirantes introduza um efeito de amortecimento da resposta, elevados níveis de oscilação dos tirantes podem originar uma amplificação da resposta dinâmica global significativa.

### 1- INTRODUÇÃO

As pontes atirantadas são sistemas complexos, caracterizados em geral por uma elevada flexibilidade baixos е amortecimentos. Estas características conferem-lhes uma grande vulnerabilidade a acções dinâmicas, também estas de caracterização complexa, o que se reflecte na observação frequente de vibrações excessivas neste tipo de estruturas. envolvendo várias componentes as estruturais e, inclusivamente, em alguns casos, em danos nas ancoragens, ou na rotura dos tirantes por fadiga.

Um aspecto importante das pontes atirantadas consiste na desproporção entre as características de rigidez e massa do subsistema constituído pelas torres e tabuleiro face às correspondentes propriedades dos tirantes, podendo dizer-se que aqueles elementos formam um sistema primário que interage com um sistema secundário, formado pelos tirantes. Do ponto de vista do comportamento dinâmico, as frequências naturais e modos de vibração associados ao sistema primário são dominantes, razão pela qual é usual desprezar o comportamento dinâmico dos tirantes no estudo dinâmico global das pontes atirantadas, contabilizando-se todavia a sua rigidez local. É importante contudo realçar o facto de que as frequências naturais dos tirantes são frequentemente próximas, múltiplas ou submúltiplas das frequências naturais do tabuleiro e torres, o que pode levar a fenómenos de interacção importantes.

Tendo em vista a demonstração e melhor compreensão destes fenómenos, foram efectuados estudos sobre o modelo físico de uma ponte já existente, a Ponte de Jindo, construída na Coreia do Sul (1983) (Figura 1). Este modelo foi desenvolvido inicialmente por Garevski (1990) e modificado posteriormente [Caetano e Cunha (1995)], com vista à realização dos estudos aqui descritos [Caetano (2000)]. Os objectivos dos estudos realizados consistiram em: (i) caracterizar a forma de interacção tirantes-tabuleiro-torres do ponto de vista do comportamento dinâmico da estrutura; (ii) analisar a influência do comportamento dinâmico dos tirantes no comportamento global da estrutura, identificando situações potencialmente gravosas para a ponte.



Fig. 1- Vista geral da Ponte de Jindo (Coreia do Sul, 1983)

## 2- MODELO FÍSICO

O modelo físico utilizado, representado na Figura 2, é um modelo distorcido construído à escala 1:150, tendo um comprimento total de 3,222m. Este modelo foi construído na Universidade de Bristol, utilizando uma liga de alumínio na composição dos elementos estruturais, e efectuando a compensação de massa através de placas de aço ligadas pontualmente ao tabuleiro e torres através de parafusos.

Na versão original, este modelo reproduzia adequadamente as condições de semelhança no que respeita às características de rigidez à flexão do tabuleiro e torres e de rigidez axial dos tirantes. No entanto, a compensação das massas ao nível dos tirantes não era contemplada.

No sentido de resolver este problema, foi efectuado um redimensionamento dos tirantes e introduziram-se massas adicionais, de modo a simular tanto quanto possível uma distribuição uniforme ao longo do seu comprimento. Assim, os tirantes foram simulados com cordas de piano de diâmetro variável entre 0,23mm e 0,66mm. A compensação de massa foi realizada utilizando artefactos de pesca, nomeadamente esferas ranhuradas constituídas por uma liga de zinco, montadas nos tirantes de menor secção transversal por aperto, e esferas em chumbo coladas aos tirantes de maior secção transversal.



Fig. 2- Modelo físico da Ponte de Jindo



Fig. 3- Montagem das massas e tensionamento dos tirantes no modelo físico



Fig. 4- Pormenor relativo à fixação das massas nos tirantes junto da ancoragem na torre

As Figuras 3 e 4 mostram pormenores relativos à montagem das massas e à sua fixação aos tirantes. Um aspecto importante deste modelo físico reside no controle das tensões instaladas nos tirantes. Este controle foi efectuado de forma iterativa, recorrendo à lei das cordas vibrantes, que permite relacionar a força axial no tirante com as correspondentes frequências de vibração. Então, utilizando um sensor magnético (Figura 5) e uma analisador de Fourier, e introduzindo manualmente uma vibração em cada tirante, mediram-se as frequências de vibração, estimou-se a correspondente força instalada, e procedeu-se de forma iterativa ao aperto dos parafusos da ancoragem no tabuleiro, até obter erros inferiores a 5% relativamente aos valores de projecto das forças instaladas, devidamente escaladas.



Fig. 5- Medição das frequências de vibração de um tirante com sensor magnético

### **3- MODELO FÍSICO MODIFICADO**

De modo a isolar os efeitos da interacção dinâmica tirante-estrutura, foi estudado também um modelo físico modificado a partir do modelo acima descrito, mas em que a massa distribuída associada a cada tirante foi concentrada nas suas extremidades. Desta forma, o comportamento dinâmico dos tirantes não foi simulado, mas apenas a sua rigidez axial, procedimento semelhante ao usualmente adoptado na modelação numérica de pontes atirantadas, em que cada tirante é idealizado através de um elemento de barra axial.

As Figuras 6 e 7 mostram a montagem utilizada, em que as massas nas ancoragens são simuladas por magnetos.



Fig. 6- Modelo físico modificado, concentração da massa dos tirantes nas ancoragens



Fig. 7- Substituição da massa distribuída dos tirantes por magnetos colocados junto das ancoragens, pormenor do tabuleiro

## 4- MODELAÇÃO NUMÉRICA

O estudo realizado envolveu uma componente numérica, que consistiu na construção de diversos modelos numéricos, e tridimensionais, que bidimensionais comportamento não 0 incluiram ou dinâmico local dos tirantes, através da consideração ou não da correspondente massa distribuída. Estes modelos basearam--se na discretização do tabuleiro e torres em elementos finitos de viga, enquanto que os tirantes foram discretizados em elementos finitos de barra axial. À semelhança do estudo experimental. desenvolveram-se modelos em que o comportamento dinâmico dos tirantes foi contemplado, através da idealização de cada tirante como uma série de 12 elementos finitos de barra e da introdução de massas concentradas equivalentes à massa distribuída escalada do tirante. aplicadas nos nós desses elementos, e desenvolveram-se modelos em que tal comportamento não foi incluído, tendo os tirantes sido idealizados como simples elementos de barra axial, do que resultou a concentração da correspondente massa escalada nas ancoragens. Os primeiros modelos foram designados, de acordo com Abdel-Ghaffar e Khalifa (1991) como MECS ("Multi-Element-Cable-System"), enquanto que os últimos foram designados OECS ("One-Element-Cablecomo System"). Representa-se na Figura 8 a malha de elementos finitos MECS utilizada na modelação tridimensional da ponte.



Fig. 8- Modelo de elementos finitos tridimensional da Ponte de Jindo

Utilizando uma formulação não-linear geométrica, determinaram-se então para os dois conjuntos de modelos MECS e OECS as matrizes de rigidez tangentes correspondentes à actuação das cargas permanentes. Estas matrizes foram utilizadas na determinação de frequências naturais e modos de vibração com base numa análise modal convencional. As Figuras 9 a 11 e a Tabela I sintetizam alguns dos principais resultados obtidos, que se passam a enunciar: A consideração do comportamento dinâmico dos tirantes (modelo MECS) leva ao aparecimento de um número muito elevado de novos modos de vibração. Embora muitos desses modos sejam modos de vibração locais, envolvendo essencialmente o movimento dos tirantes, é possível observar que na vizinhança de cada frequência natural do sistema primário surgem novas frequências naturais, muito próximas, que estão associadas a modos de vibração que envolvem o movimento conjunto do tabuleiro, torres e tirantes;



Fig. 9- Frequência natural vs ordem do modo, modelos OECS e MECS

configuração modal dos modos A próximos, que se apresentam por patamares na representação ordem vs frequência natural da Figura 9, é semelhante no que respeita ao tabuleiro e torres. Estão contudo envolvidos diferentes tirantes, sendo o seu grau de interacção variável. De modo a obter uma quantificação do grau de participação dos tirantes na configuração modal, determinou-se o cociente entre o máximo deslocamento modal dos tirantes e do sistema tabuleiro-torres na direcção preferencial do modo de vibração (Zvibração no plano vertical; Y- vibração na direcção transversal). Este cociente deverá ser baixo quando a interacção dinâmica é considerável, situação em que os deslocamentos dos tirantes e do tabuleiro-torres são da mesma ordem de grandeza. Quando a interacção dinâmica é reduzida, o movimento dos tirantes é

dominante (modos locais), e o referido cociente é muito elevado. A Tabela I resume os valores das frequências naturais as características encontradas. das correspondentes configurações modais (SYM- modo simétrico; ASM- modo anti-simétrico) e grau de interacção dinâmico para os primeiros grupos de modos de vibração. Representam-se ainda na Figura 10 dois modos de vibração (MECS) com frequências próximas e configuração correspondente ao primeiro modo de vibração (OECS) Figura, anti-simétrico. Nesta as configurações modais do tabuleiro--torres e dos tirantes são representadas separadamente, a fim de evidenciar a semelhança das configurações modais correspondentes ao sub-sistema primário;

MODO 21 FREQ.=8.42Hz

**MODO 27** FREQ.=9.04Hz

Fig. 10- Representação separada das configurações modais do tabuleiro/torres e dos tirantes para dois modos de vibração de frequências naturais próximas

| Tabela I- Resumo das frequências naturais, características dos modos de vibração e gra | u de |
|--|------|
| interacção dinâmica para os primeiros modos de vibração, modelo OECS vs MECS           |      |

| Ordem do<br>modo | Frequência<br>natural<br>MECS<br>(Hz) | Frequência<br>natural<br>OECS<br>(Hz) | Cociente entre<br>factores de<br>participação<br>(Z/Y) | Cociente<br>deslocamento<br>máx. modal<br>tirante/estrutura<br>(Z) | Cociente<br>deslocamento<br>máx. modal<br>tirante/estrutura<br>(Y) | Tipo de modo               |
|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|--|----------------------------|
| 1                | 4.26                                  | 1.28                                  | <1   | 532.1  | 1.1  | l <sup>°</sup> transv. SYM |
| 2                | 4.20                                  | 6.21                                  | >1   | 1.0  | 1066.4   | l <sup>°</sup> vert. SYM   |
| 2                | 6.04                                  | 6.21                                  | >1   | 6.1  | 205509.8   | 1 <sup>°</sup> vert. SYM   |
| 4                | 6.04                                  | 6.21                                  | >1   | 5.8  | 1845228.0  | 1 <sup>°</sup> vert. SYM   |
|                  | 7 15                                  | 11 71                                 | <1   | 77919.0  | 3.3  | 1 <sup>°</sup> transv. ASM |
| 10               | 7.15                                  | 4.78                                  | <1   | 83074.8  | 16.2   | 1° transv. SYM             |
| 10               | 7.10                                  | 9.12                                  | >1   | 8.4  | 148279.8   | 1 vert. ASM                |
| 12               | 7.93                                  | 9.12                                  | >1   | 8.0  | 2257478.0  | 1°vert. ASM                |
| 15               | 9.11                                  | 11 71                                 | <1   | 76110.7  | 8.3  | 1° transv. ASM             |
| 17               | 8 11                                  | 11.71                                 | <1   | 77946.7  | 19.9   | 1°transv. ASM              |
| 10               | 8.11                                  | 0.12                                  | >1   | 3.8  | 114344.9   | 1º vert. ASM               |
| 20               | 0. <del>4</del> 2<br>9.42             | 9.12                                  | >1   | 3.7  | 3830175.0  | 1º vert. ASM               |
| 21               | 8.61                                  | 11 71                                 | <1   | 69048.1  | 3.2  | 1° transv. ASM             |
| 25               | 8.61                                  | 11.71                                 | <1   | 65279.4  | 17.3   | 1 <sup>°</sup> transv. ASM |
| 20               | 0.01                                  | 0 12                                  | >1   | 1.6  | 2673.4   | 1° vert. ASM               |
| 27               | 9.04                                  | 9.12                                  | >1   | 7.3  | 77529.4  | 1° vert. ASM               |
| 29               | 9.05                                  | 9.12                                  | >1   | 7.3  | 9995453.0  | 1° vert. ASM               |
| 30               | 9.05                                  | 11 71                                 | <1   | 42457.2  | 28.6   | 1 <sup>°</sup> transv. ASM |
| 30               | 9.79                                  | 11.71                                 | <1   | 60449.4  | 30.4   | 1 <sup>°</sup> transv. ASM |
| 39               | 9.79                                  | 11.71                                 | <1   | 51944.1  | 19.4   | 1 <sup>°</sup> transv. ASM |
| 41               | 0.00                                  | 11.71                                 | <1   | 35404.6  | 11.7   | 1° transv. ASM             |
| 42               | 11 36                                 | 13.74                                 | >1   | 5.8  | 1065667.0  | 2° vert. SYM               |
| 40               | 11.30                                 | 13.74                                 | >1   | 6.4  | 118704.9   | 2° vert. SYM               |
| 47               | 11.30                                 | 13.74                                 | >1   | 37.2   | 29824.1  | 2° vert. SYM               |
| 40               | 11.43                                 | 13.74                                 | >1   | 35.2   | 17452.5  | 1° vert. ASM               |
| 49               | 11.47                                 | 11.71                                 | <1   | 6395.6   | 7.8  | l <sup>*</sup> transv. ASM |
| 50               | 11.40                                 | 11.71                                 | <1   | 5927 5   | 24.9   | 1 <sup>°</sup> transv. ASM |
| 51               | 11.49                                 | 11.71                                 | <1   | 696.4  | 11.3   | 1 <sup>°</sup> transv. ASM |
| 52               | 12.00                                 | 13.74                                 | >1   | 12.4   | 248350.0   | 2 <sup>°</sup> vert. SYM   |
| 55               | 12.00                                 | 11.71                                 | <1   | 12735 4  | 26.4   | 1° transv. ASM             |
| 57               | 12.13                                 | 11.71                                 | <1   | 14815.6  | 17.7   | 1° transv. ASM             |
| 59               | 12.14                                 | 11.71                                 | <1   | 5180 5   | 23.4   | 1º transv. ASM             |
| 00               | 12.10                                 | 12.74                                 | >1   | 6.4  | 8786.0   | 2° vert. SYM               |
| 61               | 13.33                                 | 13.74                                 | >1   | 18.6   | 795354.8   | 2 <sup>°</sup> vert. SYM   |
| 63               | 13.75                                 | 13.74                                 | >1   | 35.3   | 42291.0  | 2° vert. SYM               |
| 69               | 13.91                                 | 12.74                                 | >1   | 12.3   | 19593.1  | 2° vert. SYM               |



Fig. 11- Factores de participação modal na direcção longitudinal (X), transversal (Y) e vertical (Z), modelos OECS vs MECS

A Figura 11 apresenta ainda uma factores comparação entre OS de participação modal obtidos com base nos dois modelos tridimensionais OECS e MECS. Embora seja evidente a contribuição dominante do primeiro modo de vibração simétrico para vibração no plano vertical e na direcção transversal, resulta também evidente que a introdução do comportamento tirantes leva dinâmico dos ao aparecimento de diversos modos com participação factores de não desprezáveis. Tal facto permite concluir que uma modificação importante da resposta sísmica pode ocorrer ao incluir

o comportamento dinâmico dos tirantes, a qual deverá, portanto, ser estudada.

#### 5- ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL

O primeiro objectivo dos ensaios modais realizados sobre o modelo físico foi o de obter uma confirmação experimental relativa ao padrão de comportamento identificado por via numérica.

então análise Procedeu-se a uma exaustiva do modelo físico, nas duas configurações acima descritas. Como fonte de excitação, utilizaram-se um excitador electrodinâmico e mesas sísmicas. Através destes equipamentos foram aplicadas ao modelo excitações ou acelerações de base sinusoidais em varrimento, respectivamente, permitindo assim a construção de funções de resposta em frequência (FRFs) através da relação entre a resposta medida ao longo do tabuleiro, torres e alguns tirantes, em termos de acelerações e deslocamentos, e a força aplicada (excitador electrodinâmico) numa dada direcção e ponto, ou a aceleração medida na base (mesa sísmica).



Fig. 12- Utilização de excitador electrodinâmico e sensor de força na medição de FRFs



Fig. 13- Medição da resposta através de um acelerómetro piezoeléctrico



Fig. 14- Montagem do modelo físico 2 na mesa sísmica



Fig. 15- Montagem tridimensional de acelerómetros na viga de suporte do modelo

As Figuras 12, 13 e 14 mostram, das montagens respectivamente, uma utilizadas na excitação do modelo com o vibrador electrodinâmico, a medição da resposta através de um acelerómetro piezoeléctrico e a montagem do modelo físico modificado (aqui designado por modelo 2, por oposição ao modelo 1, com massas nos tirantes) na mesa sísmica, com medição da aceleração de base através de 3 acelerómetros de elevada precisão ligados directamente à viga de suporte do modelo físico (Figura 15).

O padrão acima referido, traduzido pelo aparecimento de um elevado número de modos de vibração com frequências muito próximas em resultado da introdução das massa distribuída dos tirantes, foi encontrado para o modelo físico 1, podendo ser observado através das Figuras 16 e 17, nas quais se representam FRFs obtidas com excitador electrodinâmico e com a mesa sísmica.

Este facto dificultou aliás a identificação das configurações modais com base no ajuste das FRFs, tendo exigido a obtenção de estimativas de FRFs com elevadas resoluções espectrais.



Fig. 16- Amplitude da FRF obtida relacionando a aceleração vertical a 1/3 vão com a força aplicada verticalmente no outro 1/3 vão





Para evitar as dificuldades decorrentes da elevada interferência modal na identificação dos modos de vibração, optou-se então por identificar apenas frequências naturais e factores de amortecimento modais por extraindo-se das FRFs. ajuste componentes modais posteriormente as através de ensaios de vibração sinusoidais. Nestes ensaios introduziu-se na estrutura para cada sinusoidal vibração uma frequência de interesse e mediu-se a correspondente resposta ao longo do tabuleiro e torres. A Figura 18 mostra as configurações modais do tabuleiro e torres para dois dos modos identificados. A semelhança das configurações modais para diferentes frequências naturais observada modelação anteriormente através da numérica, é também evidente nos estudos experimentais realizados. Além disso, o acompanhamento visual das oscilações dos tirantes permitiu concluir que diferentes níveis de vibração em diferentes tirantes estão envolvidos na oscilação em cada frequência natural.





Por fim, apresenta-se uma comparação entre FRFs obtidas nas mesmas condições de ensaio para os modelos físicos 1 e 2. O efeito da interacção dinâmica tirantes--estrutura está patente na composição espectral das duas FRFs representadas na Figura 19, as quais relacionam a aceleração transversal no topo de uma das torres com a aceleração transversal de base associada aos modelos físicos 1 e 2. A consideração da massa dos tirantes (modelo 1) traduz-se, efectivamente, no aparecimento de um número elevado de modos de vibração de frequências muito próximas, enquanto que a não consideração da massa (modelo 2) se traduz pelo aparecimento de um único modo de vibração na mesma gama de frequências analisada.





## 6- RESPOSTA À ACÇÃO SÍSMICA

De forma a avaliar os efeitos da tirante-tabuleiro-torres interacção na resposta a acções dinâmicas, realizaram-se ensaios sobre a mesa sísmica, através dos quais foi aplicado ao modelo físico um acelerogramas conjunto de gerados artificialmente. Diversos tipos de registos foram gerados e devidamente escalados, tendo-se aplicado aos dois modelos físicos combinações de acelerogramas nas direcções longitudinal (X), transversal (Y) e vertical (Z). A resposta foi medida ao longo do tabuleiro, torres e alguns tirantes em termos de acelerações e deslocamentos. A Figura 20 mostra alguns exemplos dos registos colhidos, considerando neste caso uma aceleração de base na direcção Y, com valor de pico de 0,11g.



Fig. 20- Exemplo de registos medidos considerando uma excitação na direcção Y: (a) Aceleração da base;
(b) Aceleração transversal a ½ vão; (c) Deslocamento vertical do tabuleiro junto à ancoragem do maior tirante; (d) Aceleração transversal do maior tirante do vão lateral (Torre Sul) a 1/3 vão

Tendo por base os registos de aceleração obtidos na base da plataforma sísmica, e utilizando uma integração directa pelo método de Newmark e uma formulação não-linear geométrica, calculou-se a resposta associada aos dois modelos OECS e MECS para as várias combinações de acelerogramas utilizadas. Em todos os cálculos utilizou-se uma matriz de amortecimento de Rayleigh, proporcional à matriz de massa, e cuja constante foi ajustada com base no valor do coeficiente de amortecimento médio ξ identificado para o primeiro modo de vibração no plano da estrutura (frequência=6,2 Hz,  $\xi = 1,5\%$ ). A Figura 21 mostra a comparação entre os deslocamentos verticais junto da ancoragem do maior tirante, medidos e calculados com base no modelo tridimensional MECS para uma combinação de acelerogramas nas direcções X e Z. A comparação entre resultados numéricos e experimentais é boa em termos gerais, podendo contudo detectar-se algumas discrepâncias ao longo dos registos, as quais se julgam associadas, em larga medida, a limitações do modelo de amortecimento utilizado. No que respeita à comparação entre as respostas calculadas numericamente com base nos modelos OECS e MECS, apresenta-se na Figura 22 um gráfico ilustrando a evolução das envolventes de aceleração vertical calculadas ao longo do tabuleiro. As Figuras 21 e 22 ilustram, em termos gerais, os principais resultados obtidos, que se passam a sintetizar nos seguintes pontos:

- A resposta estrutural é fortemente dominada pelos dois modos fundamentais transversal e vertical, não existindo, para as correspondentes frequências naturais, uma interferência modal com os modos de vibração dos tirantes, já que estas são inferiores às do últimos: 1ª frequência de flexão transversal: 3,95Hz; 1ª frequência de flexão vertical: 6,2Hz; 1ªs frequências dos tirantes: 6,8Hz-17,9Hz;
  - Por esta razão, embora tenham sido observados níveis de oscilação elevados para os tirantes cuja frequência natural fundamental é próxima de alguma frequência global, a diferença entre as respostas sísmicas calculadas considerando

ou não a distribuição de massa nos tirantes não é considerável;

A vibração dos tirantes parece, no entanto, levar a uma redução da resposta, tendo portanto o efeito de introduzir um amortecimento adicional no sistema. Note-se além disso que, pelo facto de a progressão das vibrações nos tirantes se efectuar com algum atraso em relação ao início das vibrações no tabuleiro e torres, o seu efeito em termos da redução dos valores máximos da resposta no caso da excitação sísmica é limitado;



**Fig. 21-** Deslocamentos verticais do tabuleiro junto da ancoragem do maior tirante associados a uma combinação de acelerogramas nas direcções X e Z: numérico MECS *vs* experimental



Fig. 22- Envolvente das acelerações verticais ao longo do tabuleiro associadas a uma combinação de acelerogramas nas direcções X e Z: numérico MECS vs numérico OECS

## 7- SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Pretendendo-se extrapolar os resultados obtidos através do estudo do modelo físico da Ponte de Jindo para as pontes atirantadas em geral, efectuou-se ainda um conjunto de simulações numéricas, procurando enquadrar os efeitos da interacção dinâmica tirantes-tabuleiro-torres em função das características estruturais e das acções.

A primeira simulação efectuada consistiu no estudo de um modelo com as características geométricas do modelo físico da Ponte de Jindo, mas com características mecânicas modificadas, de modo a provocar interacção dinâmica ao nível de modos de vibração fundamentais da ponte. Isto foi conseguido simplesmente através da modificação dos módulos de elasticidade associados ao tabuleiro e torres, e aos tirantes, tendo a frequência fundamental no plano vertical aumentado de 6,2Hz para 9,0Hz, enquanto que as primeiras frequências naturais dos tirantes que, no modelo inicial situavam na gama 6,8Hz-18,9Hz, se passaram a situar-se no intervalo 7,7Hz-23,7Hz.



Fig. 23- Envolvente das acelerações verticais ao longo do tabuleiro associadas a uma combinação de acelerogramas nas direcções X e Z: numérico MECS vs numérico OECS.

Calculando a resposta relativa aos acelerogramas anteriormente gerados com base nos dois novos modelos OECS e MECS, pode observar-se que a interacção dinâmica com os tirantes leva agora a um franco decréscimo da resposta, conforme evidenciado na Figura 23, na qual se representam as envolventes das acelerações verticais registadas ao longo do tabuleiro com base nos modelos OECS e MECS. Note-se que este efeito é igualmente observado nas representações das envolventes dos deslocamentos e momentos flectores (Figura 24).





A segunda simulação efectuada consistiu na aplicação ao modelo físico original de uma excitação de banda estreita e elevada intensidade, definida numa banda de frecontendo quências simultaneamente uma frequência natural global da ponte e as primeiras frequências naturais de alguns tirantes, ou seja, numa banda de frequências onde podem ocorrer fenómenos de interacção tirante-estrutura. Contrariamente ao estudo anterior, verificou-se neste caso que vibrações de elevada amplitude são induzidas nos tirantes, os quais por sua vez induzem modos globais de vibração de frequência dupla. A oscilação da ancoragem com uma frequência dupla da frequência natural do tirante leva por sua vez a fenómenos de excitação paramétrica ou, no mínimo, a uma amplificação das oscilações dos tirantes, os quais por sua vez aplicam forças de maior intensidade ao tabuleiro e torres, motivando também a amplificação da resposta correspondente. Logo, pode afir-mar-se que as oscilações dos tirantes são nesta situação desfavoráveis para o compor-tamento global da ponte. A Figura 25 mos-tra as envolventes das acelerações calcula-das ao longo do tabuleiro com base nos mo-delos OECS e MECS, podendo observar-se o fenómeno de indução de frequências ele-vadas na resposta na Figura 26, na qual se representam as séries temporais e corres-pondentes espectros de Fourier da compo-nente vertical de aceleração a 1/3 vão, correspondente aos modelos OECS e MECS.



Fig. 25- Envolvente das acelerações verticais ao longo do tabuleiro associadas a uma combinação de acelerogramas nas direcções X e Z: numérico MECS vs numérico OECS. Aplicação de excitação severa ao modelo original



Fig. 26 - Série temporal da componente vertical de aceleração calculada a 1/3 vão, modelo OECS vs MECS. Amplitude do correspondente espectro de Fourier

## **8- CONCLUSÕES**

As características da interacção dinâmica entre tirantes, tabuleiro e torres foram identificadas com base num estudo experimental e numérico do modelo físico de uma ponte atirantada. Utilizando como excitação a acção sísmica, demonstrou-se que, para uma intensidade moderada, a interacção dinâmica pode traduzir-se no tirante-estrutura global, da resposta amortecimento fenómeno tanto mais acentuado quanto maior seja o grau de interacção dinâmico nos modos de vibração cuja contribuição é dominante para a resposta estrutural. Verificou-se contudo que excitações de elevada intensidade, definidas em bandas de frequência em torno de uma frequência global, podem originar fenómenos de ressonância potencialmente gravosos em termos da resposta dinâmica da ponte. Refira-se que este agravamento da resposta se deve efectivamente a fenómenos não-lineares associados à vibração dos tirantes e, como tal, a maneira mais eficiente de os controlar reside no controle das vibrações destes elementos, através da utilização de dispositivos de amortecimento adequados.

## REFERÊNCIAS

- Abdel-Ghaffar, A. M. & Khalifa, M. A., Importance of Cable Vibration in Dynamics of Cable-Stayed Bridges, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 117, No. 11: 2571-2589, ASCE, 1991.
- Caetano, E., Dynamics of Cable-Stayed Bridges: Experimental Assessment of Cable-Structure Interaction, Tese de Doutoramento FEUP, Univ. Porto, 2000
- Caetano, E. & Cunha, A., An Investigation Into the Cable Dynamics on Cable-Stayed Bridges. Relatório de Investigação, Earthquake Engineering Research Centre, Univ. Bristol, 1995
- Garevski, M. A., Dynamic Analysis of Cable-Stayed Bridges by Means of Analytical and Physical Modelling. Tese de Doutoramento, Univ. Bristol, Reino Unido, 1990

### AGRADECIMENTOS

Os estudos experimentais sobre o modelo físico da Ponte de Jindo foram realizados na Universidade de Bristol, Reino Unido, e no ISMES, Itália, no âmbito do Programa ECOEST, agradecendo-se aos Professores Roy Severn, Colin Taylor e Franchioni a criação das condições materiais para a utilização das mesas sísmicas. Os autores agradecem ainda a colaboração do estudante de Mestrado da Universidade de Bristol Barnaby Wainwright, pelo apoio prestado na realização dos ensaios no ISMES.

