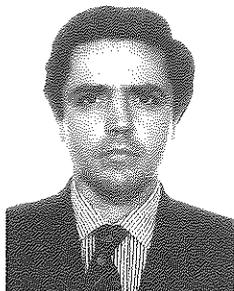


ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DA ESTRUTURA DE AMPLIAÇÃO DO AEROPORTO DA ILHA DA MADEIRA



Jorge RODRIGUES
Assistente de Investigação
Departamento de Estruturas
LNEC



A. CAMPOS COSTA
Investigador Principal
Departamento de Estruturas
LNEC

SUMÁRIO

Nesta comunicação descrevem-se e apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização dinâmica da estrutura de ampliação do aeroporto de Sta. Catarina na ilha da Madeira. Estes ensaios integraram-se nos ensaios de recepção efectuados pelo LNEC após a conclusão das obras de construção da estrutura, antes do início da sua utilização para o tráfego de aviões. Os ensaios dinâmicos consistiram na medição de acelerações na estrutura induzidas pelo tráfego de camiões carregados, e pela libertação repentina de um peso de 608 kN suspenso a meio vão de dois dos painéis de laje da estrutura. Descrevem-se os equipamentos e as técnicas adoptadas nos ensaios, bem como os métodos utilizados na análise dos registos obtidos.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de aumentar o comprimento da pista do aeroporto da ilha da Madeira, e as condições geográficas da ilha, conduziram à decisão de manter o aeroporto em Santa Catarina, efectuando-se a ampliação da pista através da construção duma estrutura em ponte. Esta estrutura de betão armado pré-esforçado, tem elementos de dimensões invulgares em face de ter que suportar as cargas resultantes do tráfego dos grandes aviões comerciais, como é o caso do Boeing 747-400 que pode chegar aos 3900 kN quando estacionado. O projecto desta

estrutura foi elaborado por Segadães Tavares & Associados [1, 2] tendo sido galardoado com o Prémio Secil Engenharia Civil 2001.

Os ensaios de caracterização dinâmica [3, 4] da estrutura de ampliação do aeroporto de Sta. Catarina na ilha da Madeira, a que se refere esta comunicação, integraram-se nos ensaios de recepção [5, 6] efectuados pelo LNEC em Março de 2000, após a conclusão das obras de construção da estrutura, antes do início da sua utilização para o tráfego de aviões.

Os ensaios dinâmicos consistiram na medição de acelerações na estrutura induzidas pelo tráfego de camiões carregados, e pela libertação repentina de um peso de 608 kN suspenso a meio vão de dois dos painéis de laje da estrutura. Os ensaios dinâmicos tiveram como principal objectivo a avaliação experimental das frequências, configurações e coeficientes de amortecimento dos primeiros modos de vibração da estrutura.

Nesta comunicação, após esta introdução, faz-se uma breve descrição da estrutura, descrevem-se os equipamentos e as técnicas adoptadas nos ensaios, bem como os métodos de identificação modal utilizados na análise dos registos obtidos. As características dinâmicas obtidas experimentalmente são comparadas com as calculadas com um modelo de elementos finitos desenvolvido no LNEC para apoio à análise e interpretação dos resultados experimentais.

2. ESTRUTURA DE AMPLIAÇÃO DO AEROPORTO DA ILHA DA MADEIRA

A estrutura de ampliação do aeroporto de Sta. Catarina na ilha da Madeira é uma estrutura em ponte, com um tabuleiro com cerca de 1000 m de comprimento e 178 m de largura, desenvolvendo-se a cerca de 50 m de altura acima do nível do mar. Esta estrutura de betão armado pré-esforçado, é constituída por 31 pórticos, transversais ao eixo da pista, que distam 32 m entre si (ver figura 1).

As vigas dos pórticos suportam uma laje com espessura variável desde 1,0 m nos 12 m centrais de cada painel até 1,7 m na ligação às vigas. Os pórticos têm 6 pilares, afastados entre si de 32 m, ligados superiormente pelas vigas com cinco vãos de 32 m e duas consolas laterais de 14,5 m (ver figura 2). Estas vigas são também de altura variável desde 5,6 m sobre os pilares até 3,6 m a meio vão. Os pilares dos pórticos, de secção circular com 3 m de diâmetro, têm, em geral, cerca de 50 m de altura, embora existam pilares com alturas inferiores junto às zonas mais próximas das encostas da ilha. As fundações dos pilares são directas em rocha ou indirectas através de estacas que nalguns casos chegam a atingir 58 m de profundidade.

Devido ao seu grande comprimento e sendo fortemente pré-esforçada, a estrutura de ampliação do aeroporto da Madeira é muito sensível aos efeitos da fluência e retracção do betão e às variações de temperatura, sendo por isso constituída por duas estruturas separadas por uma junta e designadas por estrutura da 1ª fase e estrutura da 2ª fase (ver figura 1).

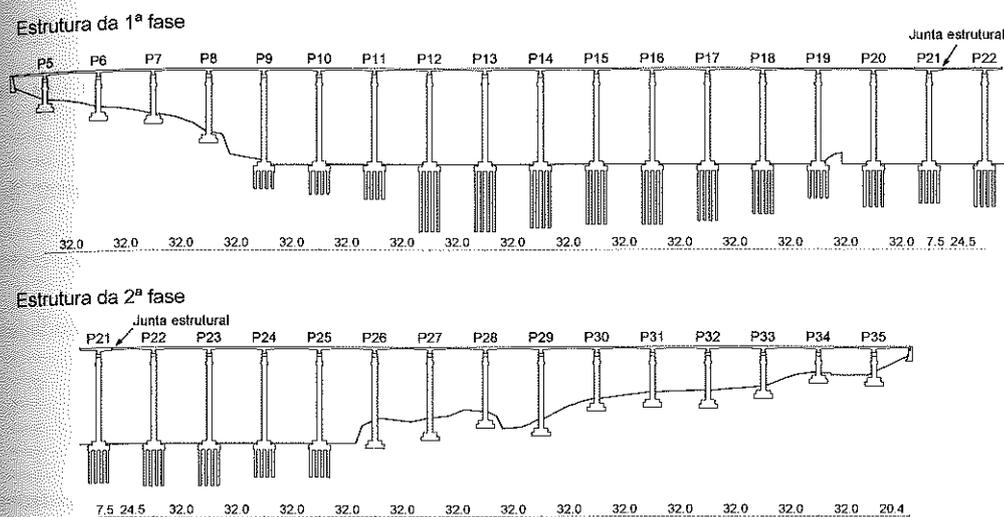


Figura 1 : Cortes longitudinais da estrutura de ampliação do aeroporto da ilha da Madeira

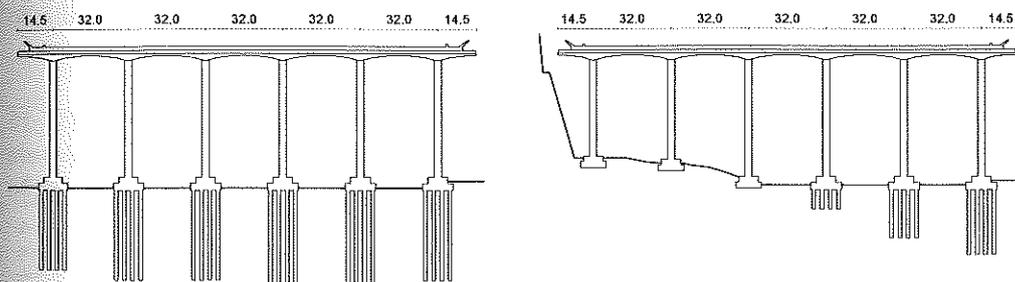


Figura 2 : Cortes transversais da estrutura em dois pórticos

3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA

3.1. Objectivos

Os ensaios [3, 4] apresentados nesta comunicação, tiveram como principal objectivo, a identificação experimental das frequências, configurações e coeficientes de amortecimento dos primeiros modos de vibração globais da estrutura. A avaliação in-situ dessas características dinâmicas foi efectuada com o intuito de estabelecer uma situação de referência, após a conclusão das obras de construção, que pudesse ser considerada na monitorização da estrutura ao longo do tempo. Interessava também comparar as características dinâmicas avaliadas através dos ensaios com as calculadas com modelos de elementos finitos, e obter informação experimental sobre o efeito na estrutura de acções de tipo impulsivo, tendo-se para isso realizado os ensaios de libertação repentina dum peso de 608 kN suspenso a meio vão de dois dos painéis de laje da estrutura.

3.2. Equipamento utilizado nos ensaios

Nos ensaios de caracterização dinâmica da estrutura de ampliação do aeroporto da ilha da Madeira utilizou-se o seguinte equipamento:

- 12 acelerómetros uniaxiais de tipo servo-controlado (FBA-11 da Kinematics);
- 4 unidades desenvolvidas no LNEC (CPCE) para alimentação e condicionamento de acelerómetros de tipo servo-controlado;
- sistema de aquisição de dados SCXI-1200 da National Instruments com conversão analógica/digital a 12 bits e um chassis SCXI-1000DC de 24 canais;
- cabos para alimentação dos acelerómetros e transmissão do respectivo sinal às unidades de condicionamento e alimentação e destas ao sistema de aquisição;
- 5 macro-sismógrafos triaxiais (GSR-16 da Geosys);
- 2 computadores portáteis.

O sistema de medição de acelerações constituído por macro-sismógrafos e por um computador portátil, tinha sido já utilizado em diversos ensaios de caracterização dinâmica de estruturas de pontes [7]. Quanto ao sistema constituído por acelerómetros, pelas unidades de alimentação e condicionamento e por um sistema de aquisição ligado a um computador portátil, foi utilizado pela primeira vez nos ensaios apresentados nesta comunicação.

Quer os acelerómetros FBA-11 quer os sensores de aceleração dos macro-sismógrafos GSR-16 são do tipo servo-controlado e têm uma resposta dinâmica entre DC e 50 Hz e uma elevada gama dinâmica; características importantes para a sua utilização em ensaios de caracterização dinâmica de grandes estruturas de engenharia civil.

Para utilizar os acelerómetros FBA-11 foi desenvolvido, no Centro de Projecto e Construção de Equipamento (CPCE) do LNEC, um sistema constituído por quatro unidades de alimentação dos acelerómetros e condicionamento dos respectivos sinais. Cada uma destas unidades é ligada a três acelerómetros através de cabos com 20 m de comprimento e é ligada ao sistema de aquisição através de cabos longos. Entre os cabos longos e o sistema de aquisição há apenas uma caixa de conversão dos cabos longos de três pares para terminais BNC.

Na figura 3 representa-se esquematicamente o sistema de instrumentação com os acelerómetros FBA-11, tal como utilizado nos ensaios da estrutura de ampliação do aeroporto da ilha da Madeira. Este sistema, desenvolvido para a realização de ensaios dinâmicos de estruturas, tem bastante versatilidade, pois permite instrumentar estruturas de diversos tipos, de maneiras diferentes consoante os objectivos que se pretendam atingir com os ensaios. Com este sistema, os sinais podem ser amplificados antes de serem transmitidos pelos cabos de grande comprimento, o que permite colocar os acelerómetros a distâncias já consideráveis do sistema de aquisição.

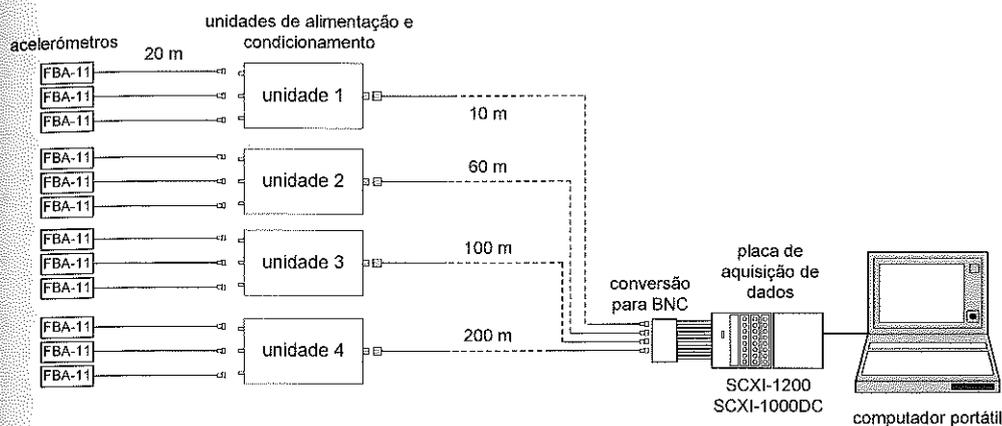


Figura 3 : Sistema de instrumentação com os acelerómetros FBA-11

Nos ensaios da estrutura de ampliação do aeroporto da ilha da Madeira, foram adoptados factores de ganho nos diversos equipamentos utilizados, que permitiram medir amplitudes mínimas de aceleração com valores de: a) 0,0195 mg com os acelerómetros FBA-11 no caso dos ensaios com circulação de camiões; b) 0,195 mg com os três acelerómetros FBA-11 mais próximos do ponto de suspensão do peso, ficando os restantes acelerómetros FBA-11 (nos ensaios de libertação repentina do peso de 608 kN) com uma configuração idêntica à utilizada nos ensaios com circulação de camiões; c) 0,0153 mg com os macro-sismógrafos GSR-16 em todos os ensaios.

3.3. Ensaios efectuados

Na estrutura de ampliação do aeroporto da ilha da Madeira foram efectuados dois tipos de ensaios dinâmicos: a) ensaios em que, aproveitando os camiões utilizados nos ensaios estáticos, registaram-se as acelerações na estrutura induzidas pela sua circulação a velocidades moderadas, incluindo a sua passagem sobre tábuas de ressalto de modo a aumentar o nível de vibrações na estrutura; b) ensaios de libertação repentina dum peso de 608 kN suspenso a meio vão de dois dos painéis de laje da estrutura.

Os ensaios com circulação de camiões foram efectuados utilizando um procedimento semelhante ao que tem sido adoptado em ensaios de caracterização dinâmica de estruturas de pontes [7], ou seja, utilizando sensores de referência que ficaram colocados sempre nos mesmos pontos, enquanto que os restantes sensores foram mudados de ensaio para ensaio. Conseguiu-se assim obter registos da resposta da estrutura num número considerável de pontos, 44 nos ensaios da estrutura da 1ª fase e 62 nos ensaios da estrutura da 2ª fase (ver figura 4). No quadro 1 indicam-se os pontos instrumentados nos ensaios com circulação de camiões, efectuados na estrutura da 2ª fase.

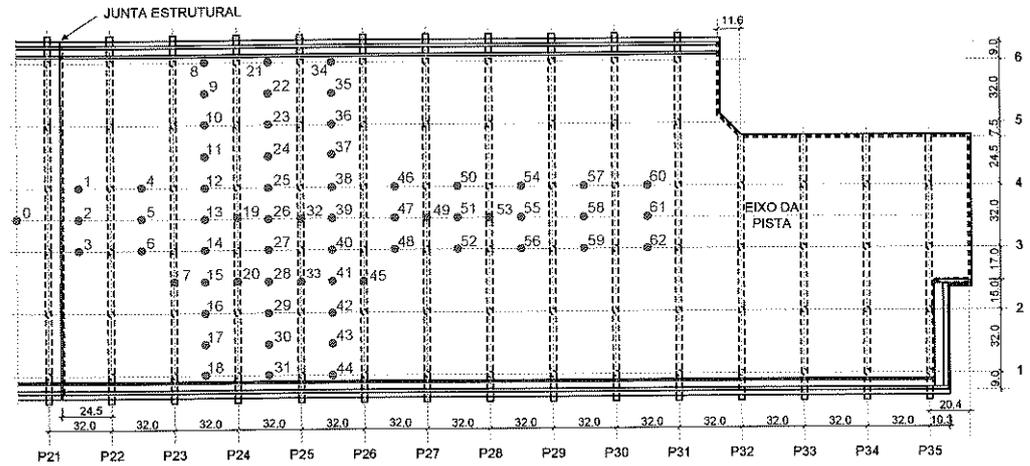


Figura 4 : Pontos instrumentados nos ensaios da estrutura da 2ª fase

Quadro 1: Ensaios com circulação de camiões na estrutura da 2ª fase

ensaio	acelerómetros FBA-11 (direcção vertical)											
1	25	26	27	48	47	46	1	2	3	62	61	60
2				40	39	38	4	5	6	59	58	57
3				43	42	41	12	13	14	56	55	54
4				30	29	28	15	16	17	52	51	50
5				19	32	33	41	45	7	15	20	49
ensaio	macro-sismógrafos GSR-16 (triaxiais)											
1	26	0			8			21			34	
2		18			9			22			35	
3		31			10			23			36	
4		44			11			24			37	

A frequência de amostragem utilizada nos ensaios com circulação de camiões, foi de 50 Hz para os macro-sismógrafos GSR-16 e de 100 Hz para os acelerómetros FBA-11 ligados ao sistema de aquisição SCXI-1200. A duração total dos registos em cada ensaio foi de 10 minutos (30000 valores a 50 Hz ou 60000 valores a 100 Hz).

Os dois sistemas de medição utilizados nos ensaios (acelerómetros FBA-11 e macro-sismógrafos GSR-16) funcionaram de forma independente, não se tendo procurado iniciar o armazenamento dos registos exactamente no mesmo instante em ambos. Tal exigiu que fossem colocados transdutores de ambos os sistemas num ponto de referência comum (o ponto 26) e que a análise subsequente fosse também efectuada de forma independente com os registos obtidos com cada um dos sistemas.

O segundo tipo de ensaios realizados consistiu na medição das acelerações na estrutura após a libertação repentina dum peso de 608 kN suspenso a meio vão de dois dos painéis de laje da estrutura. Foram efectuados dois ensaios deste tipo na estrutura da 1ª fase (na laje entre os

pórticos P24 e P25) e um na estrutura da 2ª fase (na laje entre os pórticos P14 e P15). A suspensão do peso de 608 kN foi efectuada através de 4 cordões de pré-esforço ligados a uma estrutura metálica de suporte do peso, constituído por blocos de betão, e a uma placa de ancoragem na face superior da laje. O peso foi elevado através de um macaco hidráulico, com o qual os cordões foram tensionados e em seguida ancorados na referida placa de ancoragem. A estrutura metálica de suporte do peso, tinha um elemento fusível que foi cortado através de explosivos, conseguindo-se dessa forma que o peso fosse libertado repentinamente deixando a estrutura a vibrar livremente.

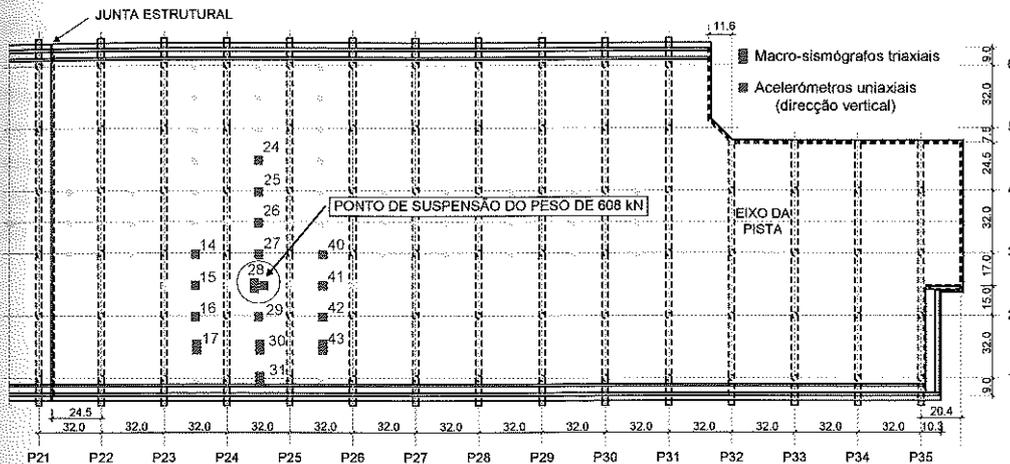


Figura 5 : Instrumentação no ensaio de libertação de peso efectuada na estrutura da 2ª fase

Neste ensaio utilizou-se uma frequência de amostragem de 250 Hz em ambos os sistemas de medição (acelerómetros FBA-11 e macro-sismógrafos GSR-16), de modo a registar a resposta da estrutura com uma boa discretização no domínio do tempo.

4. ANÁLISE DA INFORMAÇÃO OBTIDA NOS ENSAIOS

4.1. Ensaio com circulação de camiões

Os registos de acelerações na estrutura, obtidos nos ensaios com circulação de camiões foram analisados utilizando o método básico no domínio da frequência [8]. Este método envolve fundamentalmente o cálculo dos auto espectros, funções de coerência e funções de resposta em frequência entre os diferentes pontos da estrutura que foram instrumentados.

Antes do cálculo dos espectros, os registos de acelerações foram pré-processados através das seguintes operações: remoção de média ou de tendências lineares; filtragem passa baixo com frequência de corte a 20 Hz, utilizando um filtro de tipo Butterworth de ordem 4; e no caso dos

registos obtidos com os acelerómetros FBA-11, decimação dos sinais da frequência de 100 Hz para uma frequência de 50 Hz.

Os auto espectros e espectros cruzados foram calculados utilizando o algoritmo da transformada rápida de Fourier (FFT), considerando a média dos espectros calculados com séries com 4096 valores em que se subdividiram os registos totais com 10 minutos de duração. A resolução em frequência dos espectros analisados é assim de 0,012 Hz correspondente aos 4096 valores amostrados a 50 Hz. Antes do cálculo dos espectros, aplicou-se uma janela de Hanning a cada uma das séries, para reduzir os efeitos de "leakage". Para sintetizar toda a informação contida nos espectros calculados com os registos obtidos nos diversos pontos da estrutura, determinaram-se espectros normalizados médios (ANPSD) para as três direcções (transversal, longitudinal e vertical); na figura 6 apresentam-se esses espectros calculados com os registos obtidos nos ensaios da estrutura da 2ª fase. Na figura 6 indicam-se também as frequências dos picos de ressonância mais evidentes. Nessas frequências foi efectuada uma análise das funções de coerência e das funções de resposta em frequência (transmissibilidade) entre os diversos pontos instrumentados para verificar se as mesmas correspondiam a modos de vibração globais da estrutura, e para traçar graficamente as configurações desses modos.

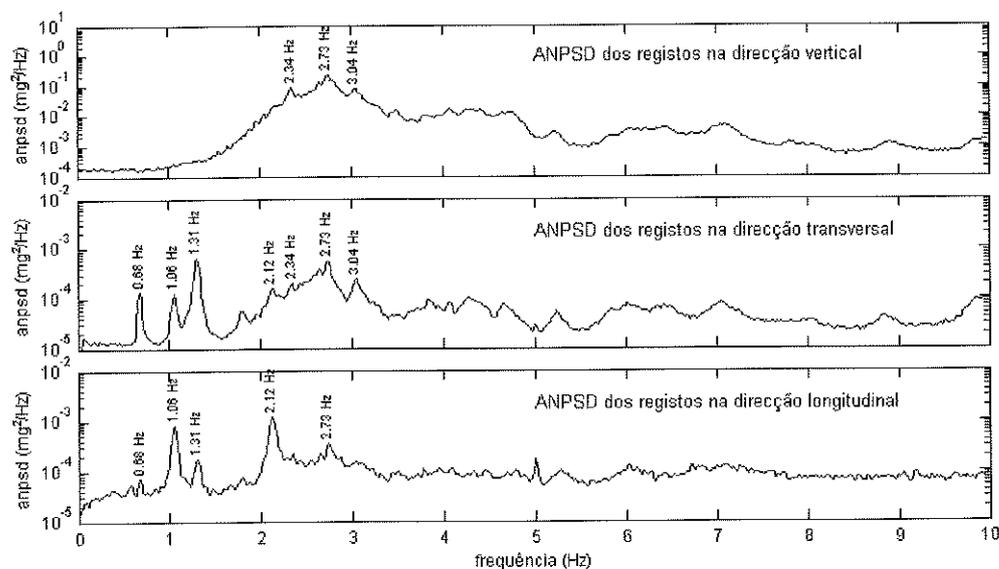


Figura 6 : Espectros normalizados médios calculados para a estrutura da 2ª fase

4.2. Ensaios de libertação repentina dum peso de 608 kN

Com os registos obtidos nos ensaios de libertação repentina dum peso de 608 kN foi também efectuada uma análise espectral para identificar as frequências dos modos naturais de vibração da estrutura.. Da análise efectuada, constatou-se que com estes ensaios conseguiu-se excitar os

modos de vibração correspondentes a uma banda de frequências mais larga. Os registos destes ensaios foram também analisados para estimar os coeficientes de amortecimento modal; para tal utilizou-se uma técnica de ajuste dum função exponencial aos registos da resposta em regime livre, filtrados com um filtro passa-banda em torno das frequências dos modos de vibração identificados. Na figura 7 apresentam-se, numa representação em perspectiva, os registos verticais obtidos no ensaio efectuado na estrutura da 2ª fase.

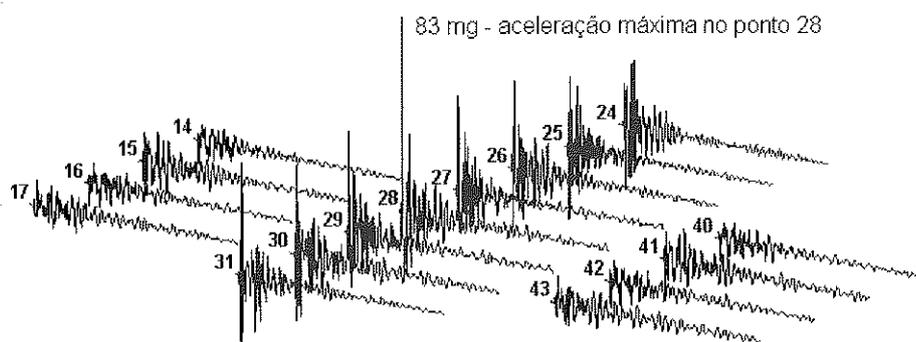


Figura 7 : Registos de acelerações verticais dum ensaio de libertação do peso de 608 kN

5. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Em paralelo com o trabalho de caracterização dinâmica experimental, desenvolveu-se também um modelo de elementos finitos da estrutura de ampliação do aeroporto da ilha da Madeira. O modelo elaborado é um modelo espacial que inclui as estruturas de ambas as fases interligadas na junta com elementos de ligação. Na figura 8 representa-se, numa vista em planta, a configuração calculada para o primeiro modo de vibração transversal ($f = 0,68$ Hz).

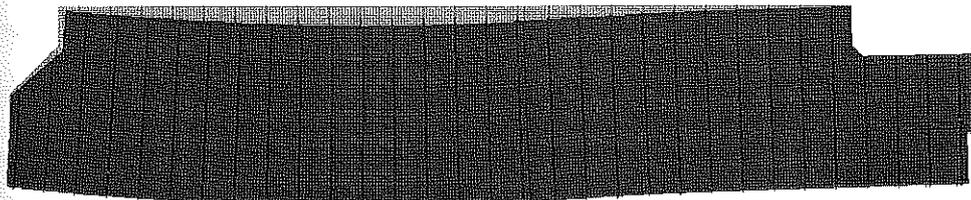


Figura 8 : Configuração calculada com o modelo para o 1º modo transversal ($f = 0,68$ Hz)

6. CONCLUSÕES

Descreveram-se nesta comunicação os ensaios de caracterização dinâmica realizados na estrutura de ampliação do aeroporto da ilha da Madeira, referindo-se os métodos utilizados na análise da informação recolhida e apresentando-se alguns dos resultados obtidos.

Considera-se que as características dinâmicas avaliadas experimentalmente, constituem um contributo importante para a caracterização global da estrutura, no fim da sua construção e antes de ser aberta ao tráfego de aviões. Prevê-se que venha a ser instalado na estrutura um sistema de instrumentação dinâmica para monitorização dos efeitos das aterragens e decolagens dos aviões, estando já adquirido equipamento e desenvolvidos diversos dos seus componentes. Este sistema constituirá um caso único de monitorização dinâmica de uma estrutura, que fornecerá informação importante para a caracterização da acção do tráfego de aviões.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de deixar expresso o seu agradecimento: aos projectistas da estrutura de ampliação do aeroporto da ilha da Madeira, Eng.º Segadães Tavares e Eng.º João Vaz; ao Eng.º Almeida Fernandes e a todos os técnicos do LNEC e do LREC, que participaram na realização dos ensaios estáticos e dinâmicos; ao consórcio construtor da obra pela sua cooperação na realização dos ensaios, nomeadamente na concepção e materialização de todo o sistema necessário para os ensaios de libertação repentina dum peso de 608 kN; ao Prof. Álvaro Cunha da FEUP pelo empréstimo de algum do equipamento utilizado nos ensaios.

Os métodos de identificação modal aplicados no estudo apresentado nesta comunicação, foram desenvolvidos no âmbito do projecto de investigação programada do LNEC 35/11/14745 – Identificação dinâmica de estruturas de engenharia civil.

8. REFERÊNCIAS

- [1] STA Segadães Tavares & Associados – *Projecto de ampliação do aeroporto do Funchal*, 1998.
- [2] Tavares, A.S.; Vaz, J. - "Funchal airport extension – The structural solution", *International Conference NEWTECH 97*, LNEC, Lisbon, 1997.
- [3] Rodrigues, J. – *Ensaio de caracterização dinâmica da estrutura da 1ª fase da ampliação do aeroporto da Madeira*, Relatório, LNEC, 2002.
- [4] Rodrigues, J. – *Ensaio de caracterização dinâmica da estrutura da 2ª fase da ampliação do aeroporto da Madeira*, Relatório, LNEC, 2002.
- [5] Santos, L. O.; Min, X.; Fernandes, J. A. – *Ensaio de carga da estrutura principal da 1ª fase da ampliação do aeroporto da Madeira*, Relatório, LNEC, 2002.
- [6] Min, X.; Santos, L. O.; Fernandes, J. A. – *Ensaio de carga da estrutura principal da 2ª fase da ampliação do aeroporto da Madeira*, Relatório, LNEC, 2002.
- [7] Rodrigues, J.; Costa, A.C. - "Caracterização dinâmica de estruturas de pontes com base em ensaios de vibrações ambiente", *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, n.º 44, 1998, p. 49-54.
- [8] Ventura, C.; Brincker R. – *Modal identification of output only systems – Course notes*, Short Course, Universidad Politecnica de Madrid, June 5-6, 2000.