



## Monitorização avançada da estrutura de ampliação do Aeroporto da Madeira

**Luís Oliveira Santos**

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, [luis.osantos@lneec.pt](mailto:luis.osantos@lneec.pt)

**Min Xu**

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, [xumin@lneec.pt](mailto:xumin@lneec.pt)

**Francisco Barros**

INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, [fbarros@inegi.up.pt](mailto:fbarros@inegi.up.pt)

**Susana Aguiar**

INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, [saquiar@inegi.up.pt](mailto:saquiar@inegi.up.pt)

**Pedro Sousa**

INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, [psousa@inegi.up.pt](mailto:psousa@inegi.up.pt)

**Paulo Tavares**

INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, [ptavares@inegi.up.pt](mailto:ptavares@inegi.up.pt)

**Pedro Moreira**

INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, [pmoreira@inegi.up.pt](mailto:pmoreira@inegi.up.pt)

**Elsa Franco**

ANA - Aeroportos de Portugal, Santa Cruz, Portugal, [emfranco@ana.pt](mailto:emfranco@ana.pt)

### Resumo

O Aeroporto da Madeira é uma infraestrutura crítica da Região Autónoma da Madeira, com umas características estruturais únicas, o que motivou a monitorização do seu comportamento estrutural desde a construção da estrutura de ampliação da pista, que decorreu entre 1995 e 2000.

A notável evolução tecnológica ocorrida desde então, bem como o conhecimento do comportamento da estrutura, tornaram natural uma atualização do sistema de monitorização que permitisse beneficiar da aplicação de recentes tecnologias a esta estrutura, tendo em vista a obtenção de informação relevante para a gestão da sua conservação.

Para além da instalação de um novo sistema de aquisição que permite tirar partido dos sensores originais que se encontram operacionais, foram adicionadas novas vertentes, designadamente a monitorização do movimento das juntas de dilatação e, principalmente, do comportamento dinâmico, através de um conjunto de acelerómetros e extensómetros em fibra ótica, bem como por via da instalação de um sistema de correlação digital de imagem digital.

Nesta comunicação é brevemente descrito o sistema de monitorização original, bem como os novos sensores e alguns dos resultados iniciais, que se afiguram promissores.

**Palavras-chave:** Aeroporto da Madeira, Correlação digital de imagem, Monitorização estrutural

## 1 INTRODUÇÃO

A estrutura de ampliação da pista do Aeroporto Internacional da Madeira, projetada pelo Eng<sup>o</sup> Segadães Tavares e construída entre 1995 e 2000, é uma estrutura singular, de grandes dimensões, de enorme importância económica e social, o que motivou a instalação, durante a construção, de um sistema de monitorização da integridade estrutural e da durabilidade, concebido e implementado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), com a colaboração do Laboratório Regional de Engenharia Civil da Madeira (LREC). O sistema de monitorização então instalado representou um significativo investimento, tendo permitido a recolha de informação relevante durante a construção e os primeiros anos em serviço.

O sucesso de uma candidatura de um projeto de investigação submetido pela ANA ao programa PROCIÊNCIA 2020 (Projeto MEGE) permitiu modernizar o sistema de monitorização da integridade estrutural originalmente instalado, visando um relevante incremento da informação experimental sobre o comportamento da estrutura e, conseqüentemente, valorizando o seu contributo como instrumento de apoio à decisão no âmbito da gestão deste importante ativo.

Para este efeito, seguiu-se uma estratégia que, continuando a beneficiar do equipamento instalado que se encontra operacional, procurou acrescentar funcionalidades que se afiguram relevantes para a avaliação do comportamento da estrutura ou dos seus componentes. O comportamento da obra em serviço, a experiência acumulada na exploração do sistema instalado, o desgaste de parte do equipamento de observação instalado e a significativa evolução tecnológica ocorrida ao longo dos quase vinte anos passados desde a implementação do plano de observação original permitiram selecionar alguns pontos prioritários da referida estratégia.

Pretendeu-se desta forma desenvolver e implementar soluções que sirvam especificamente os requisitos de uma infraestrutura aeroportuária, através de abordagens novas, incorporando o recurso a tecnologias consolidadas e emergentes num contexto diferenciado, com a redundância necessária para permitir a sua validação mútua.

Neste artigo, após uma breve descrição da estrutura e do sistema de monitorização instalado durante a construção, referem-se os critérios utilizados na escolha das grandezas a monitorizar, bem como os novos sensores instalados para esse efeito. Por fim, apresentam-se alguns resultados e tecem-se algumas considerações finais.

## 2 A ESTRUTURA DE AMPLIAÇÃO DA PISTA DO AEROPORTO DA MADEIRA

A estrutura de ampliação da pista do aeroporto desenvolve-se em planta segundo uma forma sensivelmente retangular, com uma largura de 178 m e um comprimento total de 1008 m (Figura 1).

Esta estrutura é constituída por pórticos transversais, afastados entre si de 32 m e, em geral, apoiados em 6 pilares maciços e cilíndricos, que suportam a laje que acomoda a plataforma aeroviária [1]. A estrutura está dotada de uma junta de dilatação que a separa em dois troços independentes: o troço contíguo à pista antiga, com uma extensão de 546 m, compreende 17 pórticos, numerados de P5 a P21; o segundo troço, com 462 m de comprimento, é constituído pelos pórticos P22 a P35 (Figura 2).



Figura 1. Vista geral da estrutura de ampliação da pista do Aeroporto da Madeira

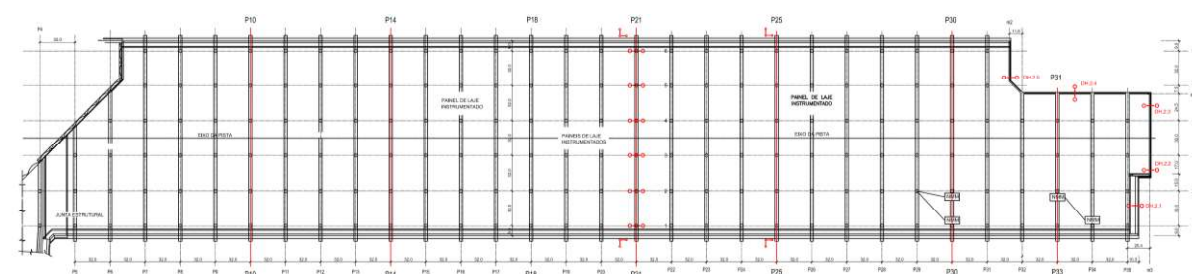


Figura 2. Planta da estrutura de ampliação da pista do Aeroporto da Madeira

As lajes possuem uma espessura de 1,0 m que aumenta até 1,7 m, junto às vigas, através de uma variação parabólica da sua face inferior 10 m contíguos a cada viga [1], como é visível na Figura 1.

Os pórticos transversais são constituídos por vigas apoiadas em seis pilares, afastados entre si de 32 m, que se prolongam por consolas de 14 metros de vão em cada extremidade.

As vigas são em betão armado pré-esforçado, com uma forma aproximada em I, cuja sua altura varia segundo uma diretriz circular entre 3,6 m, a meio vão e na extremidade das consolas, e 5,6 m nos apoios sobre os pilares. O banzo superior tem, junto à alma, uma altura máxima de 1,7 m; a alma tem uma altura de 1,3 m e largura de 2 m; o banzo inferior tem 3 m de largura e uma altura que varia entre 0,6 m, a meio vão, e 2,6 m sobre o eixo dos pilares [1].

Os pilares são em betão armado, com uma secção circular de 3 m de diâmetro e uma altura de cerca de 50 m sobre o aterro marítimo, existindo alguns pilares nas zonas de falésia com alturas significativamente inferiores. As fundações dos pilares são diretas, por sapatas, ou indiretas, sobre estacas, conforme a natureza do solo de fundação.

### 3 O SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL INSTALADO DURANTE A CONSTRUÇÃO

O sistema de monitorização instalado durante a construção baseou-se em extensómetros de corda vibrante e termómetros elétricos de resistência embebidos no interior do betão dos seis pórticos assinalados na Figura 2, bem como nos painéis de laje igualmente assinalados nessa figura. Estes sensores estavam ligados a um sistema de aquisição de dados, permitindo a realização automática das medições [2].

Importa referir que a maioria dos termómetros e extensómetros se encontravam operacionais. Por este motivo, bem como pelo interesse de continuar um registo de cerca de 20 anos desses sensores, que constitui uma base de referência significativa do comportamento da estrutura, foi renovado o sistema de aquisição de dados inicialmente instalados.

Complementarmente foram instaladas bases de clinómetro de bolha de ar no maciço de fundação de diversos pilares, tendo sido realizado um extenso estudo in situ do comportamento diferido do betão, envolvendo 87 provetes de retração e 32 provetes de fluência.

### 4 INOVAÇÃO NO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL

#### 4.1 Seleção das novas vertentes do sistema

A excecionalidade desta estrutura, decorrente das suas dimensões bem como da especificidade das sobrecargas, torna especialmente interessante a monitorização do funcionamento das juntas de dilatação, bem como do seu comportamento dinâmico. A relevância das juntas está naturalmente associada à longa extensão da estrutura; a importância do comportamento dinâmico prende-se com o forte impacto causado pelos movimentos das aeronaves, e particular na sua aterragem. Nestas circunstâncias, a escolha das novas vertentes recaiu com naturalidade sobre estes dois aspetos críticos.

#### 4.2 Juntas de dilatação

A estrutura do aeroporto está dotada de juntas de dimensão moderada nas duas extremidades e de uma junta de características excecionais numa zona intermédia, situada entre os pórticos P21 e P22. Na Figura 3 apresentam-se duas vistas desta junta de dilatação, uma superior e outra inferior.

O elevado comprimento da junta motivou a monitorização dos seus movimentos em diversos pontos, tendo sido escolhidos os seis alinhamentos de pilares para instalar sensores magnetostrictivos. Nos alinhamentos extremos estes sensores foram instalados nos muros guarda-rodas, mas nos restantes foi necessário proceder a essa instalação na parte inferior da junta (Figura 3).



Figura 3. Junta de dilatação principal: vista geral e detalhe da instrumentação

Na Figura 4 apresentam-se os movimentos da junta de dilatação principal ao longo de um ano, entre julho de 2020 e junho de 2021, juntamente com a temperatura do ar e no interior do betão (T81.1 e T81.2). Para além da evidente correlação, verifica-se que a uma variação de temperatura no betão com cerca de 17°C de amplitude corresponde uma variação da abertura da junta de cerca de 9 cm.

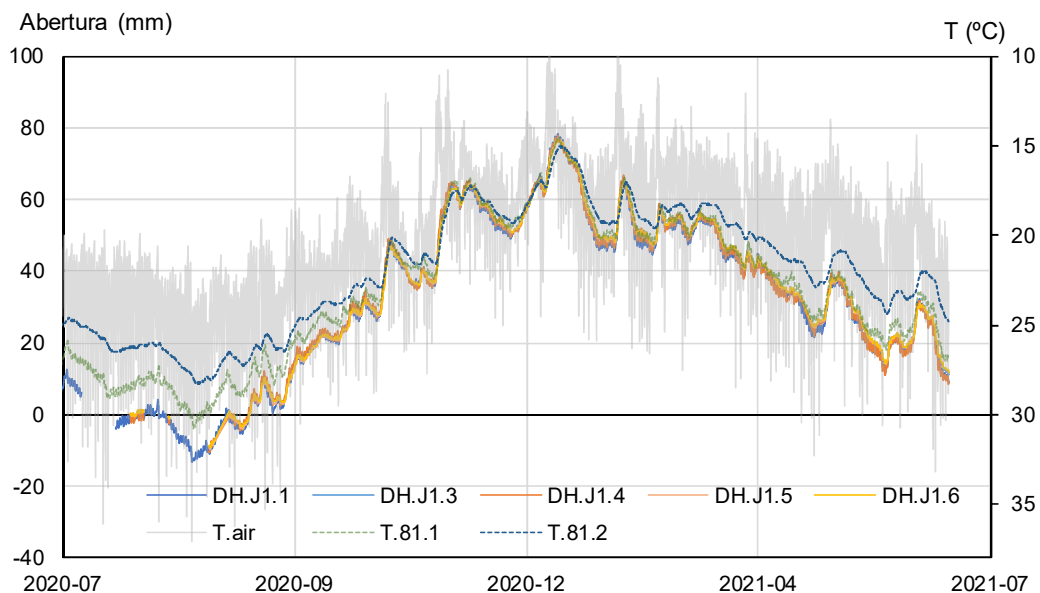


Figura 4. Movimentos da junta de dilatação principal ao longo de um ano

### 4.3 Monitorização do comportamento dinâmico

#### 4.3.1 Considerações gerais

A monitorização do comportamento dinâmico de uma estrutura fornece informação relevante sobre o desempenho dessa estrutura, permitindo uma deteção precoce de anomalias. No caso da estrutura de ampliação da pista do Aeroporto da Madeira, a acuidade desta valência é acrescida devida à continuada imposição de cargas dinâmicas decorrentes da aterragem dos aviões.

Neste contexto, a monitorização dinâmica desta estrutura incidiu na designada “zona de toque”, situada entre os pórticos P17 e P19, tendo-se procedido à instalação nessa zona de um conjunto de acelerómetros, extensómetros em fibra ótica e a um sistema de correlação digital de imagem.

#### 4.3.2 Medição de acelerações

Com a medição das acelerações pretende-se quantificar o efeito da aterragem e descolagem dos aviões, pelo que se privilegiou a medição das acelerações verticais e longitudinais. As primeiras visando fundamentalmente a medição do impacto da aterragem ou da descolagem, as segundas o efeito da frenagem dos aviões.

Para este efeito foi instalado um conjunto de sete acelerómetros no eixo central da face inferior do tabuleiro, entre os pórticos P17 e P19. Nas vigas dos pórticos P17 e P19 foram instalados dois acelerómetros orientados longitudinalmente. Os cinco acelerómetros verticais foram posicionados nas vigas dos pórticos P17 a P19, bem como na face inferior dos dois painéis de laje intermédios, como

representado esquematicamente na Figura 5. A Figura 6 é constituída pela zona instrumentada da viga central do pórtico P19, que inclui dois acelerómetros, bem como os sensores de fibra óptica.

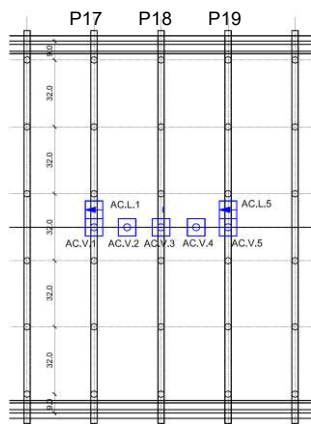


Figura 5. Posicionamento dos acelerómetros

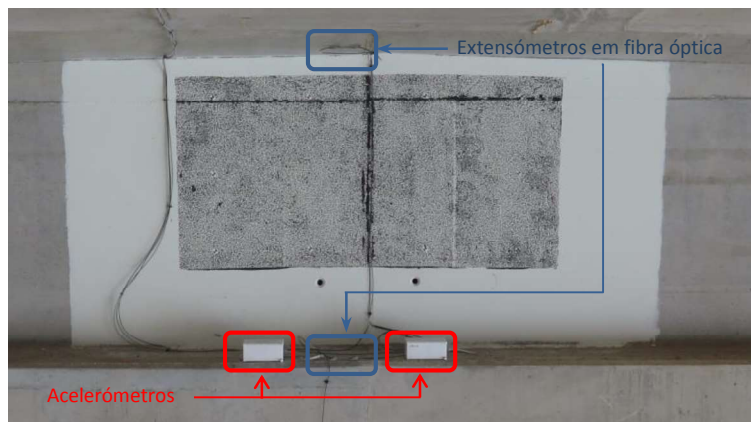


Figura 6. Instrumentação da viga do pórtico P19

O elevado volume de dados gerado pela monitorização dinâmica motivou o desenvolvimento de algoritmos para o processamento automático das acelerações medidas, extraindo os parâmetros modais da estrutura em tempo real [4].

O processamento automático dos registos, efetuados com uma frequência de aquisição de 250 Hz, realiza-se separadamente para as acelerações verticais e longitudinais. Na Figura 7 apresentam-se as acelerações verticais medidas durante uma hora em que um avião de pequeno porte em regime de treino realizou diversas aterragens e descolagens, cuja ocorrência é bem evidente nesta figura.

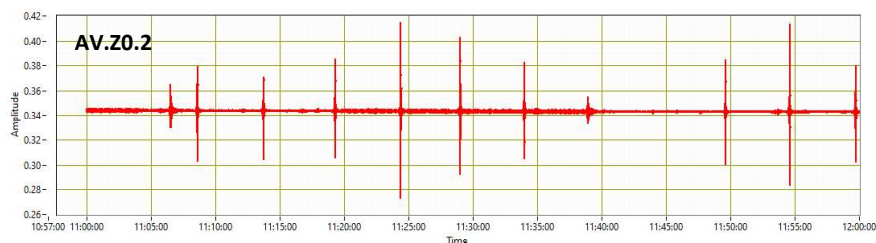


Figura 7. Registo das acelerações verticais em 2020-10-01

Os registos de aceleração são objeto de um pré-processamento e decimados para 50 Hz, após o que se procede à identificação das características dinâmicas através de uma análise modal operacional (AMO) a cada grupo de séries temporais de duração horária, em que se aplicam várias técnicas [3]:

- Método de Decremento Aleatório;
- Método de identificação estocástica em subespaços (SSI-COV);
- Automatização do processo de identificação modal.

A identificação modal estocástica é efetuada com base na resposta das estruturas às ações ambientais, assumindo-se a hipótese de as forças de excitação serem idealizáveis através de um processo estocástico gaussiano de tipo ruído branco (com densidade espectral constante) com média nula. A aterragem, descolagem ou mesmo a simples circulação dos aviões sobre a pista, provocam vibração substancialmente maior que as ações ambientais, como se pode constatar na Figura 7. Assim sendo, é



necessário eliminar as vibrações provocadas pelos movimentos de aeronave, o que é efetuado com base no critério de valor eficaz (RMS) dos dados pré-processados [4].

Aplicando o método de identificação estocástica em subespaços (SSI-COV) e a técnica de análise cluster são identificados os polos estabilizados que são considerados, possivelmente, associados aos modos de vibração da estrutura (Figura 8). Consequentemente, são obtidos os parâmetros modais (frequência natural, coeficiente de amortecimento e configuração modal) dos modos de vibração da estrutura.

Desta forma foi possível obter modos de vibração presentes, de uma forma contínua, ao longo do período em análise, como representado na Figura 9, relativamente aos modos verticais, e na Figura 10 para os modos longitudinais. Estas informações servem como referência para classificar os modos identificados automaticamente e avaliar a evolução do comportamento dinâmico da estrutura.

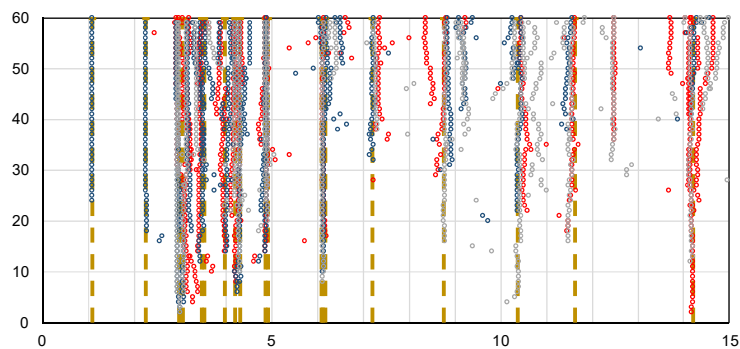


Figura 8. Diagrama de estabilização das acelerações verticais

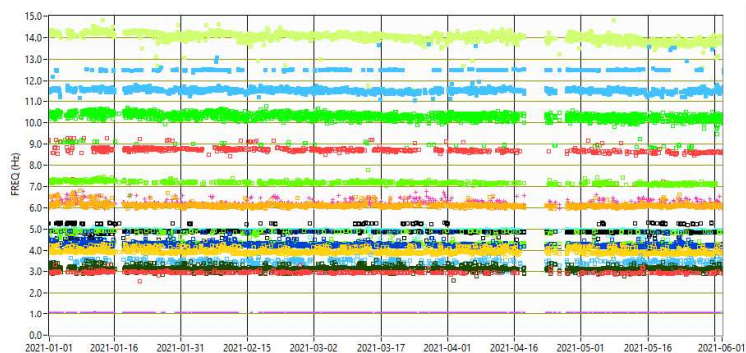


Figura 9. Frequência dos modos de vibração verticais

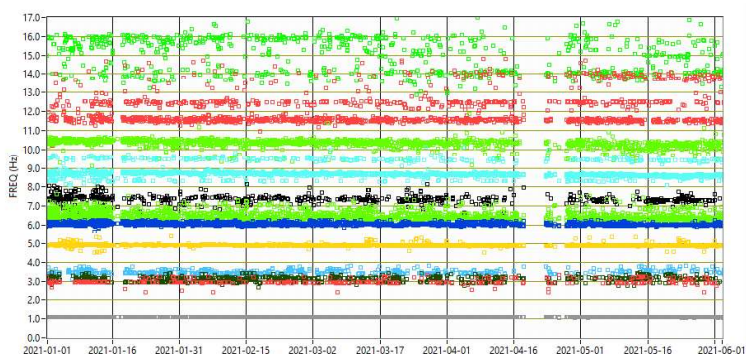


Figura 10. Frequência dos modos de vibração longitudinais

### 4.3.3 Fibra ótica

A medição de extensões em regime dinâmico visa complementar a informação obtida através dos acelerómetros.

Para este efeito foram instalados 8 extensómetros em fibra ótica, posicionados nas secções de meio vão do tramo central dos pórticos P18 e P19. Em cada secção foram instalados dois extensómetros no banzo superior da viga e dois extensómetros no seu banzo inferior, tal como está assinalado na Figura 6. Estes extensómetros foram instalados na direcção longitudinal dos pórticos, portanto na direcção perpendicular ao eixo da pista.

Para a compensação do efeito da temperatura no funcionamento destes extensómetros, em cada secção foi também instalado um termómetro em fibra ótica.

### 4.3.4 Correlação digital de imagem

Complementarmente à medição de extensões em regime dinâmico por extensómetros em fibra ótica, foi também definido e instalado um sistema de correlação digital de imagem, capaz de fornecer mapas de deslocamentos para os mesmos eventos dinâmicos, tais como aterragens, descolagens e rolagem de aeronaves [5][6].

Tendo como alvo a medição dos deslocamentos nas secções de meio vão do tramo central dos pórticos P18 e P19, foram colocados dois sistemas de monitorização por imagem por cima dos pilares noroeste do tramo central dos pórticos P17 e P18, apontados para as secções alvo, nas quais foram pintados padrões (Figura 6) para permitir a análise. A instalação das câmaras diretamente sobre os pilares deve-se ao facto de o deslocamento vertical nestas secções não ser significativo relativamente à flecha das vigas a meio vão. Cada sistema é constituído por uma câmara e equipamento de comunicação, protegidos por uma caixa IP68, e um sistema de limpeza do vidro da caixa (Figura 11). Os sistemas comunicam através de fibra ótica com computadores instalados nas imediações da pista que controlam o processo de aquisição.



Figura 11. Sistema de monitorização por correlação digital de imagem, montado sobre o pilar P17.4



Os eventos correspondentes a deteções de deslocamentos da viga são automaticamente guardados e processados, sendo possível obter deslocamentos ao longo de cerca de 4 segundos de aquisição, a uma frequência de 90 Hz (correspondente ao *frame rate* da câmara). O processamento recorre a algoritmos de correlação digital com resolução subpíxel, estimando-se que a resolução obtida seja aproximadamente 1/20 do pixel, o que corresponde a 0,026 mm [7].

Os resultados obtidos para cada evento permitem a obtenção de mapas de deslocamentos relativos a instantes de tempo individuais, bem como a evolução do deslocamento para um ponto com localização central em cada viga. A Figura 12 mostra o deslocamento ao longo do tempo referente a um mesmo evento, identificado como uma aterragem, para os dois pórticos. Pode verificar-se que a forma das curvas é semelhante, assim como os valores atingidos.

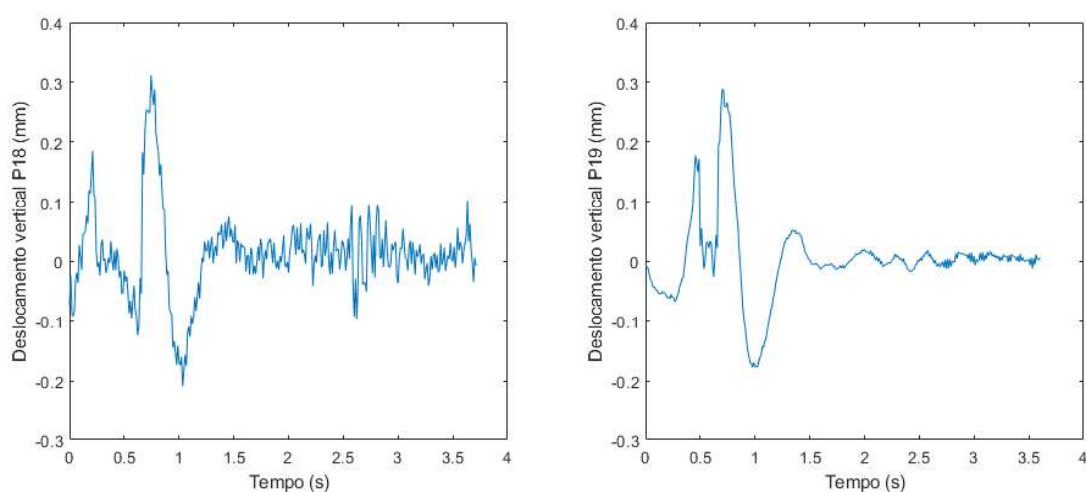


Figura 12. Deslocamento ao longo do tempo para o mesmo evento nos dois pórticos, com base temporal não síncrona entre as duas representações.

## 5 CONCLUSÕES

A aplicação de modernas técnicas de monitorização do comportamento estrutural na estrutura de ampliação da pista do Aeroporto da Madeira, permitiu uma significativa atualização do sistema instalado durante a construção, que teve lugar nos últimos anos do século passado. Neste contexto, merecem uma referência particular duas novas funcionalidades: a medição dos movimentos das juntas de dilatação, através do recurso a sensores magnetostrictivos na junta principal e de *jointmeters* de corda-vibrante na junta da cabeceira 23; a monitorização do comportamento dinâmico, através de um conjunto de acelerómetros do tipo *force-balance* e de extensómetros em fibra óptica, bem como de um sistema de correlação digital de imagem, instalados na designada “zona de toque”, de forma a caracterizar a resposta estrutural face às solicitações decorrentes da aterragem e descolagem dos aviões. Pretendeu-se assim utilizar simultânea e complementarmente técnicas consolidadas de monitorização e de uma técnica promissora.

Os referidos sensores estão todos associados a sistemas de aquisição, bem como à nova rede local de transmissão de dados permitindo a realização de medições de forma automática e o acesso remoto à informação. Os valores medidos são processados de forma automática e, posteriormente carregados

numa base de dados, em desenvolvimento, tendo em vista a sua disponibilização num portal de acesso restrito a utilizadores autorizados.

Os desenvolvimentos em curso passam pela obtenção dos deslocamentos a partir das acelerações, recorrendo para o efeito à fusão dos dados das acelerações e das extensões, de forma a evitar as dificuldades associadas à dupla integração da aceleração, método que tem um erro intrínseco associado causado pela integração numérica no domínio do tempo discreto, consequência do desvio de baixa frequência no deslocamento estimado. Será assim possível aumentar a informação disponível e realizar a comparação dos deslocamentos obtidos através das acelerações e da correlação digital de imagem.

## AGRADECIMENTOS

O trabalho apresentado foi desenvolvido no âmbito do projeto MEGE – Monitorização Estrutural de Grandes Estruturas, integrado no Programa Operacional Madeira 14-20, no âmbito do PROCiência 2020, Sistema de Incentivos à Produção de Conhecimento Científico e Tecnológico da Região Autónoma da Madeira.

## REFERÊNCIAS

- [1] Ferreira, D.; Tavares, A. Segadães.; Fernandes, J. Almeida; Santos, T. O., 1999 – O novo aeroporto do Funchal, II Jornadas Insulares de Engenharia, Funchal.
- [2] Xu, M.; Santos, L. O.; Fernandes, J. A., 2001 – Analysis and Observation of Funchal Airport Extension, EPMESC VIII - International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science, Shanghai, China, 25-28 July 2001.
- [3] Xu, M.; Santos, L. O.; Vieira, T., 2016 – Modal Identification of Bridges based on Continuous Dynamic Monitoring. 8<sup>th</sup> European Workshop on Structural Health Monitoring, Bilbao, Spain.
- [4] Xu, M.; Santos, L. O., 2017 – Dynamic Assessment of the São João Bridge Structural Integrity. *Procedia Structural Integrity*, Volume 5, 2017, Pages 325-331, ISSN 2452-3216, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.178>.
- [5] Ramos, T.; Furtado, A.; Eslami, S.; Alves, S.; Rodrigues, H.; Arêde, A.; Tavares, P.; Moreira, P., 2015. "2D and 3D Digital ImageCorrelation in Civil Engineering – Measurements in a Masonry Wall". *Procedia Engineering* 114 (2015): 215-222, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.061>
- [6] Sousa, P. J.; Barros, F; Tavares, P.; Moreira, P., 2018. "Experimental measurement of bridge deflection using Digital Image Correlation," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 17, pp. 806–811, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROSTR.2019.08.107.
- [7] Barros, F.; Sousa, P. J.; Tavares, P. J.; Moreira, P. M., 2018. "Digital image correlation through image registration in the frequency domain," *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 53, no. 8, pp. 575–583, Nov. 2018, doi: 10.1177/0309324718802705.