

Novos desafios na monitorização da estrutura de ampliação da pista do Aeroporto da Madeira

New challenges in structural monitoring of Madeira Airport runway extension

Luís Oliveira Santos, Min Xu, João Reis,
Francisco Barros, Susana Aguiar, Pedro Sousa,
Paulo Tavares, Pedro Moreira, Elsa Franco

Resumo

O Aeroporto da Madeira é uma infraestrutura crítica com 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.

O conhecimento adquirido do comportamento da estrutura em serviço, bem como a significativa evolução tecnológica, tornaram natural uma atualização do sistema de monitorização, tendo em vista o incremento de informação relevante para a gestão da sua conservação.

Para além de novos sistemas de aquisição e comunicação, a atualização operada compreendeu a instalação de novas funcionalidades, designadamente a monitorização do movimento das juntas de dilatação e do comportamento dinâmico, quer através de acelerómetros e extensómetros em fibra óptica, quer por via de um sistema de correlação digital de imagem.

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

Abstract

Madeira Airport is a critical infrastructure with unique structural characteristics, which motivated the monitoring of its structural behaviour since the construction of the runway extension structure, which took place between 1995 and 2000.

The knowledge acquired about the behaviour of the structure in service, as well as the significant technological evolution, made it natural to update the monitoring system, to increase the information relevant for the management of its conservation.

In addition to a new acquisition and communication systems, the upgrade included the installation of new functionalities, such as the monitoring of the movement of expansion joints and the monitoring of the dynamic behaviour, either through accelerometers and fibre optic strain gauges, or through a digital image correlation system.

In this paper, the original monitoring system is briefly described, as well as the new sensors and some of the initial results, which appear to be promising.

Palavras-chave: Aeroporto da Madeira / Correlação digital de imagem / Monitorização da integridade estrutural / Monitorização dinâmica

Keywords: Madeira Airport / Digital image correlation / Structural health monitoring / Dynamic monitoring

Luís Oliveira Santos

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
luis.osantos@lnec.pt

Min Xu

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
xumin@lnec.pt

João Reis

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
jpreis@lnec.pt

Francisco Barros

INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
fbarros@inegi.up.pt

Susana Aguiar

INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
saguiar@inegi.up.pt

Pedro Sousa

INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
psousa@inegi.up.pt

Paulo Tavares

INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
ptavares@inegi.up.pt

Pedro Moreira

INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
pmoreira@inegi.up.pt

Elsa Franco

ANA – Aeroportos de Portugal
Santa Cruz, Portugal
emfranco@ana.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

SANTOS, L. [et al.] – Novos desafios na monitorização da estrutura de ampliação da pista do Aeroporto da Madeira . **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 18. ISSN 2183-8488. (março 2022) 123-130.

1 Introdução

A estrutura de ampliação da pista do Aeroporto Internacional da Madeira, projetada pelo Eng.º António Segadães Tavares e construída entre 1995 e 2000, é uma estrutura singular, de grandes dimensões e enorme importância económica e social. Estas características motivaram 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 explorar o equipamento instalado que se encontrava 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



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

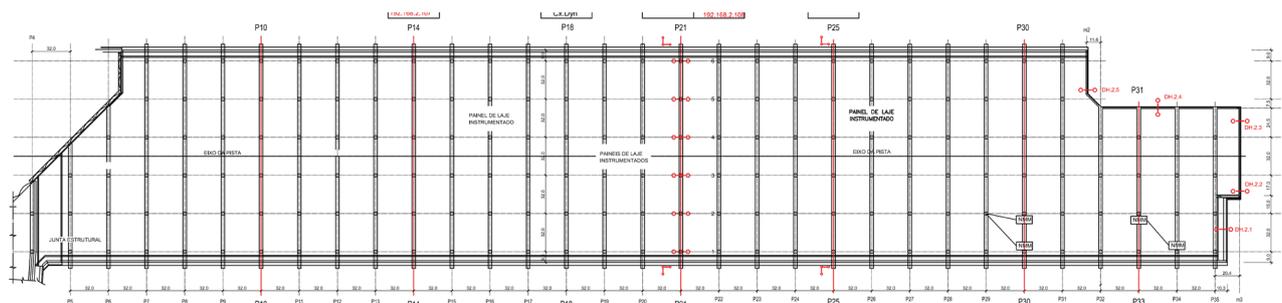


Figura 2 Planta da estrutura de ampliação da pista do Aeroporto da Madeira

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).

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 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].

A título exemplo, na Figura 3 apresenta-se a evolução das extensões medidas desde a construção numa secção (S14) da viga de um pórtico desta estrutura.

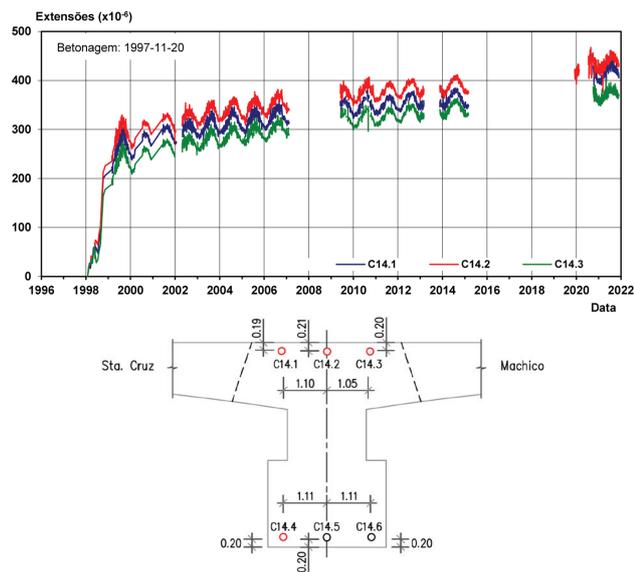


Figura 3 Evolução das extensões do betão

Importa referir que a maioria dos termómetros e extensómetros se encontram 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 instalado.

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 exceção 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 4 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 cinco 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 4).



Figura 4 Junta de dilatação principal: vista geral e detalhe da instrumentação

Na Figura 5 apresentam-se os movimentos da junta de dilatação principal ao longo de um ano, entre janeiro de 2020 e novembro de 2021, juntamente com a temperatura do ar e no interior do betão (T81.1). 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.

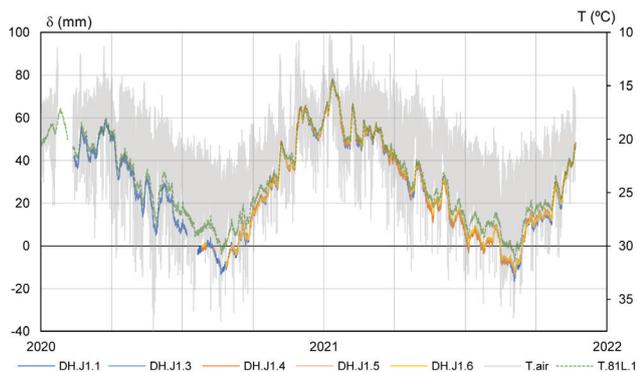


Figura 5 Movimentos da junta de dilatação principal

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 óptica e a um sistema de correlação digital de imagem.

4.3.2 Medição de acelerações

A medição das acelerações tem como objetivo 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 procurando quantificar 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 6. A Figura 7 é constituída pela zona instrumentada da viga central do pórtico P19, que inclui dois acelerómetros, bem como os sensores de fibra óptica e o padrão de Correlação Digital de Imagem descrito adiante na secção 4.3.4.

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 8 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.

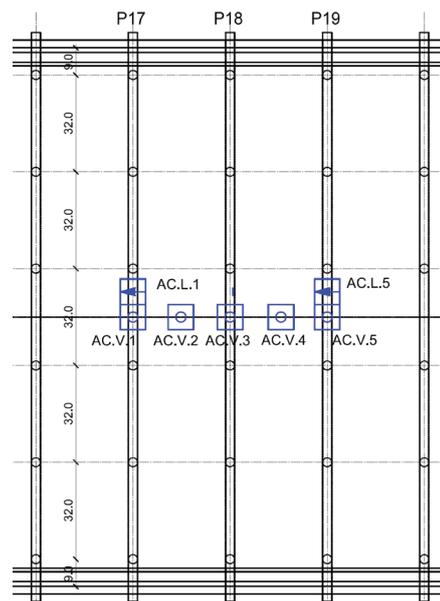


Figura 6 Posicionamento dos acelerómetros

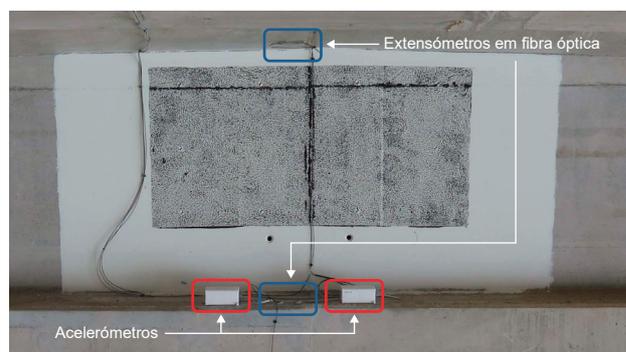


Figura 7 Instrumentação da viga do pórtico P19

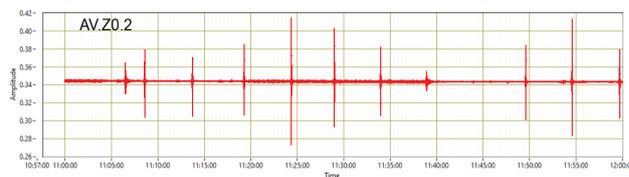


Figura 8 Registo das acelerações verticais em 2020-10-01

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 8. 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 9). Consequentemente, são obtidos os parâmetros modais (frequência natural, coeficiente de

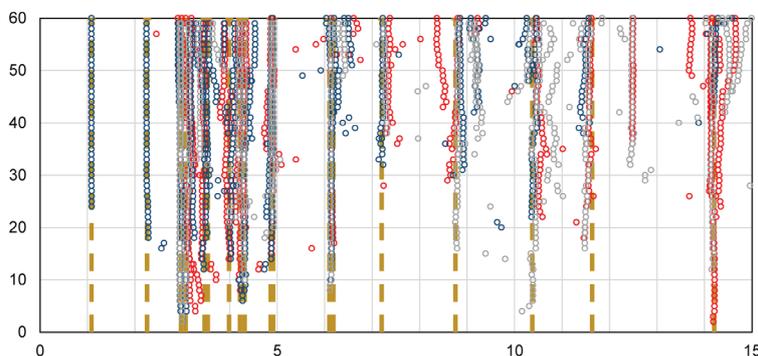


Figura 9 Diagrama de estabilização das acelerações verticais

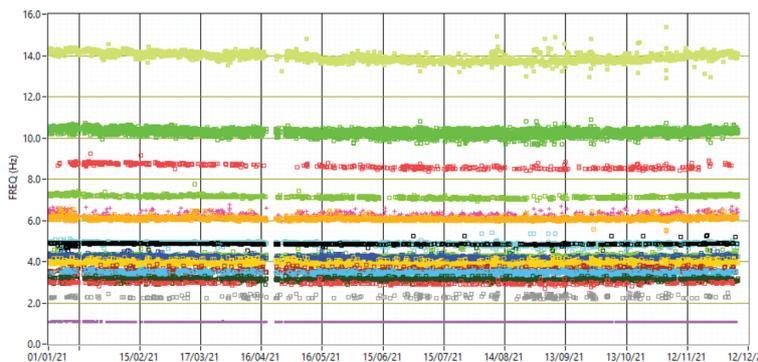


Figura 10 Frequência dos modos de vibração verticais

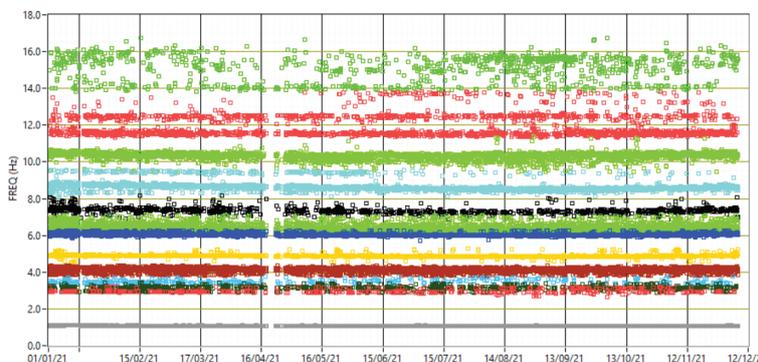


Figura 11 Frequência dos modos de vibração longitudinais

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 10, relativamente aos modos verticais, e na Figura 11 para os modos longitudinais. Devido às características da estrutura, nomeadamente o facto de ser uma estrutura contínua com um elevado número de tramos (32×32 m) e uma grande largura (178 m), existe um número considerável de modos de vibração com frequências muito próximas, como se pode verificar, por exemplo, nos intervalos de 2 Hz a 5 Hz e de 6 Hz a 8 Hz.

As frequências e coeficientes de amortecimento identificados ao longo do tempo permitirão a avaliação da evolução do comportamento dinâmico da estrutura.

4.3.3 Fibra óptica

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

Para este efeito foram instalados 8 extensómetros em fibra óptica, 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 7. Estes extensómetros foram instalados na direção longitudinal dos pórticos, portanto na direção 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 óptica.

4.3.4 Correlação digital de imagem

Complementarmente à medição de extensões em regime dinâmico por extensómetros em fibra óptica, 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].

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, respetivamente, apontados para as secções alvo, nas quais foram pintados padrões (Figura 7) 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 12). Os sistemas comunicam através de fibra óptica com computadores instalados nas imediações da pista que controlam o processo de aquisição.

A partir do momento em que o sistema de aquisição entra em funcionamento, são continuamente adquiridas imagens da zona onde foi aplicado o padrão. A primeira imagem é guardada em memória e serve de referência, e para além desta são sempre

mantidas em memória as últimas 60 imagens. À medida que cada imagem é capturada, uma pequena região desta é comparada com a região homóloga da referência com um algoritmo de correlação digital. Se for detetado um deslocamento de aproximadamente 1 pixel, é sinalizado ao sistema que foi detetado um evento e repete-se o processo.



Figura 12 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 subpixel [7], estimando-se que a resolução obtida seja aproximadamente 1/20 do pixel, o que corresponde neste caso a 0,026 mm.

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 13 mostra o deslocamento ao longo do tempo referente a um mesmo evento, identificado por meios independentes como uma aterragem, para os dois pórticos. Pode verificar-se que a forma das curvas é semelhante, assim como os valores atingidos.

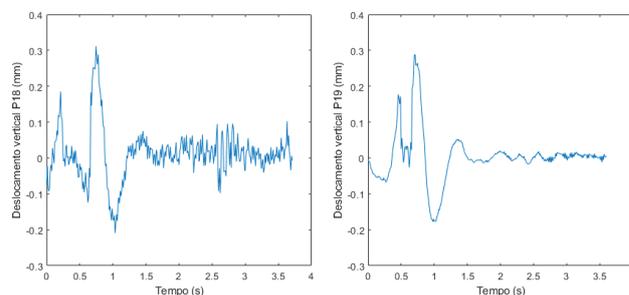


Figura 13 Deslocamento (valores positivos correspondem a uma descida do tabuleiro) ao longo do tempo para o mesmo evento nos dois pórticos, com base temporal não síncrona entre as duas representações

5 Aquisição e transmissão de dados

O sistema de aquisição de dados relativos à monitorização do comportamento estático da estrutura foi totalmente renovado, recorrendo a loggers Datataker DT85G e a diversos módulos de expansão de canais CEM20 [6][5], permitindo a realização automática das medições e da transmissão de dados.

As exigências da aquisição dinâmica, nomeadamente no que se refere à frequência de aquisição, tornaram necessário o recurso a um sistema específico para este efeito. Foi assim instalado um sistema de aquisição composto por uma unidade concentradora de dados Q.station 101 e por unidades digitalizadoras de dados Q.bloxx da marca Gantner Instruments [8].

Por outro lado, a utilização de sensores em fibra óptica requer um sistema de aquisição dedicado, específico para este tipo de sensores. Para este efeito, foi instalada uma unidade de aquisição FS22 Industrial BraggMeter com capacidade para aquisição com uma frequência até 1000 Hz [9].

A transmissão de dados entre os diversos data loggers e os serviços de aquisição e tratamento de dados que correm num computador industrial, instalado no centro de manutenção da ANAM, é assegurada por uma rede local de comunicação de dados, com topologia física em bus estendido e transmissão de sinais por fibra óptica. A rede em fibra óptica permite por um lado o isolamento galvânico entre as diversas secções do sistema de aquisição de dados e a imunidade da comunicação a eventuais interferências eletromagnéticas, e por outro, dado se monitorizar uma estrutura com tão grande extensão, garantir a largura de banda necessária para a elevada frequência de aquisição associada à monitorização dinâmica.

A cópia de segurança dos dados obtidos é feita diariamente. Presentemente a ANAM está a desenvolver uma base de dados que integra todas as informações relevantes sobre o estado de integridade estrutural da pista do Aeroporto Madeira.

O acesso remoto ao computador industrial é efetuado através de uma rede VPN, possibilitando a gestão do sistema de monitorização instalado na pista e a análise preliminar dos dados obtidos, sem comprometer a segurança da rede local de comunicação.

6 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 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 comparar os 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. 8th 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] Barros F.; Aguiar, S.; Sousa P. J.; Cachaço A.; Ramos N. V.; Tavares P. J.; Moreira P.; Xu M.; Santos L. O.; Franco E., 2021 – Displacement monitoring of crossbeams in an airport runway extension using digital image correlation. ICSI 2021 The 4th International Conference on Structural Integrity. Structural Integrity Procedia.
- [6] Thermo Fisher Scientific, 2017 – DT80 Range User's Manual (UM-0085-B09). Australia.
- [7] Barros, F.; Sousa, P. J.; Tavares, P. J.; Moreira, P. – "Digital image correlation through image registration in the frequency domain," The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, vol. 53, no. 8, p. 575-583, 2018.
- [8] GANTNER INSTRUMENTS GmbH, 2011 – Q.series / e.series System Guide. Vers.No.1.31.
- [9] HBM FiberSensing, 2017 – FS22 DI. Industrial BraggMETER DI. User Manual.