

Identificação de Dano baseada na Totalidade da Informação Espectral: Aplicações



Luís F. Ramos*

Prof. Auxiliar
 ISISE – Universidade do
 Minho
 Guimarães
 lramos@civil.uminho.pt



Giovanna Masciotta

Aluno de Doutoramento
 ISISE – Universidade do
 Minho
 Guimarães
 mgm@civil.uminho.pt



Paulo B. Lourenço

Prof. Catedrático
 ISISE – Universidade do
 Minho
 Guimarães
 pbl@civil.uminho.pt



Marcello Vasta

Prof. Associado
 Università G. D'Annunzio
 di Chieti-Pescara
 Pescara
 m.vasta@unich.it

SUMÁRIO

O tema da identificação de dano (detecção e localização) em estruturas através de métodos não destrutivos recebeu, ao longo das últimas décadas, um interesse acrescido em resultado de um significativo número de estruturas monitorizadas, tais como pontes ou edifícios históricos de elevado interesse patrimonial. Vários métodos de identificação de dano têm sido sugeridos com base em alterações dos parâmetros dinâmicos (e.g. frequências naturais ou modos de vibração), sempre que a matriz de rigidez ou de massa seja alterada no sistema. Contudo, o problema da identificação de dano é complexo, não havendo, até ao momento, um método ou um conjunto de métodos que resolva o problema. O presente artigo apresenta um método de identificação baseado na utilização da totalidade da informação espectral dentro de uma gama de frequências de interesse, obtida por ensaios de vibração ambiente (sem medir as excitações). O método é aplicado a três casos de estudo. Os resultados demonstram que o método baseado na utilização da totalidade da informação espectral poderá ser um importante contributo para a identificação do dano em estruturas.

Palavras-chave: identificação de dano, identificação dinâmica, método espectral.

1. INTRODUÇÃO

A identificação do dano estrutural na sua fase precoce recebeu nas últimas quatro décadas uma especial atenção da comunidade técnica e científica. Devido ao elevado custo de construção e de conservação das infraestruturas de engenharia e para evitar efeitos irreversíveis do dano acumulado, é prática corrente a realização de inspeções regulares para aferir a segurança estrutural com o objetivo de programar intervenções de conservação e manutenção a custos controlados. Adicionalmente, a possibilidade de identificar dano é extremamente importante quando se trata da preservação e conservação do património arquitetónico com valor patrimonial. Neste contexto, o desenvolvimento e a utilização de técnicas de identificação de dano não destrutivas desempenha um papel primordial para o diagnóstico, monitorização, avaliação da segurança e apoio à decisão de intervenção.

As anteriores razões explicam o crescente interesse pelos métodos de identificação de dano baseados na medição de vibrações. O conceito por detrás destas técnicas é que os parâmetros modais, nomeadamente frequências naturais, modos de vibração e amortecimento modal, são propriedades intrínsecas das estruturas (i.e., dependem da sua geometria, condições de fronteira e das propriedades mecânicas dos materiais) e são independentes das forças ou cargas que atuam sobre o sistema. Isto significa que as propriedades dinâmicas mudarão se as propriedades físicas (massa e rigidez), ou as condições de contorno da estrutura, sofrerem alterações. Por essa via, vários métodos foram abordados na literatura estudando alterações no sistema que conduzam a variações nas características dinâmicas. Contudo, o problema demonstra-se ser complexo, uma vez que nenhum método parece ser eficiente o suficiente para identificar dano em qualquer tipo de estrutura.

Assim, um primeiro objetivo do presente trabalho é a exploração de um método de identificação de dano baseado na totalidade dos modos espectrais, aplicável a qualquer tipo de estrutura com qualquer fonte de excitação. O segundo objetivo é apresentar algumas aplicações da técnica para estruturas de alvenaria sujeitas a diferentes cenários de dano. Os resultados obtidos evidenciam a potencialidade do método proposto para constituir uma ferramenta promissora no campo da identificação de dano.

2. A IDENTIFICAÇÃO DE DANO

2.1 Classificação geral

Os métodos de identificação de danos podem ser divididos em dois grandes grupos: os métodos globais e os métodos locais. O primeiro grupo é baseado em alterações de características globais das estruturas, enquanto o segundo é baseado em inspeções visuais e ensaios localizados. Apesar de sua precisão, as abordagens locais mais convencionais, tais como a tomografia computadorizada, o varrimento a laser, os métodos acústicos e de ultrassons, requerem um conhecimento a priori da localização do dano. A localização exata é

difícil de determinar quando se lida com grandes e complexas estruturas, sobretudo em zonas inacessíveis. Isso significa que, antes de recorrer às chamadas técnicas locais, a primeira fase do processo de identificação de dano deve ser dedicada à aplicação de métodos globais fiáveis para ser possível identificar as áreas-alvo. As técnicas de identificação de dano baseadas na análise de vibrações enquadram-se nas técnicas globais.

As técnicas baseadas em vibrações podem ser classificadas de acordo com o efeito do dano nas estruturas ou com o nível de identificação que se pretende atingir. No que diz respeito ao efeito dos danos, estes métodos podem ser classificados em lineares e não-lineares, de acordo com o comportamento que caracteriza a estrutura após a ocorrência de danos. Os métodos lineares podem ser distinguidos em modais ou não-modais, dependendo da utilização ou não de parâmetros modais para inferir sobre o dano. Por fim, os métodos modais também podem ser distinguidos em função da necessidade ou não de utilizar modelos numéricos (e.g. modelo de Elementos Finitos com capacidade de simular o dano).

Relativamente aos níveis de identificação de dano, os métodos podem ser classificados de acordo com a seguinte ordem hierárquica [1]:

- Nível 1 (Deteção) – determinação da presença de dano na estrutura;
- Nível 2 (Localização) – determinação da posição geométrica do dano;
- Nível 3 (Avaliação) – avaliação e quantificação da severidade do dano;
- Nível 4 (Prognóstico) – estimativa da vida útil da estrutura em serviço.

Esta classificação foi recentemente alargada com a introdução de um novo nível intermédio (Classificação) entre a Localização e Avaliação [2, 3]. Este nível adicional refere-se à determinação do tipo de dano presente na estrutura e é muito importante para prever a vida residual em serviço. No entanto, quando se trata de estruturas de alvenaria, a resolução dos problemas de nível 1, 2 e 3 pode revestir-se de elevadas dificuldades, uma vez que se tratam de estruturas de complexidade elevada, quer em termos de geometria, quer em termos do comportamento dos materiais.

2.2 Métodos de identificação adotados

Um grande número de trabalhos foi já publicado sobre métodos de identificação de dano baseados em vibrações. Destacam-se os trabalhos elaborados por Doebling et al.[4], Carden e Fanning [5] e Fan e Qiao [6]. A maior parte dos métodos assenta nas variações das frequências naturais como um "indicador de dano". Contudo, as variações de frequência não fornecem informação espacial do dano (localização), além de que essa variação poderá ser pouco significativa ou advir de variações dos parâmetros ambientais, tais como a temperatura e humidade. Pelo contrário, os métodos baseados nas alterações nos modos de vibração e/ou curvaturas modais tendem a ser mais adequados para a localização do dano. Também é possível a conjugação da utilização das frequências e dos modos de vibração. Consequentemente e para que a utilização deste grupo de métodos seja possível, coloca-se

o problema da identificação de um elevado número de modos de vibração na presença de estruturais complexas (modos de vibração também complexos) e pesadas, com dificuldades inerentes às técnicas experimentais para excitar os modos de vibração mais elevados. Relativamente ao amortecimento, embora se assuma que este parâmetro está intrinsecamente associado a fenómenos de dissipação de energia (e.g. existência de fendas nas estruturas), as dificuldades inerentes para a sua determinação experimental, i.e. grande variabilidade de resultados, leva a que não seja comum a sua utilização para a identificação de dano.

Portanto, a maior parte dos métodos disponíveis na literatura baseia-se na utilização da informação modal, quer das frequências naturais, quer nos modos de vibração (deslocamentos modais ou curvaturas modais). Todavia, estes métodos retiram apenas pontos singulares da informação espectral, i.e. uma “ínfima” parte da informação medida da resposta dinâmica da estrutura. No domínio da frequência, apenas a informação espectral dos picos é processada, ao passo que ao longo da gama de frequências de interesse toda a restante informação espectral é desprezada. Este facto deixa uma pergunta por responder: será possível utilizar toda a informação espectral da identificação dinâmica para comparar dois cenários com condições estruturais diferentes? Por outras palavras, será a restante informação espectral sensível ao dano estrutural?

2.3 Metodologia proposta

O método proposto no presente artigo tenta responder às anteriores perguntas. O conceito básico por detrás da metodologia assenta no pressuposto que o dano pode ser detetado e localizado a partir da totalidade dos valores e vetores próprios espectrais, através da decomposição de valores singulares no domínio da frequência, dada pela seguinte equação:

$$S_X(\omega) = \Psi_X(\omega) \Lambda_X(\omega) \Psi_X^T(\omega)^* \quad (1)$$

em que $S_X(\omega)$ é a matriz de densidade espectral da resposta (PSD), $\Lambda_X(\omega)$ é uma matriz diagonal que contém os valores singulares reais positivos por ordem decrescente e $\Psi_X(\omega)$ é uma matriz complexa ortogonal, cujas colunas contêm os valores singulares. Cada valor próprio $\lambda_j(\omega)$ indica a energia de um determinado modo de vibração a uma certa frequência ω . Cada vetor próprio $\psi_j(\omega)$ é um modo de vibração estimado para um determinado valor próprio (frequência), e depende das coordenadas modais do sistema, proporcionando informação espacial útil para localizar o dano. O número de graus de liberdade medidos experimentalmente é igual à dimensão da matriz $\Psi_X(\omega)$ e na ótica da identificação de dano está intrinsecamente ligado à resolução espacial para localizar o mesmo.

Dadas duas condições estruturais diferentes (com e sem dano), a identificação é determinada calculando um índice de dano baseado na combinação das grandezas anteriormente decompostas no domínio da frequência, sob a seguinte forma:

$$\Delta\psi = \sum_{j=1}^n \left\| \sum_{i=1}^m \left[\psi_j^d(\omega_i) \cdot \sqrt{\lambda_j^d(\omega_i)} \right] - \sum_{i=1}^m \left[\psi_j^u(\omega_i) \cdot \sqrt{\lambda_j^u(\omega_i)} \right] \right\| \quad (2)$$

em que $\psi(\omega)$ são os vetores singulares para cada frequência ω , $\lambda(\omega)$ são os valores próprios das correspondentes frequências, m corresponde à gama de frequências de interesse, n representa o número de modos e os índices u e d correspondem às condições estruturais de sem dano e com dano, respetivamente. Dependendo do nível de ruído das medições, este índice pode ser determinado pesando os parâmetros decompostos ao longo da gama de frequências, ou isolando gamas de frequência de interesse (e.g. considerando apenas as frequências naturais e modos de vibração ou bandas próximas das frequências naturais). No caso de múltiplos cenários de dano, poder-se-á determinar um índice de dano relativo entre os vários cenários, de forma a melhor acompanhar a evolução do mesmo.

Apesar dos pressupostos do método espectral não serem completamente novos na literatura, não há informações sobre a utilização da totalidade da informação espectral para a deteção e localização do dano. Portanto, o presente método pretende ser mais uma contribuição para a resolução do complexo problema da identificação de dano [7-9].

3. APLICAÇÕES EM AMBIENTE LABORATORIAL

Para validar a eficiência da metodologia proposta, foram utilizadas três estruturas: um arco no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho (LEST); um modelo ensaiado na mesa sísmica do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC); e uma chaminé industrial em Guimarães. Todas as estruturas foram construídas em alvenaria estrutural e ensaiadas dinamicamente entre dois ou mais cenários de dano.

3.1 Arco em alvenaria

3.1.1 Descrição do modelo

O arco foi construído com tijolos cerâmicos de baixa resistência ($100 \times 50 \times 25 \text{ mm}^3$) e com juntas de argamassa à base de cal (5 mm de espessura). A estrutura foi montada num cimbre com 770 mm de raio, formando um arco com 1500 mm de vão, 450 mm de largura e 50 mm de espessura. O arco apoiava-se em dois blocos de betão fixos ao pavimento por intermédio de parafusos [10], ver Figura 1.

3.1.2 Dano observado

No arco foram aplicados oito cenários de dano progressivo (DS_1 a DS_8) através de uma carga estática (carga e descarga) a um quarto de vão. A sucessão de carregamentos originou quatro fendas (quatro rótulas) no arco. A primeira fenda ficou visível a partir do carregamento/cenário de dano DS_5 e as restantes apenas no último cenário (DS_8). Salienta-se que as fendas eram facilmente visíveis quando o arco estava carregado. Na descarga, as fendas fechavam, sendo muito difícil a sua perceção visual. A localização das fendas (c) encontra-se apresentada na

Figura 1. Note-se que a designação c_1 a c_4 é aleatória, uma vez que foi impossível determinar a sequência do aparecimento das fendas, com exceção da fenda c_1 .

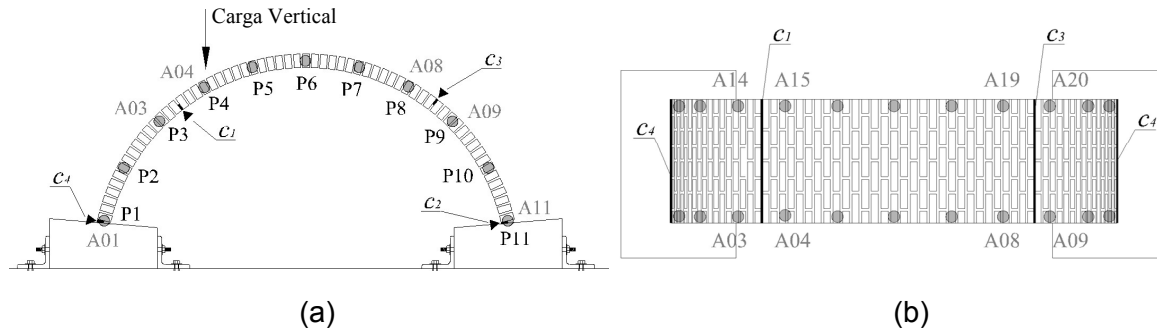


Figura 1. Geometria do arco e localização das fendas [10]: (a) vista frontal; e (b) planta.

A resposta dinâmica do arco foi medida para o cenário de referência (RS) e ao longo dos sucessivos cenários de dano (DS_1 a DS_8). Foram utilizadas técnicas de identificação modal com recurso à excitação ambiente e com recurso a impactos aleatórios na superfície do arco (sem medir as forças). Foram medidas acelerações em 22 pontos equitativamente distribuídos pelos dois bordos do arco, nas direções tangencial e normal, e deformações/extensões em 11 pontos distribuídos ao longo da linha média do arco, formados por pares de extensómetros colocados no intradorso e extradorso, a fim de estimar diretamente os modos de vibração de curvatura.

3.1.3 Análise do dano

Após calcular os auto-espectros e espectros cruzados da resposta do sistema, foram construídas três matrizes de densidade espectral de potência: duas de dimensão $[22 \times 22]$ para a resposta em acelerações, na direção normal e tangencial a cada ponto do arco, e uma de $[11 \times 11]$ referente às leituras da extensometria (curvaturas do arco). Para a determinação dos parâmetros modais, cada matriz foi decomposta no domínio da frequência em valores e vetores próprios de acordo com a Eq.(1). No presente artigo, apenas se apresentam os resultados obtidos a partir das leituras da extensometria.

Na Tabela 1 apresenta-se, para os quatro primeiros modos de vibração, uma comparação entre os valores obtidos para as frequências naturais ao longo dos sucessivos cenários de dano e, para cada cenário, entre os resultados obtidos pelo método da densidade espectral de potência (PSD) (seleção de picos) e o método de identificação estocástica por subespaços (SSI) [11]. Entre os métodos de identificação modal, verifica-se uma boa concordância, sendo que as diferenças observadas se devem à relativa reduzida resolução em frequência do método de densidade espectral de potência para com o método SSI. Quanto à variação das frequências, constata-se uma diminuição ao longo dos sucessivos cenários, com especial ênfase para uma queda mais acentuada nos primeiros modos a partir do cenário DS_5 .

Após a primeira verificação da qualidade dos resultados em termos de frequências naturais, foi calculado o índice de dano baseado na totalidade da informação espectral, dado pela Eq.(2),

para a deteção e localização do dano. Primeiramente, o índice foi calculado tendo como cenário de referência o cenário sem dano (RS) e, posteriormente, tomando como referência o cenário de dano anterior, numa tentativa de análise relativa da progressão do dano ao longo dos ensaios. Além disso, para reduzir o ruído presente nos dados e para evitar resultados mal condicionados, foi reduzida a largura da banda de frequência de interesse no cálculo do índice de dano.

Tabela 1. Frequências naturais: comparação entre os resultados das densidades espectrais de potência (PSD) e a identificação modal estocástica por subespaços (SSI) [10].

DS	Modo 1			Modo 2			Modo 3			Modo 4		
	ω_{PSD} (Hz)	ω_{SSI} (Hz)	Δ_{ω} (%)	ω_{PSD} (Hz)	ω_{SSI} (Hz)	Δ_{ω} (%)	ω_{PSD} (Hz)	ω_{SSI} (Hz)	Δ_{ω} (%)	ω_{PSD} (Hz)	ω_{SSI} (Hz)	Δ_{ω} (%)
RS	35.13	35.21	-0.2	66.62	66.58	+0.1	71.21	71.16	+0.1	124.8	124.42	+0.2
DS ₁	35.11	35.17	-0.2	66.77	66.67	+0.2	71.08	71.22	-0.2	125.0	124.55	+0.4
DS ₂	34.99	35.17	-0.5	66.06	66.72	+0.5	71.44	71.25	+0.3	126.2	124.64	+1.3
DS ₃	35.02	35.11	-0.3	66.79	66.73	+0.1	70.77	71.14	-0.5	125.7	124.65	+0.8
DS ₄	35.17	34.83	+1.0	66.31	66.45	-0.2	71.38	70.76	+0.9	125.6	124.49	+0.9
DS ₅	33.34	33.20	+0.4	65.03	64.62	+0.6	68.83	68.33	+0.7	123.7	123.10	+0.5
DS ₆	32.56	32.42	+0.4	64.07	63.84	+0.4	67.54	67.18	+0.5	121.8	122.14	-0.3
DS ₇	30.53	30.17	+1.2	61.61	61.29	+0.5	64.90	64.06	+1.3	121.4	120.26	+0.9
DS ₈	26.66	26.13	+2.0	55.53	55.28	+0.5	61.33	61.33	+0.5	119.2	117.59	+1.4
Média	-	-	+0.7	-	-	+0.3	-	-	+0.6	-	-	+0.7

Os resultados obtidos para o índice de dano baseado na totalidade da informação espectral encontram-se apresentados na Figura 2. Tal como pode ser observado, quando se compara cada cenário de dano com o de referência sem dano (RS), o método indica a presença de dano exatamente nos graus de liberdade mais próximos da ocorrência das fendas (pontos P1, P4, P8 e P11), com a exceção do ponto P1 (apoio esquerdo) para o cenário de dano DS₅ (ver também a Figura 1). Quanto à comparação relativa, o índice consegue identificar nos pontos P1, P3, P8/P9 e P11, e de acordo com uma sequência de dano: as primeiras fendas aparecem nos pontos P3 e P9 (DS₄ – DS₅) e, só depois, nos pontos P1 e P11 (DS₅ – DS₆). Nas últimas comparações relativas, verifica-se uma tendência para um valor elevado do índice para a posição P7. Contudo, não foi possível averiguar no modelo experimental a existência de uma fenda mais próxima da chave do arco.

Pela análise efetuada e apesar de não se possível identificar a ordem da abertura das fendas, o dano no arco foi detetado e localizado pelo índice de dano baseado na totalidade da informação espectral, ainda que a comparação relativa dos últimos cenários tenha fornecido resultados não validados experimentalmente. Salienta-se, também, a sensibilidade ao dano por parte da informação dinâmica obtida por via da extensometria.

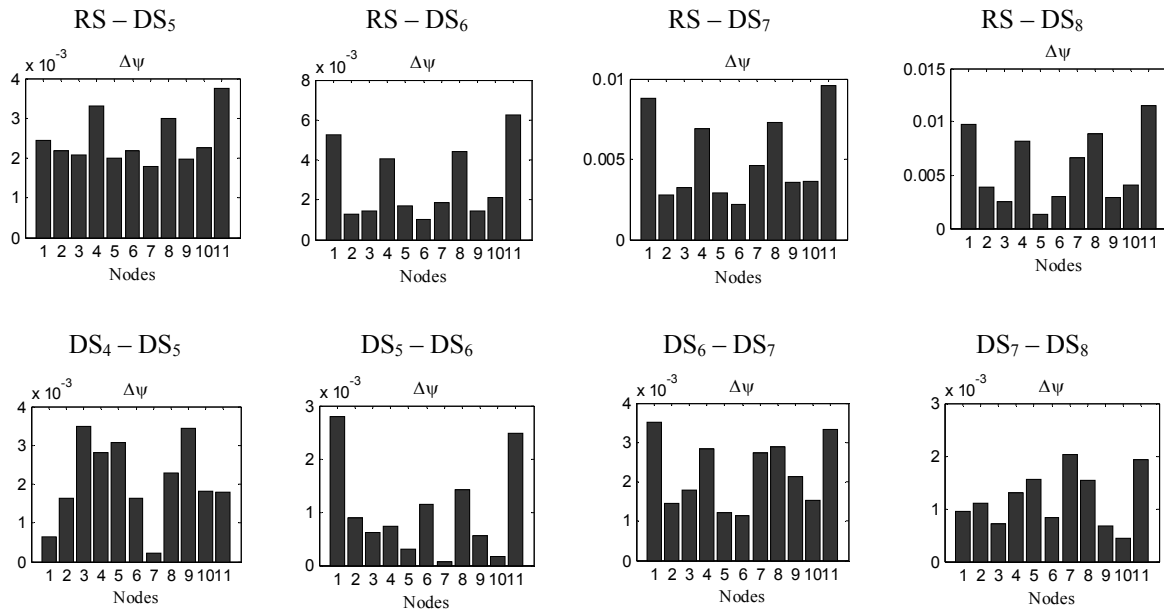


Figura 2. Identificação de dano pelo índice espectral.

3.2 Modelo na mesa sísmica

3.2.1 Descrição do modelo

O modelo desta segunda análise resultou do ensaio na mesa sísmica do LNEC no âmbito do projeto HiLoTec. Tratou-se de um modelo construído com blocos de terra compactada com estabilizante hidráulico, assentes em junta seca. As dimensões globais em planta aproximavam-se dos $3.36 \times 3.64 \text{ m}^2$ e a altura atingiu os 3.3 m no cume da cobertura. As paredes exteriores de 28 cm de espessura eram de dois panos, enquanto a parede divisória interior era de um pano único com 14 cm de espessura. Duas fachadas paralelas eram em parede de empena cerrada e as restantes continham aberturas (portas e janelas). As paredes foram encimadas com uma viga-cinta em betão armado ($0.28 \times 0.15 \text{ m}^2$) ligada à estrutura da cobertura formada por elementos de madeira em pinho nacional (ver Figura 3).

O modelo foi ensaiado na mesa através da aplicação de uma sucessão de sismos não correlacionados nas duas direções principais em planta e com intensidades crescentes, perfazendo nove fases de ensaio (DS₁ a DS₉). No final de cada fase de ensaio foi realizada uma identificação modal, recorrendo a um sinal de excitação de base do tipo impulsivo, aplicado de forma controlada nas duas direções do modelo, com uma aceleração máxima na mesa de 0.06g e uma duração total de 250s. Adicionalmente, antes da execução de qualquer ensaio sísmico, também se efetuou uma identificação modal que serviu de referência sem dano na estrutura (RS).

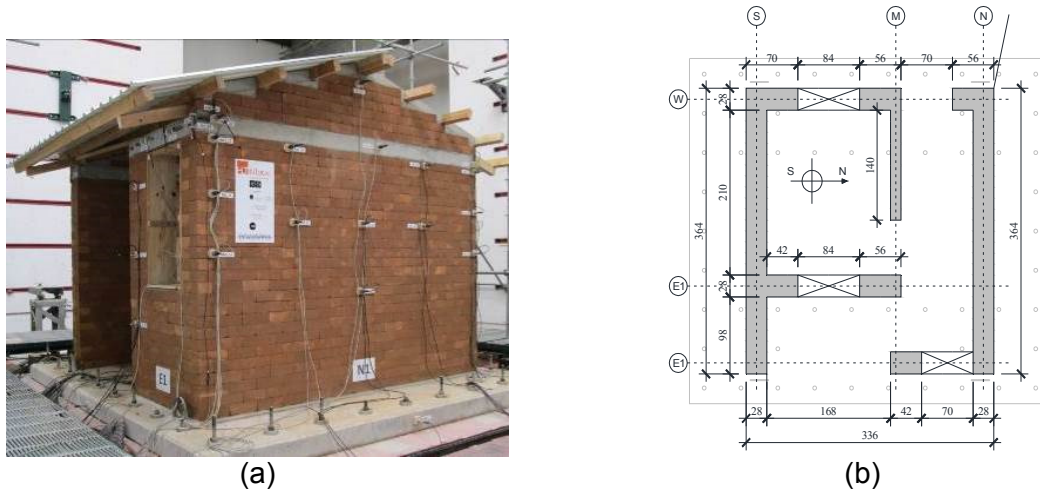


Figura 3. Modelo em blocos de terra compactada: (a) modelo na mesa sísmica do LNEC; e (b) planta estrutural.

De acordo com uma análise numérica modal preliminar, seriam esperados modos de vibração que mobilizassem os deslocamentos para fora do plano das paredes. Assim, foram colocados 54 acelerómetros no modelo: 41 na direção Norte-Sul (transversal, ver também Figura 3) e nos panos com possibilidade de maior deformação para fora do seu plano; e 11 na direção Oeste-Este (longitudinal). Informação detalhada acerca do modelo e da campanha experimental pode ser encontrada em [9].

3.2.2 Dano observado

A evolução do dano no modelo foi acompanhada através de inspeções visuais e levantamentos fotográficos em todos os cenários de dano (fases de ensaio). Até ao cenário DS₆, nomeadamente até se atingir a aceleração de base regulamentar pretendida de 0.33g, não se verificaram fendas significativas na estrutura, excetuando-se uma fenda horizontal na parede interior de pano simples (ver Figura 3b), na ligação com a viga-cinta, fazendo com que a parede vibrasse livremente como um pilar em consola. Após o cenário de dano DS₆, o modelo começou a perder o comportamento similar ao de uma caixa fechada, ocorrendo fendas nas paredes na ligação à viga-cinta, especialmente a meio do desenvolvimento das paredes de empena. Adicionalmente, dano severo foi observado no cenário DS₉ num dos nembos/pilares da fachada principal (Este) e nos cunhais Sudeste e Sudoeste (ver Figura 4).



Figura 4. Padrão de fendilhação: a) parede interior; b) nembro/pilar da fachada Este; c) cunhal Sudeste; e d) cunhal Sudoeste.

3.2.3 Análise do dano

Numa primeira análise, estimaram-se os parâmetros modais ao longo dos vários cenários. A Figura 5 apresenta os resultados em termos de valores próprios para os cenários RS, DS₃, DS₆ e DS₉ para direção longitudinal e transversal. Cada máximo dos valores singulares corresponde às frequências naturais de vibração da estrutura (método da seleção dos picos). Apesar da existência de modos locais e da natureza do sinal de excitação utilizado permitir identificar com clareza apenas os primeiros modos em cada direção, é possível observar que, em cada fase do ensaio sísmico, se verifica um decréscimo significativo das frequências em contraponto com o aumento da intensidade dos sismos e consequente dano estrutural. Verificou-se, também, que a configuração modal variou à medida que a intensidade do dano aumentava, ocorrendo alternâncias na ordem dos modos de flexão para fora do plano com os de torção.

Num segundo passo da análise realizou-se o cálculo do índice de dano espectral de todos os cenários de dano (DS₁ a DS₉), tomando como referência, ora o cenário estrutural sem dano (RS), ora uma fase intermédia do ensaio sísmico. A Figura 6 apresenta apenas os resultados obtidos quando são comparados DS₃ com RS, DS₆ com DS₃ e DS₉ com DS₆. Os números nas abcissas nos gráficos da figura coincidem com os pontos medidos para fora do plano das paredes apresentados na Figura 7. Comparando as estimativas com o verificado experimentalmente, poder-se-á concluir que o índice de dano aponta para os pontos onde ocorreram danos mais significativos, nomeadamente na parede divisória interior (pontos 22, 23, 24, 25, 26), no nembro/pilar da fachada Este (pontos 5, 6 e 7) e o cunhal Sudoeste (ponto 2).

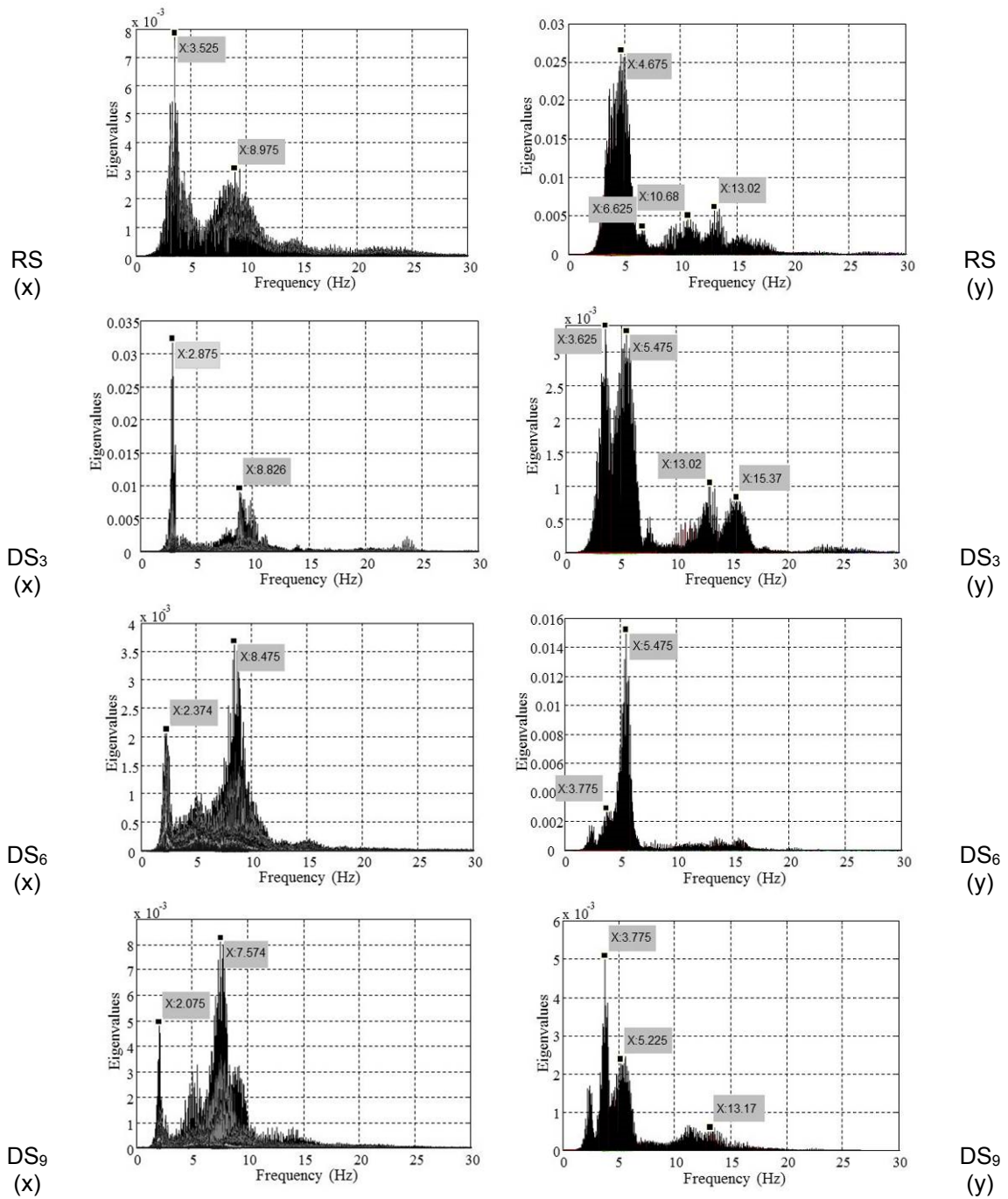


Figura 5. Identificação modal pelo método da densidade espectral de potência

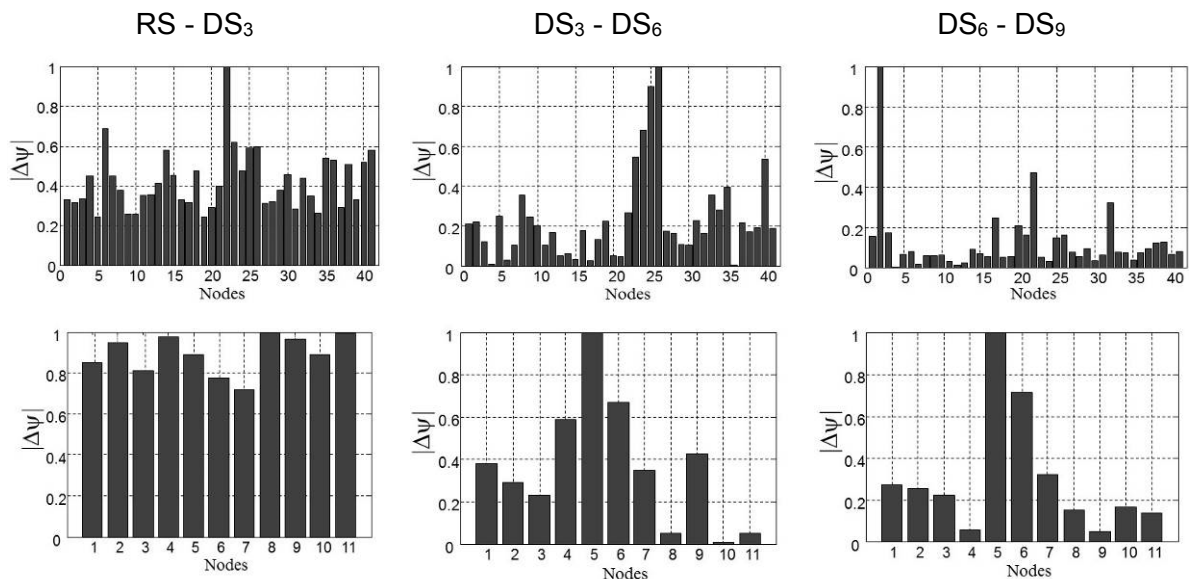


Figura 6. Índice espectral de dano: (em cima) na direção transversal (Norte-Sul); e (em baixo) na direção longitudinal (Este-Oeste).

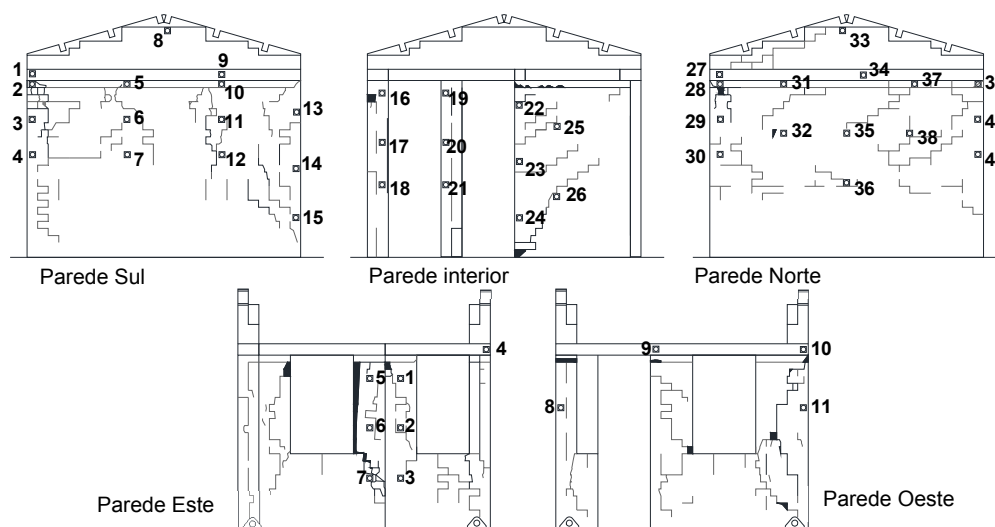


Figura 7. Pontos de leitura e localização do dano no último cenário (DS₉).

4. APLICAÇÃO A UM CASO REAL

A mesma metodologia foi aplicada a um caso real, nomeadamente a uma chaminé de uma antiga fábrica industrial no centro histórico da cidade de Guimarães, no atual Centro Avançado de Formação Pós-graduada, ver Figura 8a. A chaminé com 27 m de altura é uma típica chaminé industrial, construída com tijolos cerâmicos e juntas regulares de argamassa, com forma troncocónica no seu fuste, com diâmetro exterior variável desde a sua base até ao

topo entre os 2.93 m e os 0.94 m, respetivamente, e com espessura variável entre os 0.70 m e os 0.20 m. A chaminé apoia-se num bloco de fundação com geometria regular, onde se situa a boca da chaminé com 0.90×1.20 m.

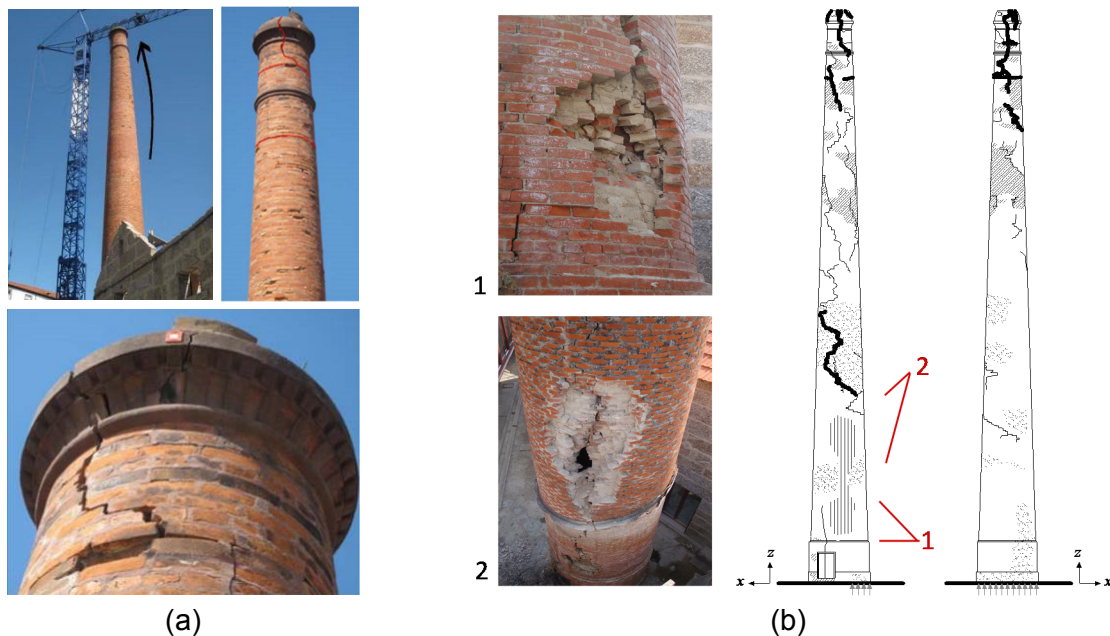


Figura 8. Danos estruturais: (a) deformação permanente e fendas na coroa da chaminé existentes antes do acidente; e (b) aberturas e fendas causadas pelo raio.

Durante a intervenção de adaptação da antiga fábrica para o centro de formação, a chaminé foi alvo de uma inspeção visual e de uma campanha de monitorização entre novembro de 2010 e junho de 2011, uma vez que esta já apresentava fendas e deformações permanentes (ver Figura 8a). Mas em julho de 2012 a chaminé foi atingida por um raio que causou duas aberturas significativas com perda de massa e o aumento da abertura das fendas existentes (ver Figura 8b). Após o acidente, a chaminé foi alvo de uma intervenção de reparação entre dezembro de 2012 e fevereiro de 2013. A reparação consistiu na reconstrução dos panos danificados, na selagem e injeção das fendas e na introdução de armadura nas juntas para coser as fendas verticais mais importantes. Antes e depois da intervenção foram realizados ensaios dinâmicos de identificação modal para avaliar a eficiência dos trabalhos, assim como analisar as diferenças entre as duas condições estruturais. Adicionalmente, foi instalado um sistema de monitorização dinâmico para analisar a evolução das propriedades modais durante a intervenção [8].

A descarga elétrica criou duas grandes aberturas na parte inferior, uma a 3 m da base e outra a 6 m, conforme se pode observar na Figura 8b. Adicionalmente, a abertura das fendas existentes na parte superior também sofreu aumento. Informação adicional acerca dos danos e da intervenção estrutural realizada poderá ser obtida em [12, 13].

A Tabela 2 apresenta os resultados para as frequências naturais, antes e depois da intervenção, para os 10 primeiros modos de vibração e através de dois métodos de

identificação modal. Salienta-se que as vibrações foram medidas em duas direções perpendiculares e horizontais em 5 níveis ao longo do fuste da chaminé (ver Figura 9). Para cada modo, o erro relativo entre os dois métodos é inferior a 0.8%, com exceção para o segundo modo da condição após a reparação, indicando uma boa concordância de resultados. Comparando a variação das frequências, antes e depois da intervenção, verifica-se que ocorreu um aumento do seu valor, especialmente para os modos superiores. Curiosamente, o valor das duas primeiras frequências naturais não sofreu alterações significativas, indicando que apenas os modos superiores são sensíveis ao dano existente na estrutura. O valor médio do aumento relativo das frequências, excluindo os modos 1, 2 e 10, foi igual a 8%.

Tabela 2. Resultados da identificação modal antes e depois da intervenção.

Modos de Vibração	Antes			Depois			Δ_{ω} [%]
	$\omega_{d,PSD}$ [Hz]	$\omega_{d,SSI}$ [Hz]	Erro _o [%]	$\omega_{u,PSD}$ [Hz]	$\omega_{u,SSI}$ [Hz]	Erro _o [%]	
1	1.02	1.02	0.29	1.02	1.02	0.29	< 0.1
2	1.15	1.15	0.17	1.08	1.10	-1.82	-4.3
3	3.21	3.20	0.31	3.37	3.39	-0.58	+5.9
4	3.65	3.65	0.08	3.75	3.73	0.54	+2.2
5	6.41	6.39	0.31	-	-	-	-
6	7.29	7.32	-0.41	7.83	7.79	0.51	+6.4
7	8.77	8.81	0.45	10.32	10.29	0.29	+16.8
8	11.49	11.40	0.79	12.49	12.51	-0.16	+9.7
9	12.29	12.31	-0.16	13.32	13.37	-0.37	+8.6
10	13.92	13.93	-0.07	13.55	13.53	+0.15	-2.9

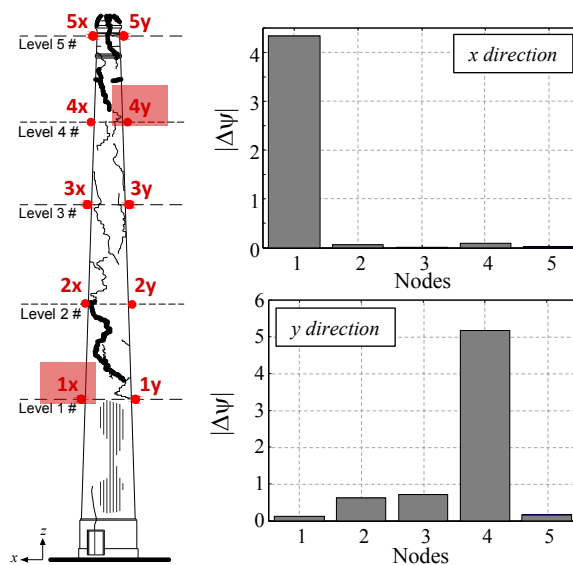


Figura 9. Identificação do dano pelo índice espectral.

O índice espectral de dano foi calculado separadamente para as direções x e y nos pontos assinalados na Figura 9. Os resultados, apresentados na mesma figura, evidenciam a existência clara de dano no nível 1 para direção x e no nível 4 para a direção y . Estes pontos correspondem aos locais onde foram observados danos significativos, embora as fendas mais significativas existissem entre os níveis 1 e 2 e 4 e 5. Salienta-se que a resolução espacial dos pontos de medida para identificação de dano não é a mais desejável, uma vez que não existe um número significativo de pontos fora das áreas com dano. Todavia, o nível 1 encontra-se próximo das grandes aberturas provocadas pela descarga elétrica. Resultados adicionais deste trabalho podem ser consultados em [13].

5. CONCLUSÕES

O presente artigo apresenta uma metodologia alternativa para a identificação de dano baseada na totalidade da informação espectral, nomeadamente pela determinação de um índice que combina os vetores e valores singulares obtidos pela decomposição no domínio da frequência das matrizes de densidade espectral da resposta estrutural. O índice é calculado numa determinada gama de frequências, comparando sempre duas condições estruturais distintas (e.g. com e sem dano).

A metodologia foi aplicada a dois modelos laboratoriais e a um caso real, todos eles referentes a estruturas de alvenaria com alterações da resposta dinâmica em função do dano existente. Pelas aplicações apresentadas, poder-se-á concluir que o método identificou dano com sucesso moderado, uma vez que para alguns cenários de dano a identificação (localização) não foi efetiva. Contudo, os resultados são animadores. Finalmente, a eficiência desta metodologia necessita de ser confrontada com outros métodos de identificação modal, assim como validada noutro tipo de estruturas, nomeadamente em estruturas reticuladas de betão armado, metálicas ou em pontes.

AGRADECIMENTOS

O modelo da mesa sísmica foi realizado no âmbito do projeto HiLoTec financiado pela Mota-Engil S.A. e pela Fundação António Manuel da Mota. Os autores agradecem à Eng^a Vânia Silva e à Eng^a Cláudia Ramos da Mota-Engil S.A., a possibilidade de construir o modelo e também ao Diretor do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Eng^o José Manuel Catarino Director do Departamento de Estruturas do LNEC, pela possibilidade de realizar o ensaio na mesa sísmica, e ao Eng.^o Alfredo Campos-Costa e ao Eng.^o Paulo Candeias por todo o apoio prestado durante a realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Rytter, "Vibrational based inspection of civil engineering structures," University of Aalborg, Denmark, 1993.

- [2] L. H. Yam, Y. J. Yan, and Z. Wei, "Vibration-based non-destructive structural damage detection," *Key Engineering Materials*, vol. 270–273, pp. 1446–1453, 2004.
- [3] Y. J. Yan, L. Cheng, Z. Y. Wu, and L. H. Yam, "Development in vibration-based structural damage detection technique," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, no. 5, pp. 2198–2211, Jul. 2007.
- [4] S. Doebling, C. Farrar, M. Prime, and D. Shevitz, "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review," LA-13070-MS Los Alamos National Laboratory, 1996.
- [5] E. P. Carden and P. Fanning, "Vibration Based Condition Monitoring: A Review," *Structural Health Monitoring*, vol. 3, no. 4, pp. 355–377, Dec. 2004.
- [6] W. Fan and P. Qiao, "Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study," *Structural Health Monitoring*, vol. 10, no. 1, pp. 83–111, Apr. 2010.
- [7] M.G. Masciotta, L.F. Ramos, P.B. Lourenço, and M. Vasta, "Damage detection on the Z24 bridge by a spectral-based dynamic identification technique", *Proceedings of the XXXII International Modal Analysis Conference (IMAC)*, Orlando, FL, February 3-6, 2014.
- [8] M.G. Masciotta, L.F. Ramos, P.B. Lourenço, and M. Vasta, "Structural monitoring and damage identification on a masonry chimney by a spectral-based identification technique", *Proceedings of the IX International Conference on Structural Dynamics (EURODYN)*, Porto, PT, June 30 - July 2, 2014.
- [9] M.G. Masciotta, P.B. Lourenço, L.F. Ramos, and M. Vasta, "Spectral-based damage identification technique on an earthen mock-up construction tested on a shaking table", *Proceedings of the 9th International Masonry Conference (IMC)*, Guimarães, PT, July 7-9, 2014.
- [10] L.F. Ramos, Damage identification on masonry structures based on vibration signatures, PhD Thesis, University of Minho, 2007.
- [11] B. Peeters and G. De Roeck, "Reference-Based Stochastic Subspace Identification for Output-Only Modal Analysis", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 13(6):855-878, 1999.
- [12] L.F. Ramos, T. Sturm, P.B. Lourenço, "Inspeção Estrutural de uma Chaminé do Centro de Formação Avançada – Guimarães", *Preliminar Report*, Department of Civil Engineering, University of Minho, Guimarães, PT, July 2012.
- [13] L.F. Ramos, M.G. Masciotta, P.B. Lourenço, M. Vasta, "SHM of a Masonry Chimney after a Lightning Accident", *Proceedings of the 9th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM)*, Stanford University, CA-USA, September 10-12, 2013.