

Estudo comparativo de métodos de análise do comportamento sísmico de uma chaminé de alvenaria

Comparative study of methods for analysing the seismic behaviour of a masonry chimney

Alexandre A. Costa
João Pacheco de Almeida
Loick Rosière
Valter Lopes
João Miranda Guedes

Resumo

A preservação das chaminés industriais, como parte integrante do património industrial, pressupõe um levantamento detalhado das suas características geométricas, mecânicas, estáticas e dinâmicas, para que se possa fazer uma correta avaliação do seu comportamento estrutural, nomeadamente sísmico e determinar necessidades de reforço. Este artigo apresenta um estudo relativo a uma chaminé industrial localizada na cidade do Porto com o intuito de: (i) identificar o comportamento dinâmico, recorrendo a técnicas in-situ, utilizando vibração livre e forçada, e acelerómetros tipo PCB e MEMS; (ii) determinar o comportamento sísmico, recorrendo a técnicas de simulação numérica linear com elementos de casca, e não linear material e geométrica com elementos de viga com secções discretizadas em fibras, utilizando os programas de análise estrutural SAP2000 e SeismoStruct, respectivamente. O estudo conclui sobre a eficácia de cada um dos 2 tipos de acelerómetros e técnicas de excitação dinâmica no estudo de chaminés industriais, e sublinha a importância da simulação não linear na identificação do comportamento sísmico desta tipologia de estruturas.

Abstract

The preservation of industrial chimneys, as part of the industrial heritage, requires a detailed survey of their geometric, mechanical, static and dynamic characteristics, to perform a correct assessment of their structural seismic behaviour, and evaluate reinforcement needs. This paper presents a study on an industrial chimney located in the city of Porto with the aim of: (i) identifying its dynamic behaviour, resorting to in-situ techniques using free and forced vibration, and PCB and MEMS type accelerometers; (ii) determining its seismic behaviour, using linear numerical simulation techniques with shell elements, and material and geometric non-linear simulation with beam elements with fibre sections, through SAP2000 and SeismoStruct structural analysis programs, respectively. The study concludes on the effectiveness of each of the 2 types of accelerometers and dynamic excitation techniques in the study of industrial chimneys, and underlines the importance of non-linear simulations when identifying the seismic behaviour of this type of structures.

Palavras-chave: Identificação dinâmica / Análise não linear / Alvenaria / Chaminé industrial

Keywords: Dynamic identification / Non-linear analysis / Masonry / Industrial chimney

Alexandre A. Costa

Eng. Civil / Prof.
NCREP, Lda. / ISEP
Porto, Portugal
alexandre.costa@ncrep.pt

João Pacheco de Almeida

Professor Auxiliar
IMMC, UCLouvain
Louvain-la-Neuve, Bélgica
joao.almeida@uclouvain.be

Loick Rosière

Estudante
UCLouvain
Louvain-la-Neuve, Bélgica
loick.rosiere@student.uclouvain.be

Valter Lopes

Eng. Civil
NCREP, Lda.
Porto, Portugal
valter.lopes@ncrep.pt

João Miranda Guedes

Eng. Civil / Prof.
NCREP, Lda. / FEUP
Porto, Portugal
jguedes@ncrep.pt

Aviso legal

Os conteúdos incluídos na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The contents included in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

AUTOR 1, N. [et al.] – Estudo comparativo de métodos de análise do comportamento sísmico de uma chaminé de alvenaria. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 22. ISSN 2183-8488. (julho 2023) 79-88.

1 Introdução

O património industrial tem uma importância fundamental na história dos povos, constituindo-se como elemento de memória da história e desenvolvimento dos processos de industrialização. Esta importância é realçada em “Os Princípios de Dublin” [1] e pela existência de organismos que lutam pela protecção e preservação do património industrial, como é exemplo o comité científico internacional do ICOMOS dedicado ao património industrial (ISCIH).

No âmbito da sua actividade, a empresa NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda., tem realizado inspecções e intervenções em chaminés industriais, a sua maioria construída em alvenaria de tijolo cerâmico maciço [2]. O presente estudo tem como objectivo determinar as técnicas de análise mais adequadas a estas tipologias estruturais, utilizando ferramentas mais avançadas e/ou alternativas de identificação do comportamento dinâmico e de análise do comportamento sísmico, nomeadamente usando modelos de comportamento não-linear material. Embora o vento possa ser a acção condicionante na verificação de segurança deste tipo de estruturas (onde se incluem fenómenos de ressonância e vortex shedding), a análise dos efeitos dessa acção encontra-se fora do âmbito desta investigação.

2 Apresentação do caso de estudo

2.1 Descrição da chaminé

A chaminé que foi seleccionada neste estudo localiza-se no Porto. Apresenta uma altura total de 17,95 m acima da cota do solo, divididos em 3 zonas distintas em altura: (i) uma base de planta quadrada com 1,96 m a 2,30 m de lado e cerca de 1,85 m de altura e; (ii) um fuste (corpo principal) de geometria troncocónica, com uma altura de 14,34 m e diâmetro exterior variável linearmente entre 1,58 m e 0,84 m; (iii) e uma coroa ou capitel (estrutura de remate superior) com cerca de 1,75 m de altura e um diâmetro exterior no topo com 0,84 m (de acordo com o levantamento geotérmico fornecido). A base possui uma pequena abertura na face Este, com secção aproximada de 0,40 × 0,60 m², que permite o acesso ao interior da chaminé. A chaminé não apresenta qualquer cinta metálica de confinamento estrutural, mas contém um para-raios no topo.

A altura total da chaminé (17,95 m) e a largura da base (2,30 m) conferem a esta estrutura uma esbeltez (rácio altura/ dimensão da base) de cerca de 7,8, um valor baixo, mas próximo dos valores limites inferiores normalmente exibidos por chaminés semelhantes (esbeltez entre 8 e 11) [2].

A Figura 1 apresenta imagens da chaminé e da sua geometria em corte, com a espessura das paredes laterais estimada a partir de medidas obtidas durante a fase de inspecção e de informação geral obtida em elementos de arquivo relativos a chaminés com geometria semelhante [3].

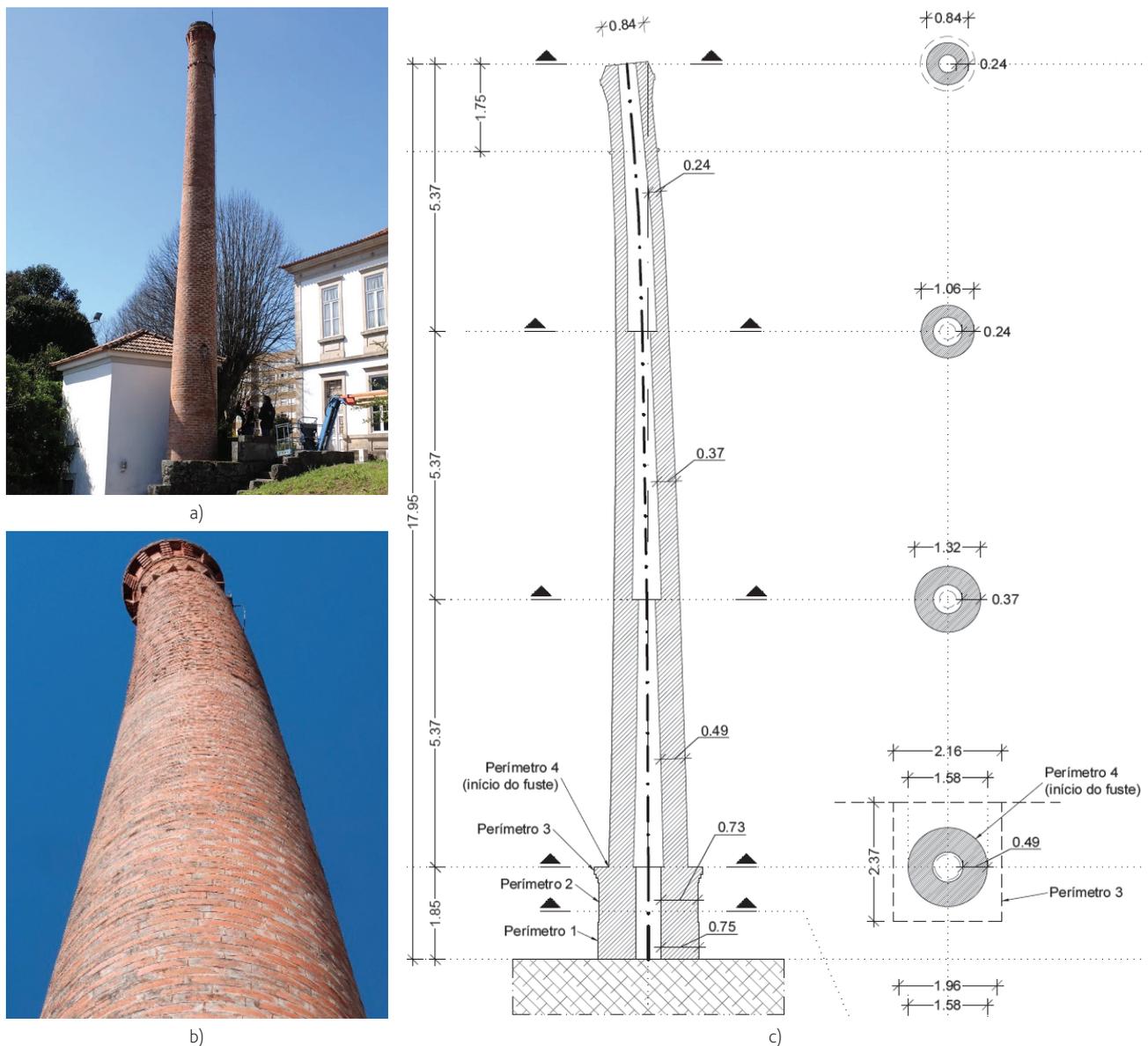


Figura 1 Chaminé em estudo: a) vista geral; b) pormenor do 1/3 superior; c) geometria

2.2 Anomalias identificadas e estado de conservação

A chaminé apresenta uma deformação acentuada no sentido Sudoeste, com particular relevância no 1/3 superior (Figura 1). A medição da deformada foi fornecida por levantamento topográfico, tendo o desvio máximo sido registado no topo (0,43m na direcção X e 0,10m na direcção Y, de acordo com os eixos principais definidos na estrutura e que foram considerados nas análises realizadas – ver Figura2). Foi identificada degradação material de alguns blocos cerâmicos e juntas, assim como pequenas fissuras e aberturas de juntas localizadas, que conduzem a um estado de conservação material que pode ser sumariamente classificado como bom.

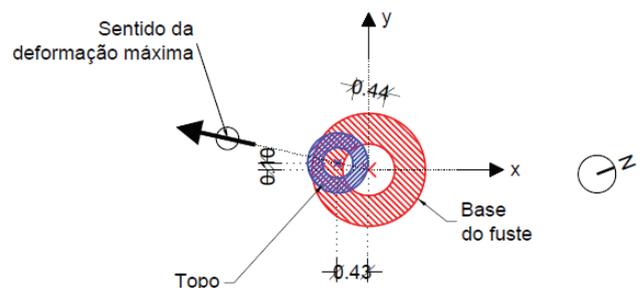


Figura 2 Representação em planta da deformação da chaminé no topo e dos eixos considerados

3 Ensaios de identificação dinâmica

3.1 Objectivos

Foram realizados ensaios de identificação dinâmica para obtenção das características dinâmicas da chaminé, nomeadamente as frequências próprias de vibração e a configuração das deformadas modais. Simultaneamente, pretendeu-se comparar os resultados obtidos através da utilização de acelerómetros com diferentes características e adoptando 2 técnicas de excitação dinâmica distintas: vibração ambiental do tipo output only e vibração forçada do tipo input-output.

3.1.1 Ensaios de vibração ambiental

Para os ensaios de vibração ambiental, foram utilizados 4 acelerómetros tradicionais uni-axiais piezoelétricos (PCB 393B12) de alta sensibilidade (10000 mV/g) e 3 acelerómetros tri-axiais do tipo MEMS com datalogger incorporado e sincronização wireless automática entre sensores (*Recovib Tiny*). Os sensores *Recovib* têm como vantagem: (i) poderem ser configurados por USB, (ii) um único sensor fazer leituras nas 3 direcções, (iii) não existirem cabos na transmissão das leituras, (iv) permitirem uma sincronização automática e (v) poderem ser ligados a elementos metálicos (e.g., chapa metálica aparafusada à chaminé) por íman. Em contrapartida, apresentam uma sensibilidade (30 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$) bastante inferior à dos sensores PCB 393B12 (1,30 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$), que limitam o registo de vibrações de baixa amplitude.

A Figura 3 a) apresenta os 2 sensores instalados lado a lado, permitindo perceber a maior facilidade na instalação e uso do

sensor *Recovib*. A Figura 3 b) apresenta o setup utilizado nos ensaios de vibração ambiental, nomeadamente a posição dos sensores, referidos pelo nome: *Recovib* e PCB, seguido do seu número: 1 a 3 e 1 a 4, respectivamente, e a direcção de leitura: x e y.

Para testar a sua aplicabilidade, os sensores *Recovib* foram colocados em diferentes posições na chaminé. Após os primeiros ensaios, concluiu-se que, quando colocados no 1/4 inferior da chaminé, não permitiam identificar as frequências principais de vibração devido à sua baixa sensibilidade, ao contrário dos PCB que identificaram as 2 primeiras frequências em cada direcção.

Tirando partido dos 3 sensores *Recovib* disponíveis, foram então distribuídos em altura, sendo posicionados aos 6, 12 e 18 metros de altura, aproximadamente, tal como se apresenta na Figura 3 b). Foram determinadas as frequências e deformadas modais e comparadas com as obtidas através dos PCB colocados à cota inferior, simulando uma eventual dificuldade, ou impossibilidade de acesso a cotas mais altas da chaminé.

Relativamente à aquisição, nos ensaios de vibração ambiental foram realizados registos de 20 minutos, com uma taxa de aquisição de 2048Hz nos PCB e 1024Hz nos *Recovib*.

3.1.2 Ensaios de vibração forçada

Na procura de soluções de ensaio alternativas, mais rápidas e sem necessidade de acesso a posições mais altas na chaminé, foram realizados ensaios de vibração forçada utilizando um martelo de impactos PCB 086D50, para avaliar a aplicabilidade destas ferramentas neste tipo de estruturas flexível. A altura máxima de instalação do acelerómetro foi limitada à altura acessível através de

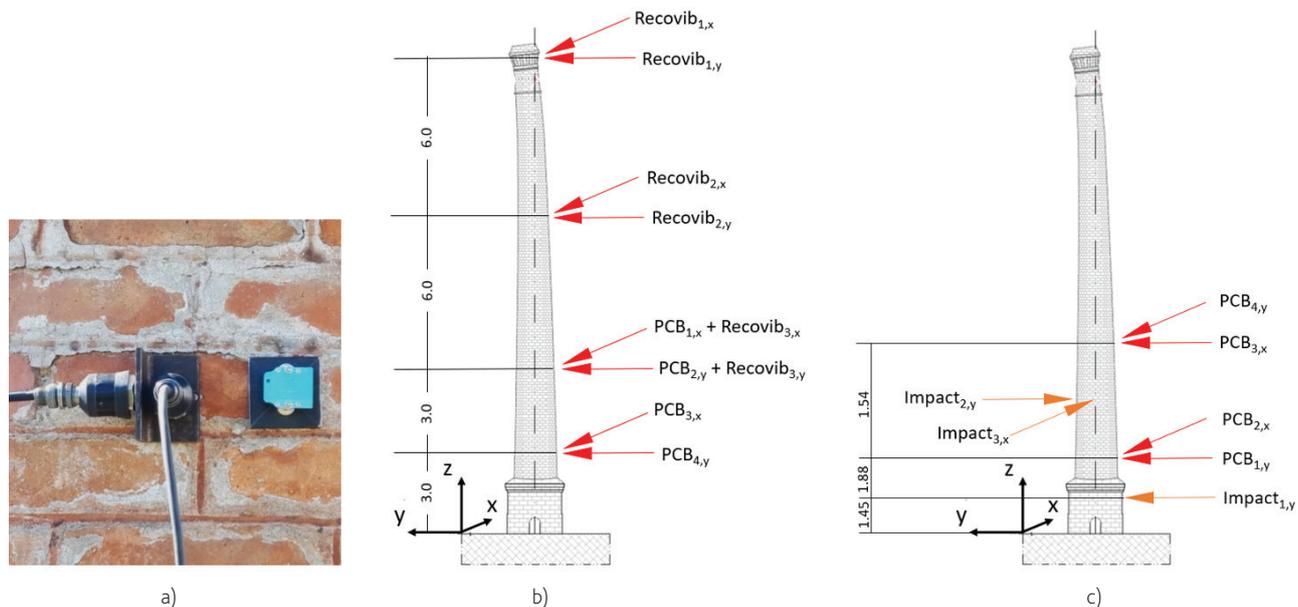


Figura 3 Ensaios de identificação dinâmica: a) instalação com 2 PCB 393B12 com cantoneira metálica, à esquerda, e *Recovib Tiny* ligado por íman a chapa metálica, à direita; b) setup de ensaio para vibração ambiental; c) setup de ensaio para vibração forçada

uma pequena escada: $4,8\text{ m} = 2,5\text{ m}$ (escada) + $1,8\text{ m}$ (técnico) + $0,5\text{ m}$ (amplitude do braço). A excitação foi imposta junto à base e a meia altura entre pontos de leitura.

A Figura 3 c) apresenta o setup utilizado nos ensaios de vibração forçada, nomeadamente a posição dos sensores, referidos da forma descrita anteriormente, e dos excitadores, referidos por Impact, seguido de um número de 1 a 3, que sinaliza as 3 posições do impacto, e da direcção do impacto: x e y.

Relativamente à aquisição, nos ensaios de vibração forçada foram realizados registos de 2 minutos, com uma taxa de aquisição de 2048 Hz.

3.2 Comparação de resultados obtidos

3.2.1 Qualidade dos resultados

O tratamento dos resultados, ou seja, a análise das acelerações registadas no domínio do tempo (Figura 4), mostra que os sensores Recovib, quando instalados à cota baixa (6,0 m de altura), não têm sensibilidade suficiente para identificar picos de aceleração resultantes da excitação ambiental, ao contrário dos PCB. Mas, quando colocados no topo, a qualidade dos resultados dos Recovib aumenta significativamente.

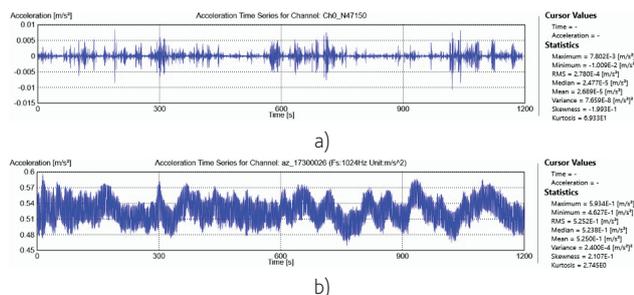


Figura 4 Comparação dos registos obtidos no domínio do tempo durante os ensaios de vibração ambiental: a) PCB; b) Recovib Tiny

Em contrapartida, os ensaios com excitação forçada, ou seja, os ensaios utilizando o martelo de impactos não permitiram obter resultados de boa qualidade (Figura 5). Estima-se que a excitação produzida desta forma não seja suficiente para identificar as frequências de vibração da chaminé, face à massa e rigidez que apresenta, concluindo-se que mais estudos deverão ser realizados para se averiguar a aplicabilidade deste método a este tipologia de estruturas.

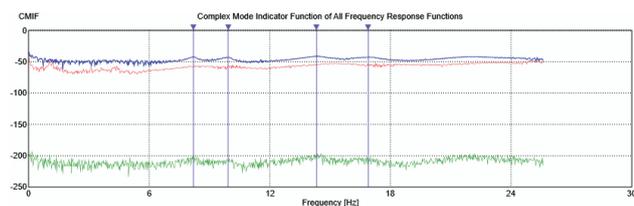


Figura 5 Tentativa de identificação dos modos de vibração através da excitação forçada

3.2.2 Principais resultados obtidos

Face aos resultados anteriores, e através da combinação dos registos dos vários sensores (PCB + Recovib), utilizando o ponto comum a 6,0 m de altura para relacionar os dados de todos os sensores, foi possível identificar as principais frequências e modos de vibração até ao 3.º modo, tendo-se encontrado ainda modos de ordem superior (4.º e 5.º modo de translação em x). A Figura 6 assinala os picos identificados no domínio na frequência e a Figura 7 apresenta as frequências e as configurações modais associadas.



Figura 6 Principais frequências identificadas a partir dos dados combinados dos sensores (decomposição em valores singulares, SVD)

Realça-se que, após os 2 primeiros modos de translação em cada direcção, identificou-se um 3.º modo com contribuição nas direcções x e y, que pode representar um modo de torção da chaminé.

4 Análise do comportamento sísmico

O comportamento sísmico da chaminé foi estudado considerando as zonas sísmicas 1,6 e 2,5, respectivamente, para os sismos tipo 1 e tipo 2, seguindo as prescrições do Eurocódigo 8-1. A análise dos espectros de resposta permitiu concluir que o sismo tipo 2 era condicionante, tendo sido utilizado para comparação dos resultados. Não foi considerada a redução da acção sísmica prevista no anexo nacional do Eurocódigo 8-3 [5] por 2 motivos principais: (i) para garantir um maior factor de segurança, face à importância do património industrial em causa e à necessidade de assegurar a sua preservação; (ii) pelo impacto que danos, ou o colapso da chaminé poderiam provocar na sua envolvente, tendo em conta que se trata de uma estrutura localizada em zona “habitada” e sem capacidade para redistribuir esforços (elemento singular encastrado na base).

4.1 Apresentação de modelos e critérios de modelação

As simulações numéricas foram realizadas utilizando os programas de análise estrutural SAP2000 e SeismoStruct, tendo em cada um dos programas sido criado um modelo: A e B, respectivamente. O modelo A usa elementos de casca com comportamento material linear (SAP2000); o modelo B usa elementos de viga com plasticidade distribuída e discretização seccional em fibras (*inelastic frame force-based elements* com 5 pontos de integração) e considera não linearidade material e geométrica (*SeismoStruct*). Os 2 modelos adoptaram a mesma geometria e incluíram a deformação registada na chaminé, tal como se ilustra na Figura 8, assim como a divisão da estrutura em 3 zonas em altura distintas, consentâneas com as diferentes condições de conservação material encontradas no local

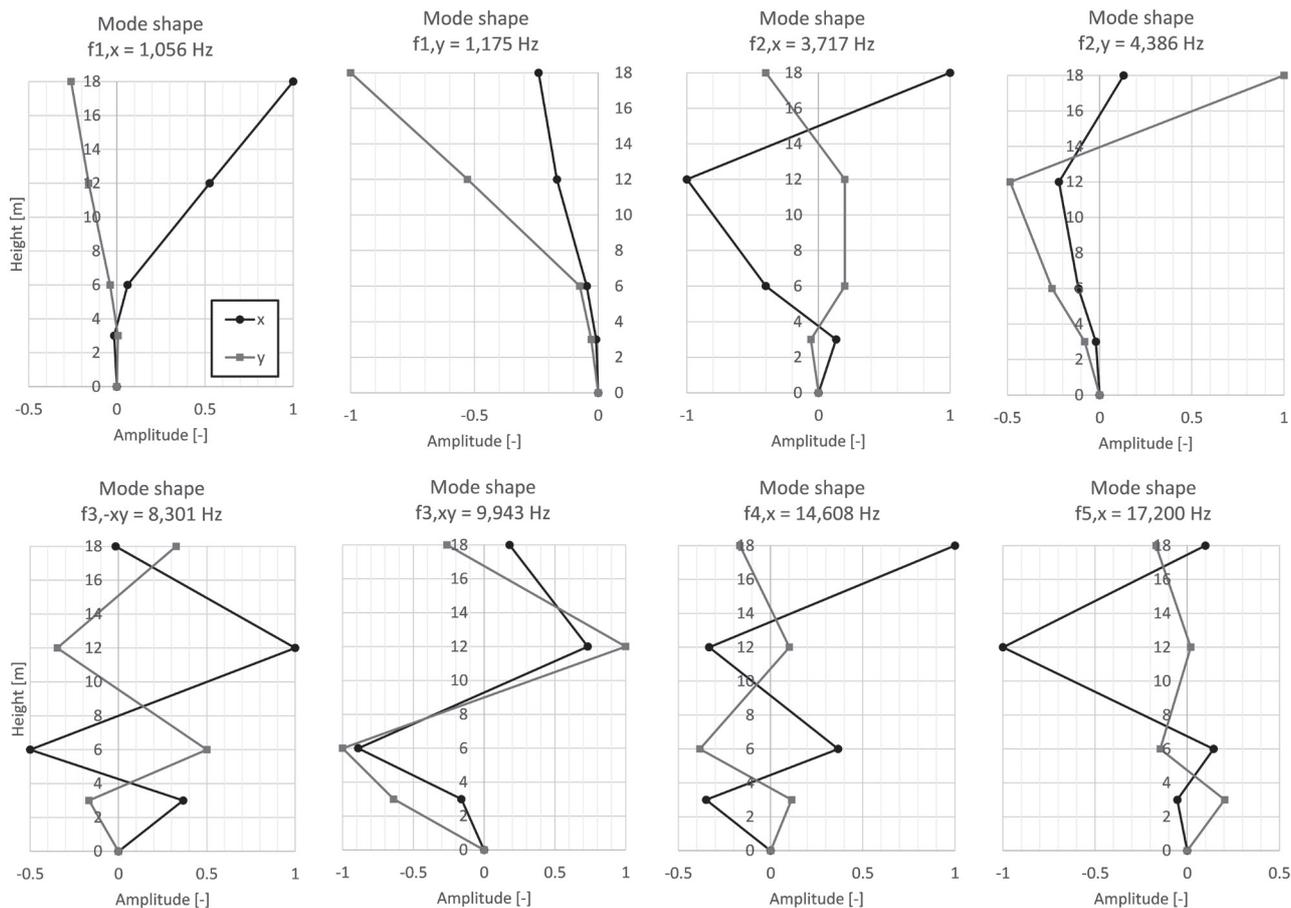


Figura 7 Frequências e modos de vibração identificados (preto: direcção X; cinza: direcção Y)

durante a inspecção. De forma a permitir uma comparação directa com o modelo A, o modelo B também considerou a hipótese de comportamento material e geométrico linear através do uso de elementos de viga elásticos.

Os modelos numéricos foram calibrados tendo por base os resultados dos ensaios de identificação dinâmica por vibração ambiental, em particular os resultados dos 2 primeiros modos de vibração em cada direcção. Utilizaram-se duas funções objectivo (*fitness functions*): uma para avaliar a adequação em termos de frequências numéricas versus experimentais, e outra para otimizar a concordância entre os modos de vibração numéricos e experimentais, através da função MTMAC (*Modified Total Modal Assurance Criterion*). Por falta de espaço, este processo não é incluído na presente publicação.

Relativamente às propriedades dos materiais, concluiu-se que a consideração das mesmas propriedades mecânicas nos 2 modelos conduziam a frequências de vibração e configurações das deformadas modais ligeiramente diferentes, pelo que se adoptaram valores adaptados a cada modelo. Os valores foram calibrados tendo em conta a informação visual registada, nomeadamente o estado de conservação dos materiais, e as configurações modais obtidas anteriormente, e apoiou-se nas propriedades mecânicas descritas em trabalhos realizados em chaminés de alvenaria de

tijolo pela empresa NCREP. Para o comportamento não linear do modelo B, escolheu-se o modelo constitutivo de betão *Mander et al.* [6] implementado no SeismoStruct, com um valor de resistência à tracção (f_t) de 40kPa, de forma a facilitar a convergência da solução, quando comparada com a hipótese de adopção de resistência à tracção nula. O Quadro 1 apresenta o resumo das propriedades principais, relevantes, adoptadas.

Quadro 1 Propriedades mecânicas adoptadas para a alvenaria (E – módulo de elasticidade; γ – peso volumico; f_c, f_t – resistência à compressão e à tracção, respectivamente)

Material	Modelo A		Modelo B			
	E [GPa]	γ [kN/m ³]	E [GPa]	γ [kN/m ³]	f_c [MPa]	f_t [MPa]
A (base e zona inferior)	2,4	17	2,0	19	2,0	0,04
B (zona intermédia)	1,6	17	1,0	19	1,0	0,04
C (topo)	0,8	17	0,8	19	0,8	0,04

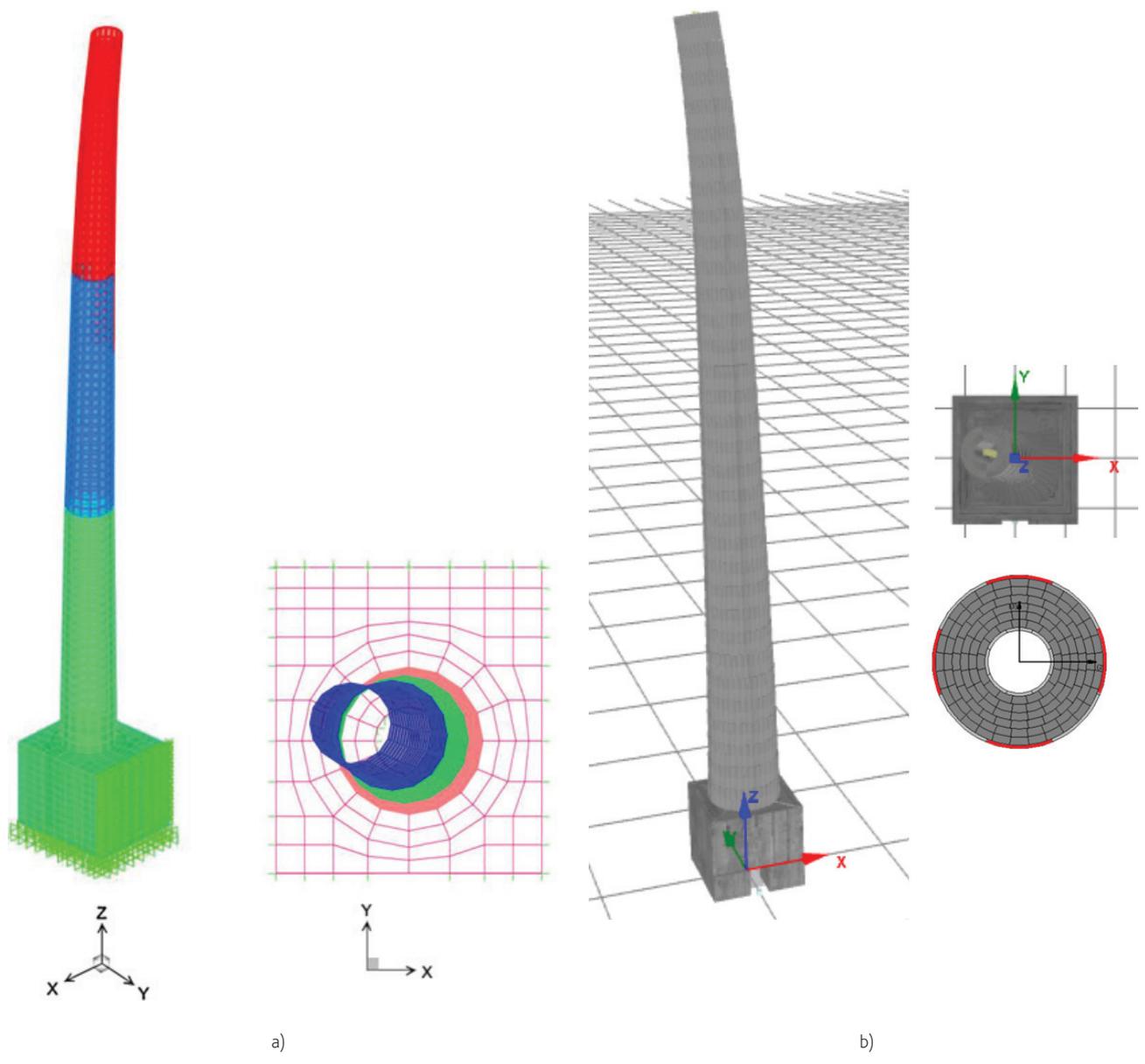


Figura 8 Modelos numéricos utilizados: a) modelo A, elementos de casca (SAP2000), com 3 zonas materiais diferentes; b) modelo B, elementos de viga (SeismoStruct) com secções de fibras (zonas de controlo de resultados assinaladas a vermelho)

4.2 Comparação dos resultados obtidos: análise linear

A resposta dos modelos em regime de comportamento linear elástico foram obtidos utilizando a análise por espectro de resposta (RSA – *Response Spectrum Analysis*), considerando um coeficiente de comportamento de 1,5, correspondente ao mínimo prescrito no EC8, pelo facto da estrutura não ter capacidade de redistribuição de esforços (elemento singular encastrado na base). As análises foram feitas considerando as 8 combinações possíveis de ações nas direcção x e y previstas no EC8-1 ($E = \pm 100\% E_x \pm 30\% E_y$; $E = \pm 30\% E_x \pm 100\% E_y$), e através da raiz quadrada da soma dos quadrados das respostas parcelares (SRSS). A Figura 9 apresenta a envolvente dos resultados obtidos para as 8 combinações, para a

zona sísmica 1,6. Constatase que, enquanto o valor máximo das tensões de compressão é semelhante nos 2 modelos (próximo dos – 500 kPa e localizado na base), o valor máximo das tensões assume valores diferentes: 230 kPa no modelo A a 2/3 de altura da chaminé (na transição de secção) e 120 kPa no modelo B, 1,2 m acima da posição anterior (13,8 m).

Este resultado mostra que a ordem de grandeza dos valores de tensão nos 2 modelos é semelhante, embora a distribuição em altura das tensões de tracção seja diferente. Contudo, ambos os modelos atingem tensões tracção, indicando que a chaminé entrada em regime não-linear material. Tal resultado aponta para a utilidade da realização das análises não-lineares que serão apresentadas na próxima secção. Por outro lado, a 1/3 e a 2/3 da altura observa-se uma mudança brusca nas tensões instaladas nos 2 modelos,

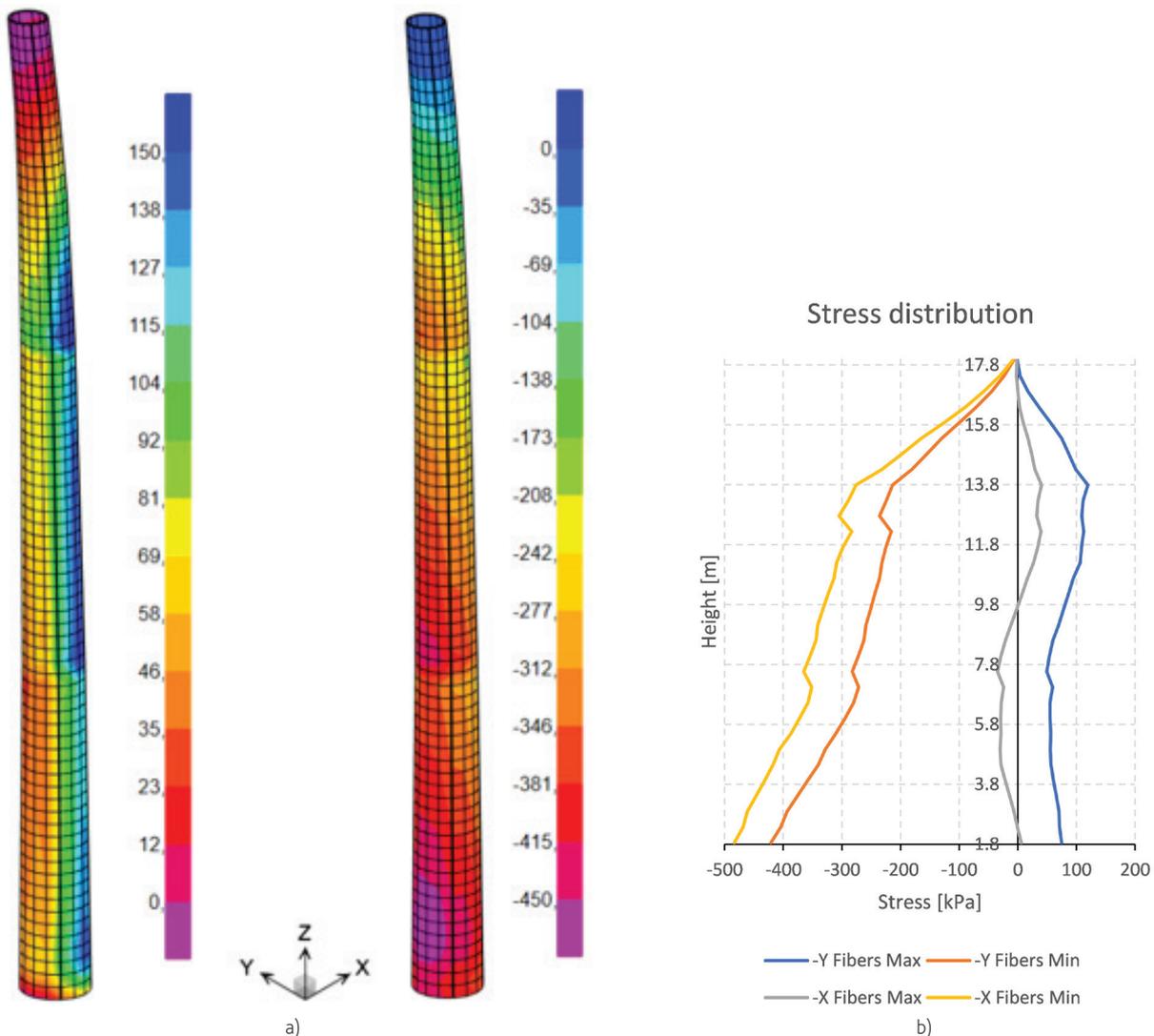


Figura 9 Envolvente de tensões verticais no corpo da chaminé para a zona sísmica 2.5: a) modelo A, máximo (230 kPa) e mínimo (– 485 kPa); b) modelo B, máximo (120 kPa) e mínimo (– 500 kPa); as quatro curvas referem-se às quatro fibras indicadas a vermelho na Figura 8 ± b)

explicada pela mudança da espessura das paredes da chaminé. Consta-se também que a direcção y do modelo B, apesar de apresentar valores absolutos das tensões de compressão menores, apresenta maiores tensões de tracção.

4.3 Comparação dos resultados obtidos: análise não-linear

Para analisar a resposta sísmica da chaminé em comportamento não-linear geométrico e material, realizaram-se análises dinâmicas não lineares recorrendo ao programa SeismoStruct e a 8 acelerogramas gerados artificialmente, compatíveis com o espectro de resposta elástico tipo 2 e com uma duração de 15 s. Foi considerado o modelo de amortecimento de Rayleigh calibrado para um coeficiente de amortecimento relativo de 1, 5% nas 2 primeiras frequências próprias ($f_{1,x} = 1,1$ Hz e $f_{2,x} = 4,56$ Hz), com um termo proporcional à massa e outro à rigidez tangente, seguindo as sugestões da literatura [7]. Todas as (8) análises convergiram e mostraram deslocamentos residuais negligenciáveis, indiciando não existirem empenos, ou perdas de estabilidade estrutural da chaminé que possam exigir a implementação de medidas de reforço estrutural.

Em seguida analisam-se com maior detalhe os resultados obtidos com o acelerograma e combinação que impuseram o maior deslocamento no topo da chaminé: $E = 100\% E_x + 30\% E_y$. De forma a ser possível comparar os resultados agora obtidos com os dos modelos lineares apresentados na secção anterior utilizando o SeismoStruct, analisou-se a evolução das tensões instaladas na chaminé ao longo do cálculo e em toda a altura, de acordo com as secções de controlo apresentadas na Figura 8 b). Identificaram-se valores máximos de compressão de -651kPa e -291kPa, atingidos na direcção -x e -y, respectivamente, e valores máximos de tensão de +40 kPa, correspondentes ao limite de resistência à tracção considerada para o material. Estes últimos valores indiciam a ocorrência de fissuras durante a resposta dinâmica da estrutura.

Para uma análise mais detalhada sobre o impacto que a modelação não-linear tem nos resultados obtidos, a Figura 10 apresenta a distribuição de tensões em altura: vermelho escuro – envoltente das tensões de compressão; amarelo – envoltente das tensões de tracção; cinza – valor da variação máxima no sentido negativo relativamente às tensões induzidas pelas cargas gravíticas (Equação 1); preto – valor da variação máxima no sentido positivo (Equação 2); tracejado vermelho – resistência à tracção da alvenaria (40 kPa).

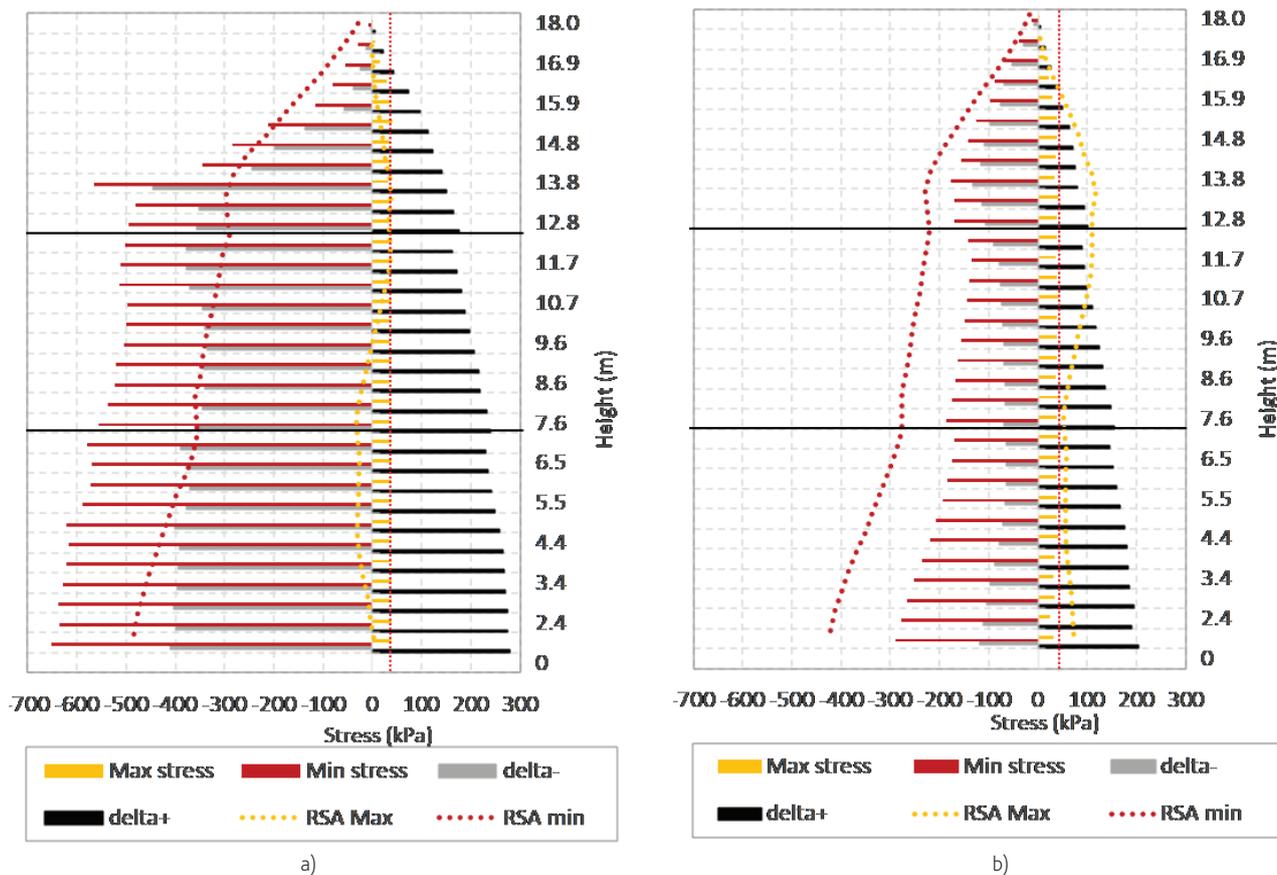


Figura 4.3 Distribuição das tensões na chaminé na análise não linear dinâmica 100% X + 30% Y: a) secção de controlo - X; b) secção de controlo - Y

Finalmente, as linhas ponteadas vermelhas e amarelas representam, respectivamente, os valores mínimos e máximos obtidos através da análise por espectro de resposta para a mesma combinação.

$$\delta^{-} = \min(\sigma) - \sigma_{(t=0)} \quad (1)$$

$$\delta^{+} = \max(\sigma) - \sigma_{(t=0)} \quad (2)$$

A análise dos gráficos permite retirar as seguintes conclusões: 1) a resistência à tracção da alvenaria é atingida em praticamente todas as secções, com maior relevância na direcção x; 2) os resultados obtidos nas 2 direcções são bastante diferentes. Enquanto na direcção y a RSA apresenta resultados conservativos, na direcção x as tensões de compressão superaram largamente os resultados obtidos através da RSA; 3) os resultados obtidos pela análise dinâmica não linear identificam novamente a altura crítica ($h = 13,8\text{m}$) na zona localizada 1,0m acima da zona de transição de espessuras. Esta identificação é visível na variação das tensões, coincidindo com o maior valor absoluto de δ^{-} em ambas as direcções.

Por último, observa-se que a variação das tensões instaladas na alvenaria na direcção X como resultado da acção sísmica é elevada (atingindo -450kPa à cota 13.8m e -400kPa na base) quando comparada com as tensões instaladas por acção apenas do peso próprio (-238kPa). Esta grande sollicitação de compressão na alvenaria justifica-se também pela reduzida capacidade resistente da alvenaria à tracção, que é compensada pelo incremento das tensões de compressão. Conclui-se, portanto, que para realizar uma avaliação de segurança estrutural de uma chaminé de alvenaria, mesmo em zona de baixa sismicidade, é necessário recorrer a metodologias de análise não linear.

5 Considerações finais

No âmbito do estudo realizado, pretendia-se, por um lado, analisar a possibilidade de aplicar diferentes formas de identificação das frequências e modos de vibração de chaminés, recorrendo a sensores e metodologias de ensaio alternativos aos correntemente utilizados em ensaios de vibração ambiental, e que exigem sensores de elevada sensibilidade e o acesso em altura da chaminé. Por outro lado, pretendia-se avaliar a utilização de ferramentas alternativas à modelação por elementos finitos de casca em regime linear, com a introdução da não-linearidade geométrica e material nas análises através de modelação por elementos de fibra para redução do tempo de computação.

Os resultados mostram que, para as condições e estruturas descritas nesta investigação, a utilização de ensaios de vibração ambiental para identificação dinâmica continua a ser a melhor opção, quando comparada com ensaios de vibração forçada recorrendo a martelo de impactos. Por outro lado, a utilização de acelerómetros de elevada sensibilidade (como os PCB) apresenta-se como a opção

mais adequada. Contudo, caso exista acesso à chaminé em altura, a utilização de sensores mais recentes (como os Recovib Tiny) permite aumentar a rapidez de execução de trabalhos, sem comprometer a qualidade final dos resultados obtidos (pelo menos na obtenção das frequências mais baixas). Quando combinados ambos os sensores, a qualidade dos resultados obtida foi notável.

Relativamente à modelação, os resultados obtidos em análise linear por espectro de resposta utilizando modelos com elementos de viga com secção de fibras, ou elementos finitos de casca, foram próximos. Estes resultados mostraram também a importância de se utilizarem análises dinâmicas não lineares nas verificações da segurança estrutural e, posteriormente, no apoio à tomada de decisão relativamente à necessidade de implementar soluções de reforço estrutural.

Agradecimentos

Os autores agradecem a colaboração de toda a equipa da empresa NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda., pelo apoio dado no desenvolvimento do trabalho. Um especial agradecimento à equipa técnica do LEMSC do Institute of Mechanics, Materials, and Civil Engineering da UCLouvain, e à Dr.ª Alexandra Carvalho do NESDE/LNEC pela colaboração na preparação das séries temporais. Agradece-se também ao programa Erasmus+, pelo financiamento do estágio do terceiro autor na empresa NCREP.

Referências

- [1] ICOMOS-TICCIH – Princípios conjuntos do ICOMOS-TICCIH para a Conservação de Sítios, Estruturas, Áreas e Paisagens do Património Industrial, 2011, 17ª Assembleia Geral do ICOMOS.
- [2] Guedes, J.M., et al. – "Brick masonry industrial chimneys: assessment, evaluation and intervention", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2019, A 377: 20190012.
- [3] Costa, A.; Ornelas, C.; Guedes, J.; Paupério, E – "Chaminés de alvenaria de tijolo. Sistema construtivo de chaminés para fábricas no Porto entre os séculos XIX e XX", *Anuário do Património 2014*, 2014.
- [4] IPQ – "NP EN 1998-1, 2010 – Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos, Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios", 2010, Instituto Português da Qualidade.
- [5] IPQ – "NP EN 1998-3, 2017 – Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos Parte 3: Avaliação e reabilitação de edifícios", 2017, Instituto Português da Qualidade.
- [6] Mander J.B.; Priestley M.J.N.; Park R. – "Theoretical stress-strain model for confined concrete" em *Journal of Structural Engineering*, 1988, Vol. 114, No. 8, p. 1804-1826.
- [7] Correia, A.; Pacheco Almeida, J.; Pinho, R. – "Seismic Energy Dissipation in Inelastic Frames: Understanding State-of-the-Practice Damping Models" em *Structural Engineering International*, 2013, No. 2, p. 148-158.