

# Avaliação numérica da segurança sísmica de estruturas em terra na Alhambra, Granada, Espanha

Numerical seismic safety assessment of earthen structures in La Alhambra, Granada, Spain

Annalaura Vuoto

Javier Ortega

Paulo Lourenço

Javier Suárez

## Resumo

A Alhambra é Património Mundial pela UNESCO e está localizada em Granada, a área com maior perigosidade sísmica em Espanha. Este trabalho apresenta a avaliação da segurança sísmica da *Torre de la Vela*, a torre principal da Alcazaba, a fortaleza da Alhambra e a primeira área da cidadela construída no século XIII.

A avaliação da segurança é realizada de forma simplificada usando modelação com elementos finitos e uma análise estática não linear. Numa primeira fase, de análise preliminar, o modelo numérico da torre foi preparado baseado exclusivamente na revisão bibliográfica. Numa segunda fase, o monumento pôde ser visitado e foi efetuado um levantamento detalhado, incluindo ensaios não destrutivos. Um segundo conjunto de análises foi realizado usando um modelo atualizado da torre, calibrado com os resultados experimentais. Os resultados são comparados de forma sistemática e evidenciam a importância dos trabalhos *in situ* para uma correta avaliação de segurança das estruturas históricas.

## Abstract

The Alhambra is a UNESCO World Heritage Site located in Granada, which is the area with the highest seismic hazard in Spain. The present work focuses on the seismic safety evaluation of the *Torre de la Vela*, the main tower of the Alcazaba, the fortress of the Alhambra and the first area of the citadel built in the 13th century.

The safety evaluation is carried out using finite element modeling and performing nonlinear static analyses. In a first phase, a numerical model of the tower was prepared based solely on bibliographic review and a first set of analyses was carried out. In a second phase, the monument was visited and a detailed survey including non-destructive testing was carried out. A second set of analyses was performed using an updated model calibrated with experimental results. The results are systematically compared, highlighting the importance of on-site works for a correct safety assessment of historic structures.

**Palavras-chave:** Taipa / Ensaios não destrutivos / Modelação numérica / Alhambra / Avaliação sísmica / Levantamento com laser scanner

**Keywords:** Rammed earth / Non-destructive testing / Numerical modeling / Alhambra / Seismic assessment / Laser scanning

## Annalaura Vuoto

M.Sc. Student  
ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho  
Guimarães, Portugal  
annalauravuoto1307@gmail.com

## Javier Ortega

Postdoc Researcher  
ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho  
Guimarães, Portugal  
javier.ortega@civil.uminho.pt

## Paulo Lourenço

Full Professor  
ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho  
Guimarães, Portugal  
pbl@civil.uminho.pt

## Javier Suárez

Associate Professor  
Universidad de Granada  
Granada, Espanha  
fjsuarez@ugr.es

## 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.*

VUOTO, A. [et al.] – Avaliação numérica da segurança sísmica de estruturas em terra na Alhambra, Granada, Espanha. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 16. ISSN 2183-8488. (julho 2021) 87-98.

## 1 Introdução

O património cultural construído confere identidade às culturas, regiões e cidades. As construções históricas são um documento vivo, testemunho de realizações técnicas excecionais pertencentes a um período histórico e população específicos [1]. Estes aspetos são particularmente evidentes na Alhambra de Granada, localizada no sul de Espanha. A Alhambra é património Mundial pela UNESCO e um dos exemplos mais bem conservados de residências palatinas do Islão medieval. A Alhambra foi construída no século XIII e o complexo ainda mantém em grande medida a sua configuração original.

No contexto atual, um monumento pode incluir um grupo de edifícios separados ou interligados que, devido a sua arquitetura, homogeneidade ou ao seu lugar na paisagem, têm um valor universal excecional, do ponto de vista histórico, artístico ou técnico [1,2]. Este é o caso da Alhambra, um complexo composto de vários edifícios de diferentes períodos históricos. Para este tipo de monumentos, é fundamental a preservação de todas as partes, essenciais para a compreensão global do complexo.

O presente trabalho apresenta a avaliação numérica da segurança sísmica da *Torre de la Vela*. A torre é parte da *Alcazaba*, a fortaleza da Alhambra construída em taipa no século XIII. A torre foi construída usando materiais extraídos diretamente do subsolo onde está construída a Alhambra. A análise estrutural de edifícios históricos construídos com materiais tradicionais é um processo complexo, principalmente devido às incertezas ao nível de comportamento do material, detalhes construtivos, dano existente ou geometria. No entanto, uma análise estrutural rigorosa é um elemento fundamental do processo de conservação, desde que permita obter previsões quantitativas da resposta do edifício sujeito a diferentes ações. Isto é particularmente relevante em áreas sísmicas, como é o caso de Granada, cidade localizada na área com o mais alto nível de perigosidade sísmica em Espanha.

A avaliação da segurança é realizada usando modelação com elementos finitos e análise estática não linear, o que permitiu obter uma melhor compreensão do comportamento estrutural e sísmico da *Torre de la Vela*. Numa primeira fase, o modelo numérico da torre foi preparado baseado exclusivamente na revisão bibliográfica, atendendo à situação pandémica de 2020. A informação geométrica, material e estrutural necessária para construir o modelo e realizar as análises foi obtida da literatura disponível. Numa segunda fase, o monumento pôde ser visitado, o que permitiu um levantamento geométrico detalhado da torre, usando scanner laser, e ensaios não destrutivos, nomeadamente, ensaios sísmicos, dinâmicos e de georadar. A campanha experimental permitiu atualizar o modelo inicial e efetuar a sua calibração. O objetivo desta abordagem foi permitir a comparação dos resultados das análises estruturais antes e depois da investigação *in situ* do edifício. Os resultados são comparados sistematicamente e evidenciam a importância dos trabalhos *in situ* para uma correta avaliação de segurança das estruturas históricas.

A primeira parte do artigo apresenta uma breve introdução histórica da *Torre de la Vela* e da Alhambra. Posteriormente, o trabalho descreve as principais características geométricas, técnicas construtivas e materiais empregues na torre, baseado na revisão da literatura. O resultado foi a preparação do primeiro modelo numérico 3D e a

realização do primeiro conjunto de análises estáticas não lineares. As análises incluem a avaliação do comportamento estrutural da torre sujeita ao peso próprio, considerando as fases construtivas, e a avaliação da sua capacidade sísmica e dos seus principais mecanismos de colapso, através de análises *pushover*.

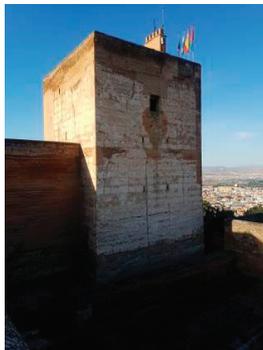
O artigo apresenta, em seguida, a campanha experimental realizada na torre e resume os principais resultados obtidos. Finalmente, após a atualização e calibração do modelo em base aos resultados experimentais e a investigação realizada *in situ*, foi realizado um segundo conjunto de análises numéricas. O artigo apresenta a comparação entre os resultados antes e depois da campanha no monumento e as principais conclusões do estudo.

## 2 A Torre de la Vela no contexto da Alhambra

A Alhambra (Figura 1a) foi construída durante a Idade Média hispano-muçulmana tendo sido uma cidade palatina, uma casa real cristã, a capitania geral do Reino de Granada e uma fortaleza militar, até a sua declaração como Monumento Nacional em 1870. A Alhambra foi construída no topo da colina al-Sabika, na margem sul do rio Darro, sobre um solo conglomerado composto por uma matriz argilosa com seixos de calcário de diferentes tamanhos. O monumento está localizado numa das zonas mais sísmicamente ativas da Península Ibérica [3].



a)



b)

**Figura 1** a) Elevação Norte da Alhambra (*Torre de la Vela* identificada com retângulo vermelho); b) Elevação Norte da *Torre de la Vela*

A construção da *Torre de la Vela* data do século XIII, durante o reinado da dinastia Nasrid em Granada. A construção da Alhambra iniciou-se com a fortaleza da Alcazaba, que incluiu as torres principais, nomeadamente a *Torre de la Vela* e a *Torre del Homenaje*. Ambas são pouco usuais para a época pelas suas extraordinárias dimensões. A *Torre de la Vela* é, portanto, um dos edifícios mais antigos do complexo. É uma torre residência em estilo feudal [4] e foi submetida a numerosas obras de conservação e reparação até a atualidade. Algumas das intervenções são evidentes do exterior, com áreas reparadas usando alvenaria de tijolo com textura diferente das paredes originais de taipa (Figura 1b).

A torre recebeu o nome de *Torre de la Vela* na era cristã, em homenagem ao primeiro sino que foi tocado na torre, denominado *La Vela* [5]. O sino foi trazido pelos cristãos e foi usado para anunciar a conquista da cidade em 1492. O sino é agora um símbolo da cidade de Granada e serviu para alertar à população sobre eventos como assaltos, revoltas ou incêndios.

Ao longo dos séculos, a configuração interior da torre foi alterada devido a diferentes eventos naturais e históricos. As ameias do terraço foram perdidas nos diferentes desastres que afetaram à torre, tais como o sismo de 1522, uma explosão de pólvora no vale do Darro em 1590 ou um relâmpago que destruiu também a parede de empena onde estava localizado o sino em 1882 [5].

## 3 Revisão bibliográfica do estado atual da Torre de la Vela

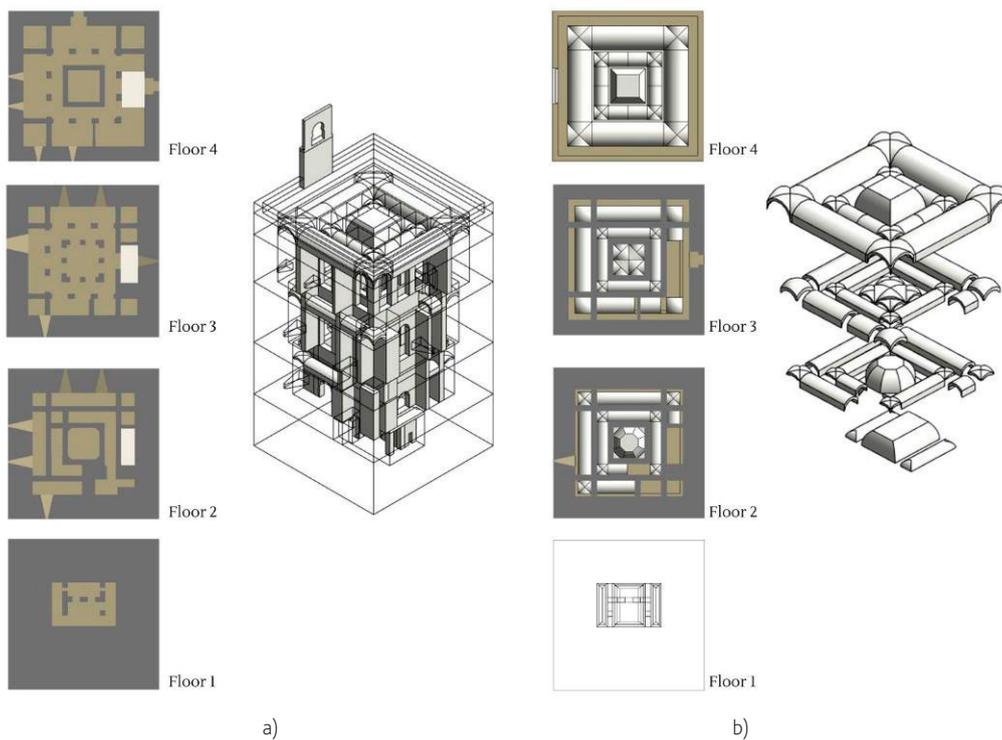
O estado atual da torre foi inicialmente avaliado através de um estudo detalhado da literatura. Os desenhos e documentos históricos foram consultados para o entendimento das características geométricas, construtivas e materiais da torre. O resultado foi a preparação de um modelo numérico tridimensional e a definição de propriedades mecânicas dos materiais.

### 3.1 Levantamento geométrico

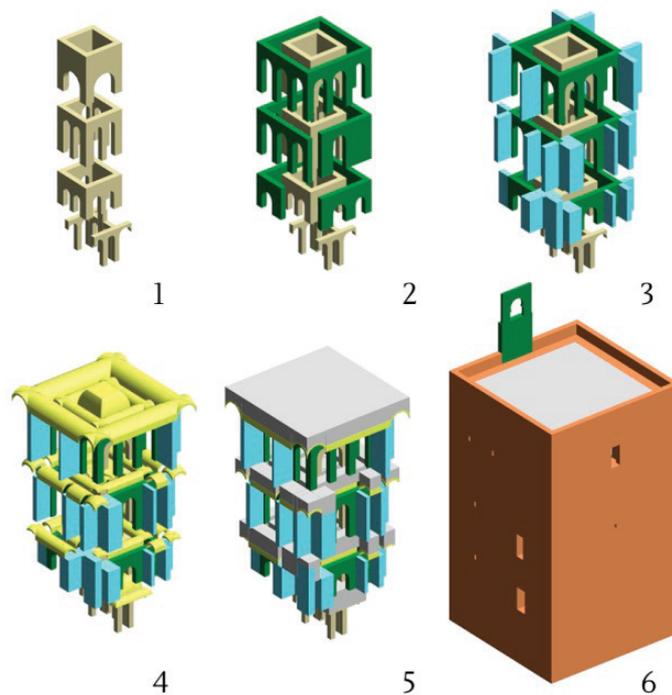
A *Torre de la Vela* é a torre mais alta da *Alcazaba*, tendo 26,80 m de altura. É uma torre de planta quadrada de aproximadamente 16 m de lado. Está dividida em quatro pisos e tem um terraço no último andar, onde está localizado o sino.

Existe um conjunto de desenhos históricos da torre (plantas e cortes) realizados por Gómez Moreno [6], antes de 1907, e López Bueno [7], entre 1923 e 1936, quando o arquiteto Leopoldo Torres Balbás coordenava as obras de conservação na Alhambra. Por outro lado, Pavón [8] fornece uma descrição geométrica detalhada da torre.

A Figura 2 apresenta as plantas e modelo tridimensional da torre, obtidas da revisão bibliográfica. O rés-do-chão (Floor 1) funciona como uma masmorra de nave única e dimensões reduzidas. Os três andares superiores (Floors 2-4) têm uma configuração similar, consistindo numa área central quadrada delimitada por duas naves em cada um dos quatro lados. A largura da nave exterior aumenta do segundo ao último piso, coincidindo com a diminuição da espessura das paredes exteriores, que passam de 4,60 m no rés-do-chão para 1,62 m no último piso. A entrada principal está no segundo andar. A



**Figura 2** a) Plantas e modelo tridimensional da torre; b) estudo das abóbadas interiores da torre; realizados com base na bibliografia



**Figura 3** Geometria adotada para o modelo numérico discretizada em diferentes elementos construtivos

circulação entre andares realiza-se através de uma escada no canto sudeste. O *rés-do-chão* é apenas acessível através de uma abertura no centro e usando escadas ou cordas.

As plantas (Figura 2a) mostram que não existe uma correspondência clara entre os pilares dos diferentes andares, o que causou deformações evidentes nas abóbadas, bem como fendas e esmagamento dos pilares do segundo andar. Por esse motivo, foram adicionados elementos construtivos adicionais no primeiro e segundo andar. O terremoto de 1522 e a explosão de pólvora de 1590 causaram danos noutros elementos internos, que foram imediatamente reconstruídos, levando a uma configuração atual diferente da original [4].

A *Torre de la Vela* é um exemplo único de arquitetura militar da Idade Média. A arquitetura tradicional militar usa elementos construtivos de dimensões exageradas, que são aqui conjugados com abóbadas e elementos próprios da arquitetura palatina. A configuração interna, de naves e arcos, corresponde a uma típica solução bizantina, incorporada à arquitetura muçulmana desde o século X.

Existem diferentes tipos de abóbadas na torre (Figura 2b), com geometrias complexas, especialmente quando cobrem a sala quadrada central. O quarto andar apresenta uma abóbada de claustro seccionada, assim como o segundo andar, mas esta é constituída por oito painéis. O terceiro andar apresenta uma abóbada complexa de aresta, suportada por quatro semi-abóbadas de aresta. As abóbadas das naves são tipicamente de berço, exceto no *rés-do-chão* onde os espaços são cobertos por abóbadas de claustro. As abóbadas nos cantos podem ser de dois tipos: de aresta e de vela.

A configuração interior foi simplificada para a preparação do modelo numérico tridimensional (Figura 3). As diferentes partes identificadas no modelo são: (1) sala central aberta com um número de arcos variável; (2) primeira nave interior aberta com número de arcos variável; (3) paredes que fazem a ligação das naves com as paredes exteriores. Note-se que, de acordo as descrições existentes, estas paredes eram originalmente arcos, mas foram fechadas; (4) abóbadas de tipologias variáveis; (5) material de preenchimento das abóbadas; e (6) paredes exteriores e parede de empena do sino.

## 3.2 Técnicas construtivas e propriedades mecânicas dos materiais

A referência principal sobre as propriedades dos materiais nas estruturas da Alhambra muçulmana (séculos XI-XV) é um estudo de Torres López [9]. O estudo define as características químicas, mineralógicas e petrográficas dos materiais através de ensaios laboratoriais. Outro estudo realizado pelo Laboratório de Geotecnia do CEDEX (*Centro de Estudios e Experimentación de Obras Públicas*) também avalia as propriedades mecânicas dos materiais usados na Alhambra [10].

### 3.2.1 Técnicas construtivas tradicionais

As paredes exteriores da *Torre de la Vela* foram originalmente construídas em taipa, apresentando áreas reconstruídas posteriormente em alvenaria de tijolo. Os elementos estruturais interiores, nomeadamente pilares, arcos e abóbadas, foram

construídos em alvenaria irregular de tijolo com juntas de argamassa espessas de 3 cm. A argamassa utilizada é fraca, constituída por terra e cal, exceto nas abóbadas, construídas usando argamassa dura de gesso. A alvenaria era tipicamente rebocada com argamassa de cal. A pedra era só usada em portões monumentais.

As paredes de taipa na *Alcazaba* e a *Torre de la Vela* foram construídas seguindo o método tradicional de construção na arquitetura hispano-muçulmana. A técnica usada é conhecida como *tapial calicostrado*. Esta técnica usa camadas de taipa (argilosa) e argamassa de cal colocadas alternadamente na cofragem. As camadas de cal são colocadas na parte exterior, em cumha. Após a compactação da taipa, as camadas de cal formam uma superfície exterior homogénea ao exterior (Figura 4a). Sendo a cal impermeável, não era necessário aplicar reboco posteriormente. O *calicostrado* também limitava a deterioração comum das paredes de taipa tradicionais. Note-se que, na atualidade, as paredes da Alhambra construídas com esta técnica estão em bom estado de conservação.

Os tijolos usados nos elementos estruturais interiores da torre têm dimensões de 29 × 14 × 5-6 cm (*ladrillo almohade*). A argamassa usada na alvenaria tem uma composição semelhante às camadas de cal usadas nas paredes em taipa *calicastrada*. Note-se que os materiais foram obtidos localmente.

A Figura 4b apresenta a configuração estrutural assumida para a torre, além da identificação e distribuição dos diferentes materiais usados. A hipótese baseia-se em referências bibliográficas de estruturas semelhantes da *Alcazaba* [11-14]. Assume-se que as paredes exteriores em taipa são contínuas em altura, de acordo com outras estruturas de torre defensivas [10].

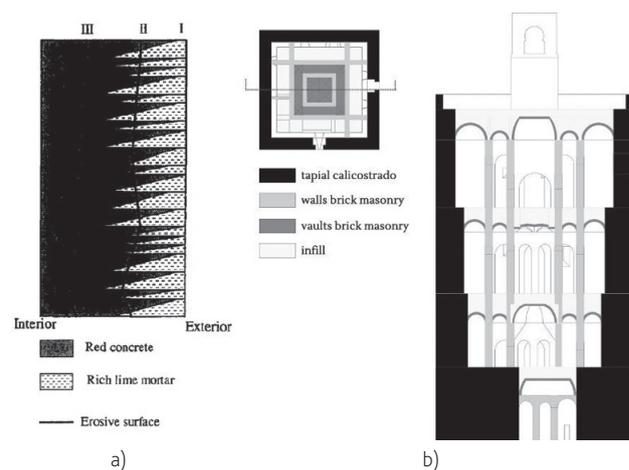


Figura 4 a) Secção típica de parede em taipa *calicastrada* [9]; b) esquema estrutural e materiais assumidos para a *Torre de la Vela*

### 3.2.2 Propriedades dos materiais

Foi possível obter uma estimativa das propriedades mecânicas dos materiais da *Torre de la Vela* através de um estudo experimental realizado na *Torre del Homenaje* [10,15]. Note-se que as duas torres datam do mesmo período e o sistema construtivo é semelhante.

**Tabela 1** Propriedades mecânicas da taipa *calicostrada* [15]

Propriedade	Valor	Ensaio
Densidade	2,25 g/cm <sup>3</sup> (2250 kg/m <sup>3</sup> )	UNE 83.312-90
Resistência à compressão	25 Kg/cm <sup>2</sup> (2,5 MPa) 80 Kg/cm <sup>2</sup> (8,0 MPa)	Andares superiores Fundações UNE 83.304-84
Resistência à tração	3 Kg/cm <sup>2</sup> (0,3 MPa) 7,5 Kg/cm <sup>2</sup> (0,75 MPa)	Andares superiores Fundações UNE 83.306-85
Módulo de elasticidade	12 000 Kg/cm <sup>2</sup> (1200 MPa) 63 000 Kg/cm <sup>2</sup> (6300 MPa)	Andares superiores Fundações ASTM C-469-87
Coefficiente de Poisson	0,3 0,2	Andares superiores Fundações ASTM C-469-87

**Tabela 2** Propriedades mecânicas dos tijolos [15]

Propriedade	Valor	Ensaio
Densidade	1,45 g/cm <sup>3</sup> (1450 kg/m <sup>3</sup> )	UNE 67-019-86
Resistência à compressão	150 Kp/cm <sup>2</sup> (15 MPa)	Andares superiores UNE 67.026-86

A Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas da taipa obtidas experimentalmente na segunda torre [15]. Note-se a distinção feita entre as propriedades da taipa usada nos andares superiores das torres e nas fundações da torre. Também foram feitos ensaios nos tijolos (Tabela 2), mas não há dados sobre as propriedades da argamassa nem da alvenaria.

De acordo com o relatório de CEDEX [10], o material de enchimento das abóbadas é semelhante ao material usado nas paredes exteriores em taipa. Assim, foi assumida a mesma densidade, mas, devido à falta de compactação do elemento, deve considerar-se um módulo de elasticidade inferior, assumindo que o enchimento não proporciona rigidez significativa à estrutura.

## 4 Avaliação previa da segurança estrutural

O modelo numérico da torre foi preparado no *software* DIANA [16], baseado nos dados obtidos na literatura e descritos previamente. A geometria foi adotada de acordo com as simplificações apresentadas na Figura 3. As condições fronteira foram definidas como suportes fixos na base, assumindo fundações rígidas. As estruturas adjacentes à torre não foram tidas em consideração.

A Tabela 3 apresenta os três materiais considerados para a análise, de acordo com o esquema da Figura 4b, e as suas propriedades lineares e não lineares. As propriedades da alvenaria foram estimadas de acordo as recomendações do regulamento italiano [17-18] e os estudos experimentais.  $\rho$  é a densidade do material,  $E$  é o módulo de elasticidade,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson,  $f_c$  é a resistência à compressão,  $G_{fc}$  é a energia de fratura à compressão,  $f_t$  é a resistência à tração, e  $G_{ft}$  é a energia de fratura à tração. A energia de fratura à

compressão foi obtida usando um índice de ductilidade de 1,6 mm [19] e a energia de fratura à tração foi calculada como  $G_{ft} = 0,04 \cdot f_t^{0,07}$  [20].

O comportamento não linear dos materiais é descrito através do modelo *Total Strain Rotating Crack Model*, que define uma relação não linear entre tensões e extensões totais de tração e compressão. Este modelo assume que o início da fendilhação ocorre quando a tensão de tração é superior à resistência do material. O comportamento em compressão é descrito por uma função parabólica e o comportamento em tração é descrito através de uma função exponencial.

A definição da malha do modelo de elementos finitos deve resultar de um compromisso entre precisão e tempo de cálculo, especialmente no caso de análises não lineares. A geometria complexa do edifício influenciou o tamanho final da malha, com elementos de 0,5 m nas paredes exteriores e 0,2 m nas abóbadas e elementos menores. Foram usados tipos de elementos sólidos (tetraedro e hexaedro), adequados para a geometria complexa dos elementos estruturais. No total, a malha tem 290 113 elementos e 171 381 nós.

### 4.1 Análise modal

Para uma primeira avaliação do modelo numérico, foi realizada uma análise modal, cujos resultados são apresentados na Figura 5. O primeiro modo ( $f = 2,16$  Hz) consiste num movimento de translação na direção X. O segundo modo ( $f = 2,22$  Hz) é de translação na direção Y. O valor de frequência obtido nas duas direções é semelhante, refletindo um comportamento praticamente simétrico na torre. O terceiro modo ( $f = 3,92$  Hz) é de torsão.

Tabela 3 Propriedades materiais usados na análise

		$E$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\nu$ [-]	$\rho$ [T/m <sup>3</sup> ]	$f_c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$G_{f_c}$ [kN/m]	$f_t$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$G_{f_t}$ [kN/m]
Taipa	[15]	1,20 E + 06	0,30	2,25	2500	4,00	300	0,017
Alvenaria	[17-18]	1,60 E + 06	0,25	1,60	4000	6,40	200	0,013
Enchimento	[15]	600000	0,30	2,25	2500	4,00	300	0,017

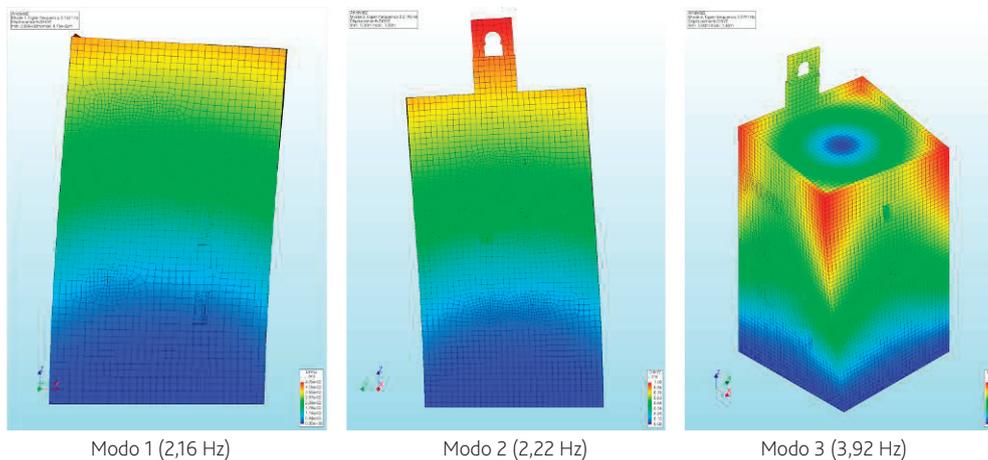


Figura 5 Modos de vibração globais obtidos no DIANA

#### 4.2 Análise não linear estática para cargas verticais

Uma análise estática não linear foi realizada com o objetivo de compreender o comportamento estrutural do edifício sob o seu peso próprio. A análise foi feita aplicando a ação de modo incremental até um valor do dobro do peso próprio da torre. O estado de equilíbrio no fim de cada passo de aplicação da carga é obtido usando um processo iterativo (método Secant e método Newton-Raphson),

controlado por um critério de energia com uma tolerância de convergência de 1%.

Para o fator de carga (LF) de 2,0, o comportamento global da estrutura é essencialmente linear. Os valores de deslocamento são muito baixos. No entanto, a literatura consultada refere problemas estruturais identificados na fase de construção, devido ao seu peso próprio. A análise foi, portanto, realizada de maneira faseada, permitindo simular as diferentes fases construtivas.

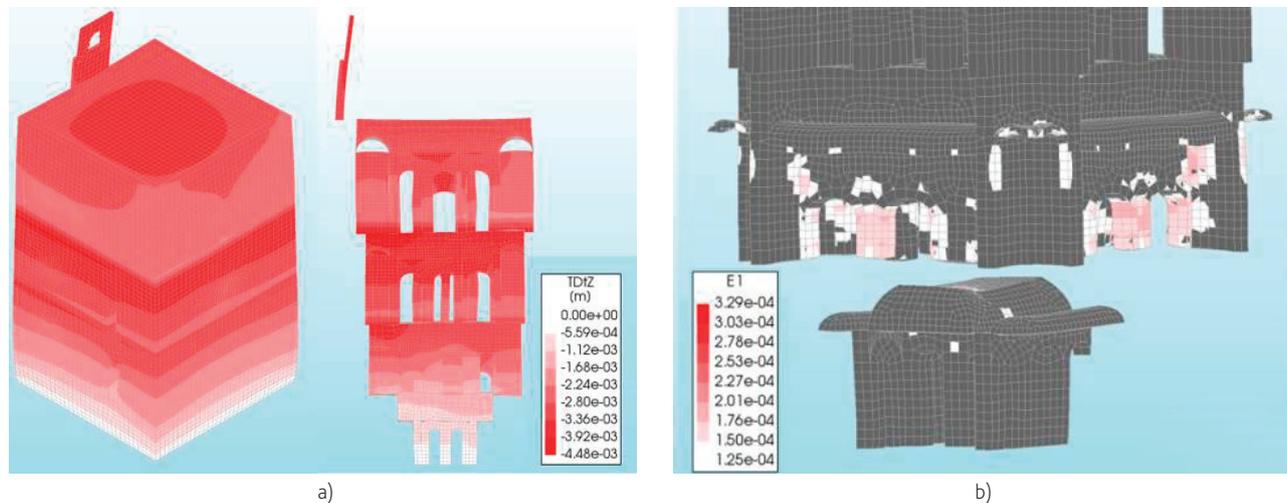


Figura 6 a) Deslocamentos verticais para LF = 1; b) Acumulação de extensões principais (sujeitos a fendilhação) no segundo andar

Em cada fase, o modelo é sujeito a ação do peso próprio, tendo em conta o estado de equilíbrio e os resultados das fases anteriores. Neste caso, foram definidas quatro fases, considerando a adição de um piso em cada uma das fases. Foram realizadas análises considerando ou não a não linearidade geométrica (NLG). Uma vez que a análise faseada considera os resultados das fases anteriores como valores iniciais da fase seguinte, é aconselhável incluir a NGL na análise. No entanto, a análise realizada resultou em baixos valores de deslocamentos e deformações, obtendo resultados semelhantes nas duas hipóteses.

Na análise faseada, pode-se observar que os valores mais elevados de deslocamento ocorrem no terceiro andar, na área central, atingindo os 4 mm (Figura 6a). No que respeita ao dano, a análise amostra que os elementos de alvenaria interiores teriam fendilhação ligeira sob a ação do peso próprio (Figura 6b). De facto, observa-se uma concentração de pequenas fissuras nos pilares e arcos do segundo andar, o que está de acordo com a descrição de dano na torre existente na literatura. A análise revela também esmagamento ligeiro em alguns dos pilares.

### 4.3 Análise não linear estática para cargas horizontais

A resposta da estrutura a ações sísmicas foi avaliada através de análise não linear estática ou *pushover*. A análise consiste em aplicar forças horizontais de modo incremental até ao colapso da estrutura, o que permite estimar os mecanismos de colapso e avaliar a distribuição e propagação do dano. O padrão de forças laterais assumido é proporcional à massa da estrutura, o que é recomendável para estruturas históricas de alvenaria [21,22]. Inicialmente, é aplicada a ação gravítica e depois a ação horizontal é aumentada monotonicamente.

Foram realizadas análises nas duas direções ortogonais em planta da torre (X e Y), que apresentam resultados semelhantes, devido à simetria da estrutura. A Figura 7a) apresenta uma das curvas de capacidade (força-deslocamento) obtidas. O valor máximo do fator de carga é de 0,80 g, correspondendo a um deslocamento máximo no topo de 0,2 m, e ilustrando a grande capacidade da estrutura.

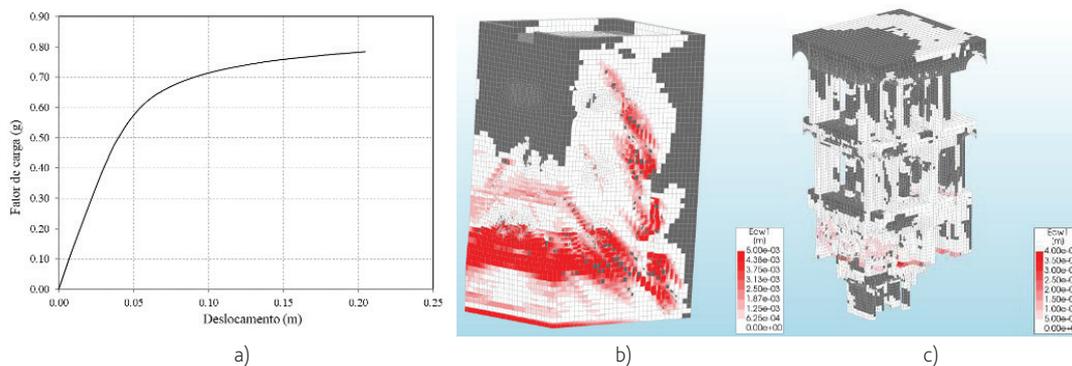


Figura 7 a) Curva de capacidade na direção X; b) Distribuição do dano (extensões principais) na torre, nas paredes exteriores; e c) no interior; para um fator de carga de 0,80 g

A Figura 7b) mostra a distribuição do dano nas paredes exteriores (em termos de extensões principais) para a carga máxima (0,80g). O mecanismo de colapso é uma flexão global da estrutura, evidenciado pelas fendas na base e as fendas diagonais nas paredes paralelas à direção da carga, que levam à rotação da torre em torno da base. A Figura 7c) mostra o dano no interior, principalmente localizado nas paredes, pilares e arcos do segundo andar.

## 5 Ensaios *in situ*

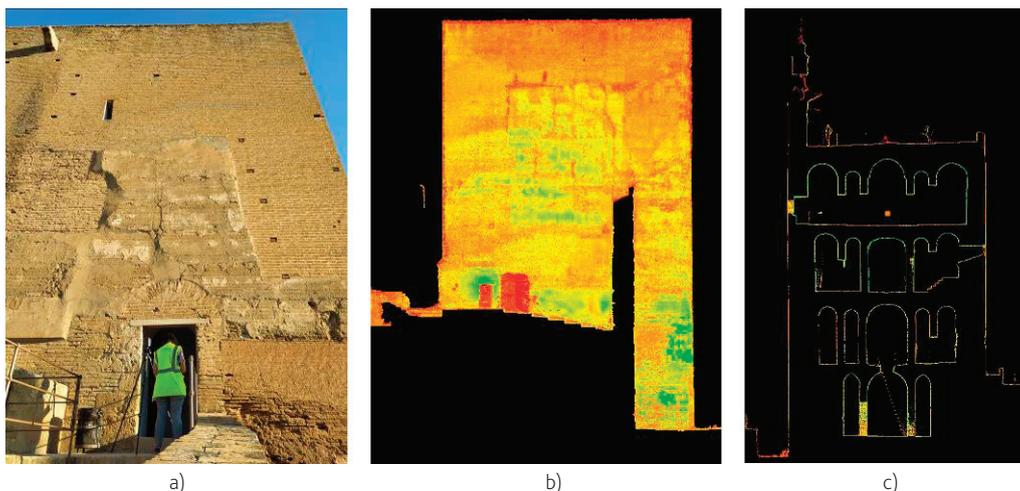
Foi realizada uma campanha de ensaios não destrutivos na *Torre de la Vela* com o objetivo de obter: (i) uma caracterização completa da geometria, usando a técnica do laser scanner; (ii) propriedades dos materiais, através de ensaios sísmicos; e (iii) comportamento estrutural global da torre, através de ensaios de identificação dinâmica. A campanha também permitiu validar as informações obtidas anteriormente na bibliografia.

### 5.1 Levantamento com laser scanner

Um levantamento geométrico preciso do edifício é essencial para preparar o modelo numérico. Isto é particularmente importante para monumentos históricos, tipicamente irregulares e sujeitos a múltiplas transformações no passado não registadas. Os desenhos históricos da torre usados para o primeiro modelo datam de 1907 e 1936, não estão digitalizados e não têm escala, pelo que um dos objetivos do trabalho foi obter um levantamento atualizado. O levantamento foi realizado usando o laser scanner, que permite a reconstrução tridimensional do edifício com grande precisão, incluindo a geometria externa e interna da torre.

A Figura 8 apresenta uma imagem da torre durante os trabalhos e a nuvem de pontos obtida no levantamento. O levantamento confirmou importantes diferenças em relação aos desenhos originais. Em primeiro lugar, apesar da altura total da torre estar correta, as alturas dos diferentes andares tinham incorreções importantes (Figura 8c)).

Em segundo lugar, o primeiro andar começa a uma altura de 1,80 m com respeito a cota inferior da torre medida desde o exterior



**Figura 8** a) Levantamento da *Torre de la Vela* com laser scanner; b) vista da fachada este (nuvem de pontos); c) seção da torre (nuvem de pontos) (credito: PROSKENE SLP)

(Figura 8c). Isto parece comprovar a ideia de a torre estar diretamente escavada no solo para criar o espaço interior da masmorra. Finalmente, também foi revelado que grande parte das fachadas este e sul se encontram enterradas (Figura 8b). Estas observações na nuvem de pontos não eram evidentes nos desenhos históricos (ou os mesmos estavam errados) e introduzem alterações substanciais nas condições de fronteira do edifício, com influência relevante no seu comportamento estrutural.

## 5.2 Ensaios sísmicos

Os ensaios sísmicos foram realizados com o objetivo de obter uma estimativa das propriedades mecânicas dos principais materiais da torre: a taipa e a alvenaria de tijolo. O pulso sísmico foi induzido por meio de um martelo instrumentado e posteriormente captado por um acelerómetro. O ensaio consiste em medir a velocidade de propagação das ondas P-primárias ( $V_p$ ) e R-Rayleigh ( $V_R$ ) no interior de material, que estão relacionadas com as propriedades elásticas: módulo de elasticidade ( $E$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), através da densidade ( $\rho$ ) do material, de acordo as seguintes expressões [23]:

$$\frac{V_p}{V_R} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)(1+\nu)^2}{(1-2\nu)(0,87+1,12\nu)^2}} \quad (1)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

A Tabela 4 apresenta os valores médios da velocidade obtidas para os diferentes materiais e a estimativa das propriedades elásticas.

Note-se que os resultados da alvenaria e da taipa dos andares superiores (2 e 4) estão em concordância com os valores da literatura. No entanto, os valores obtidos para o andar 1 (parcialmente enterrado) são claramente mais altos. Foram realizados um total de 8 ensaios no primeiro andar com um coeficiente de variação baixo, indicando que os resultados são fiáveis. Esta informação parece

confirmar que o método de construção da taipa do piso inferior é diferente. A hipótese é que este andar foi escavado, o que é certo para outras estruturas da *Alcazaba*.

**Tabela 4** Resultados dos ensaios sísmicos e estimativa das propriedades elásticas

		$V_p$ [m/s]	$V_R$ [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\nu$ -	$E$ [MPa]
Alvenaria tijolo	Andares 2,3 e 4	1218	622	1600	0,25	1,51
Taipa	Andar 1	2648	1402	2250	0,23	7,68
Taipa	Andar 2 e 4	1279	722		0,20	2,10

## 5.3 Ensaios de identificação dinâmica

O conhecimento das características dinâmicas de uma estrutura permite obter um melhor entendimento do comportamento estrutural global da estrutura, além de calibrar os modelos numéricos. Para os ensaios foram utilizados acelerómetros colocados em diferentes pontos da torre, predominantemente no quarto andar e no terraço. Os acelerómetros foram colocados no meio de cada um dos lados da torre e nos cantos, com o objetivo de capturar os possíveis movimentos da torre. A frequência de aquisição foi 200 Hz e a duração dos registos 20 minutos.

A estimativa das frequências foi feita a partir de duas análises modais operacionais, nomeadamente FDD (*Frequency Domain Decomposition*) e SSI-UPC (*Stochastic Subspace Identification Unweighted Principal Components*). Os resultados do ensaio dinâmico apresentam-se na Figura 9, sendo que todos os modos da estrutura são globais. Os primeiros dois estão caracterizados por movimentos de translação nas duas direções principais e o terceiro é um modo de torsão. Apesar deste resultado corresponder bem com os modos obtidos numericamente (Figura 5), as frequências experimentais são muito maiores.

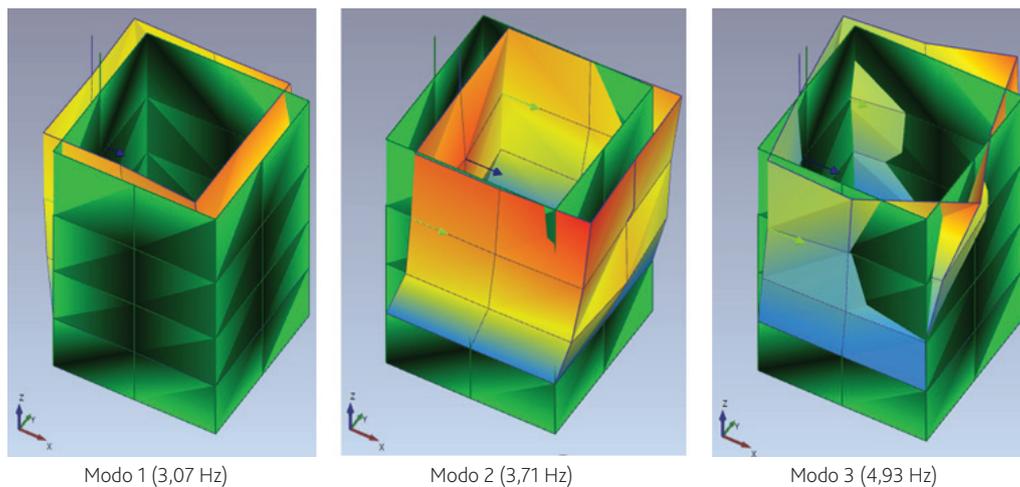


Figura 9 Três modos fundamentais obtidos no ensaio de identificação dinâmica

## 6 Avaliação posterior da segurança estrutural

Após a campanha experimental, foi possível atualizar e calibrar o modelo numérico previamente elaborado com base nas informações da bibliografia. As análises numéricas foram repetidas adotando um modelo que simula de forma mais adequada o comportamento estrutural real da *Torre de la Vela*.

### 6.1 Calibração do modelo numérico

Os resultados experimentais possibilitaram a atualização do modelo em termos de: geometria, propriedades elásticas dos materiais e condições fronteira. A calibração numérica foi feita através da comparação das propriedades dinâmicas da estrutura obtidas experimentalmente (Figura 9), nomeadamente modos de vibração e frequências, com os resultados numéricos. O modelo numérico foi modificado de modo iterativo até obter uma correspondência entre os três modos de vibração com erros na frequência por debaixo do 10% (Tabela 5).

Tabela 5 Comparação entre modos de vibração experimentais e numéricos após calibração

Número	Modo de vibração	Frequência numérica [Hz]	Frequência experimental [Hz]	Erro frequência [%]
1	Translação X	3,27	3,07	6,51
2	Translação Y	3,56	3,71	4,04
3	Torsão	5,21	4,96	5,04

Os parâmetros que foram modificados iterativamente foram o módulo de elasticidade da taipa das paredes exteriores e as condições de fronteira, nomeadamente o nível de restrição lateral exercido

pelas construções adjacentes à torre: um muro perpendicular à fachada nascente e a ponte de acesso na fachada sul.

Os valores da Tabela 4 para o módulo de elasticidade da taipa serviram de referência no início do processo de calibração. Estes valores foram modificados gradualmente com o fim de manter a diferença encontrada nos ensaios sónicos. Os valores foram assim reduzidos até 5,9 GPa e 1,1 GPa no andar 1 e superiores, respetivamente (i.e. redução do 20% dos valores estimados no ensaio sónico). Note-se que no modelo inicial (seção 4) foi assumido que as propriedades da taipa eram uniformes na torre, hipótese que foi rejeitada após a inspeção *in situ*. A variação do módulo de elasticidade teve principalmente uma influência significativa no valor da frequência. A assunção do valor mais alto para o módulo de elasticidade do primeiro andar (5,9 GPa) permitiu atingir valores de frequência maiores dos iniciais e mais próximos aos valores experimentais.

Numa segunda fase, foi abordado o nível de restrição lateral, variando entre estrutura livre (sem restrições) e ligação rígida (suportes fixos) entre a torre e estruturas adjacentes. As condições de fronteira têm uma influência notável nos modos de vibração e não alteram significativamente os valores de frequência. As condições de fronteira resultaram ter uma grande importância, dado o comportamento da torre assimétrico obtido experimentalmente. Foram testadas diferentes combinações de restrições até obter uma boa correspondência entre os modos de vibração. As condições de fronteira finalmente assumidas foram: a) apoio simples na fachada este, i.e. restrição de deslocamentos na direção paralela ao muro existente; e b) ignorar as restrições na fachada sul, sugerindo uma falta de ligação entre as estruturas ou um comportamento suficiente flexível da ponte para não poder restringir o deslocamento da torre.

A calibração foi posteriormente validada usando o coeficiente MAC (*Modal Assurance Criterion*). O MAC médio obtido para os três modos foi 0,97 (um valor igual a 1 indica correlação perfeita entre os modos de vibração), ilustrando a excelente correspondência entre os resultados numéricos e experimentais.

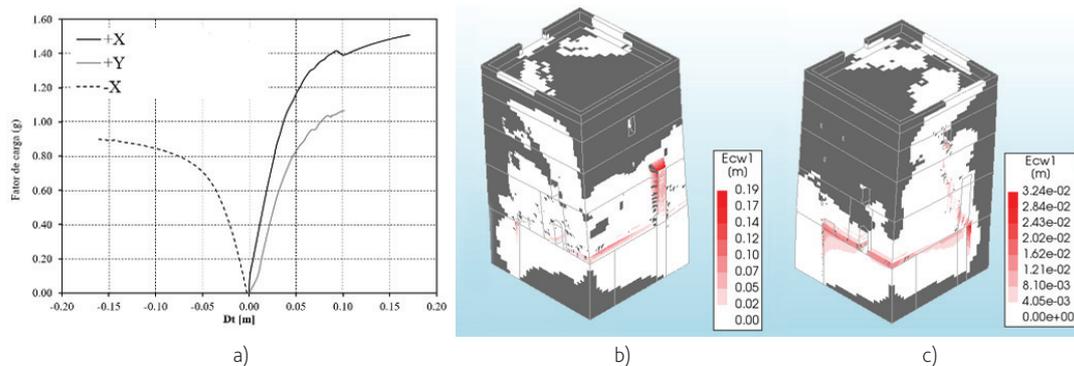


Figura 10 a) Curvas de capacidade (*pushover*); b) Distribuição do dano (extensões principais) na torre, nas paredes exteriores na direção  $-X$  (0,90 g); e c) na direção  $+Y$  (1,05 g)

## 6.2 Análise não linear estática: resultados e comparação

As análises previamente realizadas foram repetidas usando o modelo calibrado. A análise não linear estática para ações verticais continuou a mostrar um comportamento global da estrutura essencialmente linear. No entanto, a distribuição de tensões e deformações é visivelmente diferente, influenciada pelas condições de fronteira atualizadas. As fendas não se distribuem de maneira uniforme, mas a extensão de dano é igualmente limitada.

As análises *pushover* foram repetidas nas direções  $\pm X$  e  $\pm Y$ . Os resultados evidenciam um comportamento claramente diferenciado nas duas direções, devido às novas condições de fronteira. A Figura 10a) apresenta as curvas de capacidade (força-deslocamento) obtidas. A torre não apresenta o comportamento simétrico previamente observado. A menor capacidade corresponde à direção  $-X$  (0,90 g) e a maior na direção  $+X$  (1,50 g), com deslocamentos máximos superiores a 0,15 m. Na direção  $Y$ , o fator de carga máximo é superior aos 1,05 g.

Estes resultados evidenciam que a capacidade máxima da torre é superior à obtida no modelo anterior. O modelo é também mais rígido, devido ao módulo de elasticidade superior assumido para o primeiro andar e as novas condições fronteira impostas, mais restritivas. A Figura 10b) e c) apresenta a distribuição de dano nas paredes exteriores nas direções  $-X$  e  $+Y$ , para o fator de carga máximo. O mecanismo de colapso obtido continua a ser a flexão global da estrutura, mas as fendas mais importantes que conduzem a um mecanismo de rotura por rotação da torre, aparecem agora na interface entre o primeiro andar e os pisos superiores. A diferença de rigidez entre os andares tem uma influência significativa no comportamento estrutural da torre, assim como as condições de fronteira reais.

## 7 Conclusões

O estudo apresenta a avaliação numérica da segurança estrutural e análise sísmica da *Torre de la Vela*, na Alhambra de Granada, em Espanha. A análise estrutural de edifícios históricos requer investigações prévias rigorosas (tais como a recolha de informação

histórica, o levantamento geométrico e ensaios materiais). Isto é particularmente importante quando o monumento pode estar sujeito a ações extremas, tais como sismos. Note-se que a Alhambra está localizada na área com maior perigosidade sísmica em Espanha.

O presente trabalho apresenta uma série de análises numéricas preliminares do comportamento estrutural da torre baseado exclusivamente na bibliografia, com informação limitada em termos de geometria, propriedades materiais e detalhes construtivos. A seguir às análises preliminares, foi realizada uma campanha experimental extensa que permitiu atualizar e calibrar o modelo de elementos finitos. Conseguiu-se preparar um modelo capaz de representar fielmente a realidade observada. O trabalho mostra como o comportamento estrutural dos dois modelos é completamente diferente, evidenciando a importância das investigações experimentais *in situ* para uma correta análise das estruturas históricas complexas.

## Agradecimentos

O trabalho apresentado neste artigo foi desenvolvido no âmbito do projeto de investigação '*Caracterización Estructural y Análisis de Seguridad Estructural y Sísmica en Torres y Muros de Tapial de La Alhambra*', financiado pela '*Unidad Científica de Excelencia Ciencia en La Alhambra*'. Os autores agradecem ao *Vicerrectorado de Investigación y Transferencia da Universidad de Granada* e ao *Patronato de la Alhambra y Generalife* pela sua ativa colaboração na unidade de investigação de excelência *Science in the Alhambra* (ref. UC-PP2018-01). Os autores também agradecem à companhia PROSKENE SLP *Conservation of Cultural Heritage* a realização do levantamento geométrico da *Torre de la Vela* com laser scanner.

## Referências

- [1] ICOMOS – *International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites (The Venice Charter 1964)*. ICOMOS, 1964.
- [2] ICOMOS – *European Charter of the Architectural Heritage*. ICOMOS, 1975.
- [3] Justo, J.L. – *Neotectonics and slope stabilization at the Alhambra, Granada, Spain*. Eng. Geol., 2008, vol. 100, no. 3–4, pp. 101-119.

- [4] Gómez-Moreno Calera, J.M. – *Estructuras defensivas de la Alhambra, I. Cuestiones Generales*. 2002, pp. 125–154.
- [5] Andaltura – *Torre de la Vela*. Available: <http://www.andaltura.com/andalucia/la-alhambra-y-el-generalife/torres-de-la-alhambra/torre-de-la-vela>. (Accessed: 17-Apr-2020).
- [6] Gómez-Moreno Martínez, M. – *Granada en el siglo XIII*. In *Monumentos arquitectónicos de España*, 2nd Ed., 1907, Granada.
- [7] López Bueno, M.; Torres Balbás L. – *Torre de la Vela*. Patronato de la Alhambra y Generalife, 1923.
- [8] Pavón Maldonado B. – *La Alcazaba de la Alhambra*. Cuad. La Alhambra, 1971, no. 7, pp. 3-34.
- [9] De la Torre López, M.J. et al. – *A study of the wall material in the Alhambra (Granada, Spain)*. Cem. Concr. Res., 1996, vol. 26, no. 6, pp. 825-839.
- [10] González Limón, T.; Casas Gómez, A. – *Estudio de los materiales y de las fábricas de la Torre de Comares de la Alhambra*. Cuad. La Alhambra, 1997, no. 33, pp. 95-104.
- [11] Ruano, E.B. – *Tópicos y realidades de la Edad Media*. Real Academia de la Historia, 2000.
- [12] Alhambra-Patronato – *Torre de la Vela*. Available: <https://www.alhambra-patronato.es/edificios-lugares/torre-de-la-vela>. (Accessed: 17-Apr-2020).
- [13] Borrás, G. – *La Alhambra actual y la Alhambra nazarí*. Available: <https://www.artehistoria.com/es/contexto/la-alhambra-actual-y-la-alhambra-nazarí>. (Accessed: 9-Apr-2020).
- [14] Molina-López, E. – *El emirato nazarí de Granada. El último bastión del Islam andalusí*. Andalucía en la Historia, Univ. de Granada, 2013.
- [15] Villegas Cerredo, D. – *Análisis estructural del patrimonio histórico. Torre del Homenaje de la Alhambra*. Tese de Mestrado, Master de Estructuras, Univ. de Granada, 2012.
- [16] DIANA FEA BV – *Diana User's Manual, Release 10.4*. DIANA FEA BV, Delft, 2020.
- [17] NTC – *Norme Tecniche per le Costruzioni. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (in Italian)*. Roma, 2018.
- [18] NTC – *Circolare 21 gennaio 2019 n.7 "Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018" (in Italian)*, vol. 35. Roma, 2019.
- [19] Ortega, J. et al. – *Assessment of the efficiency of traditional earthquake resistant techniques for vernacular architecture*. Eng. Struct., 2018, vol. 173, pp. 1-27.
- [20] Lourenço, P.B. – *Recent advances in masonry structures: micromodelling and homogenization*. In *Multiscale modeling in solid mechanics: computational approaches*, 2009, Imperial College Press, London, pp. 280-300.
- [21] Lourenço, P.B. et al. – *On the analysis of masonry structures without box behavior*. Int J Archit Herit: Conserv Anal Restorat, 2011, vol. 5(4-5), pp. 369–382.
- [22] Endo, Y. et al. – *Comparison of seismic analysis methods applied to a historical church struck by 2009 L'Aquila earthquake*. Bull. Earthq. Eng., 2015, vol. 13, no. 12, pp. 3749-3778.
- [23] Everett, M.E. – *Near-Surface Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 2013.