

# Avaliação do comportamento sísmico de abóbadas de aresta com recurso a ensaios em plataforma sísmica

Seismic performance of masonry cross vaults through shaking table tests

Nicoletta Bianchini  
Nuno Mendes  
Paulo Candeias  
Chiara Calderini  
Michela Rossi  
Paulo B. Lourenço

## Resumo

A avaliação do comportamento sísmico das abóbadas é fundamental para a preservação dos edifícios históricos. Apesar de existirem vários métodos e tipos de análise para a avaliação estrutural abóbadas, os ensaios experimentais são cruciais quer para avaliar a sua resposta quer para calibrar modelos numéricos. O presente artigo apresenta os resultados dos ensaios de um modelo experimental de uma abóbada de aresta, efetuados na plataforma sísmica do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). O modelo experimental foi construído à escala reduzida 1:5 e é constituído por blocos impressos em impressora 3D e por junta seca. Os ensaios têm como principal objetivo avaliar o comportamento do modelo para o mecanismo de dano associado ao corte no plano. Este mecanismo é causado sobretudo devido à diferença significativa de rigidez dos apoios/condições de fronteira. Os resultados dos ensaios em plataforma sísmica foram analisados em termos dano, frequência do modelo e mecanismo de colapso.

## Abstract

The assessment of the seismic behaviour of cross vaults is a crucial issue for the preservation of historical buildings. Although various methods and types of analyses exist, experimental studies are fundamental both to evaluate the structural behaviour of vaults and to calibrate models. This paper presents the results of shake table tests on a 1:5 scaled cross vault model made of 3D printed blocks assembled with dry joints, carried out at the 3D LNEC shake table (Portugal). The main aim of the tests is to investigate one of the most typical seismic damage for cross vaults associated to the shear failure. The results of the shake table tests were analysed in terms damage, frequency of the specimen and collapse mechanisms.

**Palavras-chave:** Abóbadas de aresta / Vulnerabilidade sísmica / Corte no plano / Plataforma sísmica

**Keywords:** Groin vaults / Seismic vulnerability / In-plane shear / Shake table

### Nicoletta Bianchini

Universidade do Minho, ISISE  
Aluna de doutoramento  
Guimarães – Portugal  
nicoletta.bianchini@gmail.com

### Nuno Mendes

Universidade do Minho, ISISE  
Guimarães – Portugal

### Paulo Candeias

NESDE, Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Lisboa – Portugal

### Chiara Calderini

DICCA, Universidade de Génova  
Genova – Itália

### Michela Rossi

DICCA, Universidade de Génova  
Génova – Itália

### Paulo B. Lourenço

Universidade do Minho, ISISE  
Departamento de Engenharia Civil  
Guimarães – Portugal

### 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.*

BIANCHINI, N. [et al.] – Avaliação do comportamento sísmico de abóbadas de aresta com recurso a ensaios em plataforma sísmica. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 17. ISSN 2183-8488. (novembro 2021) 71-80.

## 1 Introdução

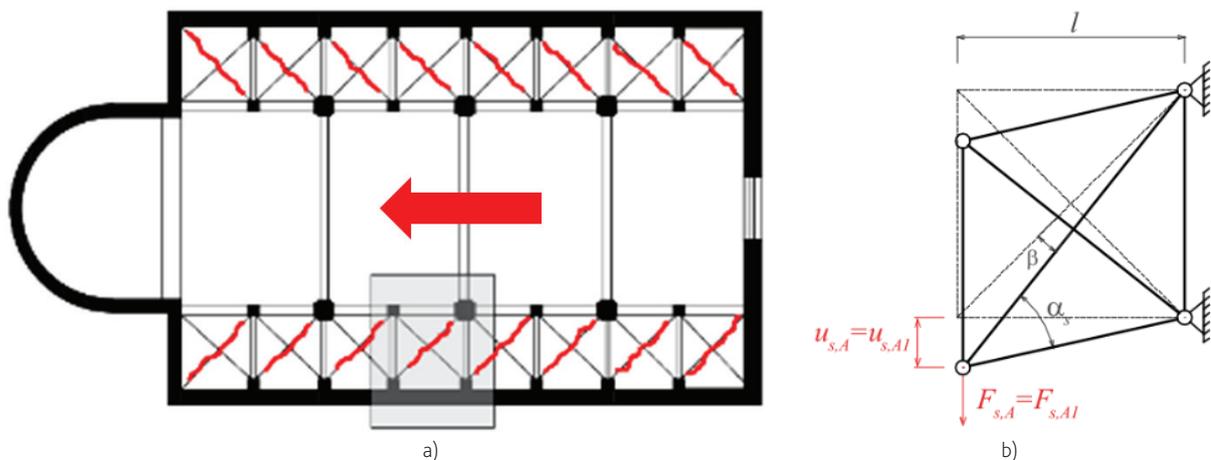
As abóbadas em alvenaria correspondem a um tipo de elemento estrutural muito frequente em edifícios históricos. As pesquisas sistemáticas de danos pós-sismo em edifícios históricos, incluindo igrejas, demonstram a vulnerabilidade das abóbadas às ações dinâmicas. Apesar da compreensão do comportamento tridimensional das abóbadas ser de fundamental para a preservação das construções históricas, a investigação neste tópico ainda é reduzida. A maioria dos trabalhos de investigação, existentes na literatura, focam-se na análise bidimensional das abóbadas, modelando-as como sequência de arcos, para ações estáticas e dinâmicas. Alguns investigadores analisaram o comportamento tridimensional de abóbadas, simulando indiretamente as ações sísmicas através da aplicação de deslocamentos diferenciais nos apoios, em abordagens numéricas e experimentais [1]-[3]. O objetivo principal deste artigo consiste na investigação do comportamento sísmico de uma abóbada de aresta com condições de fronteira assimétricas. Esta configuração é comum em corredores laterais de igrejas, lógias e claustros [4][5]. Durante os eventos sísmicos, as diferenças de rigidez entre a arcada da nave central e as paredes laterais podem conduzir a deslocamentos diferenciais e, conseqüentemente, à formação do mecanismo de corte no plano nos elementos estruturais horizontais (Figura 1) [6]. Este mecanismo é associado à ocorrência de fissuras diagonais, como apresentado na Figura 1a, e frequentemente observado em inspeções pós-sismo.

Este artigo descreve o estudo experimental de uma abóbada de aresta, construída à escala reduzida (1:5), ensaiada na plataforma sísmica do LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil), no âmbito do projeto da União Europeia SERA (*Seismology and Earthquake Engineering Research Infrastructure Alliance for Europe*). O modelo experimental, é representativo de uma abóbada central localizada na nave lateral de uma igreja de três naves (em cor cinza na Figura 1a e Figura 1b). Os resultados dos ensaios sísmicos são comparados com os resultados dos ensaios estáticos efetuados por Rossi *et al.* [6], onde a resposta devido ao corte no plano foi estudada aplicando deslocamentos diferenciais nos apoios (Figura 1b). Nos ensaios sísmicos, a resposta do modelo foi avaliada em função da amplitude crescente do sismo registado, no dia 29 de maio de 2012, em Emilia Romagna (Itália).

## 2 Ensaios experimentais

### 2.1 Modelo físico: geometria e materiais

Os ensaios foram realizados com um modelo à escala reduzida 1:5 constituído por blocos impressos em impressora 3D e por junta seca. Este modelo foi anteriormente ensaiado por Rossi *et al.* [6] através da aplicação de um deslocamento nos apoios. Os blocos foram impressos com a tecnologia SLS (Sinterização Seletiva a Laser), que corresponde a uma técnica que pode ser utilizada para gerar modelos reduzidos com elevada precisão (0,1 mm), custo reduzido e relativamente rápida produção. A geometria do modelo teve origem na intersecção de duas abóbadas de berço, resultando numa abóbada com planta quadrada, 0,620 m de vão e flecha de 0,225 m. O modelo é composto por 1132 blocos (Figura 2a), em que os blocos



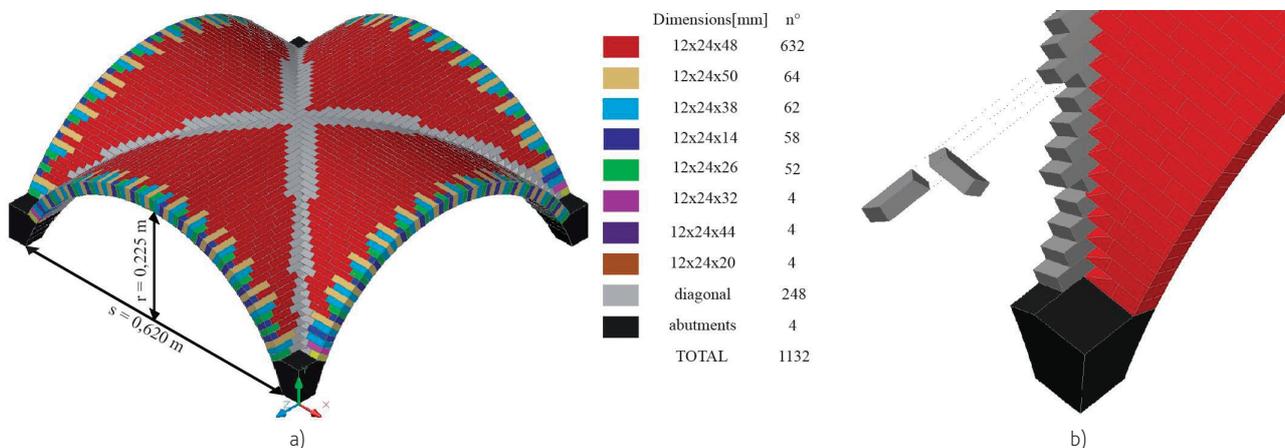
**Figura 1** a) Típico padrão de fendilhação das abóbadas das naves laterais, devido ao mecanismo de corte [7]; b) mecanismo simplificado considerado em [4] e [7]

padrão (blocos vermelhos da Figura 2a) foram definidos com base nas dimensões típicas dos tijolos sólidos ( $0,06 \times 0,12 \times 0,24 \text{ m}^3$ ), por forma a manter a estereotomia das abóbadas medievais. Os blocos com dimensões diferentes estão localizados na zona dos arcos exteriores, por forma a criar juntas transversais desalinhas. A forma dos blocos é ligeiramente trapezoidal para compensar a ausência de argamassa das juntas. A estereotomia e dimensões dos elementos das diagonais foram projetadas de forma particular (Figura 2b), tendo por objetivo garantir uma ligação adequada entre blocos.

As abóbadas de alvenaria apresentam diferentes tipos de aparelho, que envolvem igualmente diferentes disposições dos tijolos (Figura 3) [8]. O aparelho de alvenaria selecionado corresponde ao aparelho mais simples, ou seja com disposição de tijolos mais fácil de ser executada (Figura 3e) [4]. Este aparelho corresponde à disposição ortogonal, característica das abóbadas de aresta de médias e grandes dimensões, capaz de transferir diretamente as

forças para os apoios. No entanto, a sua construção requer uma estrutura temporária (cimbra). Assim, para construir o modelo, foi utilizada uma cofragem de contraplacado, com quatro peças que constituem as cascas da abóbada. Após a construção do modelo, a cofragem é removida deixando as peças livres para se deslocarem ao longo de quatro calhas adequadamente inclinadas (Figura 4). Note-se ainda que o fecho das cascas do modelo é efetuado com recurso de elementos metálicos (Figura 4b).

Os apoios da abóbada têm quatro chapas planas de aço, colocadas sobre esferas, permitindo movimentos no plano. De forma opcional, as chapas podem ser ancoradas à base através de parafusos. Os apoios estão ligados entre si por hastes de alumínio com olhais nas extremidades. A densidade do material das diagonais ( $0,55 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ ) e o ângulo de atrito ( $29,6 \pm 2,5^\circ$ ) foram determinados através de ensaios em 12 amostras. O peso dos blocos padrão foi aumentado, inserindo uma placa de aço dentro de cada bloco (Figura 5). A massa total do modelo é de cerca de 43 kg.



**Figura 2** a) Geometria e blocos da abóbada (escala 1:5); b) estereotomia das diagonais [6]

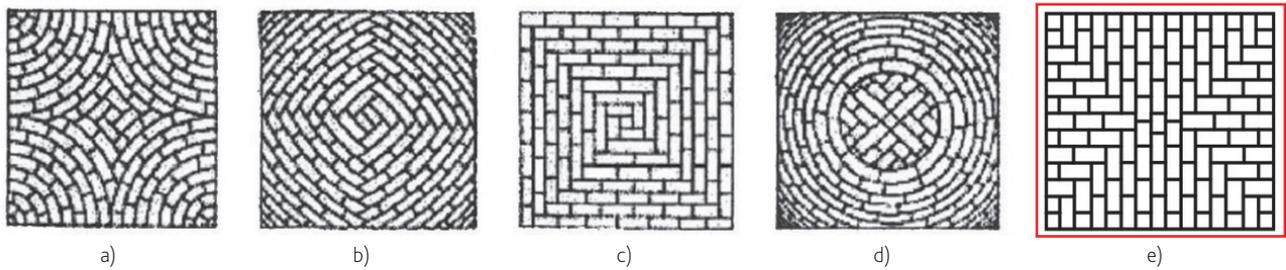


Figura 3 Aparelhos de alvenaria mais utilizados em abóbadas de aresta [8]

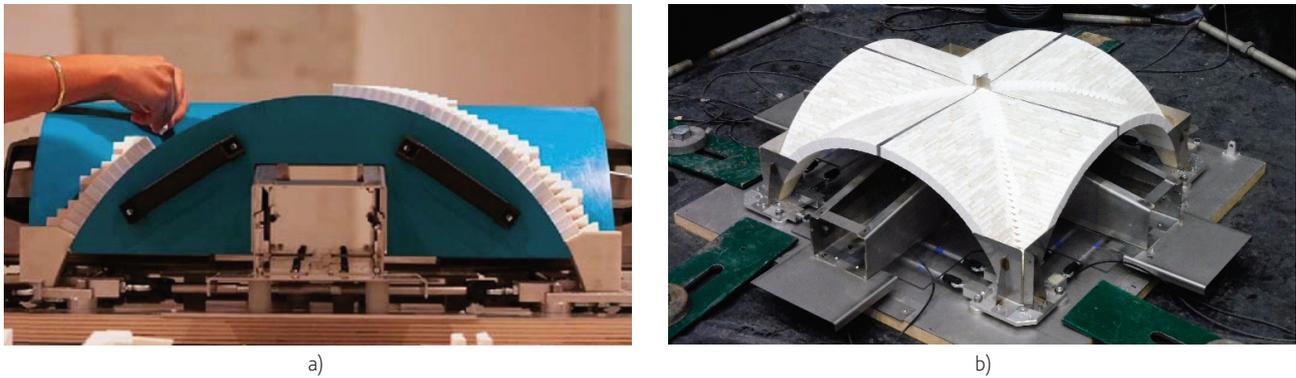


Figura 4 a) Pormenores da construção e da cofragem b) aspeto final, após construção [6]

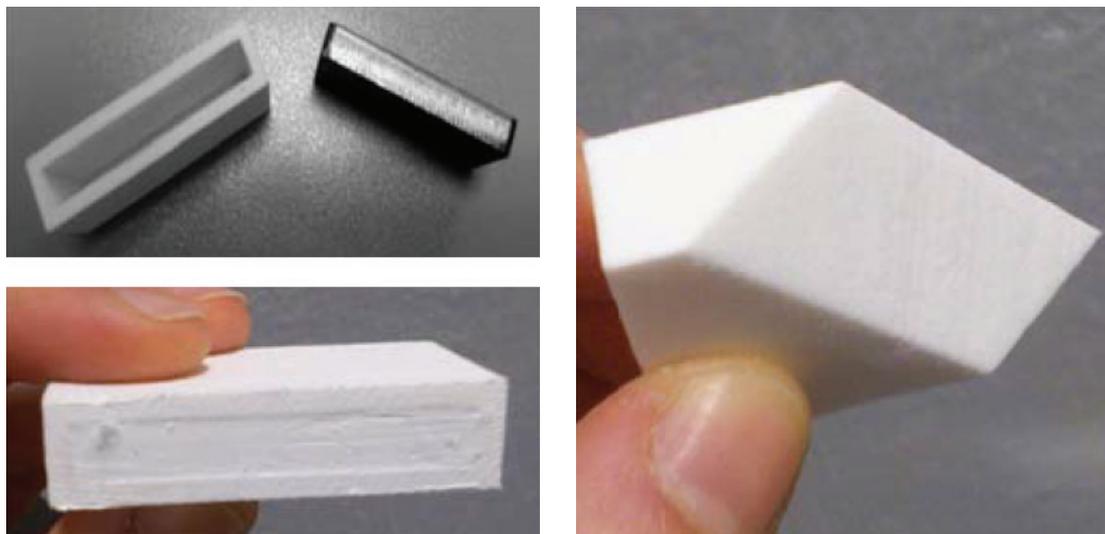


Figura 5 Pormenores dos blocos padrão e dos blocos das diagonais

## 2.2 Ensaios em plataforma sísmica

A configuração do ensaio foi definida de forma a se induzir uma rotura por corte no plano, nomeadamente através de condições de fronteira semelhantes às abóbadas existentes nos edifícios (Figura 6b). Os apoios p1 e p2 foram fixos à base através parafusos. Por sua vez, os apoios p3 e p4 permitem a ocorrência de deslocamentos no plano.

A instrumentação do modelo foi definida tendo por base o comportamento expectável para a ação sísmica, com particular interesse para a caracterização do comportamento dos apoios e do arco lateral (alçado oeste). O plano de instrumentação teve em consideração as reduzidas dimensões do modelo, tendo sido instalados os seguintes equipamentos (Figura 6): (1) um transdutor de deslocamento variável linear (LDVT1), localizado no apoio NW, por forma a medir o deslocamento relativo na direção longitudinal dos apoios deslizantes; (2) seis acelerómetros piezoelétricos (PCB<sub>1x,z</sub>, PCB<sub>1y,z</sub>, PCB<sub>1z,z</sub>, PCB<sub>2x,z</sub>, PCB<sub>2y,z</sub>, PCB<sub>2z,z</sub>, ver Figura 6b) aplicados na base dos apoios fixos; (3) cinco acelerómetros de pequenas dimensões (VCO<sub>1x,z</sub>, VCO<sub>2y,z</sub>, VCO<sub>3x,z</sub>, VCO<sub>4y,z</sub>, VCO<sub>5z,z</sub>) colocados no topo dos apoios deslizantes e no arco este do modelo; (4) duas câmaras digitais com sensores óticos por forma a medir a resposta em deslocamento do apoio deslizante p3 (H<sub>1xy</sub>) e do centro do arco oeste (H<sub>2yz</sub>); (5) duas câmaras de filmar, nomeadamente uma câmara colocada precisamente no centro do modelo (vista superior), com a uma estrutura metálica auxiliar, e outra localizada de frente para alçado este, através da instalação de um tripé fora da plataforma sísmica. Estas câmaras de filmar foram fundamentais para avaliar a resposta global do modelo, incluindo o mecanismo de colapso (Secção 3).

## 2.3 Ensaios de identificação dinâmica

Os ensaios de identificação dinâmica permitem estimar as propriedades dinâmicas da estrutura (frequências, modos de vibração e coeficientes de amortecimento) e avaliar a existência de dano. Neste estudo, recorreu-se a ensaios de vibração forçada para estimar as propriedades dinâmicas do modelo, antes do primeiro e após cada ensaio sísmico com amplitude crescente. O sinal aplicado corresponde a um sinal do tipo ruído branco, de baixa amplitude, elevado domínio em frequência e duração de 165 s (60 s de fase intensa). Foram ainda efetuados ensaios de identificação dinâmica com diferentes amplitudes do sinal de excitação, tendo por objetivo avaliar a influência da amplitude do sinal nas propriedades do modelo. Neste artigo, a amplitude do sinal dos ensaios de identificação dinâmica é apresentada em termos de deslocamento máximo.

Na Figura 7 é possível verificar que a frequência do primeiro modo de vibração do modelo varia entre 3,22 Hz a 4,50 Hz para uma variação da amplitude do sinal de 8 mm a 3 mm, respetivamente. De acordo com o esperado, o aumento da amplitude do sinal causa uma diminuição da frequência do modelo. Além disso, os ensaios de identificação dinâmica realizados em dias diferentes e após diferentes reconstruções do modelo apresentam frequências semelhantes para a mesma amplitude de sinal (5 mm), concluindo-se que a frequência do primeiro modo do modelo mantém-se praticamente constante, apesar dos diferentes processos e condições de reconstrução. Assim, a reconstrução do modelo sem alterações significativas, para realização de novos ensaios, é um aspeto relevante e fundamental para a consistência e comparação dos resultados.

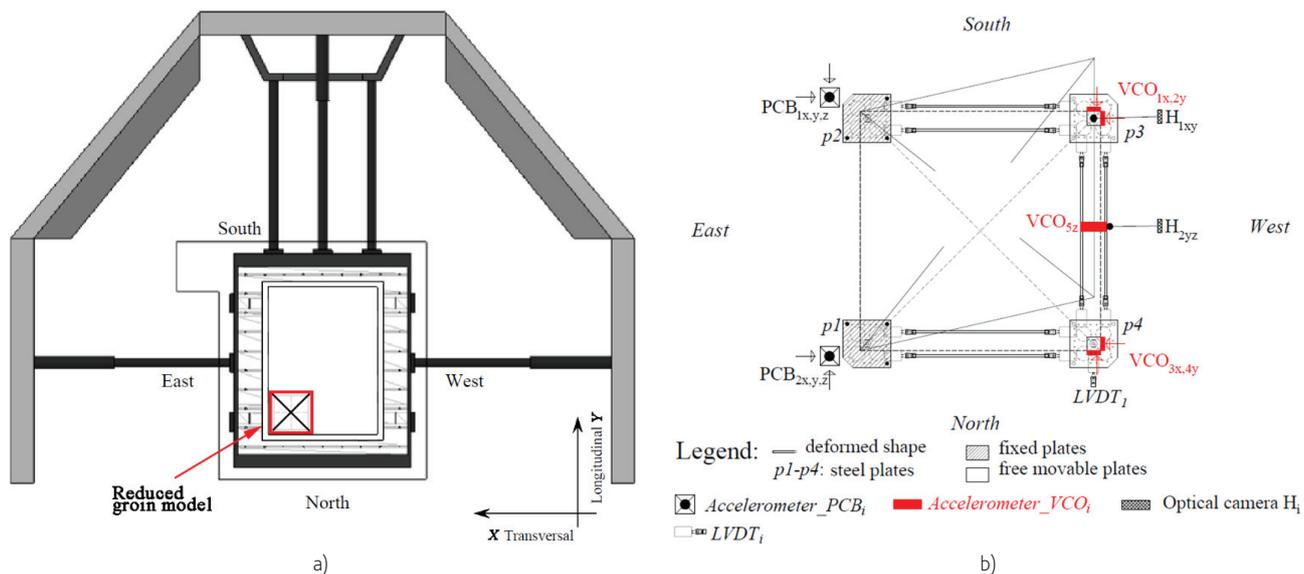
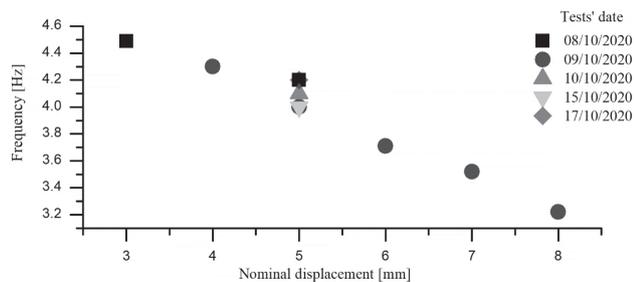


Figura 6 Ensaios em plataforma sísmica: a) planta com a localização do modelo destacada a vermelho; b) instrumentação do modelo (vista superior)



**Figura 7** Frequência em função da amplitude do sinal do ensaio de identificação dinâmica

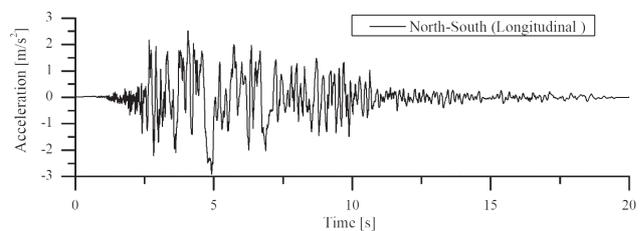
## 2.4 Ensaios sísmicos

Nos ensaios sísmicos, adotou-se o sismo de Emilia (Itália), sobretudo devido à presença significativa de abóbadas naquela região. Durante as inspeções pós-sismo efetuadas nesta região, foram observados diversos casos de danos em abóbadas, igrejas e palácios, associados à rotura por corte no plano. Na definição da ação sísmica, recorreu-se aos acelerogramas registados na estação sísmica de Mirandola (MRN), localizada a 4 km do epicentro do sismo, com intensidade de 7-8 na Escala Macro sísmica Europeia de 1998, PGA de 0,27-0,30 g e duração de 30 s (Tabela 1). O ensaio em plataforma sísmica corresponde a um ensaio uniaxial, pelo que se adotou a componente Norte-Sul do sismo. A duração do acelerograma foi reduzida para 20 s, mantendo a parte intensa original, e filtrado, por forma a corrigir a serie temporal de deslocamentos (Figura 8). Nos ensaios sísmicos, a duração do acelerograma foi escalado de acordo com a

escala do modelo, em que o tempo foi reduzido através de um fator igual à raiz quadrada de 5, resultando numa duração total de cerca de 9 s.

**Tabela 1** Parâmetros de pico das componentes do sismo registado (29 de maio de 2012) [11]

	PGA [m/s <sup>2</sup> ]	PGV [m/s]	PGD [m]
North-South (Longitudinal)	0,295	0,463	0,105



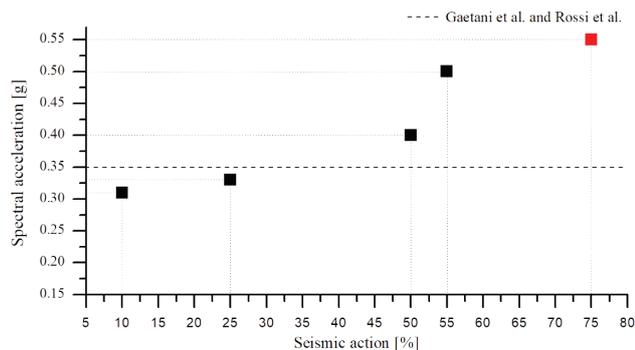
**Figura 8** Acelerograma Norte-Sul do sismo na registado na estação sísmica MRN (20 s)

A Tabela 2 apresenta a sequência de ensaios sísmicos realizados na plataforma sísmica com reconstrução do modelo em diferentes dias, a variação da frequência do modelo, estimada através dos ensaios de identificação dinâmica, e uma breve descrição do dano. Nesta fase do trabalho, adotou-se o sinal com amplitude de 5 mm para a realização dos ensaios de identificação dinâmica. Os resultados demonstram uma redução da frequência em função do

**Tabela 2** Sequência de ensaios realizados, frequências e breve descrição do dano

Tipo de ensaio	Frequência [Hz]	Descrição do dano
Identificação dinâmica	4,10	Sem dano
Sismo: 10%		Deslocamento descendente dos blocos da parte central (n.º 2)
Identificação dinâmica	4,10	Deslocamento descendente dos blocos da parte central (n.º 3)
Sismo: 25%		Sem dano
Identificação dinâmica	4,00	Deslocamento descendente dos blocos da parte central (n.º 3)
Sismo: 50%		Falha diagonal/corte. Deslizamento das extremidades (apoios fixos)
Identificação dinâmica	3,91	Deslocamento descendente dos blocos da parte central (n.º 3)
Sismo 55%		Colapso da parte central e deslizamento na extremidade
Identificação dinâmica	3,42	Sem dano adicional
Sismo 75%		Colapso

aumento da amplitude sísmica aplicada, indicativo da presença de dano. No último teste de identificação dinâmica, a frequência do modelo apresentou uma diminuição de cerca de 21% (3,22 Hz), relativamente à frequência inicial sem dano (4,10 Hz).



**Figura 9** Aceleração espectral em função da amplitude da ação sísmica (as réplicas não estão representadas; colapso destacado a vermelho)

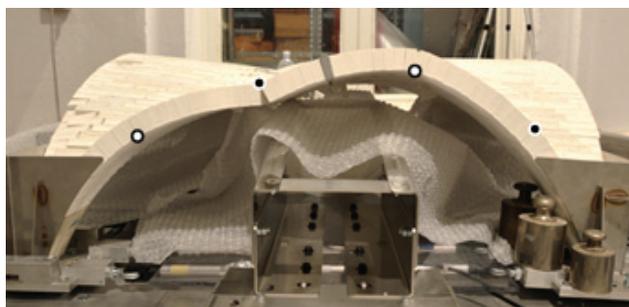
Na análise dos resultados dos ensaios sísmicos, determinaram-se as acelerações espectrais associadas às frequências do modelo à escala reduzida. Figura 9 apresenta a aceleração espectral associada a cada ação sísmica aplicada nos ensaios sísmicos (Tabela 2). Em comparação com os ensaios quase estáticos realizados por Rossi *et al.* [6] e com as análises numéricas realizadas por Gaetani *et al.* [12] (linha a traço interrompido na Figura 9), os resultados obtidos nestes testes sísmicos indicam que o mesmo modelo quando sujeito

a uma ação dinâmica apresenta uma capacidade superior (fator de 1.5) à capacidade obtida através de uma ação quase estática.

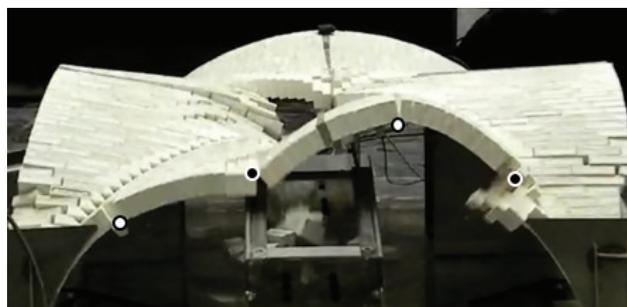
### 3 Avaliação do mecanismo de colapso

De acordo com o descrito anteriormente, os ensaios sísmicos envolveram vários ensaios com diferentes amplitudes. Nesta Secção descreve-se o mecanismo de colapso obtido nos ensaios de 75% aplicado na direção longitudinal (Norte-Sul, Figura 6). A localização das rótulas foi analisada a partir do alçado este, onde é possível verificar que o modelo apresenta uma configuração de rótulas semelhante à observada nos ensaios quase estáticos (Figura 10). As chapas de aço localizadas nos quatro apoios do modelo aumentam a rigidez nestas partes do modelo e, conseqüentemente, surgem duas rótulas nas extremidades junto das chapas, o que está de acordo com estudos baseados nas formulações de energia mínima efetuados por Oppenheim [13] e De Lorenzis *et al.* [14]. O mecanismo do arco é constituído por quatro rótulas, e está sobretudo associado à parte do modelo com os apoios fixos (parte mais rígida) (Figura 10).

O mecanismo de colapso foi analisado com recurso a uma sequência de fotos, através da qual avaliou-se também o número e a localização das rótulas. A Figura 11 apresenta a fase de maior intensidade sísmica aplicada antes do colapso da abóbada, observada através da câmara posicionada na parte superior do modelo. O centro da abóbada é a primeira do modelo a colapsar. O colapso dos blocos no centro da abóbada não interfere na rotura por corte no plano, que se inicia aos 2 s do sismo, acompanhada pela formação das rótulas. As extremidades sul e este foram as primeiras a colapsar.

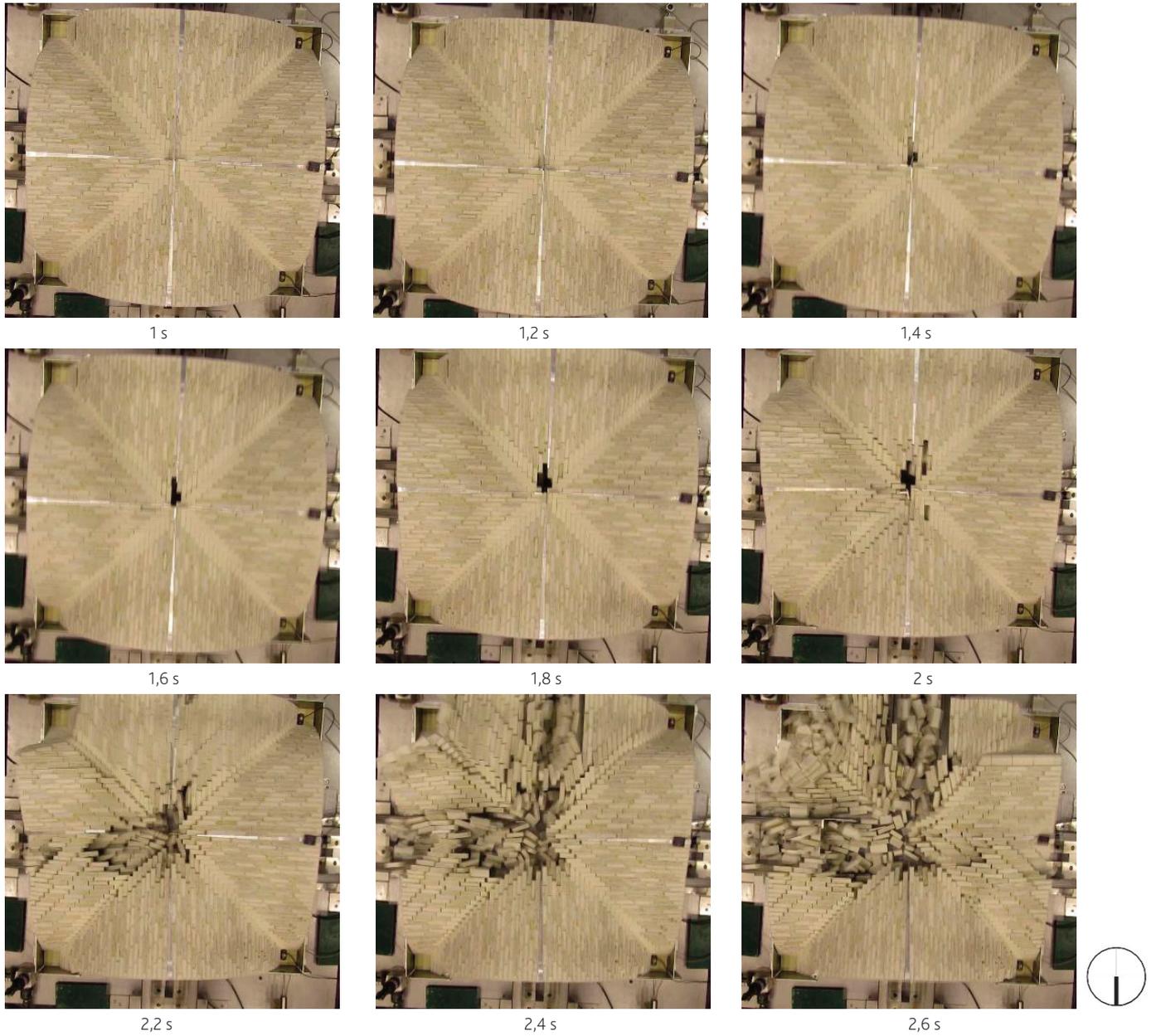


a)



b)

**Figura 10** a) Comparação do dano obtido através do ensaio quase estático [6] e b) o ensaio em plataforma sísmica



**Figura 11** Evolução do dano do modelo durante a fase intensa do sismo de 75% (5 frames/s) (À esquerda: apoios fixos; à direita: apoios deslizantes)

## 4 Conclusões

Este artigo apresenta os ensaios de um modelo de uma abóbada de aresta, construído à escala 1:5, realizados em plataforma sísmica. Foram efetuados ainda ensaios de identificação dinâmica, por forma a avaliar a redução da frequência do modelo em função do dano. A resposta dinâmica do modelo foi comparada com os resultados obtidos através de ensaios quase estáticos.

Os resultados dos ensaios dinâmicos permitiram concluir que: (1) as rótulas concentram-se na parte mais rígida do modelo (apoios fixos) e apresenta uma configuração semelhante à obtida nos ensaios quase estáticos; (2) o modelo apresentou uma rotura por corte no plano, com concentração de dano nas partes sul e este da abóbada; (3) a capacidade da estrutura obtida através dos ensaios dinâmicos é superior à capacidade através dos testes quase estáticos (fator de 1,5); (4) a aceleração espectral no colapso é igual a 0,55 g. Note-se que este valor corresponde à ação na abóbada sem ter em consideração a ampliação dinâmica em altura da igreja.

## Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo financiamento da bolsa de doutoramento SFRH/BD/136831/2018. Os autores agradecem ainda ao projeto SERA.ta Project #7.

## Referências

- [1] Block, P.; Ciblac, T.; Ochsendorf, J.A. – "Real-time limit analysis of vaulted masonry buildings," *Comput. Struct.*, vol. 84, no. 29-30, pp. 1841-1852, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.compstruc.2006.08.002.
- [2] Milani, G.; Tralli, A. – "A simple meso-macro model based on SQP for the non-linear analysis of masonry double curvature structures," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 49, no. 5, pp. 808-834, 2012, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2011.12.001.
- [3] Torres, B.; Bertolesi, E.; Moragues, J.J.; Calderón, P.A.; Adam, J.M. – "Experimental investigation of a full-scale timber masonry cross vault subjected to vertical settlement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 221, pp. 421-432, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.015.
- [4] Rossi, M. – "Evaluation of the Seismic Response of Masonry Cross Vaults," Università degli Studi di Genova, 2015.
- [5] Giovanetti – *Manuale del recupero del Comune di Città di Castello*. Rome (in Italian): DEI, 2000.
- [6] Rossi, M. Calderini, C.; Lagomarsino, S. – "Experimental testing of the seismic in-plane displacement capacity of masonry cross vaults through a scale model," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 14, no. 1, pp. 261-281, 2016, doi: 10.1007/s10518-015-9815-1.
- [7] Bianchini, N.; Mendes, N.; Lourenço, P.B.; Calderini, C.; Rossi, M. – "Seismic assessment of masonry cross vaults through numerical nonlinear static and dynamic analysis," in *COMPADYN 2019 7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, no. 1, pp. 600-612, [Online]. Available: <https://doi.org/10.7712/120119.6942.18709>.
- [8] Raimondi, A. – "La chiesa di Santa Maria in Scaria. Gestire la complessità: dal rilievo al BHIM," 2013.
- [9] Penna, A.; Morandi, P.; Rota, M.; Filippo, C.; Guido, P. – "Performance of masonry buildings during the Emilia 2012 earthquake," *Bull. Earthq. Eng.*, pp. 2255-2273, 2014, doi: 10.1007/s10518-013-9496-6.
- [10] Bozzoni, F.; Lai, C.G.; Scandella, L. – "Preliminary results of ground-motion characteristics," *Ann. Geophys.*, vol. 55, no. 4, pp. 609-614, 2012, doi: 10.4401/ag-6121.
- [11] Gaetani, A.; Bianchini, N.; Lourenço, P.B. – "Simplified micro-modelling of masonry cross vaults: Stereotomy and interface issues," *Int. J. Mason. Res. Innov.*, vol. 6, no. 1, pp. 97-125, 2021, doi: 10.1504/IJMRI.2021.112076.
- [12] Oppenheim, I.J. – "The masonry arch as a four-link mechanism under base motion," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 21, no. 11, pp. 1005-1017, 1992, doi: 10.1002/eqe.4290211105.
- [13] Lorenzis, L. De; Dejong, M.J.; Ochsendorf, J.A. – "Failure of masonry arches under impulse base motion," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 36, no. 14, pp. 2119-2136, Nov. 2007, doi: 10.1002/eqe.719.

