

Avaliação do comportamento sísmico de edifícios de alvenaria tradicional usando uma abordagem inovadora baseada em BIM

Evaluation of the seismic behaviour of traditional masonry buildings using an innovative BIM-based approach

Maria Laura Leonardi
Miguel Azenha
Daniel V. Oliveira

Resumo

Os edifícios em alvenaria tradicional são particularmente vulneráveis aos sismos. A aplicação de modelos constitutivos baseados em dano plástico, em conjunto com uma modelação por elementos finitos sólidos, é um método de análise que permite captar diversos modos de colapso destas estruturas. Apesar do seu potencial, este tipo de análise é bastante difícil de aplicar em casos reais devido à necessidade de uma modelação detalhada, custos computacionais e dificuldades em executar a análise em regime não-linear. Para superar estas limitações, propõe-se neste trabalho uma nova metodologia baseada no uso do BIM e na paralelização do código de elementos finitos. Neste trabalho, esta metodologia foi aplicada a um edifício de alvenaria tradicional, com pisos em madeira, para o qual existem resultados experimentais de testes realizados em mesa sísmica. Nesta aplicação foi particularmente importante a modelação das ligações entre paredes e vigas, modeladas com uma lei não-linear. Foram obtidas as curvas de capacidade nas duas direções da estrutura (sentidos positivo e negativo), e os resultados da distribuição do dano possibilitaram deduzir prováveis mecanismos de colapso.

Palavras-chave: Alvenaria / Análise sísmica / BIM / Método dos elementos finitos / Paralelização

Abstract

Traditional masonry buildings are particularly vulnerable to earthquakes. The application of constitutive models based on plastic damage, together with solid finite element modelling, is a method that makes possible to capture various collapse modes of these structures. Despite its potential, this type of analysis is quite difficult to apply in real cases, due to the need for detailed modelling, computational costs and difficulties in performing non-linear analyses. To overcome these limits, a new methodology based on the use of BIM and the parallelisation of the finite element code is proposed. This work applied this methodology to a traditional masonry building with wooden floors, for which exist experimental results from tests carried out on a seismic table. Particularly important in this application was the modelling of the connections between walls and beams, modelled using a non-linear law. Capacity curves were obtained in all four directions of the structure, and the damage distribution results made it possible to deduce probable collapse mechanisms.

Keywords: Masonry / Seismic analysis / BIM / Finite element method / Parallelization

Maria Laura Leonardi

Aluna de doutoramento
ISISE
0000-0003-3659-3955
mlauraleonardi@gmail.com

Miguel Azenha

Professor Associado
ISISE
0000-0003-1374-9427
miguel.azenha@civil.uminho.pt

Daniel V. Oliveira

Professor Associado
ISISE
0000-0002-8547-3805
danvco@civil.uminho.pt

Aviso legal

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

Legal notice

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

LEONARDI, M. [et al.] – Avaliação do comportamento sísmico de edifícios de alvenaria tradicional usando uma abordagem inovadora baseada em BIM. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 26. ISSN 2183-8488. (novembro 2024) 47-58.
<https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n26-004>

1 Introdução

Os edifícios em alvenaria tradicional constituem uma parte considerável do património edificado europeu. Eventos sísmicos passados, como os casos de L'Áquila e Emilia Romagna, em Itália, demonstraram a vulnerabilidade sísmica destas construções [1], [2]. A comunidade científica identificou os mecanismos de dano mais recorrentes, que foram classificados em mecanismos de primeiro tipo e de segundo tipo. Os mecanismos de primeiro tipo são os mais perigosos, e ocorrem quando uma parede, ou uma parte dela, se move perpendicularmente ao seu plano. Neste caso, os mecanismos são identificados como 'mecanismos para fora do plano'. Os mecanismos de segundo tipo, por outro lado, dependem geralmente da resistência ao corte da alvenaria. O tipo de dano destes mecanismos ocorre 'no plano' da própria parede e são identificados como 'mecanismos no plano' [3]. Os mecanismos são definidos de primeiro e segundo tipo devido ao momento em que são ativados. Tipicamente, os mecanismos de primeiro tipo ativam-se com sismos menos fortes. A sua ativação depende: (a) da qualidade da secção de alvenaria e do potencial da mesma a desagregar-se; (b) falta de ligações adequadas entre paredes adjacentes ou entre as paredes e a estrutura horizontal do edifício. Por sua vez, os mecanismos de segundo tipo dependem principalmente das propriedades mecânicas da alvenaria, em particular da resistência ao corte. A ativação dos mecanismos de segundo tipo ocorre recorrentemente para sismos mais fortes.

O estudo do comportamento sísmico dos edifícios em alvenaria tradicional tem um papel fundamental na prevenção de colapsos. Os métodos de análise destas estruturas diferem bastante dos métodos geralmente usados no dimensionamento sísmico de estruturas novas. Isto deve-se ao fato dos materiais e estruturas modernas terem um comportamento completamente diferente em relação à alvenaria, mas também à possibilidade de conhecer, de forma clara, as estruturas existentes. De facto, enquanto as estruturas 'novas' ou mais recentes são construídas atendendo ao código de construção atual ou a um período histórico bem definido no qual se pode rastrear o código de construção, o mesmo não é possível para as estruturas tradicionais em alvenaria. A qualidade da alvenaria depende da observação, pelos construtores, da 'regra da arte', ou seja uma série de regras empíricas que os construtores deviam seguir para garantir que as paredes apresentassem um comportamento monolítico para que os elementos construtivos ficassem bem ligados entre si [4,5]. Entre estas regras encontra-se a presença de blocos colocados ortogonalmente ao plano da parede para melhorar a ligação entre os panos de alvenaria e paredes adjacentes, e a presença de tirantes para permitir o comportamento do edifício como um todo, ou seja, para manter as paredes bem ligadas entre si. A interação entre as paredes de alvenaria e as vigas de madeira desempenha um papel importante. De facto, uma boa ligação entre estes elementos promove um bom comportamento em bloco, enquanto uma má ligação pode levar a dano das paredes devido ao movimento das vigas, ver Figura 1 [3, 6].

No contexto Europeu, a comunidade científica italiana está bastante avançada no que se refere à avaliação do comportamento sísmico de estruturas em alvenaria devido à perigosidade sísmica do seu território e à considerável quantidade de centros históricos.

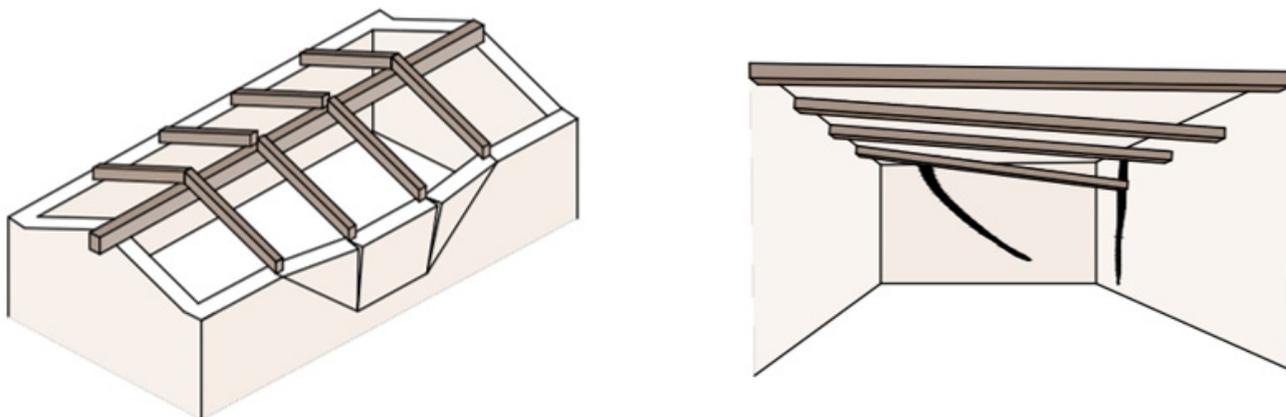


Figura 1 Efeito das vigas indevidamente ligadas às paredes em edifícios de alvenaria tradicional – adaptado de (Giuffré *et al.*, 2010)

Esta relevância é visível tanto a nível de recomendações como de normativas propriamente ditas. Uma parte substancial do trabalho foi desenvolvido pelo ‘Consórcio da Rede dos Laboratórios Universitários de Engenharia Sísmica e Estrutural’. Um dos trabalhos-chave é relativo à classificação de mecanismos específicos de colapso para fora do plano e à definição de uma série de equações, baseadas na análise cinemática, que permitem obter a carga última relativa ao comportamento para fora do plano [7].

As recomendações italianas abordam três diferentes níveis de avaliação sísmica de edifícios em alvenaria tradicional, com níveis distintos de complexidade, que devem ser escolhidos com base no conhecimento da estrutura em análise [8]. A primeira tipologia é uma simples verificação da resistência ao corte das paredes de alvenaria. A segunda refere-se à análise dos mecanismos locais, baseada na análise cinemática. A terceira é baseada no uso de modelos globais da estrutura. Enquanto a primeira e a segunda abordagens analisam de forma distinta um único tipo de fenómeno, os modelos globais permitem estudar o comportamento global da estrutura, considerando, de forma conjunta, mais de um tipo de comportamento. Isto é particularmente importante no caso dos edifícios em agregado, ou seja, grupos de edifícios ligados entre si e que têm um comportamento conjunto particular [9].

A fase de conhecimento do edifício representa uma parte substancial do documento [8] onde se reconhece a importância da sinergia entre vários atores envolvidos no conhecimento do edifício. Esta divide-se em três etapas: análise histórico-crítica, levantamento e caracterização mecânica dos materiais. A caracterização mecânica depende das duas primeiras etapas. Com base na quantidade de dados obtidos, a normativa identifica três níveis de conhecimento, cada um com o seu respetivo fator de confiança. Esses fatores ajudam a calibrar os parâmetros mecânicos da alvenaria, considerando que não se tem um conhecimento completo do edifício [10].

Segundo a normativa, os modelos globais só podem ser utilizados quando houver um nível aprofundado de conhecimento da estrutura, tanto em termos de geometria como de propriedades mecânicas. Os modelos globais para a análise de estruturas de alvenaria podem ser classificados com base na forma da discretização da alvenaria [11]. Os modelos de pórtico equivalente dividem as paredes em

painéis e associam três critérios de colapso considerados pela normativa italiana: rutura das juntas, rutura ao corte com fissura diagonal e rutura à flexão por esmagamento da alvenaria [12]. Este tipo de modelação permite definir principalmente os tipos de colapso de segundo tipo. Por outro lado, as estruturas podem ser analisadas recorrendo a modelos globais de elementos finitos, aos quais é atribuída a lei constitutiva da alvenaria. Frequentemente, a comunidade científica tem utilizado modelos constitutivos de dano plástico [13, 14]. Para o caso de elementos finitos sólidos, estes modelos permitem captar tanto a rutura no plano da alvenaria quanto a rutura para fora do plano.

Além dos critérios de discretização das paredes de alvenaria, atribuição das leis constitutivas e parâmetros mecânicos, o tipo de análise desempenha um papel fundamental. As análises podem ser lineares ou não-lineares, estáticas ou dinâmicas. Considerando que os sismos são eventos dinâmicos e que os edifícios em alvenaria tradicionais têm um comportamento marcadamente não linear, as análises dinâmicas não-lineares poderiam parecer a escolha mais adequada. Neste tipo de análise, conhecidas como ‘análises temporais não-lineares’, é necessário definir um sinal sísmico específico e calcular o comportamento temporal da estrutura. Estas análises apresentam elevados custos computacionais, bem como a resposta a um acontecimento sísmico específico. Uma alternativa viável é realizar análises *pushover*, ou seja, análises estáticas não lineares em que se aplica um perfil vertical de carga horizontal crescente. Estas análises permitem um estudo adequado da capacidade global do edifício, permitindo obter a ‘curva de capacidade’, que pode ser posteriormente comparada com o espectro sísmico.

Portanto, as análises baseadas em método para elementos finitos (MEF) sólidos permitem o estudo do comportamento global da estrutura, identificando possíveis colapsos de primeiro e segundo tipo e, quando associadas a análises *pushover*, podem fornecer informações sobre a capacidade global do edifício. No entanto, é frequentemente difícil usar esta metodologia no meio profissional. Isto deve-se essencialmente a: (a) necessidade de uma modelação detalhada, que frequentemente apresenta dificuldades geométricas; (b) custos computacionais consideráveis; (c) complexidade da análise não-linear.

No sentido de mitigar as limitações acima apontadas, os autores desenvolveram uma nova ferramenta para a análise sísmica de edifícios tradicionais em alvenaria baseada em elementos finitos sólidos [15]. O método proposto é baseado no uso da metodologia Building Information Modelling (BIM), com o objetivo de facilitar a modelação dos dados geométricos e não geométricos, mas também com a ambição de melhorar a sinergia entre os profissionais envolvidos na análise do edifício. Além disso, o código de elementos finitos é paralelizado para otimizar os custos computacionais e tornar a análise mais rápida. Finalmente, é utilizado um algoritmo misto implícito/explicito [16, 17] para facilitar o processo de análise não-linear.

A metodologia desenvolvida foi aplicada a um caso de estudo constituído por um edifício testado em mesa sísmica no EUCENTRE [18]. Trata-se de um edifício tradicional de alvenaria, de dois pisos, que apresenta aberturas irregulares e que foi testado em duas configurações: sem reforço e com reforço. Neste trabalho foi estudada a configuração não reforçada. Os resultados consistem na curva *pushover* de capacidade e no padrão de dano. Além disso, dada a relevância das ligações em madeira, foi realizada uma simulação considerando ligações 'imperfeitas' entre paredes e vigas, baseada na metodologia proposta em [19].

Após a introdução, a segunda secção do artigo é dedicada à interoperabilidade entre modelos BIM e modelos de elementos finitos. A terceira secção discute as regras de modelação estrutural inseridas na metodologia. A quarta secção discute a paralelização da análise numérica. A quinta secção apresenta os principais resultados das aplicações e, por fim, são discutidas as conclusões.

2 Interoperabilidade entre BIM e MEF

O BIM é uma metodologia para a partilha de informação e comunicação entre todas as partes interessadas e todas as fases do ciclo de vida de uma construção, suportada por um modelo digital, acessível através de software e que permite a manipulação virtual da construção [20]. Desde a sua introdução, o BIM tornou-se cada vez mais importante e, atualmente, vários países decidiram integrá-lo de forma obrigatória para certos tipos de construções com elevados custos. No caso de Portugal já se perspetiva a obrigatoriedade do licenciamento urbanístico em BIM a partir do 2030 [21].

Apesar do BIM ter sido introduzido para o projeto de novas construções, a comunidade científica reconheceu o potencial desta ferramenta também na área da conservação do património histórico. O termo 'Historic Building Information Modeling', ou HBIM, refere-se à aplicação da metodologia BIM às estruturas existentes [22]. Como o BIM é uma metodologia inicialmente desenvolvida para o projeto de novas estruturas, foram encontradas algumas dificuldades na sua aplicação à conservação de edifícios existentes. As principais dificuldades relacionam-se com a modelação, a necessidade de incluir informações diferentes das relativas ao projeto de novas estruturas e a interoperabilidade entre software com diferentes objetivos.

Diversos estudos focaram-se nas problemáticas da modelação geométrica, propondo a integração de metodologias avançadas de levantamento geométrico, como varrimento laser ou fotogrametria

[23], [24]. Outros estudos propuseram o enriquecimento das informações não geométricas no modelo [25]. Além disso, alguns destacaram o potencial do BIM para realizar simulações, incluindo simulações energéticas [26] e estruturais [27].

No campo das simulações, uma das questões mais relevantes é a interoperabilidade. O termo interoperabilidade refere-se à capacidade de dois sistemas interagirem entre si [28]. No caso do BIM, a interoperabilidade diz respeito principalmente à capacidade de usar o mesmo modelo para diferentes finalidades, exportando-o em formatos comuns. Isso pode ser feito com um único software ou entre diferentes softwares, usando o formato de troca aberto IFC (Industry Foundation Classes) [29].

No que diz respeito ao projeto de novas estruturas, é relativamente fácil exportar modelos BIM para simulações estruturais, uma vez que vários softwares já permitem a exportação do modelo analítico a partir do modelo geométrico [30]. No contexto da conservação de edifícios históricos, no entanto, é frequentemente necessário usar software específico, que não tem interoperabilidade com o software BIM. Isso aplica-se tanto ao uso de métodos baseados em pórticos equivalentes ou em elementos finitos, sendo particularmente relevante para análises sísmicas.

Para resolver este problema, a comunidade científica propôs diversas metodologias. Num trabalho anterior, os autores desenvolveram um código para exportar os modelos do Revit para o 3Dmacro, permitindo a criação automática de modelos de pórtico equivalente [31]. Outros implementaram modelos de elementos finitos usando Abaqus [32] ou Diana FEA [33] de forma semiautomática a partir de modelos BIM. Além disso, os autores propuseram uma metodologia para análise de elementos finitos a partir do BIM [15].

No caso da ferramenta proposta pelos autores e utilizada neste artigo, a principal diferença é baseada em OpenBIM, usando como software de análise estrutural o OpenSees. O OpenBIM é uma metodologia que estende os benefícios do BIM ao melhorar a acessibilidade, usabilidade, gestão e sustentabilidade dos dados digitais na indústria da construção. Na ferramenta proposta, o modelo estrutural é construído a partir do arquivo aberto IFC, exportado para uma malha de elementos finitos utilizando a ferramenta aberta Gmsh, através de um código Python. Esta malha de elementos finitos é então utilizada para criar o modelo estrutural em OpenSees, de forma totalmente automática, adaptando o código Python proposto por José Abell [34]. O OpenSees é usado a partir do Python, na sua versão OpenSeesPy, o que permite integrar o cálculo numérico no algoritmo proposto. O OpenSees é um motor de cálculo de elementos finitos aberto, utilizado para análises sísmicas. O uso de um código de cálculo aberto permite criar uma metodologia facilmente reutilizável e partilhada no GitHub [35]. Desta forma, outros investigadores podem usar e expandir o âmbito do código desenvolvido.

A Figura 2 ilustra o funcionamento da ferramenta open BIM-to-FEM proposta pelos autores. A ferramenta começa por ler o modelo IFC, através do código em Python (usando as bibliotecas *ifcopenshell* e *opencascade*), para criar a malha de elementos finitos, subdividida em grupos (na imagem as cores) com base nas propriedades mecânicas a serem associadas. Finalmente, o código *OpenseesPy* é usado para realizar as análises, posteriormente visualizadas no Gmsh.



Figura 2 Metodologia proposta

3 Modelação estrutural

A estrutura é modelada utilizando elementos finitos sólidos, com pelo menos três elementos na espessura da parede. Este critério de modelação possibilita avaliar o comportamento não-linear para fora do plano da estrutura com precisão. Optou-se por utilizar tetraedros de 4 nós, que proporcionam uma melhor adaptação da malha à geometria estrutural. Todos os elementos estruturais foram representados por elementos finitos sólidos, o que facilita o uso direto do modelo BIM, evitando problemas relacionados com a transição entre elementos sólidos e unidimensionais ou bidimensionais, garantindo ao mesmo tempo, um modelo mais rigoroso.

A alvenaria foi modelada utilizando uma lei não-linear baseada no dano plástico, implementada no OpenSees como material ND, através do modelo de dano plástico 'ASDConcrete3D', que emprega uma relação direta entre tensão e deformação, incorporando o dano. Esta abordagem permite calcular a tensão diretamente a partir da deformação, evitando o processo iterativo típico dos modelos constitutivos tradicionais, como a plasticidade de Von Mises. Nos métodos convencionais, é necessária uma 'correção plástica', enquanto, com este modelo, a tensão é calculada diretamente, considerando a acumulação do dano.

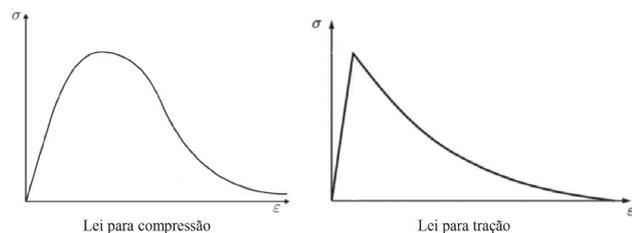


Figura 3 Leis constitutivas (adaptado de [17])

Outra vantagem deste modelo é o uso de um algoritmo misto implícito-explícito como esquema de integração, especialmente útil para leis com amolecimento. Este algoritmo integra a tensão implicitamente e a variável externa explicitamente, favorecendo a convergência em leis não-lineares. O comportamento à compressão é construído a partir de 4 curvas: uma parte linear, uma parte quadrática com endurecimento, e duas outras partes quadráticas de amolecimento. O comportamento à tração é constituído por

uma parte linear, seguida de um amolecimento parabólico [17], ver Figura 3.

Os elementos estruturais em madeira são modelados usando uma lei linear elástica. O comportamento não-linear é concentrado nas ligações entre as vigas de madeira e a alvenaria, na direção axial das vigas. A lei não-linear atribuída às ligações foi proposta em [19] com base num conjunto de ensaios experimentais [36]. A translação relativa nas outras direções é impedida.

O modelo da ligação viga-parede foi previamente desenvolvido para ser usado com elementos unidimensionais de viga e bidimensionais de parede. No caso da modelação com elementos sólidos, foi usado um 'diafragma rígido' para ligar a viga à parede. Na Figura 4 ilustra-se a ligação entre viga e parede. No centro da figura, uma vista axonométrica mostra que o diagrama rígido está presente tanto do lado da viga quanto do lado da parede. Finalmente, à direita, é exibida a lei não-linear associada ao comportamento axial da ligação.

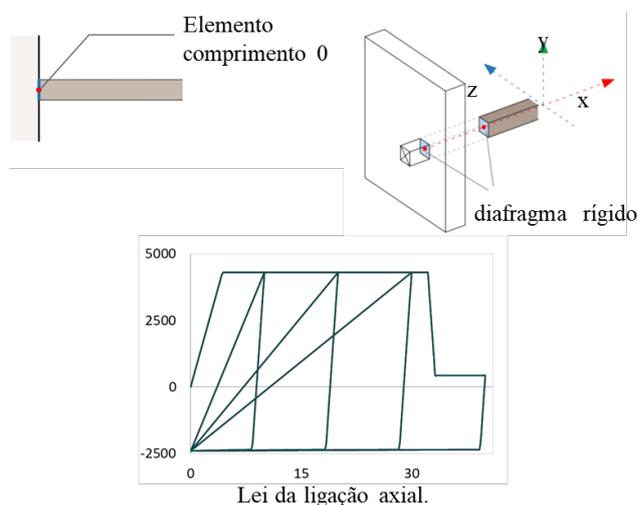


Figura 4 Ligação entre viga e parede

O uso destes elementos de ligação entre viga e parede de alvenaria não é obrigatório, mas é desejável quando há informações suficientes sobre a dita ligação. Caso contrário, é usual modelar as vigas como perfeitamente ligadas à estrutura, ou não as considerar no modelo.

4 Paralelização de códigos de elementos finitos

Os modelos sofisticados de elementos finitos podem exigir muito tempo de processamento. Uma solução possível é dividir os cálculos de modo a realizar operações mais simples simultaneamente, otimizando assim os recursos computacionais, paralelizando o código de elementos finitos. Na literatura, encontram-se diversas simulações em larga escala no contexto da simulação sísmica [37]-[39].

Foram propostas diversas tipologias de paralelização [40]. O método de decomposição de domínio (DDM) destacou-se como o mais eficaz, pois, ao contrário de outros métodos, não possui uma natureza sequencial, permitindo uma melhor otimização do código. O método DDM é uma técnica utilizada em vários campos da ciência para resolver equações diferenciais parciais. De acordo com Babuska e Elman [41], a eficiência da aplicação deste método depende da aritmética e da comunicação. A resolução de problemas de elementos finitos gera um conjunto de equações lineares onde o coeficiente da matriz é a matriz global de rigidez.

O DDM baseia-se na divisão do domínio de interesse, neste caso, a 'estrutura', em subdomínios ou 'subestruturas'. De facto, um grande sistema de equações pode ser decomposto em equações matriciais menores, e a resolução dessas matrizes pode ser realizada com algum acoplamento entre elas. A diminuição do tamanho das matrizes aumenta a velocidade dos cálculos. A aplicação em supercomputadores é viável, uma vez que as pequenas matrizes podem ser resolvidas em diferentes processadores, tornando a paralelização possível. A solução deve ser contínua no domínio,

portanto, as avaliações não podem ser independentes entre si (Figura 5).

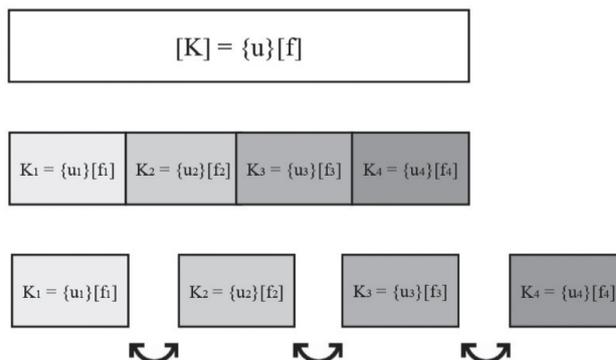


Figura 5 Método de decomposição de domínio para o cálculo da matriz de rigidez

O software OpenSees permite realizar análises paralelas, oferecendo duas metodologias diferentes: OpenSeesSP e OpenSeesMP. No primeiro caso, o OpenSees decide automaticamente como dividir o modelo em vários domínios. No segundo caso, é possível escolher como fazer essa divisão. A partição do modelo de malha pode ser realizada usando o Gmsh (ver Figura 6) ou o software proprietário STKO [42].

Para utilizar o OpenSeesMP, não é suficiente fazer apenas a partição do modelo; é necessário também definir corretamente os comandos das análises. Em particular, o comando 'system' é usado para construir o sistema de equações lineares que permite resolver o

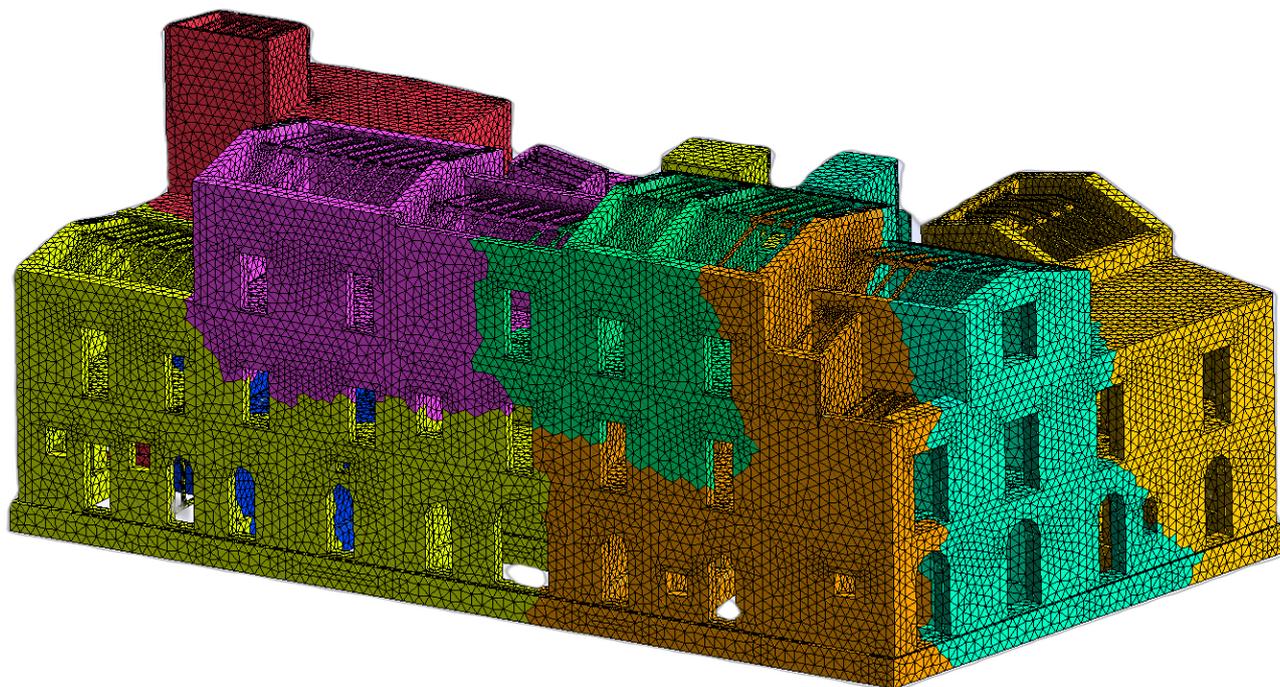


Figura 6 Exemplo de partição de malha em 8 domínios num modelo complexo em Gmsh

problema de elementos finitos usando o tipo de solver especificado. Para realizar análises em paralelo, deve-se usar o solver 'mumps', que é um solver paralelo direto esparsa, possibilitando a paralelização do código. Outro ajuste fundamental é relativo à forma como o sistema de equações e os graus de liberdade são mapeados nos nós.

5 Aplicação da metodologia

5.1 Caso de estudo

Neste artigo, a metodologia foi testada envolvendo um edifício de alvenaria previamente sujeito a ensaios em mesa sísmica do EUCENTRE [43]. O edifício em questão é de dois pisos, cada um contendo uma única divisão. A estrutura vertical é construída exclusivamente com alvenaria tradicional, enquanto a estrutura horizontal é composta por pavimentos e telhados em madeira. A planta possui dimensões de $4,16 \times 6,60 \text{ m}^2$. As janelas estão distribuídas de maneira assimétrica tanto no lado longo quanto no lado curto do edifício. As plantas, as fachadas e as vistas axonométricas do edifício estão detalhadas na Figura 7. Este protótipo foi testado na mesa sísmica usando tanto vigas de madeira simples como elementos de reforço para melhorar o comportamento estrutural do edifício. As propriedades mecânicas estão resumidas na Tabela 1. Estas propriedades são referidas em [43], com exceção da energia de fratura, que foi calculada utilizando as equações 1 e 2.

O modelo BIM da estrutura foi criado no software Revit (versão 24.2.10.64) e exportado para IFC, seguindo as diretrizes apresentadas

em [15]. Em particular, à alvenaria são atribuídas as seguintes propriedades mecânicas: resistência à compressão, resistência à tração, módulo de Young, densidade e energia de fratura em compressão e tração.

Tabela 1 Propriedades mecânicas dos elementos em alvenaria e madeira

Alvenaria		
Massa	2100	kg/m ³
Módulo de Young	2537	MPa
Coefficiente de poisson	0,2	–
Resistência à tração (f_t)	0,14	MPa
Resistência à compressão (f_c)	3,28	MPa
Energia de fratura em compressão (G_c)	2	N/mm
Energia de fratura em tração (G_t)	0,01	N/mm
Madeira		
Massa	588	kg/m ³
Módulo de Young	10000	MPa
Coefficiente de poisson	0,3	–

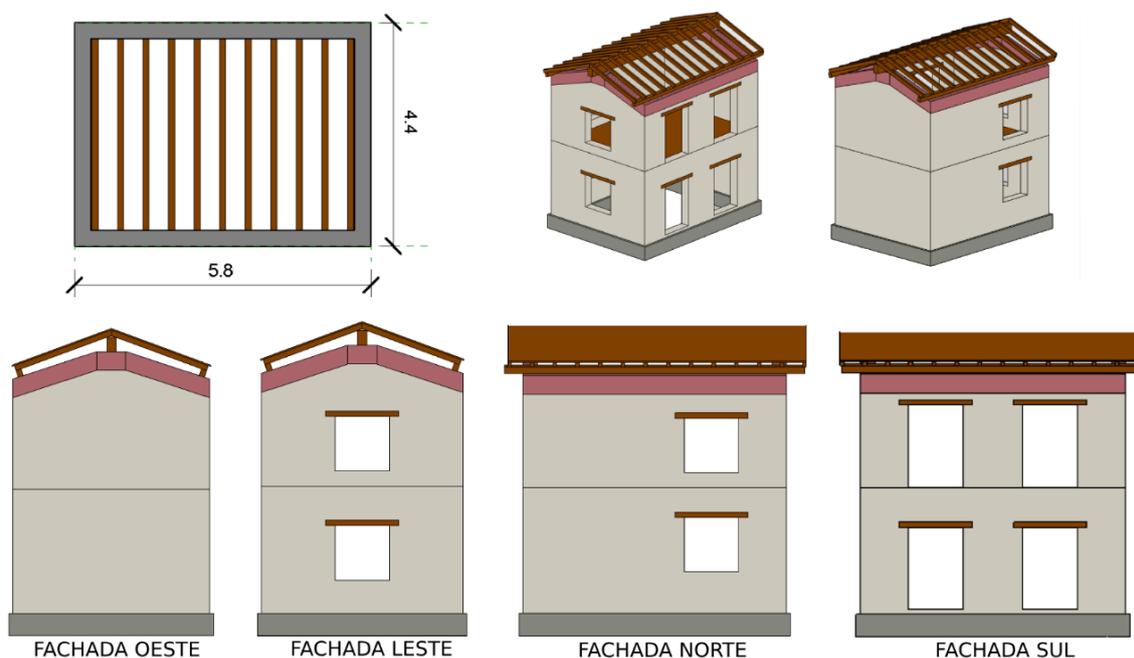


Figura 7 Geometria do caso de estudo

A energia de fratura em compressão foi calculada utilizando o índice de ductilidade, com as seguintes equações:

$$d = G_c / f_c \quad (1)$$

$$d = G_t / f_t \quad (2)$$

Para $f_c < 12 \text{ N/mm}^2$ é sugerido um valor de $d = 1.66$ [44, 45]. Assim, a energia de fratura por compressão (G_c) assume o valor de 2 N/mm . Para a tração, o valor recomendado para o índice de ductilidade (d) é $0,029 \text{ mm}$ [44, 45] e a energia de fratura (G_t) assume um valor de $0,1 \text{ N/mm}$.

A partir destes dados, o algoritmo estabelece a lei constitutiva da alvenaria, ajustando a curva tensão-deformação com base na energia de fratura. Além disso, para cada tetraedro do algoritmo, a energia de fratura é normalizada em função do lado do tetraedro. Para cada material presente no modelo, o algoritmo obtém: (a) propriedades mecânicas; (b) elementos estruturais constituídos por esse material. A partir dos elementos estruturais, o algoritmo determina os tetraedros que os compõem para a malha de elementos finitos e associa a cada tetraedro a lei constitutiva, ajustando a energia de fratura.

Às vigas é associada uma lei linear. Aos elementos de interface entre vigas e alvenaria é associado o comportamento não-linear discutido na secção 2. Nesta aplicação, as vigas são consideradas apenas na configuração não reforçada.

5.2 Análise estrutural

Realizaram-se análises estáticas não-lineares em quatro sentidos com forças horizontais proporcionais à massa, após a aplicação das cargas verticais quase permanentes da estrutura. As análises foram conduzidas em paralelo, dividindo a malha em oito domínios, conforme ilustrado na Figura 8.

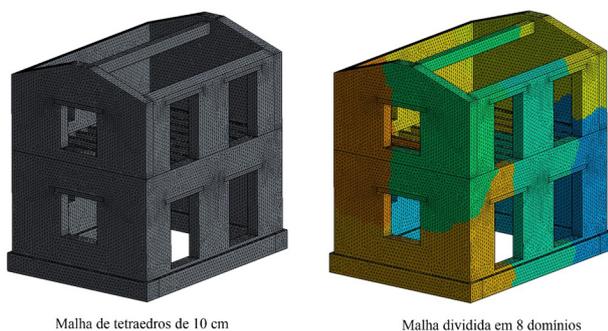


Figura 8 Malha e partição.

A análise para as cargas verticais quase permanentes (*pushdown*) foi executada em "controle de carga" utilizando o algoritmo Krylov-Newton. Foi empregue um incremento de carga adaptativo, variando de forma decrescente ou crescente, para otimizar a convergência, com 10 iterações. Os deslocamentos maiores ocorrem nas vigas, que têm um comportamento puramente de flexão, enquanto na alvenaria ocorrem distribuições mais significativas de tensões, conforme ilustrado na Figura 9. Nesta fase,

os deslocamentos e as distribuições de tensões e deformações não têm uma relevância estrutural significativa (não há dano).

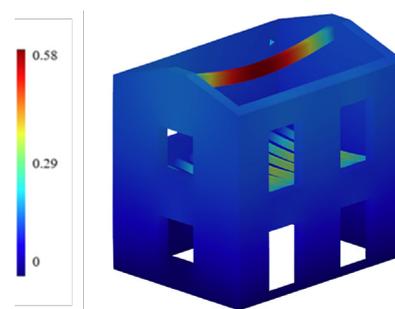


Figura 9 Deslocamento associado à aplicação do peso próprio

As análises pushover foram realizadas com controlo de deslocamento, utilizando também o algoritmo Krylov-Newton [46]. As análises foram executadas num PC com processador intel 9900k com 8 núcleos e 16 threads e com 16 GB de RAM. Cada análise pushover foi executada em aproximadamente 8 minutos. Foi também testada uma análise sem paralelização, que durou muito mais tempo, cerca de uma hora e dez minutos.

Foi possível obter o comportamento pós-pico nos 4 sentidos, representado na Figura 10. Na direção X, alcança-se uma carga máxima maior, porém após o pico, a fase de amolecimento é muito curta e o colapso é imediato. Na direção Y, por outro lado, o comportamento é menos frágil, devido à quantidade e localização das aberturas.

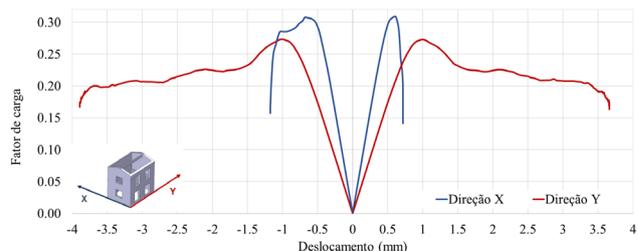
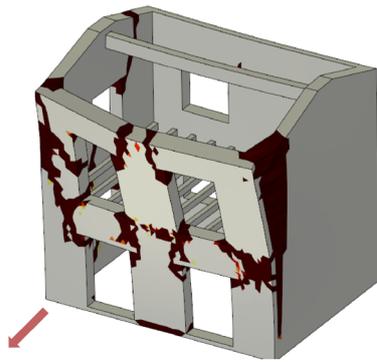


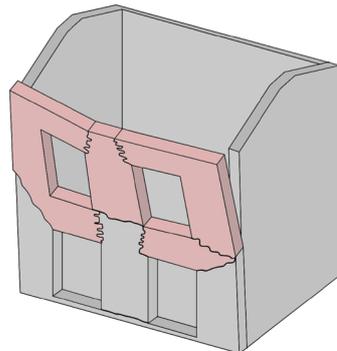
Figura 10 Curvas de capacidade nas 2 direções (sentidos positivo e negativo)

A análise da distribuição de dano, através do software de pós-processamento STKO, permitiu deduzir possíveis mecanismos de colapso, os quais foram investigados com base nas recomendações italianas [7]. As tabelas de tipos de colapso nestas recomendações representam colapsos tipificados, focando-se no comportamento puramente fora do plano. No entanto, os resultados das análises numéricas no software OpenSees mostram uma distribuição de danos generalizada, o que permite, especialmente quando combinados com deslocamentos, deduzir mecanismos combinados de dano, tanto no plano como fora do plano.

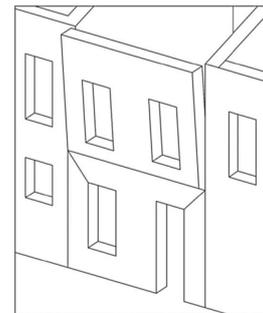
Como mostra a Figura 11, na direção X, os resultados da análise sugerem a ativação de um mecanismo de rotação simples da parede para fora do seu plano, envolvendo apenas a parede superior. Este é um mecanismo que ocorre quando há falta de ligação entre as paredes e os pavimentos, entre paredes adjacentes, ou na ausência



Padrão de dano numérico

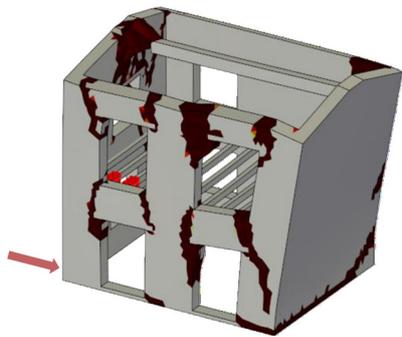


Mecanismo idealizado desenvolvido

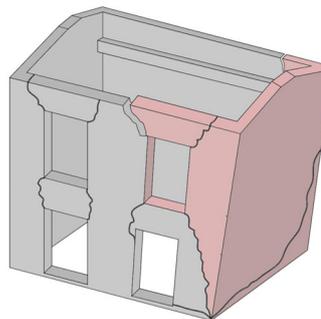


Mecanismo idealizado constante nas recomendações italianas

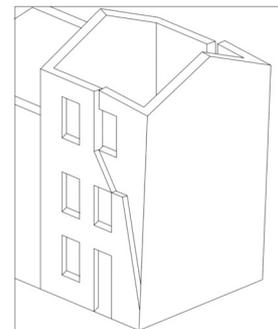
Figura 11 Dano na direção X



Padrão de dano numérico



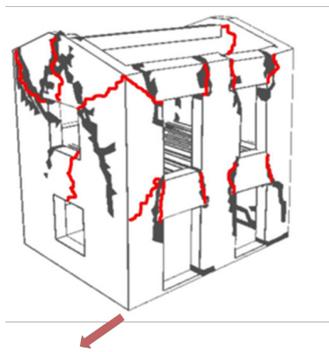
Mecanismo idealizado desenvolvido



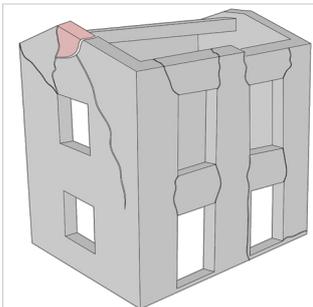
Mecanismo idealizado constante nas recomendações italianas

Figura 12 Dano na direção Y (sentido positivo)

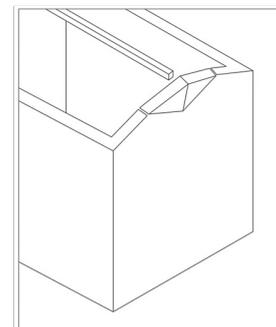
— Resultados numéricos
 — Resultados experimentais



Sobreposição de resultados numéricos e experimentais



Mecanismo idealizado desenvolvido



Mecanismo idealizado constante nas recomendações italianas

Figura 13 Dano na direção Y (sentido negativo)

de pavimentos rígidos. Neste caso, estes resultados são plausíveis porque no plano superior do modelo numérico não foi considerado o diafragma.

Além do mecanismo para fora do plano, foram também observados danos nas aberturas, concentrados na área das vigas de pavimento. Isto deve-se ao impulso das vigas sobre a parede. Este comportamento foi constatado devido ao uso de elementos de ligação viga-parede. A Figura 11 mostra, da esquerda para a direita: (a) padrão de dano numérico; (b) mecanismo idealizado desenvolvido; (c) mecanismo idealizado constante nas recomendações italianas.

Como mostra a Figura 12, no sentido Y positivo, por outro lado, o mecanismo para fora do plano envolve a parede oeste na sua totalidade. Isto deve-se à ausência de elementos de travamento no plano intermédio (as vigas estão posicionadas na outra direção). Considerando um bom travamento entre as paredes ortogonais (aqui considerado), o mecanismo é de rotação composto pois envolve parte da fachada oeste e fachada sul. A Figura 12 mostra, da esquerda para a direita: (a) padrão de dano numérico; (b) mecanismo idealizado desenvolvido; (c) mecanismo idealizado constante nas recomendações italianas.

No sentido Y negativo, o mecanismo observado resulta do efeito da força exercida pela viga no tímpano. Este tipo de mecanismo ocorre quando a viga do tímpano de um edifício não está devidamente ligada à parede. Este cenário de dano foi comparado com os resultados experimentais em mesa sísmica. A Figura 13 mostra, da esquerda para a direita: (a) sobreposição de resultados numéricos e experimentais; (b) mecanismo idealizado desenvolvido; (c) mecanismo idealizado constante nas recomendações italianas. Na sobreposição entre os resultados numéricos e experimentais, observa-se uma distribuição de danos bastante semelhante.

A modelação das ligações não-lineares permitiu obter um resultado mais alinhado com a resposta real do edifício. A Figura 14 mostra uma comparação entre um modelo em que as vigas apresentam uma ligação perfeita às paredes e um modelo com ligações não-lineares. Observa-se que o modelo com ligações não-lineares permite captar os danos que se concentram na proximidade do pavimento devido ao impacto das vigas.

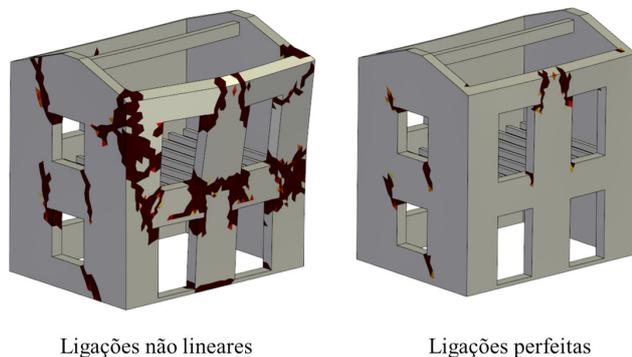


Figura 14 Comparação para diferente modelação das ligações

O cenário de dano é comparado com o cenário de dano observado nos resultados experimentais. O cenário de dano numérico indica a ativação simultânea de danos no plano e fora do plano. O dano

resulta distribuído segundo um padrão diagonal nas proximidades das aberturas e da viga principal. O padrão numérico é bastante semelhante ao padrão experimental observado.

6 Conclusões

A análise do comportamento sísmico de edifícios em alvenaria tradicional é especialmente importante para a requalificação e segurança desse tipo de construção, que mostra grande vulnerabilidade a eventos sísmicos. O uso de modelos globais de elementos finitos sólidos, utilizando leis de dano plástico, tem grande potencial, pois permite captar, através do estudo da distribuição do dano, eventuais mecanismos que surgem no plano e fora do plano num mesmo modelo. No entanto, o uso desta metodologia foi, por muito tempo, dificilmente aplicável em casos reais devido à complexidade dos modelos, aos custos computacionais e à complexidade inerente à análise não-linear.

Neste artigo, apresenta-se uma aplicação de um método inovador para a análise por elementos finitos sólidos não lineares. A metodologia, previamente proposta pelos autores, é uma ferramenta open BIM que permite a paralelização do código dos elementos finitos. A integração da modelação BIM permite uma melhor gestão de geometria complexa e dos dados não geométricos. A paralelização, por sua vez, reduz os custos computacionais. O uso de um algoritmo misto, implícito-explicito, facilita a convergência das análises não-lineares.

A metodologia foi testada num edifício de dois andares, testado à escala real em mesa sísmica. Uma parte fundamental do trabalho foi a modelação das ligações entre as vigas de madeira e paredes de alvenaria através de uma lei axial não-linear. Esta abordagem tornou possível obter padrões de colapso que, de outra forma, não seriam visíveis se as ligações fossem modeladas como perfeitas.

O algoritmo paralelo permitiu executar cada uma das análises *pushover* em aproximadamente 8 minutos. Foi possível obter as curvas de capacidade, juntamente com a distribuição do dano. Esta foi interpretada com o auxílio das recomendações italianas, permitindo deduzir possíveis mecanismos de colapso.

A metodologia proposta pelos autores demonstrou ser escalável a casos de não-linearidade complexa. Os próximos desenvolvimentos incluirão a considerações de agregados de edifícios de alvenaria, a modelação de ligações "reforçadas" e a execução de análises dinâmicas.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), com a referência UIDB / 04029/2020 (doi.org/10.54499/UIDB/04029/2020), e no âmbito do Laboratório Associado Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE com a referência LA/P/0112/2020. Este trabalho é financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia, ao abrigo do contrato da bolsa 2022.10204.BD atribuída ao 1.º autor.

Referências

- [1] Augenti, N.; Parisi, F. – “Learning from Construction Failures due to the 2009 L’Aquila, Italy, Earthquake,” *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 24, no. 6, pp. 536–555, 2010, doi: 10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000122.
- [2] Penna, A.; Morandi, P.; Rota, M.; Manzini, C.F.; da Porto, F.; Magenes, G. – “Performance of masonry buildings during the Emilia 2012 earthquake,” *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 12, no. 5, pp. 2255–2273, 2014, doi: 10.1007/s10518-013-9496-6.
- [3] Giuffrè, A.; Carocci, C.F.; Tocci, C. – *Leggendo il libro delle antiche architetture. Aspetti statici del restauro. Saggi 1985-1997*. 2010.
- [4] Baggio, C. – “Il restauro antisismico dei centri storici e la regola d’arte,” *Ric. di Stor. dell’Arte*, vol. 99, pp. 19–30, 2009.
- [5] Borri, A.; Corradi, M.; De Maria, A. – “The Failure of Masonry Walls by Disaggregation and the Masonry Quality Index,” *Heritage*, vol. 3, no. 4, pp. 1162–1198, Oct. 2020, doi: 10.3390/heritage3040065.
- [6] Giuffrè, A. – *Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso Ortigia*. 1993.
- [7] ReLuis – “Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni,” 2011.
- [8] M. of H.; C. A.; MiBACT, T. – “Guidelines for the seismic risk evaluation and reduction of the cultural heritage— alignment to the Technical Standards for Constructions,” 2011.
- [9] ReLuis – “Linee Guida per il Rilievo, L’analisi Ed il Progetto di Interventi di Riparazione e Consolidamento Sismico di Edifici in Muratura in Aggregato Dipartimento Protezione Civile ReLUIS Ufficio del Vice-Commissario Delegato per la Messa in Sicurezza dei Versio,” 2010.
- [10] Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti – *Technical Standards for Constructions*, no. Ntc. 2018.
- [11] D’Altri, A.M. et al. – *Modeling Strategies for the Computational Analysis of Unreinforced Masonry Structures: Review and Classification*, vol. 27, no. 4. Springer Netherlands, 2020. doi: 10.1007/s11831-019-09351-x.
- [12] Brencich, A.; Gambarotta, L.; Lagomarsino, S. – “A Macroelement Approach to the Three-Dimensional Seismic Analysis of Masonry Buildings,” *11th Eur. an Conf. ce Ear thqua ke Eng.*, vol. 90, no. January, pp. 1-10, 1998.
- [13] Kachanov, L. – *Introduction to continuum damage mechanics*, vol. 11, no. 3. 1986. doi: 10.1177/1748895811401979.
- [14] Pelà, L. – “Technical University of Catalonia University of Ferrara Department of Engineering Continuum Damage Model Masonry Structures Luca Pelà,” no. January, p. 302, 2009.
- [15] Leonardi, M.L.; Granja, J.; Oliveira, D.V.; Azenha, M. – “Scalable BIM based open workflow for structural analysis of masonry building aggregates,” *Comput. Struct.*, vol. 297, no. September 2023, 2024, doi: 10.1016/j.compstruc.2024.107321.
- [16] Oliver, J.; Huespe, A.E.; Cante, J.C. – “An implicit/explicit integration scheme to increase computability of non-linear material and contact/friction problems,” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 197, no. 21–24, pp. 1865–1889, 2008, doi: 10.1016/j.cma.2007.11.027.
- [17] Petracca, M.; Camata, G.; Spacone, E.; Pelà, L.; – “Efficient Constitutive Model for Continuous Micro-Modeling of Masonry Structures,” *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 17, no. 1, pp. 134-146, 2023, doi: 10.1080/15583058.2022.2124133.
- [18] Senaldi, I.E. et al. – “Experimental seismic performance of a half-scale stone masonry building aggregate,” *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 609–643, Jan. 2020, doi: 10.1007/s10518-019-00631-2.
- [19] Solarino, F.; Oliveira, D.V.; Giresini, L. – “Modelling of the seismic behaviour of wall-to-horizontal diaphragm connections in historical constructions: Application to a case study,” *Eng. Struct.*, vol. 283, no. January, p. 115791, 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.115791.
- [20] Eastman, C.; Liston, K.; Sacks, R.; Liston, K. – “BIM Handbook Paul Teicholz Rafael Sacks,” pp. 20-21; 65-84; 93–135, 2008.
- [21] República de Portugal, “Decreto-Lei n.10/2024,” *Presidência do Cons. Minist.*, pp. 5–52, 2024, [Online]. Available: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/10-2024-836222484>
- [22] Murphy, M.; Dublin, E.M.; Pavia, S. – “Historic building information modelling (HBIM),” *Struct. Surv.*, vol. 34, no. 1, pp. 1–5, 2009.
- [23] Argiolas, R.; Cazzani, A.; Reccia, E.; Bagnolo, V. – “From Lidar Data Towards HBIM for Structural Evaluation,” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, Aug. 2019, vol. 42, no. 2/W15, pp. 125-132. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-125-2019.
- [24] Brumana, R. et al. – “HBIM challenge among the paradigm of complexity, tools and preservation: The basilica Di collemaggio 8 years after the earthquake (L’Aquila),” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, Aug. 2017, vol. 42, no. 2W5, pp. 97-104. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-97-2017.
- [25] Cursi, S.; Martinelli, L.; Paraciani, N.; Calcerano, F.; Gigliarelli, E. – “Linking external knowledge to heritage BIM,” *Autom. Constr.*, vol. 141, no. June, 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104444.
- [26] Gigliarelli, E. et al., “Integrated numerical analysis and Building Information Modeling for Cultural Heritage,” 2017. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/314371832>
- [27] Trovarelli, F.; Falcao, A.P.; Machete, R.; Tanganelli, V.; Bento, R. – “Parametric Modelling in BIM for Structural Analysis of Masonry Vaults,” *Lect. Notes Civ. Eng.*, vol. 437, pp. 717-726, 2024, doi: 10.1007/978-3-031-44328-2_75.
- [28] International Organization for Standardization – “ISO 25964-2:2013 Information and documentation – Thesauri and interoperability with other vocabularies – Part 2: Interoperability with other vocabularies.” 2013.
- [29] buildingSMART International – “Building Smart International,” 2005. <https://www.buildingsmart.org/>
- [30] Barbosa, J.E.M. de Menezes, G.L.B.B. – “Interoperabilidade Entre Autodesk Robot Structural Analysis e Revit,” no. November, pp. 0-6, 2015.
- [31] Leonardi, M.L.; Oliveira, D.V.; Azenha, M. – “A integração do BIM na reabilitação de «agregados» em alvenaria,” *4.º Congr. Port. Build. Inf. Model*. vol. 1 – ptBIM, pp. 394-405, 2022, doi: 10.21814/uminho.ed.32.33.
- [32] Barazzetti, L.; Banfi, F.; Brumana, R.; Gusmeroli, G.; Previtali, M.; Schiantarelli, G. – “Cloud-to-BIM-to-FEM: Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 57, pp. 71-87, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.simpat.2015.06.004.
- [33] Correia Lopes, G.; Mendes, N.; Vicente, R.; Ferreira, T.M.; Azenha, M. – “Numerical simulations of derived URM-RC buildings: Assessment of strengthening interventions with RC,” *J. Build. Eng.*, vol. 40, no. March, p. 102304, 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102304.
- [34] Abell, J.A. – “Gmsh2Opensees,” 2022. <https://github.com/jaabell/gmsh2opensees> (accessed Sep. 03, 2023).
- [35] Leonardi, M.L. – “OpenBIM to FEM repository,” 2023. <https://github.com/mlaura1996/OpenBIMtoFEM> (accessed Sep. 03, 2023).

- [36] Moreira, S.M.T. – “Seismic retrofit of masonry-to-timber connections in historical constructions,” p. 238, 2015, [Online]. Available: <https://ezp.lib.unimelb.edu.au/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsrca&AN=rcaap.doctoralthesis.1822.38756&site=eds-live&scope=site>
- [37] Roten, D. *et al.*, – High-Frequency Nonlinear Earthquake Simulation on Petascale Heterogeneous Supercomputers. IEEE Press, 2016.
- [38] Xu, Z.; Lu, X.; Law, K.H. – “A computational framework for regional seismic simulation of buildings with multiple fidelity models,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 99, pp. 100–110, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.advengsoft.2016.05.014.
- [39] Yamashita, T.; Kajiwara, K. – “Petascale Computation for earthquake Engineering,” 2011.
- [40] Yagawa, G.; Ycbhioka, A.; Himui, S. Y.; Soneda, N. – “A Parallel Finite Element Method With a Supercomputer Network,” 1993.
- [41] Babuska, I.; Elman, H.C. – “Some aspects of parallel implementation of the finite-element method on message passing architectures,” 1989.
- [42] Asdea software, “STKO – Scientific ToolKit for OpenSees. <http://www.asdeasoft.net/stko?product=stko> (accessed Oct. 04, 2022).
- [43] Magenes, G.; Penna, A.; Senaldi, I.E.; Rota, M.; Galasco, A. – “Shaking table test of a strengthened full-scale stone masonry building with flexible diaphragms,” *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 8, no. 3, pp. 349–375, 2014, doi: 10.1080/15583058.2013.826299.
- [44] Lourenço, P.B.; Gaetani, A. – *Finite Element Analysis for Building Assessment. Advanced Use and Practical Recommendations*. Routledge, 2022.
- [45] Araújo, A.S.F.F. – “Modelling of the Seismic Performance of Connections and Walls in Ancient Masonry Buildings,” 2014.
- [46] Scott, M.H.; Fenves, G.L. – “Krylov Subspace Accelerated Newton Algorithm: Application to Dynamic Progressive Collapse Simulation of Frames,” *J. Struct. Eng.*, vol. 136, no. 5, pp. 473–480, 2010, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0000143.