

Rumo a adoção de métodos avançados para a análise estrutural de agregados de alvenaria: uma abordagem baseada em openBIM

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.142.11>

**Maria Laura Leonardi¹, José Granja²,
Daniel V. Oliveira³, Miguel Azenha⁴**

¹ *University of Minho, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Guimarães, Portugal, ID ORCID 0000-0003-3659-3955*

² *University of Minho, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Guimarães, Portugal, ID ORCID 0000-0002-0858-4990*

³ *University of Minho, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Guimarães, Portugal, ID ORCID 0000-0002-8547-3805*

⁴ *University of Minho, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Guimarães, Portugal, ID ORCID 0000-0003-1374-9427*

Resumo

Os agregados de alvenaria são grupos de edifícios que estão interligados, formam um padrão repetitivo na paisagem e moldam a morfologia dos centros históricos. A análise estrutural destes complexos requer um grande número de dados para caracterizar as propriedades mecânicas. Além disso, para obter resultados mais fidedignos, a modelação por elementos finitos sólidos oferece mais informação que a modelação baseada em elementos mistos de barra-casca. No presente artigo é proposto um método automático para a modelação de elementos finitos sólidos a partir de modelo IFC. Esta metodologia pretende resolver o problema da interoperabilidade entre o modelo de dados em IFC e o motor de cálculo estrutural OpenSees através do desenvolvimento de um algoritmo específico. Este método foi desenvolvido utilizando as seguintes bibliotecas Python: IfcOpenShell, PythonOcc, Gmsh, Gmsh2OpenSees e OpenSeesPy. O método proposto é escalável a um vasto número de cenários, eliminando a necessidade de intervenção manual no processo de interoperabilidade. É apresentada uma aplicação a um agregado de alvenaria real situado no centro histórico de Siracusa.

1. Introdução

A análise estrutural de estruturas de alvenaria representa um grande desafio, especialmente no contexto de edifícios existentes. Os principais obstáculos incluem a necessidade de muita informação, a complexidade da geometria e os custos computacionais associados à análise de um modelo com muitos graus de liberdade.

Os edifícios de alvenaria existentes incluem as habitações tradicionais que se encontram nos centros históricos. Estas são frequentemente caracterizadas por habitações interligadas, formando os chamados “agregados de alvenaria” [1]. Este tipo de construção é comum no sul da Europa, onde era o tipo de habitação tradicional. Estas construções de alvenaria eram tradicionalmente feitas de material local, com elementos de madeira principalmente no sistema de divisórias horizontais [2]. Em comparação com as construções monumentais (por exemplo, igrejas ou templos), os agregados de alvenaria são frequentemente construídos com materiais mais pobres e com menos atenção aos pormenores de construção. Além disso, sofreram frequentemente várias alterações ao longo dos anos, que modificaram o seu comportamento estrutural e especialmente a sua resposta sísmica. Efetivamente, a análise do cenário de danos de sismos recentes pôs em evidência a vulnerabilidade sísmica destes edifícios [3].

O comportamento sísmico de cada edifício dum agregado de alvenaria depende não só das suas próprias características, mas também das características dos edifícios adjacentes. O efeito “agregado”, ou seja, a variação da resistência sísmica de um destes edifícios devido ao facto de se encontrar num agregado, só pode ser estudado eficazmente através de uma análise global [4]. Contudo, a utilização da modelação estrutural através de modelos globais é muito complexa, quando aplicada a agregados de alvenaria. A comunidade científica privilegiou frequentemente a utilização de métodos empíricos em grande escala [5], ou métodos simplificados de pórticos equivalentes [6]. Muito poucos trabalhos na literatura aplicaram a análise de elementos finitos sólidos a agregados de alvenaria. Em [7], a análise de elementos finitos aplicada a agregados em alvenaria é comparada com análises simplificadas, onde se mostra que a primeira produz melhores resultados, capturando tanto os colapsos no plano como fora do plano. O método dos elementos finitos é também aplicado em [8] e considerado preferível aos métodos simplificados. Em ambos os casos, apenas são modelados elementos de alvenaria, negligenciando outros elementos fundamentais como vigas e pavimentos.

Atualmente, os recentes métodos de paralelização para a análise de elementos finitos abriram novas fronteiras para a utilização de métodos complexos na análise estrutural, reduzindo significativamente os custos computacionais [9]. Este facto poderá abrir novas fronteiras na análise estrutural dos agregados de alvenaria. No entanto, subsiste o problema da complexidade da modelação e da gestão da informação.

O recurso a modelos BIM permite representar os edifícios em todas as suas complexidades. Esta é uma vantagem quando se utilizam métodos avançados de análise

estrutural aplicados a construções de alvenaria não reforçada. Atualmente, a interoperabilidade entre o modelo BIM e o software de cálculo permite que este seja utilizado para análises estruturais. Geralmente, os softwares proprietários permitem alternar entre o modelo BIM e o modelo “analítico”, que normalmente consiste num modelo simplificado feito de elementos lineares ou planos. Esta simplificação, que é válida para estruturas regulares e corresponde aos atuais métodos de análise estrutural, não permite a análise adequada de estruturas existentes com geometrias complexas, especialmente no caso de edifícios de alvenaria tradicional.

A revisão da literatura mostra que a comunidade científica tem avançado no sentido da utilização do BIM para a modelação estrutural de edifícios complexos de alvenaria estrutural. Em particular, há a tendência de utilizar modelos BIM para realizar modelos de cálculo, utilizando o método da teoria dos elementos finitos [10]–[12]. As contribuições têm ainda em comum a utilização da modelação estrutural sólida, que permite uma representação mais adequada do comportamento da alvenaria na sua secção resistente. Uma questão em aberto é o facto de, até agora, estas metodologias terem permanecido semi-automáticas e baseadas em software proprietário.

Este artigo apresenta um novo método para a análise estrutural com elementos finitos sólidos utilizando a modelação BIM em formato IFC. A interoperabilidade entre o BIM e o formato de cálculo é efectuada através de um código Python, desenvolvido pelos autores. O solver de cálculo utilizado é o OpenSees, que é *framework* em código aberto, o que permite manter a metodologia proposta totalmente aberta. Além disso, o OpenSees permite efetuar análises em paralelo, o que reduz consideravelmente os custos computacionais das análises. O método desenvolvido foi aplicado na análise estrutural de um complexo de edifícios de alvenaria tradicional. A aplicação a este caso de estudo permitiu demonstrar a sua escalabilidade. O agregado escolhido para a aplicação da metodologia proposta está localizado no centro histórico de Ortigia (Siracusa, Itália). A extensa documentação histórica e gráfica existente, devido à investigação de Giuffrè e a anteriores projetos de reabilitação no distrito de Graziella [13], facilitou a recolha de informações e permitiu que os autores se concentrassem no desenvolvimento do fluxo de trabalho.

O artigo está organizado de forma sequencial. Após esta introdução, a secção 2 apresenta brevemente o algoritmo desenvolvido, a secção 3 apresenta o caso de estudo e os principais resultados, a secção 4 apresenta as conclusões.

2. Metodologia proposta

Neste trabalho é proposta uma nova metodologia para a análise estrutural de edifícios complexos. Esta metodologia pretende resolver o problema da interoperabilidade entre o modelo de dados em IFC e o motor de cálculo estrutural OpenSees através do desenvolvimento de um algoritmo específico. Desta forma, o utilizador desta metodologia pode somente focar-se na produção de um modelo BIM em IFC com a informação necessária e a problemática da interoperabilidade fica resolvida.

O modelo BIM pode ser gerado em qualquer software de modelação desde que este seja capaz de gerar um ficheiro IFC com qualidade (requerida pela própria buildingSMART) e com as propriedades mecânicas necessárias para a análise estrutural associada aos elementos modelados. A Figura 1 apresenta uma visão geral do método desenvolvido. A partir do modelo geométrico em IFC é gerado um modelo geométrico em STEP e um dicionário com todas as informações não gráficas extraídas do modelo IFC necessário para o cálculo estrutural. Por fim, estes dois modelos de dados são integrados usando a ferramenta do Gmsh onde é gerada a malha de elementos finitos e preparado o ficheiro de comandos para a execução da análise estrutural no OpenSees. O Gmsh, tal como as outras bibliotecas utilizadas, é uma biblioteca aberta. Todos os procedimentos foram elaborados num algoritmo desenvolvido em Python, utilizando as seguintes bibliotecas de código: IfcOpenShell [14], PythonOCC [15], (c) Gmsh, Gmsh2OpenSees [16], and OpenSeesPy [17]. Os números apresentados na Figura 1 correspondem aos quatro algoritmos desenvolvidos.

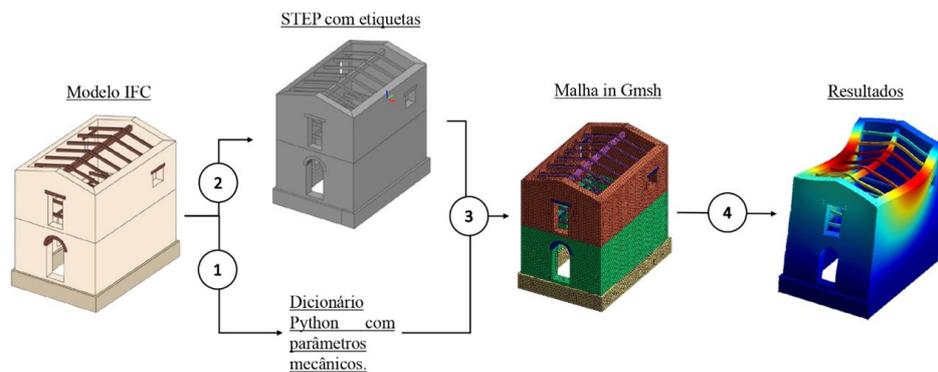


Figura 1
Visão geral do método.

O primeiro algoritmo tem por objetivo extrair as informações alfanuméricas associadas aos materiais IFC do modelo. Especificamente, para cada IfcElement, o material relevante e os seus parâmetros mecânicos são extraídos e introduzidos no modelo como 'IfcProperties'. É determinado se o material está diretamente associado à instância ou ao tipo. No caso de associação à instância, o código recupera imediatamente a informação sobre o material. Caso contrário, identifica o tipo de elemento e extrai as informações sobre o material em conformidade. Uma vez obtida a informação sobre o material, as propriedades são guardadas num dicionário Python para que possa ser obtida posteriormente e informar o modelo computacional.

O segundo algoritmo converte o ficheiro IFC num ficheiro STEP, permitindo a interoperabilidade entre o IFC e o gerador de malhas. Embora o processo de conversão de IFC para STEP possa ser automatizado através da utilização do módulo Python "IfcConvert" [1], este não é suficiente para ser mantido o link entre as entidades em STEP com as entidades em IFC. Para colmatar este problema, foi desenvolvida uma função para manter o registo dos materiais associados às formas, preservando a informação alfanumérica da transição do ficheiro IFC para o ficheiro STEP. Neste algoritmo, os elementos IFC do modelo são adquiridos iterativamente e os seus nomes de tipo (Relating type) são comparados com cada nome de material no dicionário

previamente gerado. Se o nome do tipo do objeto contiver um nome de material, este é atribuído como uma variável em Python, designada por “etiqueta”.

Depois, a geometria de cada elemento IFC é obtida no formato B-Rep, utilizando o kernel de geometria 'Open Cascade'. Foi observado que os sólidos complexos são modelados em IFC como *IfcAdvancedBRep*, e isso faz com que eles se quebrem em faces individuais quando convertidos para STEP. O algoritmo desenvolvido verifica quando isto acontece e gera o sólido a partir da envolvente composta por todas as faces. Isto permite a preservação da representação sólida dos objetos, necessária para a modelação de elementos finitos sólidos. Os sólidos são associados à 'etiqueta' gerada na fase inicial do algoritmo e guardados num ficheiro STEP.

No terceiro algoritmo, o ficheiro STEP é importado para o Gmsh para criar a geometria do modelo. Com base nas etiquetas associadas aos sólidos, as geometrias no Gmsh organizam-se em diferentes grupos, correspondentes a materiais diferentes. Finalmente, as superfícies mais baixas dos elementos de fundação são seleccionadas e é criado um grupo especial, que será utilizado para atribuir condições de fronteira. No final, é gerada a malha tetraédrica.

No quarto algoritmo, o modelo Gmsh é utilizado para gerar o modelo OpenSees, utilizando a biblioteca Python *GmshToOpenSees* [16], que permite importar os nós e os tetraedros do Gmsh para o OpenSees. Com base na subdivisão dos elementos em grupos no gmsh, são-lhes atribuídas propriedades mecânicas, elásticas e inelásticas, que são obtidas a partir do dicionário Python gerado no primeiro algoritmo. Para definir as análises a efetuar, é utilizada a biblioteca *OpenSeesPy*. A última parte do algoritmo permite visualizar os resultados das análises em Gmsh.

3. Caso de estudo

A metodologia proposta foi aplicada na análise estrutural de um complexo de edifícios de alvenaria. Este tipo de construção é chamado “agregado em alvenaria”. O agregado é constituído por 12 unidades de construção, atingindo um comprimento de 33 metros. A estrutura é de alvenaria de pedra, com telhados e pavimentos tradicionais de madeira. Algumas coberturas são planas de betão armado, devido às práticas de intervenção usuais no séc. XX.

A documentação existente do agregado escolhido inclui plantas e alçados, representados a uma escala de 1:200, fornecendo informações valiosas sobre as características arquitectónicas do agregado escolhido. Para determinar as tipologias e características dos elementos estruturais, foi utilizada uma combinação de métodos. Isto envolveu o cruzamento de informação gráfica com o levantamento tipológico de Giuffré, bem como a utilização de dados obtidos através de inspeções visuais e imagens de satélite. O objetivo não foi reproduzir os detalhes exatos da construção original, mas sim demonstrar o potencial de aplicação da metodologia proposta.

3.1. Modelação em BIM

O agregado foi modelado na plataforma de modelação BIM Revit (versão 24.2.0.63). As soluções estruturais do agregado e os seus objetos correspondentes, foram definidos após um estudo tipológico baseado no trabalho de Giuffrè [13], como se segue: (a) parede estrutural, (b) divisória, (c) fundação, (d) piso, (e) telhado, e (f) aberturas (janelas e portas). Os seguintes “IfcBuildingElement” foram necessários para representar os diferentes objetos anteriormente mencionados: “IfcWall” para paredes e divisórias estruturais, “IfcFooting” para as fundações, “IfcBeam” para as vigas principais e secundárias de coberturas e pisos, “IfcSlab” para o revestimento das vigas ou lajes de betão armado, “IfcDoor” e “IfcWindow” para as aberturas.

As paredes foram modeladas como prismas contínuos, aos quais são atribuídos diferentes valores de propriedades mecânicas, correspondentes a diferentes tipos de alvenaria. Os pavimentos e as coberturas em madeira, foram modelados como um conjunto de vigas encimadas por uma prancha de madeira que redistribui os pesos e, se presente, a viga principal. Os pavimentos e coberturas de betão foram modelados como lajes. Para além das paredes principais, foram modeladas as paredes divisórias, que contribuem para o comportamento global da estrutura. As portas e janelas foram modeladas como aberturas com arcos ou lintéis. As fundações foram modeladas como paredes ligeiramente mais espessas do que as que suportam.

As características mecânicas dos materiais foram modeladas como propriedades atribuídas aos materiais associados aos diferentes elementos. A estas propriedades correspondem várias “IfcProperties” no “IfcPropertySet” do esquema IFC. As propriedades mecânicas modeladas são as exigidas pelas normas técnicas italianas para a construção [18], que constituem uma referência para a análise estrutural de edifícios antigos de alvenaria. É considerada a utilização de uma lei material não linear para a alvenaria e de uma lei linear para a madeira e o betão armado. As propriedades são apresentadas na Tabela 1.

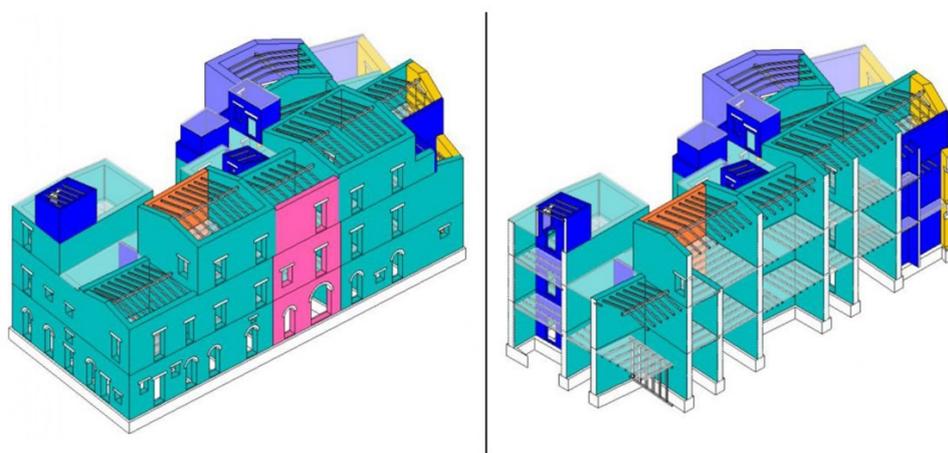


Figura 2
Perspetivas do modelo
do agregado.

Tabela 1: Propriedades mecânicas necessárias para os materiais

Alvenaria	Madeira	Betão armado
Módulo de Young	Módulo de Young	Módulo de Young
Coefficiente de Poisson	Coefficiente de Poisson	Coefficiente de Poisson
Peso específico	Peso específico	Peso específico
Resistência à compressão	-	-
Resistência à tração	-	-
Módulo de distorção		

Após a modelação do agregado este é exportado para IFC, utilizando o *Model View Definition Design Transfer*. As informações não gráficas foram mapeadas para IFC como “IfcProperty” associadas ao material (“IfcMaterial”) correspondente.

3.2. Resultados

A metodologia proposta foi aplicada ao modelo IFC. Foi gerada uma malha de tamanho máximo de 450 mm para garantir um meio-termo entre o custo computacional e precisão. A malha é refinada nos pontos mais críticos da geometria, onde uma malha mais esparsa não representaria a geometria de forma consistente. A malha resultante é composta por 33527 elementos finitos. Foram efetuadas análises modais (de valores e vetores próprios) e análises estáticas à ação gravítica.

A análise modal foi efetuada para determinar as frequências e os modos de vibração da estrutura, permitindo uma avaliação rápida das suas características dinâmicas. Foram considerados os primeiros 300 modos, garantindo que a massa modal efetiva acumulada nas direções X e Y representasse pelo menos 90% da massa da estrutura. Posteriormente, a análise estática foi efetuada aplicando linearmente o peso próprio dos elementos estruturais e os deslocamentos foram avaliados.

A Figura 3 mostra a malha gerada (esquerda) e a deformação associada à análise do peso próprio (direita). Na análise do peso próprio observa-se uma maior tendência para a deformação de algumas partes do edifício, principalmente nas partes mais altas, sobretudo onde existem acrescentos posteriores, e nas paredes triangulares.

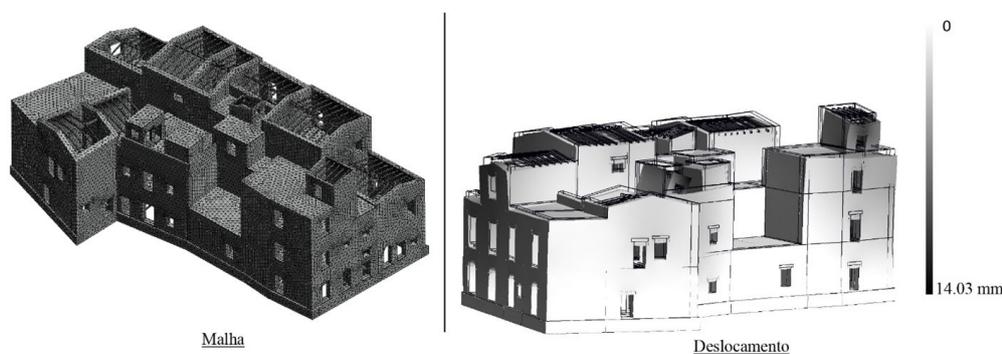


Figura 3
Modelo do agregado.

Na análise modal, por outro lado, observa-se o efeito agregado, em que partes do agregado se movem em conjunto e o movimento de uma célula influencia o das células adjacentes. Além disso, observam-se grandes deslocamentos no topo da cobertura. A figura 4 mostra a deformação associada ao 4.º modo de vibração e a frequência do modo.

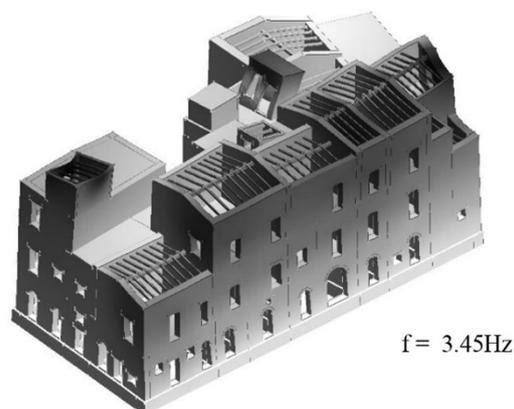


Figura 4
Deformação e frequência associada ao 4.º modo de vibração.

Foi também calculada a distribuição de tensões no edifício. Verifica-se uma concentração de tensões principalmente na proximidade das aberturas, visível sobretudo nas duas direções horizontais do edifício (x e y). Sendo uma análise gravitacional, na direção z existe uma concentração de tensões nas zonas de contacto entre células adjacentes. Isto demonstra a importância de uma análise global, pois permite considerar as interações entre as habitações e a forma como estas afetam o comportamento global da estrutura (Figura 5).

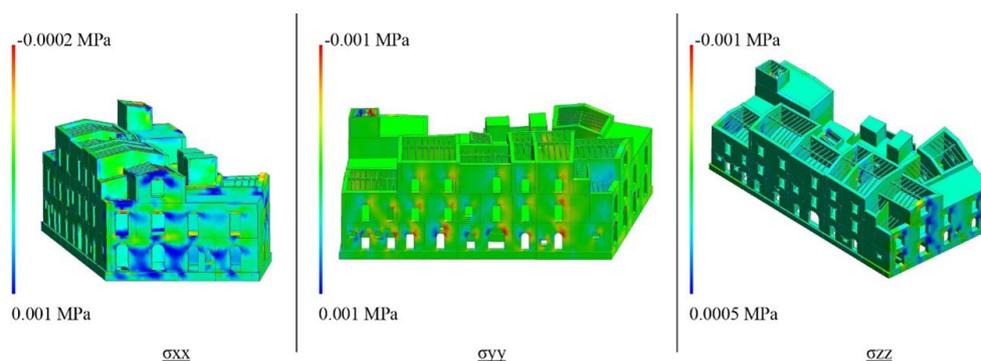


Figura 5
Distribuição das tensões.

4. Conclusões

A aplicação da análise numérica global à análise estrutural de agregados de alvenaria tradicional continua a ser um grande desafio para os profissionais. Para abordar este problema, é apresentada uma nova metodologia OpenBIM para análise por elementos finitos. A metodologia foi aplicada com sucesso a um caso de estudo Italiano.

O principal desafio foi a interoperabilidade entre o modelo BIM (em IFC) e o modelo de elementos finitos. Para resolver este problema, foi desenvolvido um código em Python que converte o formato IFC num formato de geometria legível pelo 'software' Gmsh, que foi utilizado para gerar a malha de elementos finitos. Esta foi depois utilizada para efetuar a análise utilizando o OpenSees. As características mecânicas dos elementos estruturais são também retiradas do modelo IFC. A metodologia desenvolvida é totalmente automática e baseada em formatos abertos, tornando-se facilmente reproduzível.

Do ponto de vista da análise estrutural, a metodologia permitiu a análise estrutural de um agregado inteiro, modelando os elementos de alvenaria, mas também os outros elementos estruturais. Trata-se de um avanço na literatura, uma vez que este método nunca tinha sido aplicado até à data. Assim, conseguiu-se ultrapassar um dos principais obstáculos que causam a aplicação limitada deste método aos agregados de alvenaria, nomeadamente, o desafio prático de modelar estas estruturas e as suas intrincadas geometrias. A utilização da modelação BIM desempenhou um papel importante neste desenvolvimento, uma vez que simplificou a modelação e a gestão da informação.

Este trabalho é o ponto de partida de um projeto mais vasto, e existem várias perspetivas de expansão e aperfeiçoamento da metodologia proposta. Futuramente, serão efetuadas análises não lineares estáticas e dinâmicas de modo a tirar o máximo partido da ferramenta desenvolvida. Isto será possível graças à possibilidade de executar análises em paralelo e reduzir os custos computacionais. Serão realizadas novas investigações para modelar em pormenor as ligações entre os elementos estruturais, permitindo automatizar a modelização estrutural de elementos com ligações imperfeitas. Por último, será melhorada a experiência do utilizador, através de uma interface gráfica, e a interoperabilidade com outros sistemas de dados (ex: bases de dados e ontologias).

5. Agradecimentos

This work was partly financed by FCT / MCTES through national funds (PIDDAC) under the R&D Unit Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE), under reference UIDB / 04029/2020 (doi.org/10.54499/UIDB/04029/2020), and under the Associate Laboratory Advanced Production and Intelligent Systems ARISE under reference 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.

6. Referências

- [1] I. S. C. F. A. A. O. S. O. A. H. ICOMOS, "Recommendations For The Analysis, Conservation And Structural Restoration Of Architectural Heritage," 2005.
- [2] Antonino Giuffré, C. F. Carocci, and C. Tocci, *Leggendo il libro delle antiche architetture. Aspetti statici del restauro. Saggi 1985-1997*. 2010.
- [3] C. F. Carocci, "Small centres damaged by 2009 L'Aquila earthquake: On site analyses of historical masonry aggregates," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 45-71, Feb. 2012, doi: 10.1007/s10518-011-9284-0.
- [4] L. Battaglia, T. M. Ferreira, and P. B. Lourenço, "Seismic fragility assessment of masonry building aggregates: A case study in the old city Centre of Seixal, Portugal," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 50, no. 5, pp. 1358-1377, Apr. 2021, doi: 10.1002/eqe.3405.
- [5] T. M. Ferreira and R. Ramírez Eudave, "Assessing and Managing Risk in Historic Urban Areas: Current Trends and Future Research Directions," *Front. Earth Sci.*, vol. 10, Mar. 2022, doi: 10.3389/feart.2022.847959.
- [6] M. Angiolilli, S. Lagomarsino, S. Cattari, and S. Degli Abbatì, "Seismic fragility assessment of existing masonry buildings in aggregate," *Eng. Struct.*, vol. 247, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.113218.
- [7] N. Grillanda, M. Valente, G. Milani, A. Chiozzi, and A. Tralli, "Advanced numerical strategies for seismic assessment of historical masonry aggregates," *Eng. Struct.*, vol. 212, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110441.
- [8] M. Valente, G. Milani, E. Grande, and A. Formisano, "Historical masonry building aggregates: advanced numerical insight for an effective seismic assessment on two row housing compounds," *Eng. Struct.*, vol. 190, no. April, pp. 360-379, 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.04.025.
- [9] T. Yamashita and K. Kajiwara, "Petascale Computation for earthquake Engineering," 2011.
- [10] P. Crespi *et al.*, "From BIM to FEM: the analysis of an historical masonry building," *Build. Inf. Model. Des. Constr. Oper.*, vol. 1, no. September, pp. 581-592, 2015, doi: 10.2495/bim150471.
- [11] A. Ursini, A. Grazzini, F. Matrone, and M. Zerbinatti, "From scan-to-BIM to a structural finite elements model of built heritage for dynamic simulation," *Autom. Constr.*, vol. 142, no. July, p. 104518, 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104518.
- [12] R. Rolin, E. Antaluca, J. L. Batoz, F. Lamarque, and M. Lejeune, "From point cloud data to structural analysis through a geometrical hBIM-oriented model," *J. Comput. Cult. Herit.*, vol. 12, no. 2, Jun. 2019, doi: 10.1145/3242901.

- [13] Antonino Giuffré, *Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso Ortigia*. 1993.
- [14] IfcOpenShell Contributors, "IfcOpenShell Documentation," 2020. <https://ifcopenshell.github.io/docs/python/html/index.html> (accessed Oct. 04, 2022).
- [15] Paviot, "PythonOCC," 2018. <https://github.com/tpaviot/pythonocc> (accessed Sep. 03, 2023).
- [16] J.A. Abell, "Gmsh2Opensees," 2022. <https://github.com/jaabell/gmsh2opensees> (accessed Sep. 03, 2023).
- [17] M. Zhu, "OpenSeesPy," 2019. <https://openseespydoc.readthedocs.io/en/latest/> (accessed Sep. 03, 2023).
- [18] Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti, *Technical Standards for Constructions*, no. Ntc. 2018.