

## ENRIQUECIMENTO SEMÂNTICO DE MODELOS HBIM PARA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA ALVENARIA INTEGRADA NUM FLUXO DE TRABALHO BIM-TO-FEM

**Maria Laura Leonardi<sup>(1)</sup>, Stefano Cursi<sup>(2)</sup>, Letizia Martinelli<sup>(2)</sup>, Elena Gigliarelli<sup>(2)</sup>, Daniel V. Oliveira<sup>(1)</sup>, Miguel Azenha<sup>(1)</sup>**

(1) Universidade do Minho, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal

(2) Instituto de Ciências do Património, Conselho Nacional de Investigação de Itália, Itália

### Resumo

A aplicação do BIM em edifícios históricos (HBIM) demonstra elevado potencial para documentação, análise estrutural e gestão do património construído. Contudo, o esquema IFC atual e os conjuntos de parâmetros dos softwares proprietários revelam limitações significativas na representação explícita de conceitos construtivos complexos, particularmente na alvenaria histórica heterogénea. Informações críticas sobre composição estratigráfica, morfologia detalhada e propriedades mecânicas homogeneizadas tendem a permanecer dispersas, codificadas implicitamente ou ausentes nos modelos BIM, comprometendo a fiabilidade de análises FEM detalhadas que exigem caracterização rigorosa dos materiais.

Para colmatar estas limitações, propõe-se uma estratégia de enriquecimento semântico de modelos BIM baseada em ontologias de domínio, integrada num workflow BIM-to-FEM OpenBIM para avaliação sísmica de construções históricas. A ontologia formaliza relações explícitas entre parâmetros morfológicos observáveis (geometria das unidades, textura, padrões de juntas, irregularidades construtivas), componentes materiais (unidades e argamassas) e propriedades mecânicas derivadas via Masonry Quality Index (MQI) e normas técnicas, suportando inferências automáticas via SWRL.

Esta abordagem torna rastreáveis e transparentes os critérios de atribuição de parâmetros, promovendo avaliações estruturais replicáveis e independentes de software proprietário. O contributo é duplo: desenvolvimento de ontologia especializada para alvenaria histórica em contexto BIM e demonstração da sua integração em fluxos BIM-FEM para conservação patrimonial.

### 1. Introdução

As estruturas de alvenaria não armada compõem uma fração importante das construções na Europa, as quais, devido às suas características construtivas, apresentam uma vulnerabilidade elevada perante eventos sísmicos. A avaliação do comportamento sísmico deste tipo de

estrutura é particularmente exigente, sobretudo quando se recorrem a modelos globais que exigem hipóteses de modelação bem fundamentadas para produzir resultados fiáveis. A definição destas hipóteses envolve a escolha do tipo de discretização, do modelo constitutivo e dos parâmetros mecânicos da alvenaria, exigindo um conhecimento aprofundado da estrutura e a colaboração de especialistas de diferentes áreas [1].

Na prática, a recolha e interpretação dos dados geométricos, construtivos e de danos é feita de forma fragmentada, com informação dispersa por vários intervenientes e formatos. Isto aumenta o risco de perda ou duplicação de dados e torna o processo fortemente dependente da experiência subjetiva dos técnicos. Neste contexto, as metodologias digitais baseadas em Building Information Modeling (BIM) oferecem um grande potencial para integrar e explorar estes dados de forma mais sistemática, reforçando ao mesmo tempo a necessidade de garantir interoperabilidade, clareza conceptual e representação em linguagem legível por máquinas.

A metodologia BIM tem vindo a ser adaptada à conservação do património construído, frequentemente designada por Historic Building Information Modeling (HBIM) [2]. No contexto de edifícios históricos, os modelos HBIM são usados para mapear deformações e danos, apoiar simulações numéricas, planear intervenções e melhorar a gestão de operações e manutenção. No entanto, a aplicação de BIM ao património enfrenta desafios específicos, sobretudo pela complexidade geométrica e pela dificuldade em representar, nos formatos padrão, a estratigrafia construtiva e a variabilidade de materiais [3].

Do ponto de vista da interoperabilidade, o formato aberto IFC, embora essencial para a troca de modelos entre diferentes aplicações BIM, foi originalmente concebido para obras novas e apresenta limitações quando aplicado a edifícios históricos [3]. Muitos requisitos específicos são acomodados através de classes genéricas ou “placeholders”, o que conduz a descrições semanticamente pobres e dificulta a integração com outros sistemas. Portanto, a comunidade científica tem explorado a Web Semântica e os dados ligados como solução para ultrapassar estas limitações [4].

A Web Semântica corresponde a uma extensão da Web em que a informação é publicada com significado explícito, recorrendo a modelos formais que permitem a interpretação automática dos dados por máquinas, sem perder legibilidade para humanos. Neste cenário, o Resource Description Framework (RDF) fornece um modelo de dados em tripletos sujeito–predicado–objeto para descrever recursos, enquanto a Web Ontology Language (OWL) permite definir vocabulários formais e restrições sobre esses recursos. Em conjunto, RDF e OWL representam o conhecimento sob a forma de grafos em que as entidades são ligadas por relações bem definidas e por identificadores globais, o que facilita a pesquisa, a integração e a reutilização de dados entre diferentes sistemas e domínios [5].

Ontologias de domínio, incluindo as dedicadas ao ambiente construído, formalizam conceitos, propriedades e relações, fornecendo um vocabulário comum que torna os dados simultaneamente compreensíveis para especialistas e processáveis por algoritmos de inferência. Sobre esta camada semântica, linguagens de regras como Semantic Web Rule Language (SWRL) introduzem capacidades adicionais de raciocínio, permitindo derivar novas propriedades, classificações ou recomendações a partir de factos existentes, o que é especialmente relevante para sistemas de apoio à decisão em engenharia civil. O conceito de Linked Data complementa esta infraestrutura ao definir princípios para publicar e ligar conjuntos de dados na Web através de identificadores únicos e ligações explícitas entre recursos, permitindo que informação proveniente de diferentes fontes seja navegada e combinada como parte de um grafo global de conhecimento [6].

Este trabalho propõe uma metodologia baseada em dados ligados (Linked Data) e em ontologias de domínio para apoiar a definição de hipóteses de modelação de edifícios de alvenaria não armada. São introduzidas duas ontologias complementares: a Historic Masonry Ontology (HMO), orientada para a caracterização morfológica e mecânica da alvenaria, e a Failure Mechanism Ontology (FMO), focada na descrição de danos e mecanismos de colapso mais prováveis. A ligação entre dados observados e propriedades mecânicas ou comportamentais é operacionalizada através de regras em SWRL, permitindo inferência automática a partir de informação geométrica e de materiais, com integração direta em fluxos BIM-to-FEM OpenBIM para análise estrutural [7-8-9].

Este artigo está organizado da seguinte forma. Após esta introdução, a secção 2 apresenta a fundamentação teórica e a metodologia proposta, incluindo as ontologias HMO e FMO com regras SWRL e a sua integração BIM-FEM. A secção 3 descreve a aplicação prática a um caso de estudo real e discute os resultados obtidos e as limitações identificadas. Finalmente, a secção 4 apresenta as principais conclusões e perspectivas de desenvolvimento futuro.

## 2. Metodologia proposta

A metodologia apresentada tem dois objetivos principais: por um lado, apoiar a definição das propriedades mecânicas a atribuir aos elementos de alvenaria nos modelos analíticos; por outro, identificar de forma sistemática os modos de colapso mais plausíveis, em especial em situações de ação sísmica. Para isso, são definidas e implementadas duas ontologias de domínio – HMO e FMO – e é estabelecida uma rede de relações e regras que ligam informação de inspeção, conhecimento normativo e resultados pretendidos para a modelação numérica.

As ontologias são integradas com esquemas já consolidados na área da construção, de forma a facilitar a interoperabilidade com modelos BIM e com outras fontes de dados. Para atributos quantitativos e unidades de medida, são usados vocabulários adequados que permitem associar valores e unidades de modo explícito, contribuindo para um tratamento coerente de propriedades mecânicas, densidades e parâmetros de qualidade. Em paralelo, é construída uma base de regras SWRL que liga os parâmetros observáveis de uma parede de alvenaria – por exemplo, qualidade da argamassa, geometria das unidades e arranjo das juntas – a indicadores sintéticos de qualidade e, por fim, às propriedades mecânicas e ao tipo de comportamento estrutural.

As ontologias desenvolvidas foram publicadas online com identificadores permanentes através do serviço W3C 'Permanent Identifier Community Group' em w3id.org (<https://w3id.org/hmo#> e <https://w3id.org/fmo#>), acompanhadas de documentação detalhada sobre o seu propósito e uso gerada com Widoco. Esta publicação garante acessibilidade universal, interoperabilidade com outros sistemas semânticos e escalabilidade, permitindo que investigadores e profissionais de diferentes áreas as reutilizem.

A Figura 1 sintetiza a integração entre o fluxo BIM-FEM e o grafo de conhecimento construído a partir das ontologias de domínio consideradas no trabalho. À esquerda, o diagrama representa o modelo BIM exportado em formato IFC e posteriormente convertido em modelo de elementos finitos no OpenSees, constituindo o fluxo BIM-FEM automatizado usado para a análise estrutural. Cada elemento estrutural do modelo é identificado por um GUID, que serve como chave para ligar, no grafo ontológico, as instâncias correspondentes às mesmas paredes de alvenaria. À direita, o conjunto de nós coloridos representa o grafo semântico resultante, onde

cada cor corresponde a uma ontologia de domínio específica: Building Element Ontology (cinzento), Material Properties Ontology (amarelo), Damage Topology Ontology (vermelho), Historic Masonry Ontology (azul) e Failure Mechanism Ontology (verde). As ligações entre nós ilustram como, a partir de um mesmo GUID, é possível navegar entre informação geométrica BIM, características materiais, parâmetros de qualidade, estados de dano e mecanismos de colapso inferidos, suportando uma leitura integrada do comportamento estrutural e a sua transferência consistente para o modelo FEM.

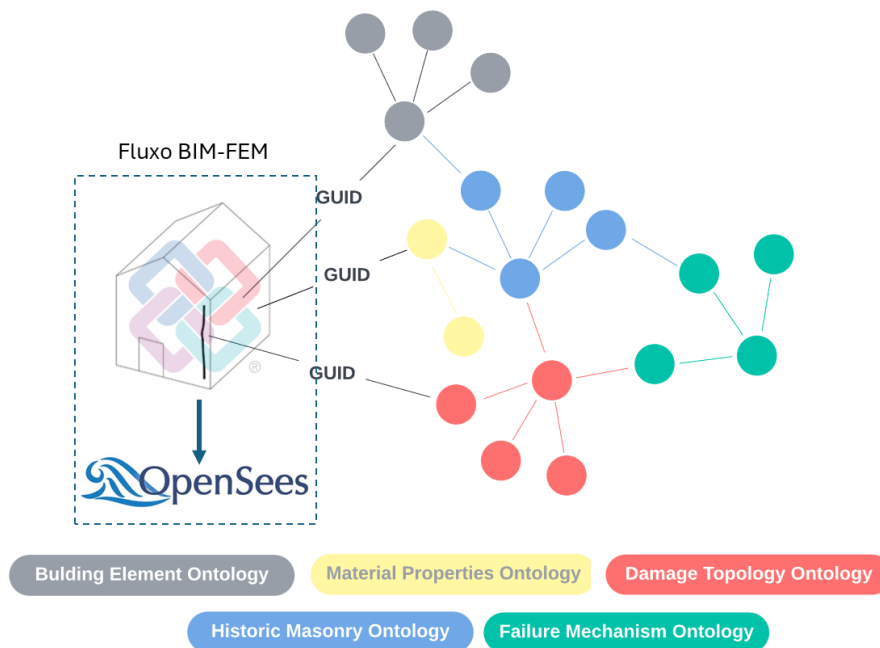


Figura 1: Metodologia proposta

## 2.1 Historic Masonry Ontology (HMO)

A Historic Masonry Ontology é concebida para representar, com elevado nível de detalhe, diferentes tipos de alvenaria não armada, incorporando a heterogeneidade do material e permitindo a derivação de propriedades mecânicas homogeneizadas.

A Figura 2 ilustra a ontologia. A classe `hmo:MasonryWall` representa a parede de alvenaria como elemento estrutural global, isto é, a unidade básica de análise sobre a qual se pretende inferir qualidade e propriedades mecânicas. Cada parede é decomposta em uma ou mais instâncias de `hmo:MasonryLayer`, que correspondem às diferentes “folhas” ou camadas verticais na espessura da parede (por exemplo, paramentos exteriores e enchimento).

Para cada parede é definido um `hmo:RepresentativeVolumeElement`, ligado por `hmo:hasRepresentativeVolumeElement`, que representa um volume “típico” (RVE) onde se assume que a textura e a disposição das unidades se repetem, servindo de base para a homogeneização das propriedades mecânicas. Este RVE está associado a um `hmo:Pattern` (propriedade `hmo:hasPattern`), que descreve o arranjo geométrico da alvenaria (tipo de aparelho, continuidade de juntas, presença de unidades irregulares, etc.).

O padrão é, por sua vez, decomposto em `hmo:PatternEntities` (`hmo:hasPatternEntities`), que agrupam os dois tipos fundamentais de componentes: `hmo:Units`, que representam os blocos ou tijolos, e `hmo:Joints`, que representam as juntas horizontais e verticais preenchidas com

argamassa ou a seco. Esta hierarquia explicita a passagem da parede global para as suas camadas, do volume representativo para o padrão construtivo e, finalmente, para as entidades elementares que controlam o comportamento estrutural da alvenaria.

Um elemento central da HMO é a incorporação do Masonry Quality Index (MQI), um método baseado em inspeção visual que quantifica a qualidade da alvenaria através de parâmetros ligados às dimensões e forma das unidades, à qualidade da argamassa, à organização das juntas e à ligação entre folhas de parede, analisados em diferentes direções de carregamento. Na ontologia, estes parâmetros são representados como propriedades de dados associadas a uma instância de `hmo:MasonryQualityIndex`, permitindo que os seus valores sejam usados por regras SWRL para calcular indicadores globais de qualidade e, a partir destes, estimar propriedades mecânicas homogeneizadas do material.

Ao modelar as propriedades mecânicas como classes, é possível associar não apenas um valor e unidade, mas também descrições e metadados adicionais, reforçando a rastreabilidade entre o resultado numérico e a sua origem conceptual ou normativa. Quando o tipo de alvenaria observado não coincide com as tipologias normativas, a combinação entre MQI e regras SWRL permite estimar propriedades equivalentes com base em critérios estabelecidos na literatura, mantendo a consistência com abordagens existentes.

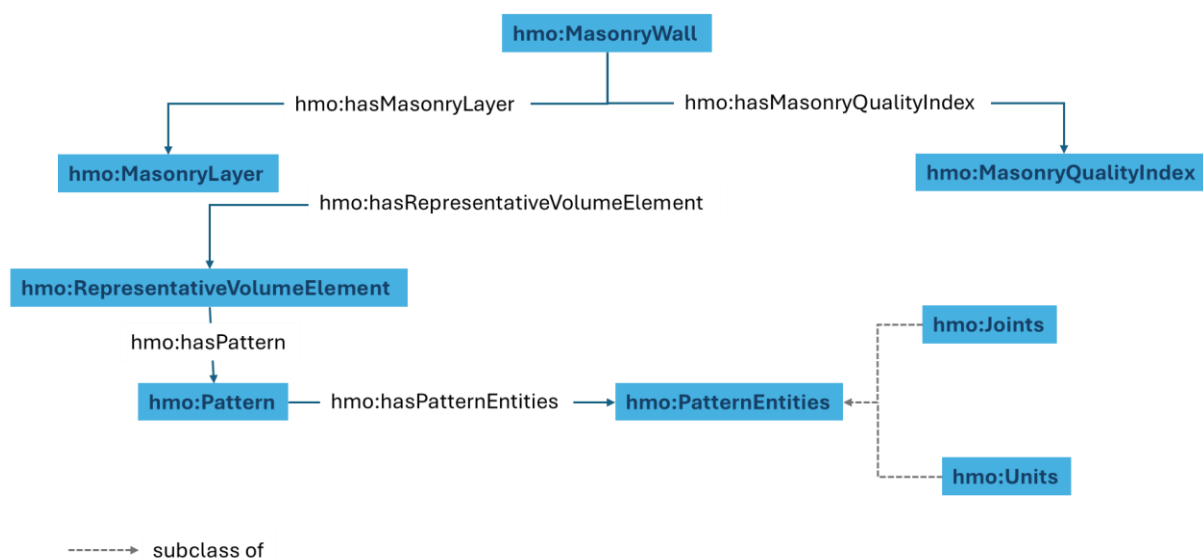


Figura 2: Historic Masonry Ontology

## 2.2 Failure Mechanism Ontology (FMO)

A Failure Mechanism Ontology (FMO) foi desenvolvida para formalizar os comportamentos estruturais esperados de paredes de alvenaria e os mecanismos de colapso mais prováveis observados em eventos sísmicos, auxiliando na escolha do tipo de modelação numérica mais adequada. A ontologia distingue três tipos de comportamento principais – em plano (in-plane), fora do plano (out-of-plane) e vertical – classificados como inadequados, médios ou bons, com base nos valores totais do Masonry Quality Index (MQI) obtidos da HMO. Cada comportamento é relacionado a padrões de dano específicos, como fendas verticais, diagonais ou horizontais, e a mecanismos de colapso como rotação total da parede, flexão ou corte, permitindo inferências sobre a vulnerabilidade global da estrutura.

Na FMO, as paredes de alvenaria são ligadas a instâncias de dano estrutural através da propriedade `dot:hasDamage`, da Damage Topology Ontology (DOT), enquanto relações causais (`fmo:hasCausation`) conectam danos observados a mecanismos de falha prováveis. Regras SWRL interpretam os valores do MQI e o estado de dano para inferir automaticamente o comportamento da parede em cada direção e associar mecanismos de colapso, como o "total overturn" (rotação total fora do plano) em casos de qualidade inadequada out-of-plane. Esta estrutura semântica garante que a transição da caracterização material (HMO) para a avaliação de risco sísmico seja sistemática e rastreável. A Figura 3 ilustra a ontologia.

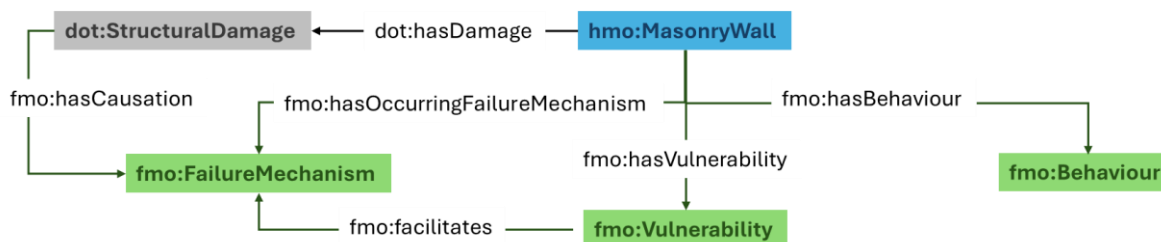


Figura 3: Failure Mechanism Ontology

### 2.3 Integração BIM - FEM

A integração das ontologias HMO e FMO com modelos BIM é facilitada pelo alinhamento semântico com a Building Element Ontology (BEO), onde a classe `hmo:MasonryWall` é subclasse de `beo:Wall` – semanticamente equivalente à `IfcWall` do standard IFC – permitindo o enriquecimento direto de elementos de parede com propriedades mecânicas inferidas e recomendações de modelação.

Esta ligação semântica suporta o workflow OpenBIM-FEM proposto pelos autores [3], que automatiza a geração de malhas tetraédricas a partir de geometrias IFC complexas de agregados de alvenaria, atribuindo propriedades mecânicas, autopesos e apoios diretamente dos parâmetros BIM para análises estáticas/dinâmicas em OpenSees, com visualização em Gmsh. Implementado em Python (IfcOpenShell, OpenCascade, Gmsh and OpenSeesPy), este processo garante interoperabilidade total sem software proprietário, resolvendo as limitações do IFC em HBIM – como o uso de classes genéricas `IfcElementProxy` – e superando workflows semi-automáticos laboriosos.

## 3. Aplicação ao Caso de Estudo

A metodologia foi validada num edifício histórico em Castelnuovo di Porto (Itália), cujos dados geométricos foram obtidos por laser scanning e a caracterização dos materiais por inspeção visual e revisão bibliográfica. A Figura 4 representa, de cima para baixo, como a partir da descrição ontológica de uma parede de alvenaria se inferem parâmetros mecânicos e como esses resultados são depois mapeados para propriedades IFC no modelo BIM. Neste exemplo, a parede em estudo é modelada como uma “parede inspecionada”, ligada a um tipo de alvenaria específico, ao respetivo padrão e ao índice de qualidade, servindo de caso concreto para ilustrar todo o percurso de inferência e mapeamento.

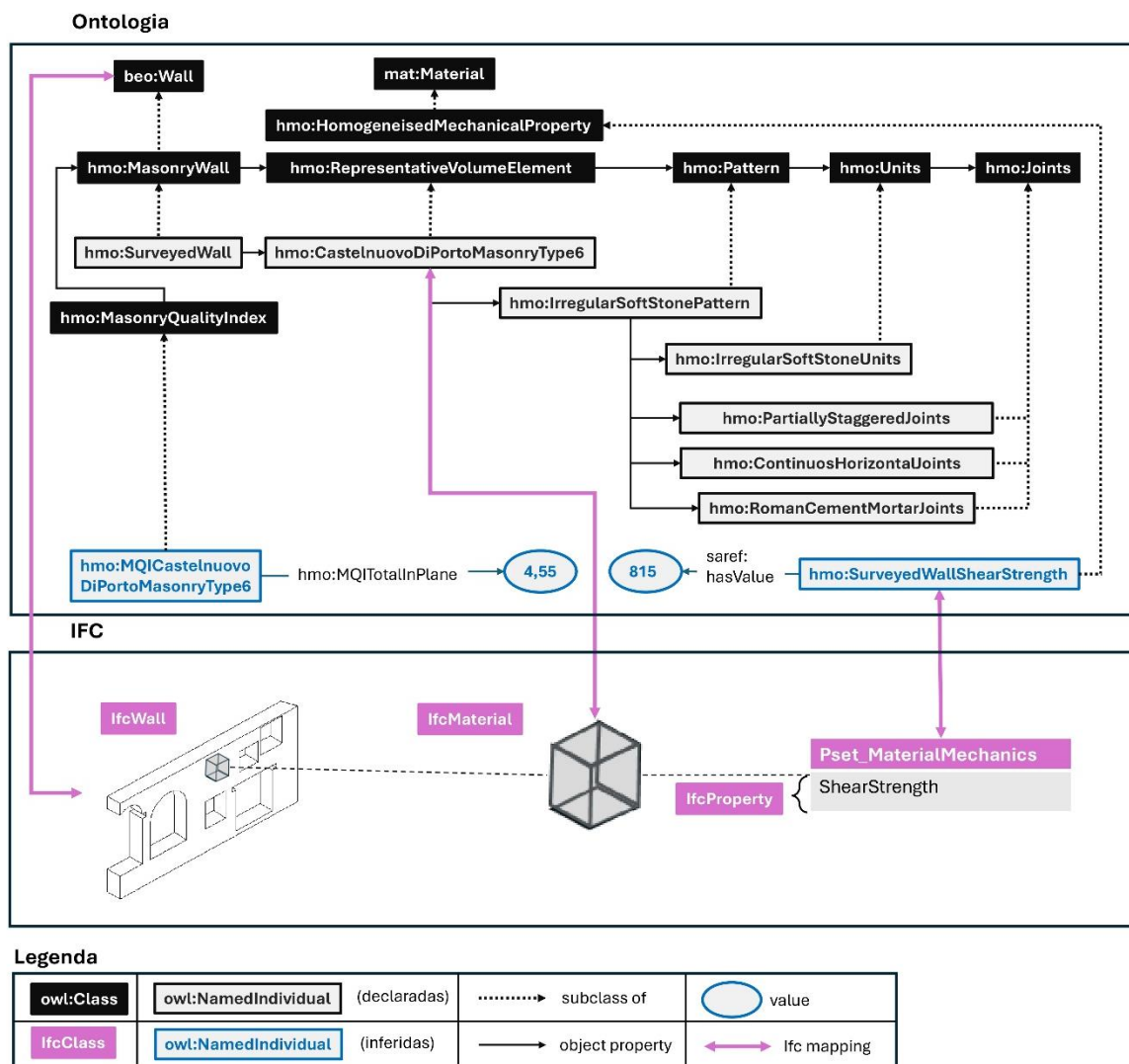


Figura 4: Diagrama do fluxo entre ontologia e modelo IFC

Na parte superior da figura (“Ontologia”), os blocos com fundo preto representam classes OWL, ou seja, conceitos genéricos como parede, material, volume representativo, padrão ou componentes elementares da alvenaria. De acordo com a legenda, estes blocos pertencem à componente terminológica da ontologia (owl:Class). Os blocos com fundo cinzento claro representam indivíduos declarados dessas classes: instâncias concretas que descrevem a parede analisada, o tipo de alvenaria e o padrão morfológico observado (owl:NamedIndividual).

As setas pretas contínuas indicam propriedades de objeto (owl:ObjectProperty), isto é, relações entre indivíduos (por exemplo, uma parede que “tem” um volume representativo ou um padrão). Já as linhas pretas tracejadas indicam relações de subclasse, mostrando como as classes mais específicas herdam de classes mais gerais e como o modelo se ancora em ontologias de base, como as dedicadas a elementos de construção e materiais.

Os indivíduos declarados na parte superior do esquema constituem, assim, o ponto de partida para o processo de raciocínio: descrevem explicitamente a parede observada, o tipo de alvenaria, o padrão construtivo e os parâmetros do índice de qualidade, que são depois

consumidos pelas regras lógicas definidas na ontologia. Essas regras, detalhadas na Tabela 1, combinam os valores do índice de qualidade com a estrutura das classes para gerar novos indivíduos que representam propriedades mecânicas homogeneizadas e outros resultados derivados, sem necessidade de os introduzir manualmente. A Tabela sintetiza, em forma de pseudo-SWRL, as regras utilizadas para (i) combinar os parâmetros parciais do índice de qualidade da alvenaria em valores totais por direção e (ii) transformar esses valores totais em propriedades mecânicas homogeneizadas, como a resistência ao corte.

**Tabela 1: Regras SWRL para o cálculo do MQI e das propriedades mecânicas homogeneizadas**

| <b>Cálculo do MQI total (verticais / em plano / fora do plano)</b>                                                                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>IF</b> MQI tem parâmetros {JuntasHorizontais, JuntasVerticais, QualidadeArgamassa, FormaUnidades, DimensõesUnidades, LigaçãoFolhas, PropriedadesUnidades} <b>THEN</b><br>$MQI\_Total\_Direção = SM \times (JH + JV + QA + FU + DU + LF + PU)$ |
| <b>Cálculo da resistência ao corte a partir do MQI</b>                                                                                                                                                                                           |
| <b>IF</b> RVE está associado a um MQI com valor MQI_Total_EmPlano <b>THEN</b> ResistênciaCorte<br>$= a \times (MQI\_Total\_EmPlano)^b + c$                                                                                                       |

Na zona inferior esquerda do bloco ontológico surge a instância do índice de qualidade da alvenaria, cujo valor total em plano é representado pelo oval “4,55”. Segundo a legenda, os ovais azuis correspondem a valores literais (numéricos) obtidos por cálculo, enquanto os retângulos azuis apenas contornados representam indivíduos inferidos, isto é, criados automaticamente pelo raciocinador a partir das regras definidas. O percurso a magenta evidencia esta cadeia de inferência: a partir do valor total do índice em plano, regras em SWRL calculam, por exemplo, a resistência ao corte em plano (valor “815” indicado noutro oval) e criam um novo indivíduo que representa essa propriedade mecânica, associando-lhe o valor através de uma propriedade de dados apropriada.

A metade inferior do diagrama (“IFC”) mostra como este resultado semântico é mapeado para o modelo BIM. Os blocos a cor magenta (IfcWall, IfcMaterial, IfcProperty) representam classes IFC, enquanto os retângulos cinzentos ilustram o *property set* e a propriedade específica onde o valor inferido é armazenado. As setas magenta são o *IFC mapping*: ligam o indivíduo ontológico da parede (hmo:SurveyedWall, ligado a beo:Wall) ao elemento IfcWall correspondente, associando-lhe o material (IfcMaterial) e a propriedade mecânica (IfcProperty / Pset\_MaterialMechanics.ShearStrength) com o valor numérico calculado na ontologia.

Na etapa seguinte, a parede caracterizada na HMO é importada para a ontologia de mecanismos de colapso, onde os valores totais do índice de qualidade e a informação de dano observada são usados pelas regras para classificar o seu comportamento em cada direção. Com base nesta combinação, o modelo identifica que o desempenho fora do plano é inadequado e associa automaticamente o mecanismo de colapso por rotação total da parede (overturning), fornecendo uma indicação explícita de que o modelo estrutural deverá ser capaz de representar este tipo de movimentação.

A identificação, pela ontologia de mecanismos de colapso, de um comportamento fora do plano inadequado e de um mecanismo de rotação total da parede justifica a adoção de um modelo numérico capaz de representar explicitamente esse tipo de deslocamento. Por este motivo,

recorre-se à pipeline automatizada de transferência do modelo de informação para um modelo de elementos finitos, utilizando o modelo IFC enriquecido com as propriedades mecânicas inferidas como fonte única de dados para gerar o modelo estrutural. A exploração do modelo IFC, previamente anotado com os parâmetros mecânicos inferidos pela ontologia, permite alimentar diretamente o processo de geração do modelo estrutural, reduzindo intervenções manuais e potenciais incoerências entre fases de modelação. A Figura 5 documenta este passo, apresentando o modelo IFC enriquecido e o respetivo modelo de análise obtido automaticamente a partir da mesma fonte de dados.

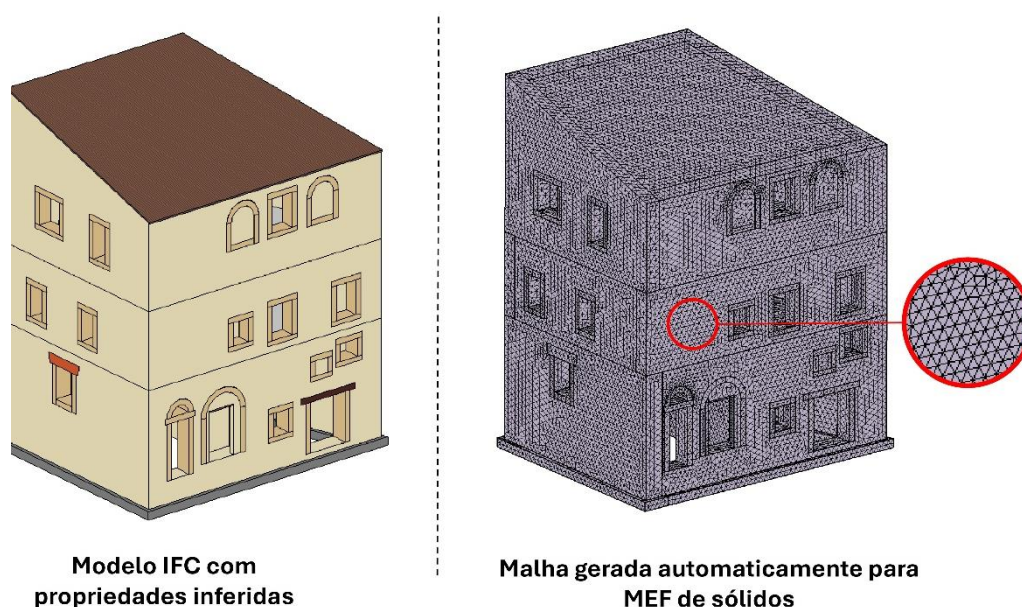


Figura 5: Interoperabilidade do modelo IFC e MEF

#### 4. Conclusões

A metodologia proposta preenche uma lacuna crítica na análise estrutural de alvenaria não armada, fornecendo uma abordagem sistemática, aberta e escalável para a definição de hipóteses de modelação em análises globais. Ao integrar ontologias semânticas complementares – HMO para caracterização morfológica/mecânica e FMO para mecanismos de colapso – com regras SWRL, o processo tradicional manual e subjetivo é substituído por inferências automáticas rastreáveis, baseadas em normas técnicas, literatura especializada e dados de inspeção visual.

A publicação das ontologias em w3id.org com identificadores permanentes W3C assegura acessibilidade universal, interoperabilidade com ecossistemas semânticos existentes e escalabilidade independente de software proprietário, permitindo que investigadores e profissionais de diferentes áreas as reutilizem, validem e estendam em novos contextos. A integração com fluxos BIM-FEM OpenBIM demonstra viabilidade prática, transferindo

propriedades mecânicas inferidas diretamente para análises por elementos finitos em OpenSees, superando limitações de workflows semi-automáticos laboriosos.

O caso de estudo em Castelnuovo di Porto validou a capacidade de representar alvenaria histórica heterogénea e prever mecanismos dominantes (out-of-plane), recomendando adequadamente discretização contínua. Apesar das limitações identificadas — dependência da qualidade dos dados de entrada, complexidade das regras SWRL e necessidade de otimização para agregados extensos — os resultados obtidos demonstram a viabilidade da abordagem proposta para apoiar a caracterização mecânica e a definição de hipóteses de modelação em alvenaria histórica.

## Referências

- [1] Lourenço, P. B. (2002). Computations on historic masonry structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 301–319. <https://doi.org/10.1002/pse.120>
- [2] Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2009). Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey*, 27(4), 311–327. <https://doi.org/10.1108/02630800910985108>
- [3] Leonardi, M. L., Oliveira, D. V., & Azenha, M. (2025b). On the Use of HBIM for the Analysis of Historical Constructions: Technical and Semantic Interoperability for Different Aspects of the Structural Assessment. In *Lecture notes in computer science* (pp. 1–20). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-93753-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-93753-8_1)
- [4] Cursi, S., Martinelli, L., Paraciani, N., Calcerano, F., & Gigliarelli, E. (2022). Linking external knowledge to heritage BIM. *Automation in Construction*, 141, 104444. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104444>
- [5] Grimm, S., Abecker, A., Völker, J., Studer, R. (2011). Ontologies and the Semantic Web. In: Domingue, J., Fensel, D., Hendler, J.A. (eds) *Handbook of Semantic Web Technologies*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-92913-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-540-92913-0_13)
- [6] Pauwels, P., Costin, A., & Rasmussen, M. H. (2021). Knowledge graphs and linked data for the built environment. In *Structural integrity* (pp. 157–183). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-82430-3\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-82430-3_7)
- [7] Leonardi, M. L., Cursi, S., Gigliarelli, E., Oliveira, D. V., & Azenha, M. (2024b). Leveraging semantic web rule languages to define modeling assumptions for the structural analysis of unreinforced masonry buildings. *Journal of Information Technology in Construction*, 29, 1058–1082. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.047>
- [8] Leonardi, M. L., Cursi, S., Oliveira, D. V., Azenha, M., & Gigliarelli, E. (2023). Linked data for the categorization of failures mechanisms in existing unreinforced masonry buildings. In *Proceedings e report* (pp. 781–790). <https://doi.org/10.36253/979-12-215-0289-3.78>
- [9] Leonardi, M. L., Granja, J., Oliveira, D. V., & Azenha, M. (2024). Scalable BIM based open workflow for structural analysis of masonry building aggregates. *Computers & Structures*, 297, 107321. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2024.107321>