

METODOLOGIA SEMIAUTOMÁTICA DE SCAN-TO-BIM PARA AVALIAÇÃO DA COMPARTIMENTAÇÃO CORTA FOGO EM EDIFÍCIOS EXISTENTES

Jorge Magalhães⁽¹⁾, Tomás Jorge⁽¹⁾, Rafael Cabral^(1,4), Jéssica Reis⁽²⁾, Rui Gavina⁽²⁾, José Aidos Rocha⁽³⁾, Ricardo Santos^(1,4), Diogo Ribeiro^(1,4)

(1) iBuilt, ISEP, Politécnico do Porto, Porto, Portugal

(2) VN2R-Engineering Innovation Consulting LDA, Porto, Portugal

(3) Exactusensu - Consultores Associados, Lda, Porto, Portugal

(4) CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal

Resumo

As verificações de conformidade com as normas de segurança contra incêndios em edifícios existentes são trabalhosas e propensas a erros, devido à falta de dados de projeto e da morosidade associada à dependência de ferramentas de inspeção manuais tradicionais. O presente trabalho propõe uma alternativa às abordagens convencionais através de uma metodologia semiautomática de *Scan-to-BIM* para criar um modelo BIM a partir de dados de nuvem de pontos. Este modelo está especificamente adaptado para facilitar as verificações regulamentares exigidas para a segurança contra incêndios, particularmente ao nível da compartimentação. A metodologia envolve quatro etapas principais: i) aquisição e registo; ii) processamento; iii) indicadores geométricos; e iv) modelação IFC. Os resultados confirmam a eficiência e precisão da metodologia no desenvolvimento de modelos BIM adequados para apoiar a engenharia de segurança contra incêndios.

1. Introdução

De acordo com a Autoridade Portuguesa de Segurança e Proteção Civil (APSEI) [1], foram confirmados 6.844 incêndios urbanos em 2024, dos quais 603 ocorreram em edifícios devolutos. Estes tipos de edifícios são maioritariamente antigos e carecem de informações digitalizadas. Estas limitações criam dificuldades significativas para projetos de reabilitação, uma vez que as características dos edifícios são normalmente obtidas através de métodos tradicionais e manuais que requerem uma intervenção humana intensiva. Uma solução possível para apoiar este desafio é a utilização de métodos de sensorização remota, que permitem a criação de dados do tipo nuvem de pontos para gerar informações geométricas existentes, caracterizadas por modelos *as-is* [2, 3]. Para muitos tipos de edifícios, por exemplo, residenciais, escritórios e hotéis, a digitalização com recurso a *laser scanner* é o processo mais adequado, uma vez que permite capturar a realidade com grande precisão. Estes dados brutos

são o *input* para a criação de modelos digitais que podem ser posteriormente enriquecidos para criar modelos de *Building Information Modelling* (BIM) e *digital twins*.

A segurança contra incêndios (SCI) é um aspeto crítico da gestão de edifícios que abrange um conjunto de medidas destinadas a prevenir e controlar incêndios [4]. Entre essas medidas, este trabalho centra-se nos requisitos de compartimentação corta-fogo, em que um edifício é subdividido em compartimentos para isolar os ocupantes e/ou confinar a propagação do fogo, aumentando assim a segurança dos ocupantes. De forma a auxiliar esta análise, o presente estudo propõe uma metodologia semiautomática de *Scan-to-BIM* para a criação de modelos BIM que promovam a implementação e avaliação da compartimentação contra incêndios.

A abordagem *Scan-to-BIM* tornou-se um tema relevante nos últimos anos, onde a comunidade científica propõe diversas abordagens para automatizar este processo, embora algumas abordagens sejam semiautomáticas e ainda necessitem de intervenção manual para identificar elementos estruturais [5]. O fator determinante da abordagem proposta é o processo de extração de contornos, que caracterizam geometricamente os diferentes espaços do edifício. Os métodos existentes incluem principalmente métodos baseados em imagens, em características geométricas ou na segmentação de superfícies [6]. Os métodos baseados em imagens consistem na conversão de dados de nuvens de pontos em imagens para processamento [5, 7]. Os métodos baseados em características geométricas dependem da extração de planos e segmentos de reta [8, 9], sendo o algoritmo *Random Sample Consensus* (RANSAC) a opção mais adequada para este fim. Os métodos baseados na segmentação de superfícies podem ser realizados por estratégias tradicionais de segmentação de nuvens de pontos e técnicas de Inteligência Artificial (IA) [10, 11]

A transição para modelos BIM começa com a conversão desses modelos 3D para o padrão *Industry Foundation Classes* (IFC), onde os elementos de construção são explicitamente classificados em entidades semânticas e podem ser enriquecidos com parâmetros e propriedades estruturadas. Zbirovský and Nežerka [5] desenvolveram uma ferramenta *Scan-to-BIM* de código aberto, chamada *Cloud2BIM*, que automatiza a conversão de nuvens de pontos de grande escala em modelos BIM no formato IFC. Mais recentemente, Chen et al. [10] desenvolveram uma metodologia que combina segmentação semântica baseada em *deep learning* com agrupamento não supervisionado para gerar modelos IFC a partir de dados de nuvens de pontos. Esta etapa é particularmente relevante no domínio da segurança contra incêndios, onde os fluxos de trabalho *Scan-to-BIM* são frequentemente limitados à reconstrução geométrica. Além disso, a aquisição de dados de nuvens de pontos em edifícios que ainda estão em utilização resulta em níveis de ruído elevados e informações geométricas incompletas, o que pode afetar a precisão dos resultados nas metodologias *Scan-to-BIM*. No domínio da segurança contra incêndios, a disponibilidade de modelos BIM para edifícios existentes pode melhorar significativamente as análises de segurança contra incêndios, particularmente na avaliação da compartimentação, onde intervenções de reabilitação/remodelação podem alterar o *layout* geométrico original.

O presente trabalho apresenta uma metodologia *Scan-to-BIM* semiautomática adequada para projetos de reabilitação/remodelação. Os modelos digitais resultantes fornecem uma representação volumétrica do edifício, correspondendo a um Nível de Desenvolvimento (LOD) 200 [12], e destinam-se a apoiar os processos de tomada de decisão relacionados com os requisitos de compartimentação corta-fogo. A conversão de dados de nuvens de pontos em BIM é avaliada utilizando o formato IFC, com foco específico nas entidades IFCSpace, IFCWall e IFCSlab.

2. Metodologia

A metodologia *Scan-to-BIM* semiautomática, representada na Figura 1, é composta por quatro etapas principais: i) aquisição e registo; ii) processamento; iii) indicadores geométricos; e iv) modelo IFC. A descrição de cada uma das etapas é seguidamente apresentada utilizando como exemplo a sua implementação num conjunto de dados sintéticos correspondentes a um corpo da Universidade Técnica Gediminas de Vilnius (*VILNIUS TECH*). O desenvolvimento do algoritmo foi baseado em Python e aplicável a estruturas *Manhattan-world* (caracterizadas por uma configuração ortogonal e alinhada) [11].

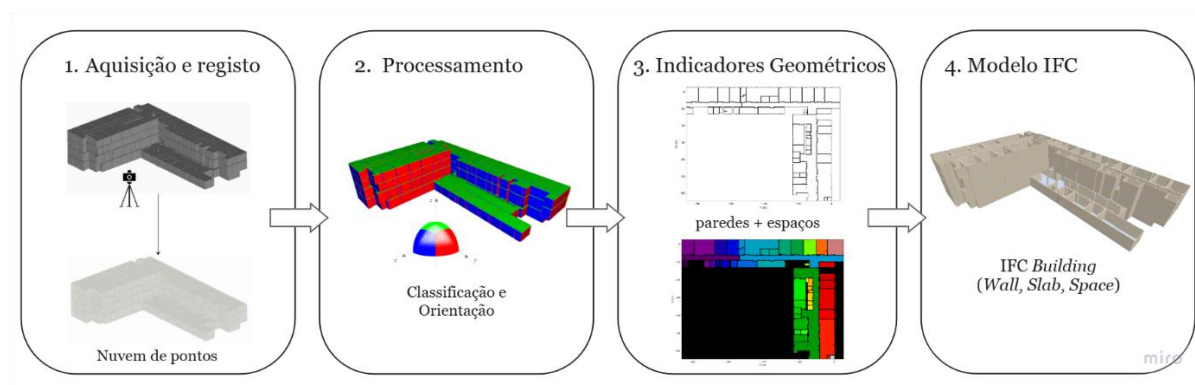


Figura 1. Metodologia proposta de Scan-to-BIM semiautomática.

2.1 Aquisição e registo

A aquisição e o registo de nuvens de pontos caracterizam-se pela transferência de informações do mundo real para formato digital. A digitalização com suporte de *laser scanner* terrestre (TLS) é normalmente o método mais adequado para adquirir nuvens de pontos em ambientes internos. Normalmente, este procedimento é realizado no *software* proprietário do fabricante do equipamento. No caso de dados sintéticos, a aquisição é realizada por meio da dissociação do objeto, onde um modelo 3D é convertido numa nuvem de pontos com base em densidade ou em número de pontos específico.

2.2 Processamento

O processamento da nuvem de pontos começa com uma reorientação global do conjunto de dados com base no agrupamento de vetores normais estimados. Os vetores são calculados a partir de uma estratégia híbrida de agrupamento espacial apoiada em *KD-Tree*, que considera tanto os k vizinhos mais próximos quanto um limite de raio para definir a vizinhança de cada ponto. Posteriormente, os vetores normais estimados, em valor absoluto, são agrupados usando o algoritmo *k-means*. Os agrupamentos resultantes representam orientações de superfície dominantes dentro da nuvem de pontos conferindo uma orientação global consistente do conjunto de dados. Este procedimento garante que a nuvem de pontos fica centrada e alinhada ao eixo ortogonal, evitando a distribuição aleatória dos dados no espaço 3D. A nuvem de pontos alinhada é submetida a uma segunda etapa de cálculo dos vetores normais para permitir a classificação geométrica em elementos verticais e horizontais. Em seguida, os dados são submetidos a uma análise de *outliers* e a uma redução da amostragem (*downsample*) para remoção de ruído.

2.3 Indicadores geométricos

Para identificar automaticamente o número de pisos do edifício, é realizada uma segmentação usando a nuvem de pontos vertical obtida na etapa anterior. As coordenadas *Z* são analisadas através de um histograma unidimensional com uma resolução de 0,1 m e um filtro gaussiano, produzindo uma estimativa empírica da distribuição da densidade. A densidade resultante descreve a concentração relativa de pontos por unidade de altura. Os mínimos locais da função de densidade são usados como pontos de transição entre pisos, permitindo dividir a nuvem original.

A extração de contornos para dados sintéticos é realizada a partir de uma secção da nuvem de pontos vertical, no entanto, para dados reais, a quantidade de ruído dificulta este processo. Os pontos coordenados do contorno da nuvem de pontos extraída são transformados numa grelha de ocupação 2D através da discretização do domínio espacial horizontal em células quadradas de resolução fixa. Cada ponto é projetado no plano horizontal e a célula é considerada ocupada (parede) se o número de pontos projetados que caem dentro da célula exceder um limiar predefinido. Este procedimento produz uma máscara binária que é robusta ao ruído permitindo que as regiões das paredes formem limites coerentes e topologicamente fechados, adequados para a lógica espacial. A partir da máscara de parede, obtém-se uma máscara de espaços complementar por inversão lógica. Esta etapa garante que apenas as regiões fechadas delimitadas por paredes sejam consideradas como espaços interiores candidatos. Através de um processo de vectorização ambas as máscaras são definidas como limites poligonais e subsequentemente transferidos para sólidos 3D. Para caracterizar a altura do piso é utilizado o algoritmo *RANSAC* na nuvem de pontos horizontal. Estas características geométricas são usadas para definir a altura do *IFCSpace*, *IFCWall* e gerar *IFCSlab*.

2.4 Modelo IFC

A criação de um modelo IFC foi implementada utilizando a biblioteca *ifcopenshell*. Esta etapa é realizada através de uma hierarquia espacial IFC4 compatível com o esquema (*IfcProject–IfcSite–IfcBuilding–IfcBuildingStorey*). Para cada piso, os elementos são posicionados através do *IfcLocalPlacement* hierárquico, garantindo um tratamento consistente das coordenadas. Os limites 2D reconstruídos das divisões são convertidos em perfis fechados baseados em *IfcPolyline* e extrudidos na direção +*Z* para formar sólidos *IfcSpace* com uma altura fixa extraída da classificação horizontal da nuvem de pontos. Os elementos de parede e laje são gerados de forma análoga para formar *IfcWall* e *IfcSlab*; as lajes são colocadas com um deslocamento *Z* negativo para que a sua superfície superior coincida com a elevação do piso, exceto no primeiro andar e na laje da cobertura. Como resultado, é criado um modelo IFC estruturado, o que permite a análise baseada em BIM.

3. Análise Experimental e Discussão

Esta secção apresenta a aplicação da metodologia *Scan-to-BIM* semiautomática em três conjuntos de dados públicos, nomeadamente, TUB2 - Universidade Técnica de Braunschweig [13], Alemanha, Universidade de Zurique (sala 3) [14] e estação ferroviária de Kladno [15]. A Figura 3 ilustra a nuvem de pontos original, o modelo BIM, a sobreposição da nuvem de pontos com o modelo BIM e o modelo de projeto inicial. Neste tipo de dados, o nível de ruído da nuvem de pontos tem um impacto significativo na fase de extração do contorno e,

consequentemente, no resultado final. Atendendo à diversidade das geometrias dos edifícios, foram realizados vários testes para obter o contorno mais representativo possível. Além das nuvens de pontos vertical e horizontal, uma nuvem de pontos inclinada foi extraída da classificação baseada na normal, compreendendo pontos cujos vetores normais unitários ficam fora dos limites angulares predefinidos. Este subconjunto representa principalmente transições entre superfícies horizontais e verticais, evidenciando as divisões dos espaços existentes.

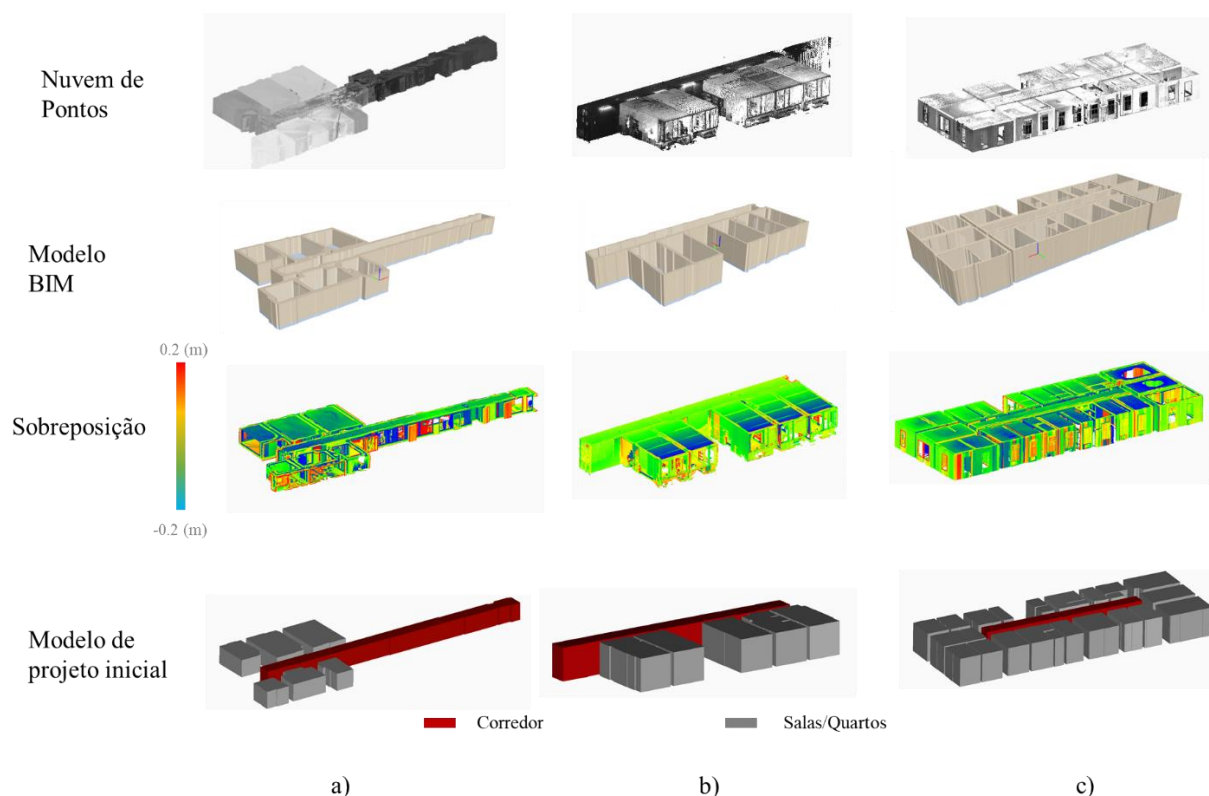


Figura 2. Análise experimental da metodologia proposta em nuvens de pontos reais: a) TUB2 - Universidade Técnica de Braunschweig, Alemanha; b) Universidade de Zurique (sala 3) e c) Estação ferroviária de Kladno.

A metodologia testada em três conjuntos de dados permitiu perceber a influência do ruído e da disposição construtiva do edifício. A Universidade Técnica de Braunschweig apresentou-se como o caso mais complexo (Figura 3a), tendo-se uma distância média de 0,167 m, influenciada pelo elevado ruído que inviabilizou a deteção de espaços reduzidos. Em contraste, os dados mais limpos representados pela Universidade de Zurique (Figura 3b) e da estação Kladno (Figura 3c) resultaram em distâncias médias de 0,059 m e 0,048 m, respetivamente. No entanto, são visíveis variações nas alturas dos pisos, o que evidencia a necessidade de um filtro adicional do contorno extraído. A extração de contornos é, portanto, identificada como a etapa mais crítica de toda a metodologia e continua a ser o principal foco do trabalho, com o objetivo de desenvolver um método capaz de lidar com uma gama mais ampla de dados. Para a avaliação da compartimentação contra incêndios, o modelo de projeto inicial foi modificado manualmente para diferenciar o corredor das salas/quartos. Esta abordagem permite o desenvolvimento e enriquecimento futuros do modelo BIM, permitindo que as paredes

adjacentes do corredor sejam associadas a paredes resistentes ao fogo. Ainda assim, esta distinção pode ser aprimorada para explorar estratégias de evacuação.

4 Conclusão

A falta de projetos arquitetónicos, de plantas detalhadas e de modelos 3D para edifícios antigos é um desafio significativo em Portugal. Para resolver este problema, o presente trabalho apresenta uma metodologia semiautomática de *Scan-to-BIM*, concebida para apoiar a análise de segurança contra incêndios em projetos de reabilitação.

A metodologia proposta foi inicialmente desenvolvida e descrita utilizando um conjunto de dados sintéticos e posteriormente validada em três nuvens de pontos reais de base pública. Os resultados demonstram a sensibilidade da metodologia quando aplicada a dados com nível de ruído considerável, em que os modelos BIM obtidos contêm irregularidades. No entanto, a validação em vários conjuntos de dados destaca a sua robustez e adaptabilidade a diversas condições reais. Este trabalho fornece uma contribuição fundamental para a análise da segurança contra incêndios, especificamente na avaliação da compartimentação em edifícios existentes. O modelo de projeto inicial resultante pode ser utilizado para auxiliar o planeamento de caminhos de evacuação, possibilitando a verificação das distâncias de evacuação, largura de saídas e escadas, bem como a determinação do número de saídas necessárias em função da capacidade do edifício.

O trabalho futuro focar-se-á no desenvolvimento de estratégias mais robustas para extrair contornos espaciais mais detalhados a partir de nuvens de pontos densas e com excesso de ruído. Esta etapa é identificada como o ponto crítico do fluxo de trabalho, uma vez que contornos incompletos comprometem o detalhe dos modelos BIM. Além disso, a caracterização da caixa de escadas bem como a localização de portas e aberturas (janelas), são aspetos fundamentais que serão desenvolvidos para que possam ser incluídos nos modelos BIM de forma a garantir as condições necessárias de evacuação e compartimentação.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo Programa NORTE 2030 através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), no âmbito do projeto FireBIM, referência NORTE2030-FEDER-00358400. Este trabalho foi ainda apoiado por: UID/04708/2025 e <https://doi.org/10.54499/UID/04708/2025>, do CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P./MECI, através dos fundos nacionais.

Referências

- [1] Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (2024). *Anuário ANEPC*. Available: <https://prociv.gov.pt/pt/documentacao/anuario-de-seguranca-contraincendio-em-edificios-2024/>
- [2] R. Oliveira, D. Ribeiro, P. Oliveira, and R. Gavina, "Laser Scanner in Construction Quality Control of Steel Industrial Buildings," vol. 28, no. 4, p. 04023055, 2023.
- [3] J. Ventura *et al.*, "Geometric Monitoring of Steel Structures Using Terrestrial Laser Scanning and Deep Learning," vol. 26, no. 3, p. 831, 2026.
- [4] P. Schönfelder, A. Aziz, F. Bosché, and M. König, "Enriching BIM models with fire safety equipment using keypoint-based symbol detection in escape plans," *Automation in Construction*, vol. 162, p. 105382, 2024.
- [5] S. Zbirovský and V. Nežerka, "Open-source automatic pipeline for efficient conversion of large-scale point clouds to IFC format," *Automation in Construction*, vol. 177, p. 106303, 2025.
- [6] X. Chen, J. Mao, B. Zhao, W. Tao, M. Qin, and C. Wu, "Building contour extraction from hypervoxel growth point cloud surface neighborhood azimuth geometric features," *Journal of Building Engineering*, vol. 101, p. 111914, 2025.
- [7] X. Gao *et al.*, "A New Framework for Generating Indoor 3D Digital Models from Point Clouds," vol. 16, no. 18, p. 3462, 2024.
- [8] Q. Wang, Z. Zhu, R. Chen, W. Xia, and C. Yan, "Building Floorplan Reconstruction Based on Integer Linear Programming," vol. 14, no. 18, p. 4675, 2022.
- [9] F. Li, W. Shi, Y. Tu, and H. Zhang, "Automated methods for indoor point cloud preprocessing: Coordinate frame reorientation and building exterior removal," *Journal of Building Engineering*, vol. 76, p. 107270, 2023.
- [10] T. Chen *et al.*, "An automated framework for converting point cloud data to building information modeling with segmentation and refinement," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 163, p. 112915, 2026.
- [11] M. Mehranfar, A. Braun, and A. Borrmann, "From dense point clouds to semantic digital models: End-to-end AI-based automation procedure for Manhattan-world structures," *Automation in Construction*, vol. 162, p. 105392, 2024.
- [12] American Institute of Architects and buildingSMART International. (2026). *Level of Development (LOD) Specification*. Available: <https://bimforum.org/resource/lo-d-level-of-development-lo-d-specification/>
- [13] K. Khoshelham, L. Díaz Vilariño, M. Peter, Z. Kang, and D. Acharya. (2017). *THE ISPRS BENCHMARK ON INDOOR MODELLING*. Available: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-2-W7/367/2017/>
- [14] University of Zurich. *VMML, ETH Zurich Office3 Point Cloud Dataset*. Available: <https://www.ifi.uzh.ch/en/vmml/research/datasets.html>
- [15] R. Urban. (2024). *Cloud2BIM benchmark point cloud dataset*. Available: <https://zenodo.org/records/14221915>