

## OTIMIZAÇÃO DO PLANEAMENTO DE DEMOLIÇÃO BASEADO EM BIM: EXTRAÇÃO DE PRECEDÊNCIA DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS E ALGORITMOS GENÉTICOS

André Mantelatto<sup>(1)</sup>, Melody Njuguna<sup>(2)</sup>, Manuel Parente<sup>(3)</sup>, José Granja<sup>(4)</sup>, Miguel Azenha<sup>(5)</sup>

University of Minho, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Guimarães

(1) 0009-0009-5293-5522

(2) 0000-0002-2110-9932

(3) 0000-0001-5765-2622

(4) 0000-0002-0858-4990

(5) 0000-0003-1374-9427

### Resumo

A transição para a construção circular exige abordagens de planeamento que permitam avaliar sistematicamente estratégias alternativas de demolição, em vez de se basearem em sequências únicas definidas manualmente. A Modelagem da Informação da Construção (BIM), e em particular, as normas openBIM como o *Industry Foundation Classes* (IFC), fornecem acesso estruturado a dados geométricos e semânticos do edifício que podem responder a esta necessidade. Este artigo apresenta uma metodologia centrada em BIM para extrair automaticamente relações de precedência de demolição diretamente de modelos IFC, com o objetivo explícito de viabilizar o planeamento de demolição com múltiplas soluções através da otimização. É proposta uma estrutura baseada em regras para inferir dependências físicas entre elementos estruturais com base em relações espaciais e topológicas, produzindo uma matriz de precedências legível por máquina. Esta matriz é utilizada como entrada lógica fixa para um problema de otimização multiobjetivo resolvido através do algoritmo *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II), permitindo a geração e comparação de cronogramas de demolição alternativos considerando compromissos entre tempo e custo. A metodologia é demonstrada através de um caso de estudo real envolvendo um edifício de betão armado com múltiplos pisos. A contribuição deste trabalho reside na ligação entre a lógica construtiva derivada do BIM e o planeamento de demolição baseado em otimização, conectando dados openBIM a processos sistemáticos de apoio à decisão alinhados à construção circular.

### 1. Introdução

A indústria de construção civil é conhecida por contribuir adversamente para o meio ambiente. Estima-se que 85% dos recursos extraídos resultem em rejeitos. Além disso, Resíduos de Construção e Demolição (RCD) representam 30% do resíduo gerado mundialmente, sendo que uma grande parcela é despejada em aterros [1]. Existe, portanto, a necessidade de repensar o gerenciamento de RCD alinhado às práticas de economia circular.

Embora o BIM tenha sido amplamente adotado para apoiar a coordenação do projeto e o planeamento da construção, a sua utilização no planeamento de demolição para a circularidade continua a ser limitada [2]. O sequenciamento da demolição ainda é amplamente definido manualmente pelos planeadores, com base na experiência e em representações simplificadas da geometria do edifício, resultando em uma única solução viável, em vez de exploração estruturada de alternativas [3]. Esta abordagem é particularmente restritiva em contextos de construção circular, onde diferentes estratégias de sequenciação podem influenciar significativamente a segurança, a duração, o custo e o potencial de reutilização ou reciclagem de alta qualidade dos materiais.

Em uma perspetiva de apoio à decisão, o planeamento de demolição é inerentemente um problema multiobjetivo [4]. Podem existir múltiplas sequências viáveis para o mesmo edifício, cada uma associada a diferentes compensações entre tempo, custo e utilização de recursos. A exploração destas alternativas requer abordagens baseadas em otimização capazes de avaliar grandes espaços de soluções. No entanto, tais abordagens dependem criticamente da disponibilidade de restrições lógicas fiáveis — especificamente, das relações de precedência que definem quais os elementos devem ser removidos antes de outros.

Embora os modelos BIM contenham as informações geométricas necessárias para derivar estas relações, a maioria dos fluxos de trabalho existentes depende de estruturas analíticas de projeto definidas manualmente ou de dependências de tarefas especificadas pelo utilizador para permitir a otimização ou simulação [5–7]. Esta intervenção manual prejudica a escalabilidade e a repetibilidade do planeamento baseado na otimização e limita a utilização eficaz do BIM.

Este artigo aborda esta lacuna propondo uma metodologia orientada por normas abertas em BIM para (1) extrair automaticamente relações de precedência entre elementos estruturais a partir de modelos IFC, permitindo (2) a otimização do sequenciamento da demolição de edifícios verticais. Ao formalizar a lógica física da construção numa representação estruturada e legível por máquina, a abordagem proposta fornece a entrada essencial necessária para gerar e comparar vários cronogramas de demolição. O foco desta contribuição, portanto, não é apenas a extração da informação de precedência em si, mas o seu papel como pré-requisito para a tomada de decisão sistemática e apoiada pela otimização no planeamento de demolição.

## 2. Metodologia

A metodologia proposta segue um fluxo sequencial de processamento de dados, no qual o modelo IFC atua como um banco de informações. Em vez de tratar o BIM meramente como uma ferramenta de visualização, o modelo é utilizado como um conjunto de dados computáveis, a partir do qual são derivadas as dependências físicas entre os elementos estruturais do edifício. O fluxo de trabalho está dividido em duas etapas principais, como indicado na Fig. 1. No Processo 1, as relações de precedência de demolição são extraídas diretamente do modelo IFC por meio de um código em Python que utiliza uma interpretação baseada em regras geométricas e espaciais.

Já no Processo 2, esta informação de precedência é utilizada como uma entrada lógica fixa em um algoritmo evolucionário multiobjetivo – NSGA-II. Adicionalmente, dados de produtividade e de custo associados à demolição também são utilizados como entrada para gerar sequências alternativas de demolição. Embora a segunda etapa possa envolver técnicas de otimização, a extração de precedências permanece independente e reutilizável em diferentes abordagens analíticas.

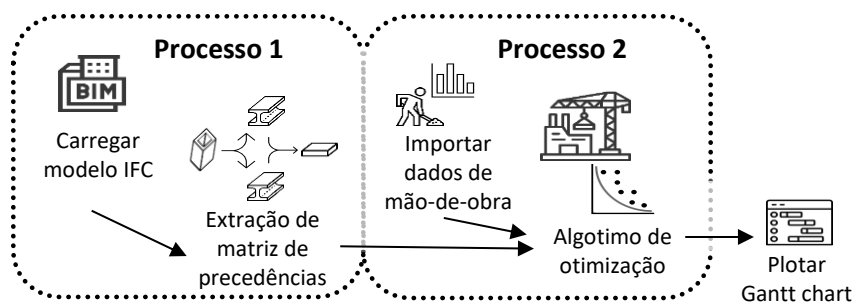


Figura 1: Visão geral do fluxo de trabalho centrado em BIM.

Esta separação garante que a lógica do edifício seja formalizada uma única vez, diretamente a partir do modelo BIM, podendo, posteriormente, suportar múltiplas aplicações de planeamento ou de apoio à decisão. Por fim, um cronograma de demolição otimizado é exportado como gráfico de Gantt.

## 2.1 Requisitos de modelação e Nível de Informação Necessário

Um aspecto fundamental da abordagem proposta é a sua dependência de práticas de modelação consistentes. Para que a extração de precedências seja fiável, devem ser seguidas certas regras de modelação, incluindo:

- Elementos ligados devem tocar-se geometricamente, porém sem sobreposição
- Elementos como pilares devem ser modelados como objetos distintos por piso

Requisitos geométricos e semânticos mínimos são formalizados por meio do conceito de Nível de Informação Necessário, tal como definido nas normas ISO 19650-1 [8] e ISO 7817-1 [9]. Em vez de exigir atributos adicionais definidos pelo utilizador, a metodologia baseia-se principalmente em informações já incorporadas em modelos BIM típicos, como as classes de elementos IFC e os identificadores únicos globais (GUID). Propriedades adicionais, como áreas (NetSideArea), volumes (NetVolume) ou elevações (Global bottom elevation e Global top elevation), são calculadas automaticamente a partir do modelo, porém inseridas aqui para fins de validação.

Excecionalmente, para o caso de paredes (IfcWalls), deve ser especificado corretamente seu tipo, uma vez que somente paredes estruturais (LoadBearing=Y) são incluídas na análise, como indica a Tab. 1. Por fim, o sistema de classificação adotado nesta metodologia foi o SECClasS, por possibilitar um sistema de classificação voltado à economia circular e a processos digitais e que engloba o UniClass 2015, o qual oferece um padrão unificado para a construção civil.

Ao definir claramente os requisitos mínimos de informação, a metodologia promove a repetibilidade e aumenta a confiabilidade dos resultados.

Tabela 1: Nível de Informação Necessário

|                         |                                       |
|-------------------------|---------------------------------------|
| <b>Objetos</b>          | Paredes estruturais                   |
| <b>Ator fornecedor</b>  | Projetista de estruturas              |
| <b>Marco de entrega</b> | Projeto de Execução                   |
| <b>Propósito</b>        | Extração de precedências de demolição |

(continuação)

| Requisitos mínimos de informação geométrica |                                                                                                                            |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Detalhe                                     | As dimensões do elemento e de seu contorno externo estão corretamente definidas. Regras de modelação deverão ser seguidas. |
| Dimensão                                    | 3D                                                                                                                         |
| Localização                                 | Relativa                                                                                                                   |
| Aparência                                   | Não requerido                                                                                                              |
| Comportamento Paramétrico                   | Não requerido                                                                                                              |

---

| Requisitos mínimos de informação alfanumérica |                          |
|-----------------------------------------------|--------------------------|
| Classe IFC                                    | IfcWall                  |
| Identificador global único                    | GUID                     |
| Propriedade                                   | Conjunto de propriedades |
| LoadBearing                                   | Pset_WallCommon          |
| NetSideArea                                   | Qto_WallBaseQuantities   |
| NetVolume                                     | Qto_WallBaseQuantities   |
| Localção                                      |                          |
| Global Bottom Elevation                       |                          |
| Global Top Elevation                          |                          |
| Classificação                                 | SECClasS / UniClass 2015 |

---

2.2 Extração de precedências de modelos IFC

O núcleo deste método consiste na geração automática de uma matriz de precedência de demolição que captura as dependências físicas entre os elementos estruturais. Estas dependências refletem as condições de transferência de carga e de suporte que restringem a ordem de demolição viável, como, por exemplo, lajes suportadas por vigas ou pilares que sustentam os pisos superiores. A Fig. 2 apresenta o processo geral para a extração de relações de precedência através de um diagrama IDEF0.

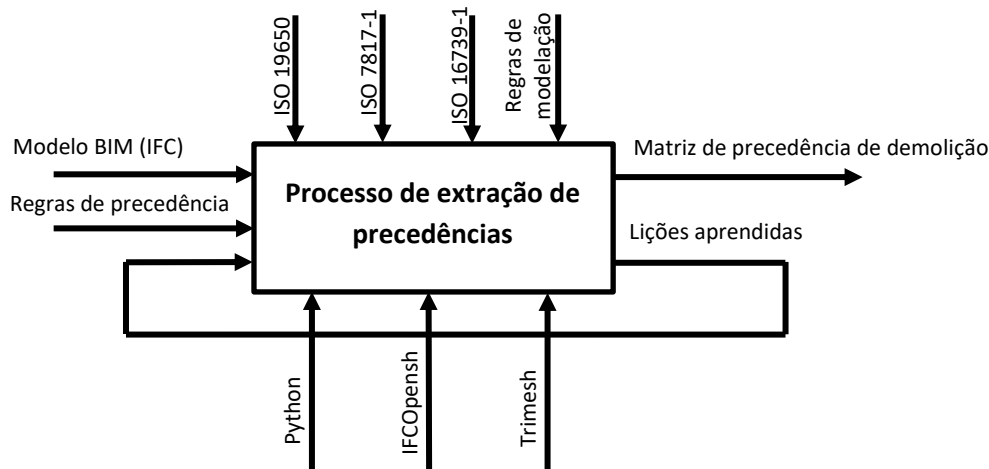


Figura 2: Diagrama IDEF0 para extração de relações de precedência.

A entrada para este processo é um modelo BIM exportado no formato IFC e compatível com o esquema IFC4 ADD 2 TC1. Por meio da elaboração de um código em Python que utiliza bibliotecas como ifcopenshell [10] e trimesh, que emprega processamento geométrico baseado em malha triangular [11], são exportadas relações de dependência entre elementos estruturais com foco na demolição de edifícios verticais.

O algoritmo analisa o modelo IFC e seleciona todos os elementos estruturais com representações geométricas explícitas. Em seguida, realiza uma análise par a par para identificar elementos em contato, extrai dados de cada elemento, como GUID e classe IFC, e calcula suas elevações, áreas e volumes.

Caso dois elementos estejam em contato, aplica-se um conjunto de regras predefinidas para determinar a precedência entre eles. Tais regras baseiam-se no posicionamento vertical relativo (elevações superiores e inferiores) dos elementos e, em casos ambíguos, em suas áreas.

O resultado é uma relação de precedência que indica qual elemento deve ser removido antes de outro. Tanto as regras para extração de precedências quanto as métricas de validação que foram aplicadas para verificar a conformidade dos resultados são apresentados em [12].

Todas estas relações são agregadas numa matriz de precedências estruturada, na qual cada linha representa um par predecessor-sucessor. Finalmente, cada elemento é identificado por números inteiros distintos, garantindo, assim, rastreabilidade.

Entre os controles do processo, aplicam-se as normas ISO 19650 [8] para definir os requisitos de informação, enquanto a ISO 7817-1 [9] é utilizada para estabelecer o Nível de Informação Necessário para cada elemento estrutural do modelo. Por fim, a ISO 16739-1 [13] é empregada para inferir as relações entre entidades e propriedades do esquema IFC, necessárias para que a metodologia proposta seja exequível.

### **2.3 Utilização de informação de precedência para planeamento de demolição**

Uma vez extraída, a matriz de precedências é utilizada como entrada lógica fixa na formulação de um problema de planeamento de demolição multiobjetivo [14]. O objetivo desta etapa consiste em gerar e avaliar sequências alternativas de demolição que minimizem simultaneamente a duração total e o custo total, respeitando estritamente a ordem física de demolição derivada do modelo BIM.

O problema de escalonamento é resolvido através do algoritmo *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II), adequado à exploração de grandes espaços de soluções combinatórias com objetivos concorrentes. A otimização considera dois conjuntos principais de dados: os elementos do edifício a demolir e as equipas de demolição disponíveis, caracterizadas por produtividades e custos horários específicos. Em princípio, qualquer elemento pode ser atribuído a qualquer equipa, originando um elevado número de combinações possíveis de sequenciação e alocação de recursos.

As soluções candidatas são representadas sob a forma de cromossomas, nos quais os genes codificam a atribuição dos elementos do edifício às equipas de demolição ao longo de fases sucessivas. Cada fase corresponde a um intervalo temporal no qual várias equipas podem trabalhar em paralelo, sujeitas às restrições de precedência derivadas do modelo BIM. Consoante a sequência e as restrições, algumas equipas podem permanecer inativas numa determinada fase, permitindo que a otimização explore compensações entre menor utilização de recursos e maior duração total.

Para garantir a viabilidade das soluções, é aplicada a todos os cromossomas gerados pelo NSGA-II uma estratégia de reparação específica do problema. Este mecanismo assegura o

cumprimento da matriz de precedências derivada do BIM, ajustando dinamicamente sequências inviáveis sempre que um elemento é programado antes dos seus predecessores. Durante o processo de reparação, os elementos demolidos e remanescentes são continuamente monitorizados, e os tempos de demolição são calculados com base nos volumes dos elementos e nas produtividades das equipas. A duração de cada fase é determinada pelo menor tempo de conclusão não nulo, permitindo simular trabalho paralelo e períodos de inatividade das equipas. O tempo e o custo totais de cada cromossoma reparado são então calculados e utilizados pelo NSGA-II no processo de ordenação por dominância, garantindo que todas as soluções candidatas são fisicamente viáveis e comparáveis em termos de compensações entre tempo e custo, com base na lógica construtiva derivada do BIM. A Fig. 3 apresenta a lógica do algoritmo NSGA-II desenvolvido.

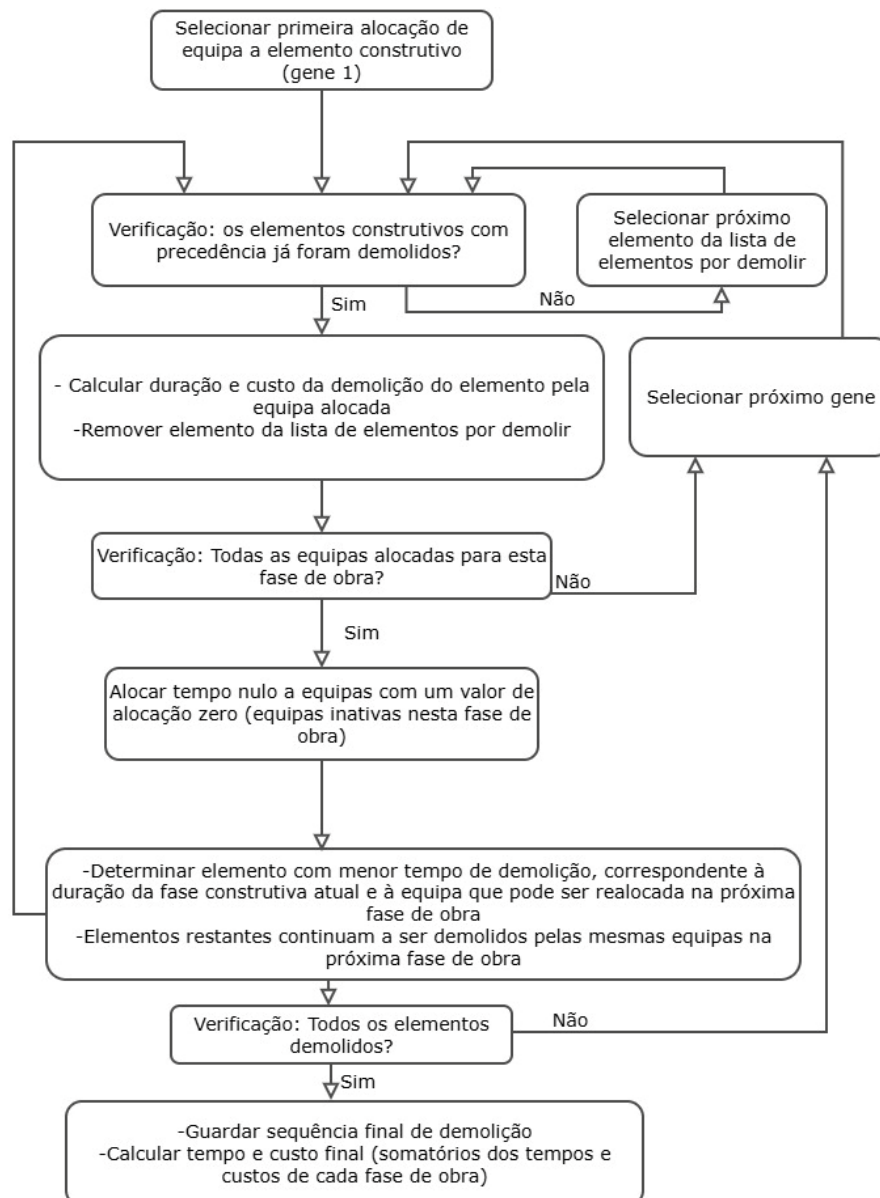


Figura 3: Processo de reparação e avaliação da qualidade de soluções de alocação.

### 3. Estudo de Caso

A metodologia proposta foi aplicada em um modelo BIM real, representando um edifício vertical de betão armado de 5 andares, como apresenta a Fig. 4. O modelo inclui elementos estruturais típicos, como lajes (IfcSlab), vigas (IfcBeam), pilares (IfcColumn), paredes estruturais (IfcWall), escadas (IfcStair/IfcStairFlight), telhado (IfcRoof) e treliças (IfcElementAssembly/IfcMember). O edifício foi modelado através de um software comercial de autoria BIM e exportado para o formato IFC4 ADD2 TC1, a fim de garantir compatibilidade com as ferramentas de processamento openBIM.

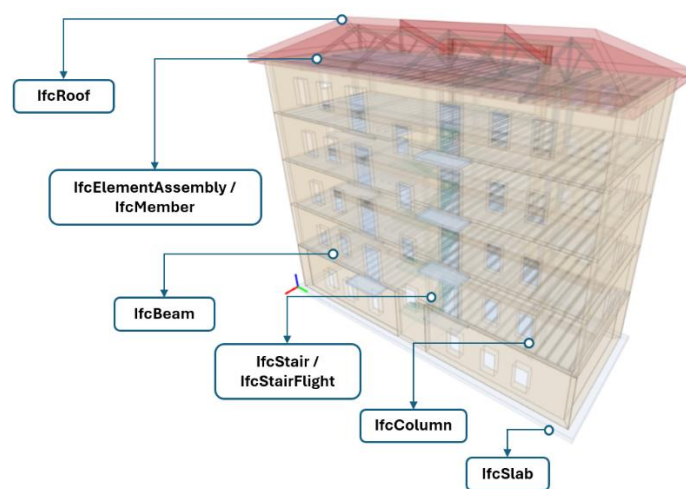


Figura 4: Estudo de caso de um edifício vertical.

Apenas foram considerados elementos estruturais neste estudo, uma vez que a ordem de demolição é predominantemente regida por dependências físicas. Os acabamentos arquitetónicos e os sistemas MEP foram excluídos para manter o foco na lógica estrutural e demonstrar a viabilidade da abordagem como prova de conceito.

Adicionalmente, somente métodos de demolição manuais foram considerados, por estarem alinhados à circularidade, na qual a demolição seletiva é essencial. Além disso, restrições de segurança, como trabalho em altura, uso de componentes adicionais, como andaimes ou estruturas de suporte, e a resistência de estruturas em betão não foram consideradas na análise. Por fim, os dados de produtividade e de custo associados à demolição, inseridos no algoritmo NSGA-II, são valores reais fornecidos por uma empresa de demolição.

#### 3.1 Geração e validação da Matriz de Precedências

O algoritmo de extração de precedências baseado em IFC foi executado no modelo do caso de estudo, resultando numa matriz de precedências abrangente, contendo mais de mil relações predecessor-sucessor e suas respectivas informações geométricas e alfanuméricas, como GUID, Classe IFC, elevações inferiores e superiores, áreas e volumes totais.

Para validar as relações extraídas, uma amostra estatisticamente representativa das entradas da matriz foi verificada manualmente em relação ao modelo BIM através de inspeção visual [12]. O processo de validação confirmou que a grande maioria das relações extraídas era consistente com a lógica de demolição esperada. 98% dos resultados foram consistentes em uma

amostragem de 64 elementos conferidos visualmente, demonstrando que as dependências físicas podem ser inferidas com confiabilidade a partir da geometria BIM, quando se seguem práticas de modelação apropriadas.

### 3.2 Geração de sequências alternativas de demolição

Usando a matriz de precedência extraída como uma restrição lógica, foram geradas múltiplas sequências de demolição viáveis, plotadas em um diagrama de Pareto, como indicado na Fig. 5. Estas sequências diferem em termos de ordem e utilização de recursos, mas todas respeitam as restrições físicas codificadas na informação de precedência derivada do BIM.

Os cronogramas resultantes ilustram como um único modelo BIM pode suportar múltiplas alternativas de planeamento sem a necessidade de redefinir manualmente as dependências dos elementos. Esta capacidade é particularmente relevante para cenários de construção circular, onde podem ser avaliadas diferentes estratégias de sequenciação para maximizar o potencial de reutilização ou minimizar o impacto ambiental.

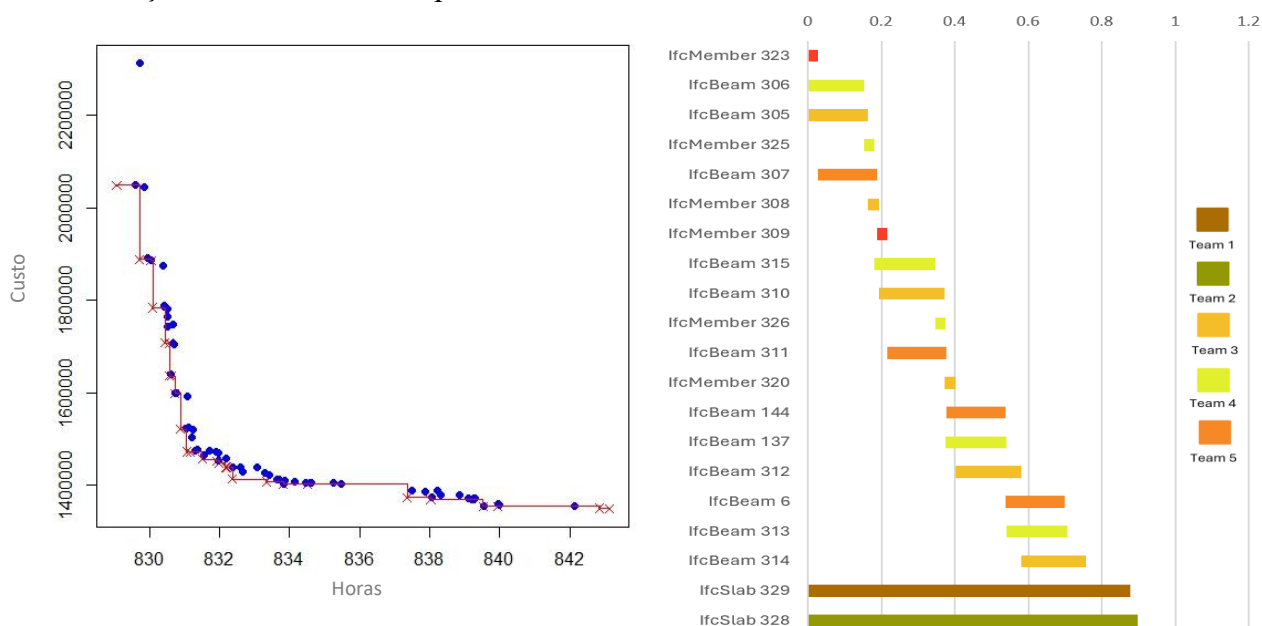


Figura 5: Soluções ótimas em diagrama de Pareto (linha vermelha à esquerda) e excerto de um cronograma de uma solução ótima em gráfico de Gantt (à direita).

## 4. Conclusões

Este artigo apresentou uma metodologia centrada em BIM para extrair automaticamente relações de precedência de demolição diretamente de modelos IFC, com o objetivo explícito de viabilizar o planeamento de demolição baseado em otimização. Ao formalizar a lógica física da construção numa matriz de precedências estruturada, a abordagem proposta fornece uma base lógica fiável e reutilizável para gerar e avaliar múltiplos cronogramas de demolição.

Os resultados demonstram que, quando os requisitos de modelação e de Nível de Informação Necessário apropriados são cumpridos, os dados openBIM podem ser transformados em restrições de planeamento acionáveis sem intervenção manual. Esta capacidade é particularmente relevante para problemas de planeamento de demolição que se beneficiam da

otimização, em que a capacidade de explorar sistematicamente sequências alternativas depende da disponibilidade de informação precisa e completa sobre precedências.

Em vez de tratar a otimização como uma etapa analítica isolada, este trabalho posiciona a extração de precedências baseada em BIM como um facilitador necessário para processos de apoio à decisão com múltiplos objetivos. O estudo de caso ilustra como um único modelo IFC pode apoiar a geração de múltiplas estratégias de demolição viáveis, cada uma em conformidade com a mesma lógica física derivada do BIM.

Trabalhos futuros poderão alargar esta integração incorporando objetivos adicionais, restrições de segurança ou indicadores de circularidade, reforçando ainda mais a ligação entre os dados BIM, as técnicas de otimização e as práticas de construção sustentável.

### **Agradecimentos**

Este trabalho foi parcialmente financiado pela ERA-MIN 3, cujo financiamento provém da União Europeia no âmbito do Programa Horizonte 2020 através do Grant Agreement No. 101003575 da Comissão Europeia.

Adicionalmente, este trabalho resultou do projeto “R2U Technologies | sistemas modulares” (ref.: C644876810-00000019), que é financiado pelo PRR – Plano de Recuperação e Resiliência – e pelos Fundos Europeus Next Generation EU, no âmbito do sistema de incentivos “Agendas para a Inovação Empresarial”.

Este trabalho foi também 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](https://doi.org/10.54499/UIDB/04029/2020)), e no âmbito do Laboratório Associado de Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE com a referência LA/P/0112/2020.

### **Referências**

- [1] Kuzminykh A, Granja J, Parente M, Azenha M (2024) Promoting circularity of construction materials through demolition digitalisation at the preparation stage: Information requirements and openBIM-based technological implementation. *Advanced Engineering Informatics* 62:102755. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102755>
- [2] Pavka F (2025) A Review of BIM-Driven Environmental Optimization in Construction Practices. *BIT* XV:36–46. <https://doi.org/10.14311/bit.2025.02.04>
- [3] Kim H, Anderson K, Lee S, Hildreth J (2013) Generating construction schedules through automatic data extraction using open BIM (building information modeling) technology. *Automation in Construction* 35:285–295. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.05.020>
- [4] Pinedo ML (2016) *Scheduling*. Springer International Publishing, New York
- [5] Yu J, Wang J, Hua Z, Wang X (2022) BIM-based time-cost optimization of a large-span spatial steel structure in an airport terminal building. *Journal of Facilities Management* 20:469–484. <https://doi.org/10.1108/JFM-12-2020-0097>
- [6] Nguyen D-T, Chou J-S, Tran D-H (2022) Integrating a novel multiple-objective FBI with BIM to determine tradeoff among resources in project scheduling. *Knowledge-Based Systems* 235:107640. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.107640>

- [7] Nusen P, Boonyung W, Nusen S, Panuwatwanich K, Champrasert P, Kaewmoracharoen M (2021) Construction Planning and Scheduling of a Renovation Project Using BIM-Based Multi-Objective Genetic Algorithm. *Applied Sciences* 11:.. <https://doi.org/10.3390/app11114716>
- [8] ISO 19650-1:2018(en) (2018) ISO 19650-1:2018(en), Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:19650:-1:ed-1:v1:en>. Accessed 10 Feb 2024
- [9] ISO 7817-1:2024. Building information modelling — Level of information need — Part 1: Concepts and principles. <https://www.iso.org/standard/82914.html>. Accessed 10 Feb 2026
- [10] IfcOpenShell - The open source IFC toolkit and geometry engine. <https://ifcopenshell.org/>. Accessed 28 Jan 2026
- [11] Dawson-Haggerty, Trimesh Contributors (2024) trimesh 4.4.1 documentation. <https://trimesh.org/index.html>. Accessed 22 June 2024
- [12] Mantelatto A, Njuguna M, Kuzminykh A, Parente M, Granja J, Azenha M (2026) Circularity of Construction Materials: Precedence Between Elements Based on Digital Models for Demolition. In: Daoud A, Balázs GL (eds) *Concrete and Circular Economy*. Springer Nature Switzerland, Cham, pp 308–318
- [13] ISO 16739-1:2024. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries — Part 1: Data schema. <https://www.iso.org/standard/84123.html>. Accessed 10 Feb 2026
- [14] Njuguna M, Mantelatto A, Kuzminykh A, Cerovšek T, Parente M, Granja J, Azenha M (2026) IFC-Based Demolition Schedule Optimization. In: Daoud A, Balázs GL (eds) *Concrete and Circular Economy*. Springer Nature Switzerland, Cham, pp 34–45