

Nível de informação necessário para a circularidade dos materiais de construção no âmbito do projeto RecycleBIM

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.164.25>

**Artur Kuzminykh¹, Achushankar Anil²,
Vasco Vieira³, Manuel Parente²,
José Granja⁵, Miguel Azenha⁶**

¹ *Universidade do Minho, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Guimarães, <https://orcid.org/0000-0003-1564-9227>*

² *Universidade do Minho, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Guimarães, <https://orcid.org/0009-0006-0910-1491>*

³ *Universidade do Minho, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Guimarães, <https://orcid.org/0000-0001-7316-4688>*

⁴ *Universidade do Minho, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Guimarães, <https://orcid.org/0000-0001-5765-2622>*

⁵ *Universidade do Minho, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Guimarães, <https://orcid.org/0000-0002-0858-4990>*

⁶ *Universidade do Minho, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Guimarães, <https://orcid.org/0000-0003-1374-9427>*

Resumo

O projeto RecycleBIM tem como objetivo aumentar a reutilização e reciclagem de matérias-primas extraídas de edifícios a demolir, intervindo no melhoramento dos processos digitais. Isto inclui a troca de informações com os mercados RCD com base no modelo de dados BIM. A abordagem do projeto considera os edifícios como repositórios de materiais de construção, promovendo a reciclagem e a reutilização em mercados de RCD. Para além disso, o projeto introduz inovações nos requisitos de informação estabelecidos e aborda os desafios da interoperabilidade. Assim, as especificações do nível de necessidade de informação são definidas no contexto dos requisitos de troca de informação, suportando o processo de criação de modelos digitais para o planeamento da desconstrução. Por sua vez, estes apoiam-se em objetos BIM como representação digital dos produtos de construção, fornecendo dados essenciais para a tomada de decisões informadas sobre a gestão de resíduos. Este artigo descreve o procedimento seguido para a criação destas especificações, com o objetivo de estabelecer uma abordagem normalizada para a troca de informações que promova a circularidade de materiais de construção.

1. Introdução

O aumento global da população implica uma maior procura por habitação e infraestruturas, resultando no consumo significativo de recursos pelo setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), responsável por quase metade dos materiais extraídos. Este setor também gera resíduos consideráveis, incluindo emissões de carbono, contribuindo com 35% do total de resíduos da União Europeia. A prática convencional de demolir edifícios no final do seu ciclo de vida leva à produção de grandes volumes de resíduos de construção e demolição (RCD). Por esse motivo, a economia circular na construção, promovida pelo Plano de Ação para a Economia Circular da Comissão Europeia, visava aumentar a reutilização e reciclagem de RCD para 70% até 2020. Porém, a recuperação efetiva de materiais ainda é significativamente inferior, resultando na disposição de quantidades substanciais em aterros ou incineração [1].

No contexto da transição para uma economia circular, na qual a transformação digital é crucial, o BIM surge como uma ferramenta essencial para a gestão de RCD e do processo de demolição. Contudo, a adoção eficaz de tecnologias digitais requer a consideração de normas adequadas, como as ISO 19650 [2] e EN 17412-1:2020 [3], bem como formatos de dados abertos, como o IFC, para garantir a interoperabilidade dos sistemas. O BIM pode ser utilizado para rastrear todo o ciclo de vida de um edifício, desde o projeto inicial, passando pela construção, as fases de serviço e, por fim, a demolição. Neste âmbito o potencial do BIM passa também por implementar simulações de energia e estudos de custos, para assim associar aos materiais e edifícios o máximo possível de informação, permitindo a tomada de decisão informadas relativamente ao seu fim de vida.

Neste contexto, o projeto RecycleBIM tem como objetivo implementar estratégias e metodologias BIM na gestão do RCD, no planeamento dos processos de demolição e na representação digital de edifícios, considerando-os como bancos de materiais. Isto inclui o desenvolvimento de uma metodologia para *Scan-to-BIM* de edifícios a serem demolidos, Juntamente com uma metodologia de baixo custo de criação de nuvens de pontos (i.e., obtenção de dados geométricos), inspeção do edifício (i.e., obtenção de dados não geométricos sobre os materiais e o seu estado) e modelação, isto resulta num modelo BIM capaz de conter informações suficientes para suportar todas as funcionalidades de análise e integração por aplicações subsequentes á demolição, tais como estimativa de quantidades de RCD, análise de ciclo de vida, otimização de estratégias de desconstrução, ligação a mercados de RCD/circularidade, e até otimização de resíduos reciclados para a impressão 3D. O projeto visa igualmente promover o desenvolvimento de ferramentas digitais para que os municípios possam emitir autorizações e licenças com base nos dados dos modelos BIM e manter registos precisos das informações relacionadas com a circularidade dos materiais [5]. Isto é possível graças ao estabelecimento de requisitos de informação para a representação digital de objetos e das correspondentes regras de modelação. Ao estruturar e normalizar os dados nos modelos, as partes interessadas podem compreender facilmente os requisitos e tomar decisões informadas. O projeto visa ainda promover o desenvolvimento de ferramentas digitais para que os municípios possam

emitir autorizações e licenças com base nos dados dos modelos BIM, mantendo registos precisos das informações relacionadas com a circularidade dos materiais [5]. Isto torna-se possível por meio do estabelecimento de requisitos de informação para a representação digital de objetos, assim como das correspondentes regras de modelação. De facto, ao estruturar e normalizar os dados nos modelos, as partes interessadas podem compreender facilmente os requisitos e tomar decisões informadas.

Assim, este artigo abrange um dos passos cruciais para atingir os objetivos propostos no RecycleBIM, que consiste no estabelecimento do nível de informação necessário para articular as necessidades de informação dos modelos BIM e de normalização das características e propriedades dos materiais. Este passo tem em vista garantir a criação de uma base de dados abrangente sobre as matérias-primas utilizadas tanto em novas construções como em edifícios destinados à demolição. Desta forma, os materiais de construção podem ser facilmente e transparentemente rastreados, contribuindo para decisões fundamentadas na gestão de matérias-primas, promovendo a melhoria do processo de reciclagem e reutilização de materiais e otimizando a gestão de RCD.

2. Nível de informação necessário

2.1. Troca de informação e marcos de entrega no âmbito da modelação

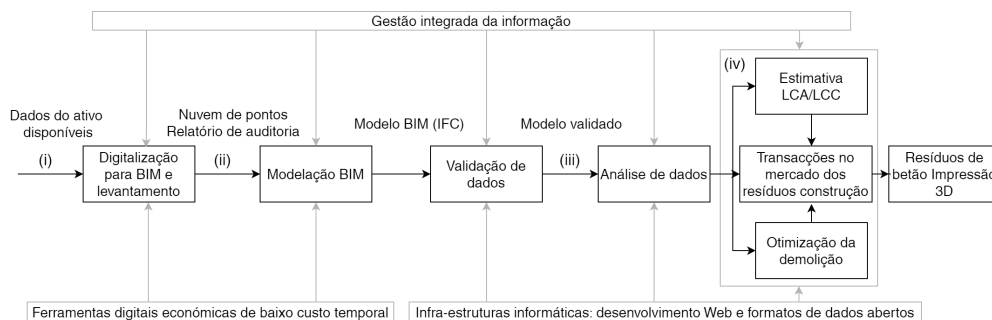
A literatura destaca vários desafios na adoção de práticas circulares, atribuindo-os em grande parte à compreensão inadequada das necessidades de informação [6]. Em qualquer processo de modelação BIM, é imperativo que o ponto de partida consista na definição dos requisitos de informação para o modelo digital do ativo. A incorporação de tecnologias digitais na transição para uma economia circular é complexa, sendo essa complexidade amplificada como resultado de dois desafios simultâneos: a sobrecarga de informação no seu intercâmbio, e a disponibilidade limitada de dados sobre circularidade [7]. Tendo estes desafios em mente, e com vista a permitir que as trocas de informação abordem a quantidade exata de informação necessária para um ou mais fins específicos, a norma ISO 19650-1 introduz o conceito de "nível de informação necessário", que define a extensão e a granularidade da informação a trocar.

O nível de informação necessário pode ser especificado para qualquer objeto sujeito a troca de informação. Ao criar uma representação digital de um ativo, podem ser definidas as seguintes etapas principais para a troca de informações (Figura 1):

- (i) Entrega de informações fornecidas pelo proprietário ou operador do ativo a demolir;
- (ii) Entrega de dados de inspeção no local (incluindo dados de auditoria estrutural e de materiais, assim como representação em nuvem de pontos da geometria do local);

- (iii) Criação do modelo BIM para o planeamento estratégico do processo de desconstrução através da análise das quantidades de materiais nele contidas;
- (iv) Processamento de dados obtidos a partir do modelo para posterior utilização em vários fluxos (integração no mercado, otimização, análise LCA).

Figura 1
Arquitetura proposta e etapas delineadas para troca de informações.



Nas fases iniciais do estudo documental que precede a auditoria, a base de dados do ativo consiste predominantemente em informação proveniente de documentos existentes associados ao mesmo. Quando disponíveis, os dados digitais do projeto, tais como modelos BIM e/ou desenhos CAD que mostrem as relações espaciais entre os elementos do edifício, são utilizados para apoiar a definição da geometria do ativo.

A nuvem de pontos obtida a partir do *laserscan*, utilizada como base para a modelação digital do ativo através da metodologia *Scan-to-BIM*, atua como uma representação geométrica do ativo. Adicionalmente, a documentação resultante da auditoria inclui também imagens que captam elementos específicos identificados pelo auditor, melhorando assim a identificação do estado atual de um objeto. Finalmente, o relatório de auditoria fornece informação sobre os próprios elementos de construção, incluindo a sua composição e características dos materiais constituintes. Este processo cumpre as diretrizes preconizadas pela UE para auditorias [8], apoiando a modelação e enriquecimento de informação do modelo digital criado.

Uma vez que os desafios associados à implementação do BIM, especialmente no final do ciclo de vida de um ativo, estão muitas vezes relacionados com a inexistência de modelos BIM, este artigo foca-se principalmente nas especificações relativas aos objetos do modelo BIM, adotando o modelo digital como a base de dados central para todas as informações relacionadas com aspetos de circularidade. Neste contexto, um ativo pode ser conceptualizado quer como uma mina urbana, fornecendo materiais para reciclagem, quer como um conjunto de produtos de construção adequados para reutilização, alinhando com os níveis da hierarquia dos passaportes de materiais [9]. Assim, é essencial não só articular a composição da informação relativa aos produtos, mas também incluir detalhes sobre os materiais como componentes integrais dos mesmos. Consequentemente, o nível de informação necessário foi estabelecido adotando uma perspetiva que enfatiza a apresentação de informação essencial relativa tanto a materiais como a produtos.

2.2. Requisitos alfanuméricos

Uma vez que a informação é um dos pontos centrais dos modelos digitais, a componente alfanumérica do nível de informação necessário desempenha um papel crucial na formulação de requisitos para os objetos do modelo. Aqui, os modelos de dados do produto (*Product Data Templates* – PDT) são utilizados para melhorar a legibilidade automática e garantir uma representação unificada dos dados alfanuméricos. Os PDT desempenham um papel fundamental na normalização da informação estruturada e semântica ao longo de todo o ciclo de vida do ambiente construído, promovendo a rastreabilidade [10]. Uma vez que, até à data, não existem bases de dados estabelecidas de PDTs para definir um subconjunto de informações para a avaliação das propriedades de circularidade, a definição dos requisitos de informação depende dos requisitos do processo (Figura 2). Na ausência de critérios distintos para avaliar a circularidade, estas métricas foram compiladas utilizando dados recolhidos ao longo da fase de auditoria da demolição, abrangendo fatores considerados cruciais para que os gestores de resíduos tomem decisões bem informadas.

Tendo em conta a metodologia defendida no projeto RecycleBIM para a circularidade dos elementos de construção, esta pressupõe que, se um elemento de construção (ou seja, um produto) não puder ser diretamente reutilizado, pode ser alternativamente desmontado nos seus materiais constituintes para reciclagem, quando viável. Consequentemente, o conjunto de dados sugerido para estimar o potencial de reutilização e reciclagem compreende dois níveis: o nível do material (Tabela 1) e o nível do produto (Tabela 2) [11].

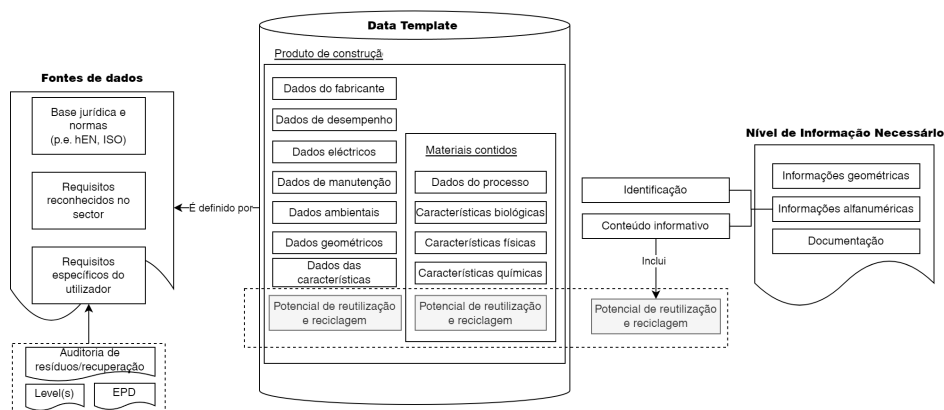


Figura 2
Relações entre o modelo digital e o nível de informação necessário.

Tabela 1 – Exemplo de conjunto de dados de circularidade de materiais

Propriedade	Material Predefinido	Betão/ revestimento	Betão Armado	Aço	Madeira	Fonte de dados
Name	✓	✓	✓	✓	✓	Level(s)
WasteCode	✓	✓	✓	✓	✓	EWC
CanBeRecycled	✓	✓	✓	✓	✓	Inspeção
CanBeReused	✓	✓	✓	✓	✓	Inspeção
TypeOfJoints	✓	v	✓	✓	✓	Inspeção
Hazardous	✓	✓	✓	✓	✓	Inspeção
MassDensity	✓	✓	✓	✓	✓	Inspeção / Referências
CompressiveStrength	-	✓/-	✓/-	-	-	Inspeção / Referências
ReinforcementVolumeRatio	-	✓/-	✓	-	-	Inspeção / Referências
StructuralGrade	-	-	-	✓/-	-	Inspeção / Referências
Species	-	-	-	-	✓/-	Inspeção

Tabela 2 – Exemplo de conjunto de dados de circularidade de produtos

Elemento	Parede	Laje	Cobertura	Viga	Pilar	Janela	Porta	Fonte de dados
Informações Alfanuméricas								
Tier1BuildingAspect	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Levels(s)
Tier2BuildingAspect	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Levels(s)
Classification	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Uniclass
ItemCanBeReused	✓/-	✓/-	✓/-	✓/-	✓/-	✓	✓	Inspeção
ItemTypeOfJoints	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Inspeção
Image	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Inspeção
Description	✓/-	✓/-	✓/-	✓/-	✓/-	✓	✓	Inspeção
SampleReference	✓/-	✓/-	✓/-	✓/-	✓/-	-	-	Inspeção
LoadBearing	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	Inspeção
Informações sobre Quantidades								
Altura	✓/-	-	-	✓/-	✓/-	✓	✓	Dados do modelo geométrico
Largura	-	-	-	✓/-	✓/-	✓	✓	Dados do modelo geométrico
Comprimento	-	-	-	✓/-	✓/-	-	-	Dados do modelo geométrico
Volume líquido	✓	✓	-	-	✓/-	-	-	Dados do modelo geométrico
Área	-	✓	✓	-	-	✓/-	✓/-	Dados do modelo geométrico
Por cada Camada de Material								
Volume Material	✓	✓	✓	✓/-	✓	-	-	Dados do modelo geométrico
Área lateral do Material	✓/-	✓/-	✓/-	-	✓/-	-	-	Dados do modelo geométrico
Peso do Material	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Inspeção / Referências / Modelo
Espessura do Material	✓	✓	✓	-	-	-	-	Dados do modelo geométrico

O conjunto de dados relativos à circularidade dos materiais contém as seguintes propriedades:

- 'WasteCode', onde a cada material é atribuído o tipo de resíduo correspondente conforme a Lista Europeia de Resíduos [12].
- 'CanBeRecycled', indica se o material pode ou não pode ser reciclado;
- 'CanBeReused', utilizado para indicar se o material pode ser reutilizado na sua forma atual sem processamento adicional;
- 'TypeOfJoints', correspondente ao nível de complexidade associado ao processo de desmontagem do material numa escala de 1 a 3, em que 1 corresponde às juntas mecânicas totalmente desmontáveis, 2 identifica o esforço suplementar necessário e 3 reflete as camadas soldadas e fundidas que requerem uma intervenção humana significativa ou maquinaria;
- 'Hazardous', identificando se o material tem de receber tratamento especial (e.g., amianto);
- 'MassDensity', referente à densidade, que permite calcular os pesos de cada material;
- 'CompressiveStrength' para identificar as propriedades do betão, estimar a qualidade do material recuperado e a sua aplicabilidade para a reciclagem e utilização como agregado;
- 'ReinforcementVolumeRatio', para estimar o peso de aço que pode ser extraído da estrutura armada;
- 'StructuralGrade', para definir as características do aço e 'Species' para identificar o tipo de madeira.

Para estimar o potencial de reutilização, o produto de construção, que representa um conjunto de materiais, é definido pelas seguintes propriedades:

- 'Tier1BuildingAspect' e 'Tier2BuildingAspect', que definem a categoria e o tipo do produto de acordo com a classificação Level(s) [13];
- 'Classification', correspondente à classificação de todos os elementos de construção de acordo com o sistema de classificação Uniclass 2015, sendo útil para uma identificação normalizada e detalhada dos produtos no mercado;
- 'ItemCanBeReused', indicando se o produto pode ser utilizado diretamente na sequência da desmontagem ou desconstrução (i.e., sem a necessidade de processamento adicional), ou se deve ser separado nos seus materiais constituintes para reciclagem;
- 'ItemTypeOfJoints', referente às possibilidades de desconstrução dos produtos;
- 'Image', utilizado para fornecer um link para um documento fotográfico do produto, que pode ser utilizado para avaliar a condição do mesmo, sendo especialmente relevante para produtos que podem ser revendidos no mercado;
- 'Description', fornecendo uma breve descrição do produto, incluindo informações relevantes que não fazem parte de outros parâmetros, tais como a condição do produto;

- 'SampleReference' e 'LoadBearing', específicos para os elementos estruturais para avaliar a possibilidade de reutilização (por exemplo, para estruturas de aço) e a sequência de desconstrução;
- Quantidades (dimensions, area, volumes, weights) por produto e por material.

O conjunto de dados formulado foi utilizado para definir o conteúdo "Informação" dos requisitos alfanuméricos. O domínio "Identificação" é especificado pela estrutura de decomposição do modelo e é inerente à utilização do fluxo de trabalho BIM (a identificação pode ser ditada principalmente pela classe do objeto, pelo seu identificador único ou pela referência de classificação utilizada na parte alfanumérica).

2.3. Representação geométrica e documentação de suporte

Para especificar a informação geométrica de um objeto num modelo BIM utilizado para planejar a desconstrução, são considerados os seguintes aspetos [3]:

- Detalhe: Descreve a complexidade da geometria do objeto, desde simplificada até detalhada, em comparação com o objeto do mundo real. No caso do uso BIM proposto no contexto da desconstrução, é adotada a representação "Simplificada", desde que esta permita calcular as quantidades baseadas na geometria em conjunto com os dados alfanuméricos especificados;
- Dimensionalidade: Define o número de dimensões espaciais do objeto. Para fornecer o contexto dos elementos numa estrutura espacial e uma quantificação baseada na geometria, é adotada a dimensionalidade 3D;
- Localização: Ao ser definido o referencial e o ponto de levantamento que posiciona o modelo no sistema de coordenadas de referência, os objetos BIM são representados relativamente à base do modelo;
- Aparência: No âmbito da demolição, são solicitadas cores diferentes para diferentes camadas dentro de objetos para fácil identificação. Por outro lado, não é necessária informação relativa às texturas neste contexto;
- Comportamento paramétrico: No caso de um modelo BIM para desconstrução, a geometria é produzida para um caso de uso singular, ou seja, para calcular a quantidade de materiais recuperáveis, produtos e para o planeamento de demolição. Como não há necessidade de transferência do projeto para desenvolvimento adicional, o comportamento paramétrico e a modificação de forma para objetos não são solicitados, sendo que a "Geometria Explícita" é suficiente para a maioria dos objetos solicitados.

Os requisitos de geometria especificados permitem a quantificação automatizada e baseada na geometria dos materiais extraídos, abrangendo aproximadamente 90% dos elementos de construção, tais como paredes, lajes, estruturas, pavimentos e coberturas. Estes elementos representam os produtos, incluindo betão e alvenaria, que constituem até 80% dos RCD [14]. No contexto da modelação de produtos com composições complexas, como janelas e portas construídas com vários materiais, e.g. metal, vidro, madeira, plástico, etc., torna-se impraticável a quantificação com base na representação digital devido à complexidade envolvida. Por conseguinte,

a representação do objeto pode ser reduzida a um sólido que reflete a forma do objeto (Figura 3), especificando as quantidades de material no conjunto de dados alfanuméricos.

Para além dos requisitos alfanuméricos e geométricos dos objetos, a documentação é parte integrante da especificação. O conjunto de documentos é definido pela informação recolhida pelo auditor, que incluem fotografias do produto, resultados de testes e avaliações de qualidade, relatórios de laboratório, diagramas de camadas de materiais, entre outros documentos que possam apoiar o processo de tomada de decisão do gestor de resíduos. Para os objetos BIM, a única documentação solicitada é uma ligação para a fotografia do produto, uma panorâmica de 360º da sala/espço onde o objeto se encontra, ou um esboço, revelando os materiais e a estrutura.

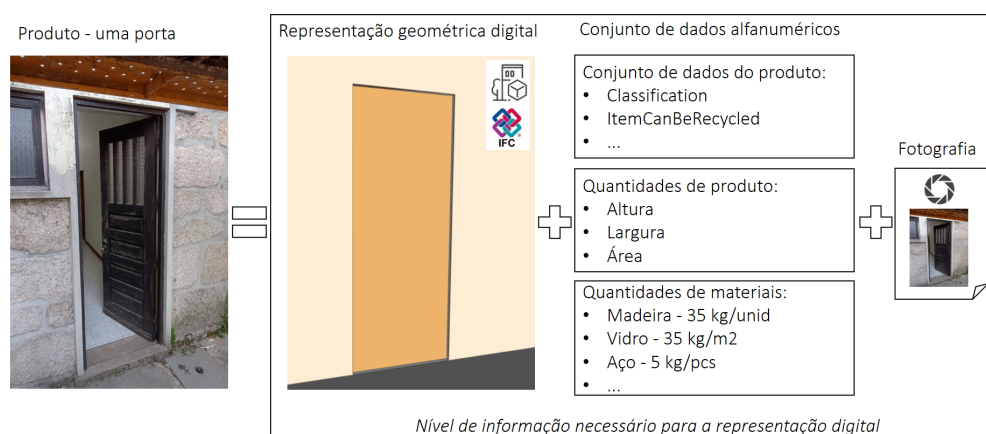


Figura 3
Representação digital do produto para a gestão do RCD.

3. IFC mapping to ensure interoperability and information circularity

Os requisitos de informação definidos para o modelo foram estabelecidos num formato de dados aberto (IFC-SPF) para garantir um fluxo de trabalho independente do software e promover a interoperabilidade, que é considerada um desafio para a aplicação de práticas circulares com fluxos de trabalho digitalizados. Uma vez que o esquema IFC pode não abranger todos os domínios alfanuméricos concebíveis e as propriedades estabelecidas no conjunto de dados de circularidade não estão semanticamente definidas no esquema IFC existente, foi definido o conjunto de propriedades personalizado "RecycleBIM" [11, 15]. O exemplo de mapeamento de propriedades do conjunto de dados é apresentado na Tabela 3. O projeto não só introduz a capacidade de definir uma configuração normalizada para contentores de informação, como também permite a análise de modelos IFC BIM e a sua validação utilizando a *Information Delivery Specification* (IDS) [16]. Aqui, foi estabelecida uma extensão personalizada do esquema IFC, permitindo representar os conceitos no domínio personalizado do *buildingSMART Data Dictionary* (bSDD) [17].

Tabela 3 – Localização de cada propriedade no esquema IFC

Propriedade	Tipo de Dados	Unidade	Localização	Exemplo
Tier1BuildingAspect	IfcLabel	-	RecycleBIM_Pset	Shell
Tier2BuildingAspect	IfcLabel	-	RecycleBIM_Pset	Load Bearing Structural Frame
Classification	IfcClassification	-	IfcClassificationReference	Pr_20_85_08_15
ItemCanBeReused	IfcBoolean	-	RecycleBIM_Pset	FALSE
ItemTypeOfJoints	IfcInteger	-	RecycleBIM_Pset	3
Image	IfcText		RecycleBIM_Pset	DCIM_1707.jpg
Description	IfcText		Description (IfcRoot)	RC beam, w/o finishing
SampleReference	IfcText		RecycleBIM_Pset	Sr_07-17
LoadBearing	IfcBoolean		Pset_BeamCommon	TRUE
Quantity Information				
Length	IfcQuantityLength	m	Qto_BeamBaseQuantities	3.5
NetVolume	IfcQuantityVolume	m ³	Qto_BeamBaseQuantities	0.875
Por cada Camada de Material				
MaterialVolume	IfcQuantityVolume	m ³	IfcPhysicalComplex Quantitiy	0.875
MaterialWeight	IfcQuantityWeight	kg	IfcPhysicalComplex Quantitiy	2100

4. Conclusões

A adoção do BIM como metodologia para representar dados de ativos digitais envolve fases distintas de geração e processamento de informações. Os requisitos de informação para os marcos de entrega do modelo são estabelecidos através da definição do nível de informação necessário. Estas especificações têm um valor prático significativo para a criação de um modelo BIM, especialmente nas fases de planeamento da desconstrução de ativos. Neste caso específico de uso BIM, o nível de informação necessário é fundamental para organizar a gestão dos RCD e implementar abordagens circulares. Para garantir uma troca de informação efetiva, os requisitos de informação foram delineados num formato de dados aberto, utilizando o esquema IFC. Esta metodologia é essencial para fomentar a interoperabilidade, um aspeto crítico na promoção de práticas circulares no âmbito dos processos fragmentados do sector da construção.

A metodologia proposta oferece uma visão relevante para as partes interessadas no contexto dos conceitos de "mina urbana", capacitando os municípios para estabelecerem legislação e estruturas de licenciamento que incentivem a circularidade dos materiais. Como perspetiva futura, pretende-se desenvolver o nível de informação necessário não só para aplicação de demolições, mas também para o registo de materiais e produtos de novos edifícios, numa abordagem *design to deconstruct*.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT / MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), com a referência UIDB / 04029/2020 (doi.org/10.54499/UIDB/04029/2020), e no âmbito do Laboratório Associado de Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE com a referência LA/P/0112/2020. O trabalho foi também parcialmente financiado pela ação ERA-MIN 3, que recebeu financiamento da União Europeia ao abrigo do Programa Horizonte 2020 do Acordo de Subvenção da Comissão Europeia n.º 101003575.

Referências

- [1] Ajayebi, A., Hopkinson, P., Zhou, K., Lam, D., Chen, H.M., Wang, Y.: Spatiotemporal model to quantify stocks of building structural products for a prospective circular economy. *Resour Conserv Recycl.* 162, (2020).
- [2] ISO 19650-1: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling – Information management using building information modelling-Part 1: Concepts and principles. (2018)
- [3] EN 17412-1: Building Information Modelling – Level of Information Need – Part 1: Concepts and principles. (2020)
- [4] ISO 16739-1: Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries – Part 1: Data schema.
- [5] Parente, M., Granja, J., Vieira, V., Kuzminykh, A., González, V., Fernández, A., Díaz-Vilariño, L., Cao, D., Ukrainczyk, N., Sambataro, L., Koenders, E., Babafemi, J., De Villiers, W., Van Zijl, G., Petrik, L., Sandonis, E., Azenha, M.: RecycleBIM: a framework for the circularity of construction materials through digital modelling. In: V International Conference Progress of Recycling in the Built Environment. pp. 42-51, Weimar (2023)
- [6] Çetin, S., Gruis, V., Straub, A.: Digitalization for a circular economy in the building industry: Multiple-case study of Dutch social housing organizations. *Resources, Conservation and Recycling Advances.* 15, (2022).
- [7] Hedberg, A., Šipka, S.: Creating a digital roadmap for circular economy. (2019).
- [8] European Commission: Guidelines for the waste audits before demolition and renovation works of buildings. EU Construction and Demolition Waste Management. (2018).
- [9] Luscuere, L.: Circularity information management for buildings: the example of materials passports. Presented at the January 1 (2019).

- [10] ISO 23387: Building information modelling (BIM) – Data templates for construction objects used in the life cycle of built assets – Concepts and principles.
- [11] Achushankar, A.: Efficient data management in a BIM-based framework for circularity of products and materials, (2023).
- [12] European Commission: Guidance on classification of waste according to EWC-Stat categories. (2010).
- [13] Dodd, N., Donatello, S., Cordella, M.: “Level(s) indicator 2.4: Design for deconstruction”, European Commission JRC Technical Report. (2021).
- [14] Pacheco-Torgal, F., Ding, Y., Colangelo, F., Tuladhar, R., Koutamanis, A.: Advances in Construction and Demolition Waste Recycling: Management, Processing and Environmental Assessment. (2020).
- [15] Kuzminykh, A.: Integrated planning and recording circularity of construction materials through digital modelling, (2022).
- [16] Kuzminykh, A., Parente, M., Vieira, V., Granja, J., Azenha, M.: RecycleBIM Approach Towards Integrated Data Management for Circularity: Proof of Concept in a RC Building. RILEM Bookseries. 43, 252–262 (2023).
- [17] buildingSMART: buildingSMART Data Dictionary – buildingSMART International, <https://www.buildingsmart.org/users/services/buildingsmart-data-dictionary/>