

Plataforma integrada para a circularidade dos materiais de construção: Prova de conceito no âmbito do projeto RecycleBIM

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.164.24>

**Artur Kuzminykh¹, Manuel Parente²,
Vasco Vieira³, José Granja⁴, Miguel Azenha⁵**

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/0000-0001-5765-2622>*

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/0000-0002-0858-4990>*

⁵ *Universidade do Minho, ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, Guimarães, <https://orcid.org/0000-0003-1374-9427>*

Resumo

Embora a maior parte dos resíduos de construção e demolição seja composta por materiais com potencial de reutilização/reciclagem (por exemplo, alvenaria e betão) que poderiam contribuir para uma economia circular, o desempenho da indústria da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) no contexto da circularidade é considerado ainda insuficiente. De acordo com a UE, a agenda da economia circular deve ser coincidente com a agenda digital. No entanto, a primeira é considerada inatingível sem o avanço das tecnologias digitais, que continuam a ser pouco utilizadas no setor. Tendo isto em conta, este artigo descreve a abordagem do projeto RecycleBIM, que pretende criar uma plataforma integrada para a circularidade dos materiais de construção com a utilização de metodologias e tecnologias associadas com BIM e a gestão da informação. O trabalho apresenta uma descrição do fluxo de trabalho proposto pelo projeto e dos desenvolvimentos que permitem a aplicação de tecnologias digitais em atividades de desconstrução. Para além disso, são descritos os pré-requisitos para a utilização do BIM bem como os principais elementos da abordagem proposta, incluindo requisitos de informação, técnicas de recolha e processamento de dados, formatos de dados abertos e o desenvolvimento de código aberto com integração de serviços Web. É também apresentado um caso de estudo com a validação do fluxo de trabalho proposto, assim como as oportunidades e trabalhos futuros nas secções finais.

Introdução

A construção é uma das indústrias com maior impacto ambiental. Para além de ser responsável pelo consumo de mais de metade de todos os recursos extraídos e minados [1], está também associada à poluição ambiental, ao esgotamento das matérias-primas e às emissões de carbono. De todos estes recursos extraídos, vários estudos indicam que até 85% acabam em resíduos [2]. De acordo com a Comissão Europeia, os resíduos de construção e demolição (RCD) representam 25-30% de todos os resíduos criados na UE. No entanto, a maioria dos RCD são resíduos inertes, o que significa que estes materiais podem ser reutilizados, contribuindo assim para uma economia circular.

Tendo em conta que mais de 90% dos edifícios e estruturas são constituídos principalmente por dois produtos de construção com potencial de circularidade inerente, i.e., alvenaria e betão, que também representam 40-80% dos RCD [2,3], o seu tratamento deve ser visto como um objetivo prioritário. Atualmente, o betão produzido a partir de agregados reciclados já não é apenas um conceito teórico: é uma prática comum em alguns países, tendo inclusivamente sido demonstrado que o produto final pode ter propriedades mecânicas comparáveis às do betão convencional [4-6]. Há, no entanto, que ter em conta que os restantes resíduos de construção representam também materiais considerados raros e/ou difíceis de extrair da natureza e que, mesmo com grandes custos de extração (durante a demolição), podem representar uma oportunidade para colocar novamente estes materiais na economia e reduzir a extração de novos materiais. Para além do mais, nos edifícios existentes verifica-se ainda um grande potencial para a reutilização de produtos, diretamente ou através de processos de restauro, desses produtos em novas construções. Esta é uma abordagem ainda muito pouco estudada e implementada na indústria uma vez que existe uma grande separação entre a indústria de demolição e as equipas de projeto/construção.

De acordo com Leising *et al.* [7] a abordagem da economia circular para a indústria Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) pode ser descrita como *“uma abordagem do ciclo de vida que otimiza o tempo de vida útil dos edifícios, integrando a fase de fim de vida no projeto e adotando uma postura em que os materiais são apenas temporariamente contidos no edifício, que funciona como um banco de materiais”*. Assim, é levantada a questão da rastreabilidade, juntamente com a questão de como seguir o conceito do berço ao berço e rastrear o material ao longo de todas as fases do ciclo de vida. Este rastreamento é ainda bastante complexo de ser materializado, mas várias iniciativas europeias, tais como os passaportes digitais dos produtos, estão a definir estratégias para que a informação de cada produto de construção seja mantida, de uma forma normalizada, ao longo de todo o ciclo de vida.

Uma forma possível de abordar esta questão é a compilação de toda a informação sobre os elementos constituintes dos edifícios numa base de dados abrangente que permita aos utilizadores e à indústria ver os edifícios como bancos de materiais, colocando-se, assim, o problema da gestão de dados em primeiro plano. Apesar da

importância da circularidade, esta acarreta enormes desafios de gestão da informação e existem ainda muito poucos trabalhos quer académicos quer de aplicação prática que abordem esta questão com detalhe que permitam a avaliação da viabilidade na indústria [8], [10].

A utilização da simulação 4D para otimizar o processo de demolição e a quantificação dos produtos e materiais para determinar o volume de agregados reciclados são dois exemplos documentados de como o BIM pode ser utilizado para apoiar as atividades de demolição [11], [13]. Foram também apresentadas sugestões para uma auditoria pré-demolição [14] para potenciar a tirada de partido das tecnologias digitais. No entanto, a ausência de bases de dados com conjuntos de dados compatíveis e de modelos BIM dos ativos existentes é citada como um obstáculo à aplicação do BIM neste âmbito [15], [17].

Neste contexto, o projeto RecycleBIM (recyclebim.eu) foi criado para estudar soluções baseadas em processos digitais suportados na metodologia BIM para a otimização dos processos de demolição e gestão da informação para permitir a economia circular dos produtos e resíduos de demolição de edifícios existentes, assim como edifícios a construir. Para além do estudo da circularidade de resíduos de demolição, este projeto pretende fornecer um *framework* para a reutilização de produtos existentes nos edifícios para aumentar a vida útil destes mesmos produtos. Os objetivos gerais do RecycleBIM podem ser agrupados em cinco pontos: (i) a utilização de técnicas de recolha dados para permitir o suporte à modelação BIM por meio de métodos semi-automáticos e minimização de custos; (ii) o fornecimento de requisitos de informação para garantir a qualidade e quantidade necessária dos dados relativos aos materiais contidos nas estruturas; (iii) a utilização de aplicações em código e com formatos de dados abertos para processar a informação e permitir a otimização do planeamento das atividades de desconstrução e demolição; (iv) a utilização estratégica e ótima de resíduos de demolição reciclados em impressão 3D de betão para a construção digital local; (v) a manutenção de registos precisos da circularidade dos materiais com contexto geográfico.

Tendo em conta que a vida útil da maioria dos edifícios e estruturas atuais varia entre os 30 e os 100 anos, pode facilmente inferir-se que o conceito da mina urbana se tornará cada vez mais premente à medida que os recursos se tornam cada vez mais limitados ao longo do tempo. Embora já existam mercados Web para esse efeito, essas soluções carecem, em última análise, de uma abordagem digital integrada e de uma interface de interação humana [19]. A combinação de BIM com tecnologias Web (tais como o *Linked Data*) torna possível a automatização do processo de recolha de dados e o desenvolvimento de um mercado. A ideia de uma plataforma de informação para a circularidade centrada em BIM já foi proposta previamente [20], embora de modo concetual apenas, incluindo com a integração do aspeto comercial procurando o equilíbrio entre a oferta e a procura de RCD [9].

Assim, as três áreas-chave atualmente em desenvolvimento no âmbito do projeto RecycleBIM e que constituem a agenda de investigação para a gestão dos RCD no

final do ciclo de vida são (i) recolha de dados eficaz e eficiente; (ii) automatização e facilidade de desenvolvimento de modelos BIM; e (iii) planeamento integrado para a gestão de RCD [3, 18]. Este artigo pretende divulgar o objetivo e alguns desenvolvimentos atuais do RecycleBIM, com destaque para o trabalho relacionado com o BIM aplicado no contexto da demolição de estruturas de betão.

Plataforma web RecycleBIM

Para processar a informação contida no modelo BIM para posterior utilização em fluxos de trabalho relacionados com as práticas da economia circular, o projeto desenvolveu uma ferramenta web, com o objetivo de promover a circularidade dos materiais de construção. Esta plataforma foi desenvolvida com o objetivo de processar a informação do levantamento efetuado do edifício a demolir que culminou num modelo BIM em IFC e convertê-la numa base de dados com a informação necessário para a colocação num *marketplace*. Um aspeto importante desta ferramenta é a sua capacidade de fornecer automaticamente dados suficientemente precisos sobre as quantidades de materiais contidos nos ativos, derivados do modelo digital. O aspeto fundamental que faz avançar o conceito de economia circular nesta aplicação reside na sua facilidade de utilização e na sua incorporação de operações com formatos de dados abertos. A aplicação é desenvolvida utilizando kits de desenvolvimento de software (SDK) e bibliotecas de acesso livre e de código aberto, criando um ambiente que favorece a aceitação tecnológica generalizada. Além disso, esta estratégia ajuda a minimizar os obstáculos económicos para as empresas se envolverem, uma vez que elimina a necessidade de adquirir software para operar com esta plataforma. Prevê-se que a plataforma possa ser alojada num domínio público da Web ou num servidor privado da empresa, estabelecendo pontos de entrada nos mercados regionais de materiais de construção. A lógica subjacente à utilização da tecnologia baseada na Web foi a de oferecer um serviço de cliente “magro” que não exige uma capacidade computacional de elevado desempenho. Esta escolha permite a utilização em dispositivos portáteis, facilitando a partilha instantânea de informações. A aplicação proposta pode ser conceitualmente categorizada como uma arquitetura de três camadas [21], em que:

- A camada de apresentação, representada pela interface gráfica de utilizador baseada na web e construída em HTML, CSS e JavaScript, assegura a visualização de um modelo digital através do funcionamento do Xeokit na camada de aplicação;
- A camada de aplicação, que representa a lógica comercial e é construída em Python e PHP, assegura a validação e a análise do modelo IFC com a biblioteca python “IfcOpenShell”;
- A camada de dados, onde os dados são armazenados e geridos numa base de dados MySQL no lado do servidor (remoto ou local).

As principais funções operacionais da ferramenta web giram em torno da validação de informações dentro do modelo BIM e da sua análise num formato tabular dentro de uma base de dados. Estes dados estruturados sobre os elementos e materiais de construção contidos podem ser posteriormente transmitidos a qualquer mercado e servem como base fundamental para o planeamento do processo de demolição. A aplicação desenvolvida fornece as seguintes funcionalidades essenciais, delineadas como um conjunto mínimo para articular o conceito de utilização de um modelo digital como uma entrada automatizada para o mercado (Figura 1):

- (i) A ferramenta incorpora um sistema de registo de utilizadores para garantir um acesso seguro aos utilizadores autorizados;
- (ii) Permite que os utilizadores carreguem um modelo BIM no esquema IFC, completo com imagens de objetos, e mostra o modelo 3D na interface gráfica do utilizador;
- (iii) A aplicação efetua verificações de validação do conjunto de dados alfanuméricos dos requisitos de informação, gerando relatórios detalhados com identificação visual dos elementos na interface;
- (iv) Realiza a análise do modelo BIM validado, gerando uma lista de objetos definidos para reutilização e materiais para reciclagem.

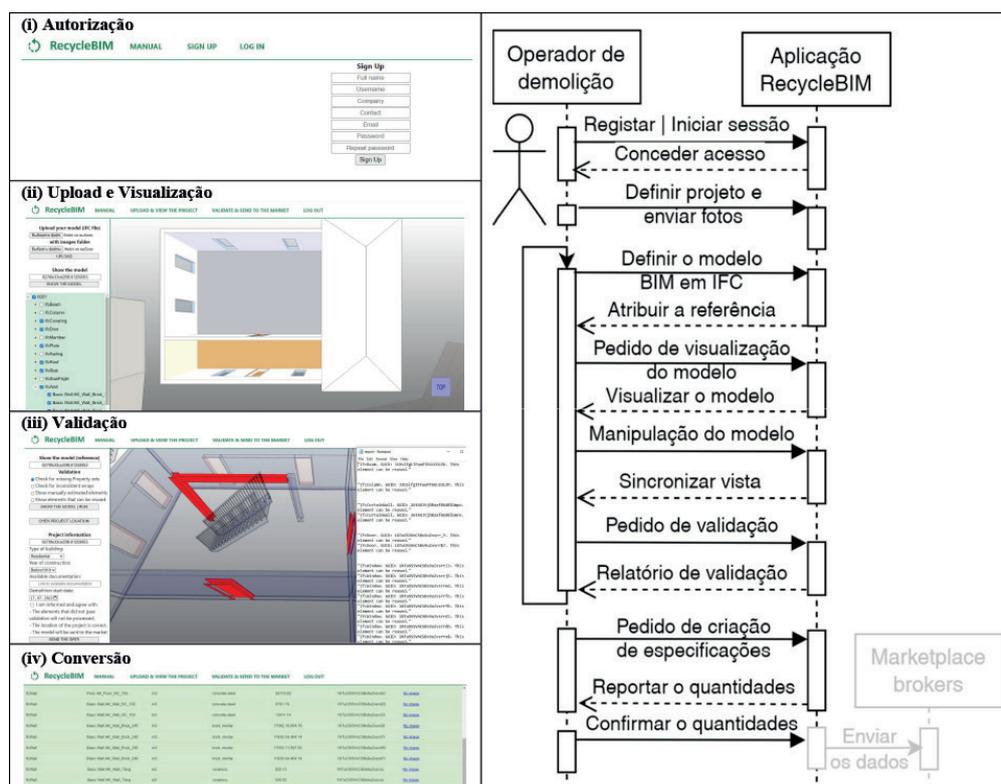


Figura 1
Funcionalidades da ferramenta web desenvolvida.

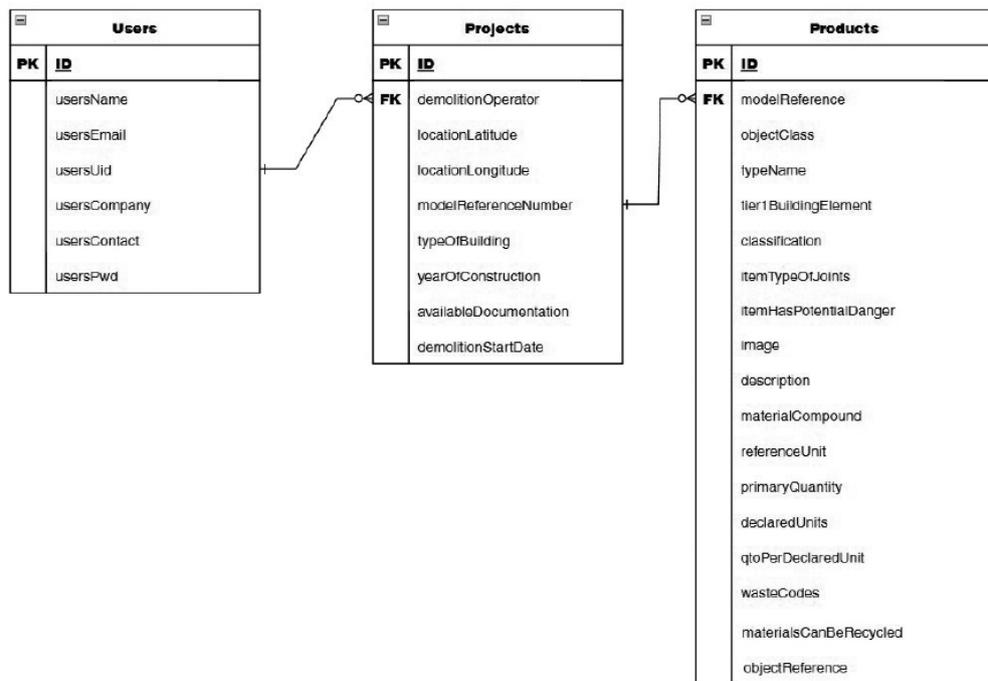
Antes de disseminar a informação sobre os ativos para o mercado, é crucial assegurar que a natureza estruturada e organizada dos dados está alinhada com os requisitos de informação estabelecidos [22]. Neste contexto, o passo inicial envolve o escrutínio e a validação dos dados da base de dados de entrada, apresentados no formato

de um modelo BIM em IFC. Estas verificações são executadas analisando o esquema IFC através da utilização da biblioteca `IfcOpenShell`. O objetivo destas verificações é verificar a presença das informações necessárias e gerar uma lista de elementos que não passaram com êxito a verificação, identificando-os especificamente pelos seus GUIDs. Estes GUIDs são então apresentados no relatório e são também utilizados para destacar visualmente itens na interface do utilizador através das ferramentas `Xeokit`.

Depois de verificados, os dados do modelo são analisados a partir do esquema IFC para uma base de dados SQL que representa a especificação do ativo. A estrutura da base de dados adotada é descrita na Figura 2: o utilizador é ligado a projetos que possuem modelos com informações sobre elementos de construção para reciclagem e reutilização. A informação sobre os materiais contida nos elementos também permite efetuar consultas sobre os materiais, dando o contexto - os elementos onde esses materiais estão contidos. Isto permite que o operador de demolição avalie a viabilidade de recuperar um material específico de um determinado elemento. É possível melhorar esta base de dados para criar relações mais complexas, adicionando tabelas relativas a contas de clientes e integrando-a com bases de dados de instalações de reciclagem locais ao escalar a ferramenta para a plataforma digital para a circularidade. Evitando a promoção de uma abordagem centralizada, a ênfase é colocada na defesa de uma abordagem aberta e na assunção da existência de numerosas aplicações semelhantes à demonstrada. Neste contexto, a estrutura de dados proposta pode ser considerada suficiente e conforme com o nível de informação necessário [22] para a criação de especificações de ativos. Estas especificações destinam-se a ser integradas em mercados, estabelecendo um quadro para o planeamento da demolição com base na procura do mercado.

Figura 2

Diagrama da base de dados da ferramenta desenvolvida.



Demonstração em caso de estudo

A metodologia proposta, desde a captura de dados até à geração automática de especificações de materiais e produtos de construção contidos num edifício, foi validada num caso de estudo correspondente a uma habitação familiar real de 2 pisos, com 400 m² de área em Portugal. O edifício contém alguma variabilidade de materiais ao longo das suas secções, em parte como resultado de uma remodelação sofrida nos anos 60, durante a qual foi construído um segundo piso em tijolo e betão, em oposição às secções originais que eram maioritariamente compostas por paredes de granito e telhados de madeira. A estrutura é considerada como um projeto típico a ser desconstruído ou renovado na área geográfica específica na qual se encontra.

Não existindo disponibilidade de modelo BIM da estrutura, as etapas iniciais incluíram o levantamento, com laser scanner portátil para obtenção dos dados geométricos, acompanhado de uma inspeção ao edifício para recolha de informações não geométricas, nomeadamente relativas aos materiais existentes em cada elemento da estrutura e o seu estado. A duração do levantamento foi de cerca de 1 hora, a partir do qual resultou uma nuvem de pontos abrangente suficiente para permitir a modelação BIM (Figura 3a). As informações geradas pela inspeção *in-situ* permitiram o enriquecimento do modelo com dados alfanuméricos e documentação associada, seguindo o nível estabelecido de informações necessárias. É relevante notar que a caracterização dos materiais efetuada durante a etapa da inspeção incluiu informações relativas à desconstrução parcial e às intervenções locais para prevenir potenciais perigos durante a desconstrução (e.g., substâncias perigosas, juntas enfraquecidas). Este processo de enriquecimento do modelo BIM com dados não-geométricos demorou cerca de 16-20 horas, o que, juntamente com a atividade de levantamento, resulta num total de 3-5 dias de trabalho para obtenção do modelo final (Figura 3b). Independentemente do software adotado, que pode ser gratuito (e.g., *Blender* com o *add-on* BIM e a biblioteca *IfcOpenShell* incorporada), todos os requisitos de informação foram verificados com vista à criação do ficheiro IFC, que foi posteriormente validado na plataforma baseada na Web desenvolvida (Figura 3c).

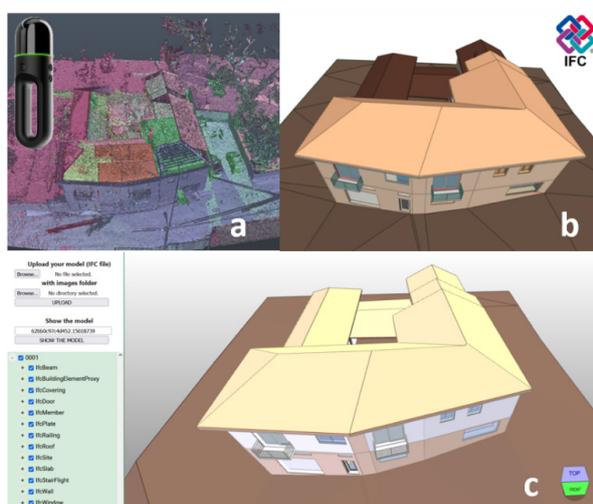


Figura 3
(a) dados *point cloud*; (b) modelo BIM em formato IFC; e (c) representação do modelo na plataforma [21].

O processo de validação apoia-se em scripts integrados na plataforma Web que analisa a informação presente nos contentores de informação e avalia a qualidade do modelo [21]. Após a validação, o modelo é analisado num formato de tabela SQL, permitindo que as especificações dos materiais existentes fossem automaticamente carregadas para o mercado (Figura 4). Desta forma, o edifício é finalmente representado como um banco de materiais para reutilização e reciclagem de um modo automático, evitando as soluções descritivas convencionais baseadas na introdução manual de dados pelo utilizador. De acordo com os resultados gerados pela plataforma, 90% dos elementos foram considerados recicláveis ou reutilizáveis. A estrutura continha cerca de 77 m³ de betão armado e betonilha, 27 m³ de tijolo e cerca de 150 m³ de granito.

Figura 4

Edifício como um banco de materiais representado como elementos construtivos separados.



Conclusões

Este artigo descreve uma abordagem para a criação/gestão de modelos de informação e bases de dados no contexto da circularidade dos materiais de construção. O âmbito do trabalho alinha-se com o do projeto RecycleBIM, que também foi brevemente descrito no artigo. A abordagem integrada proposta baseia-se em formatos de dados abertos e incentiva a utilização de ferramentas abertas, promovendo assim a divulgação e a adoção da solução. A plataforma desenvolvida permite um fluxo de informação rastreável, defendendo a transparência e promovendo a economia circular. Deste modo, suporta um mercado livre aberto para o comércio de RCD, atuando como base para a construção de modelos de informação e estimativa de quantidades de materiais utilizando os dados recolhidos.

Atualmente, o fluxo de trabalho concebido está adaptado para representar um edifício através da combinação dos seus produtos (i.e., elementos de construção) e materiais. No entanto, o edifício pode ser avaliado de vários pontos de vista (e.g., na perspetiva de materiais que constituem produtos compostos), criando a base para análises futuras mais complexas, assim como para tarefas de otimização de processos de demolição tendo como referência indicadores económicos e ambientais. Mesmo que a implementação do fluxo de trabalho sugerido possa implicar um maior nível de esforço e de custos iniciais, especialmente nos casos em que a existência de

um modelo BIM da operação do edifício não está previamente disponível, as vantagens associadas à adoção da metodologia podem não só contribuir para um futuro mais sustentável, mas também ser financeiramente justificadas pelo comércio de RCD, que está a ser gradualmente adotado em alguns países e que se espera que se torne inevitável com a crescente escassez de recursos.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para Ciência e a Tecnologia, ao abrigo da convenção de subvenção MPP2030-FCT-2022 atribuída ao 1.º autor. 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] European Commission, “A new Circular Economy Action Plan,” Report 98, Bruxelas, Bélgica, 2020.
- [2] F. Pacheco-Torgal, Y. Ding, F. Colangelo, R. Tuladhar, and A. Koutamanis, “Advances in Construction and Demolition Waste Recycling: Management, Processing and Environmental Assessment,” in *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling* (2020). doi: 10.1016/C2018-0-05197-X
- [3] D. Han, M. Kalantari, and A. Rajabifard, “Building information modeling (BIM) for construction and demolition waste management in Australia: A research agenda,” *Sustainability*, vol. 13, pp. 12983, 2021. <https://doi.org/10.3390/su132312983>
- [4] N. Bui, T. Satomi, and H. Takahashi, “Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate,” *Construction and Building Materials*, vol. 163, pp. 496-507, 2018. doi: 10.1016/J.CONBUILD-MAT.2017.12.131
- [5] G.S. dos Reis, M. Quattrone, W. M. Ambrós, B.G. Cazacliu, and C.H. Sampaio, “Current applications of recycled aggregates from construction and demolition: A review,” *Materials*, vol. 14, pp. 1700, 2018. doi: 10.3390/ma14071700
- [6] Sabireen, F. Butt, A. Ahmad, K. Ullah, O. Zaid, H. Ahmed Shah, and T. Kamal, “Mechanical performance of fiber-reinforced concrete and functionally graded concrete with natural and recycled aggregates,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, pp. 102121, 2023. doi: 10.1016/J.ASEJ.2023.102121

- [7] E. Leising, J. Quist, and N. Bocken, "Circular Economy in the building sector: Three cases and a collaboration tool," *Journal of Cleaner Production*, vol. 176, pp. 976-989, 2018. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.12.010
- [8] M. Bolpagni, R. Gavina, and D. Ribeiro, *Industry 4.0 for the Built Environment – Methodologies, Technologies and Skills*, Springer Link, 2021.
- [9] K. Kang, S. Besklubova, Y. Dai, and R.Y. Zhong, "Building demolition waste management through smart BIM: A case study in Hong Kong". *Waste Management*, vol. 143, pp. 69-83, 2022. doi: 10.1016/j.wasman.2022.02.027
- [10] B. Nikmehr, M.R. Hosseini, J. Wang, N. Chileshe, and R. Rameezdeen, "Bim-based tools for managing construction and demolition waste (CDW): A scoping review," *Sustainability*, vol. 13, p. 8427, 2021. doi: 10.3390/su13158427
- [11] X.J. Ge, P. Livesey, J. Wang, S. Huang, X. He, C. Zhang, "Deconstruction waste management through 3d reconstruction and bim: a case study," *Visualization in Engineering*, vol. 5, p. 13, 2017. doi: 10.1186/s40327-017-0050-5
- [12] B.C. Guerra, F. Leite, and K.M. Faust, "4D-BIM to enhance construction waste reuse and recycle planning: Case studies on concrete and drywall waste streams," *Waste Management*, vol. 116, pp. 79-90, 2020. doi: 10.1016/J.WASMAN.2020.07.035
- [13] J. Won, and J.P. Cheng, "Identifying potential opportunities of building information modeling for construction and demolition waste management and minimization," *Automation in Construction*, vol. 79, pp. 3-18, 2017. doi: 10.1016/j.autcon.2017.02.002
- [14] D. García, X. Plazaola, I. Vegas, and P. Areizaga, "BIM for pre-demolition and refurbishment inventories and waste information management," in *HISER International Confernce (2017)*, Delft, Holanda, 2017.
- [15] C. Li, Y. Zhao, B. Xiao, B. Yu, V.Y. Tam, Z. Chen, and Y. Ya, "Research trend of the application of information technologies in construction and demolition waste management," *Journal of Cleaner Production*, vol. 263, pp. 121458, 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121458
- [16] S. Sobhkhiz, H. Taghaddos, M. Rezvani, A.M. Ramezaniapour, "Utilization of semantic web technologies to improve BIM-LCA applications," *Automation in Construction*, vol. 130, pp. 103842, 2021. doi: 10.1016/j.autcon.2021.103842
- [17] J. Wang, J. Wei, Z. Liu, C. Huang, and X. Du, "Life cycle assessment of building demolition waste based on building information modeling," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 178, pp. 106095, 2022. doi: 10.1016/j.resconrec.2021.106095

- [18] R. Volk, J. Stengel, and F. Schultmann, "Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs," *Automation in Construction*, vol. 38, pp. 109-127, 2014. doi: 10.1016/j.autcon.2013.10.023
- [19] A. Silva, and M.M. Gil, "Industrial processes optimization in digital marketplace context: A case study in ornamental stone sector," *Results in Engineering*, vol. 7, p. 100152, 2020. doi: 10.1016/J.RINENG.2020.100152
- [20] Y. Yu, D.M. Yazan, V. Junjan, and M.E. Iacob, "Circular economy in the construction industry: A review of decision support tools based on Information & Communication Technologies," *Journal of Cleaner Production*, vol. 349, p. 131335, 2022. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.131335
- [21] A. Kuzminykh, "Integrated Planning and Recording Circularity of Construction Materials through Digital Modelling," *Tese de Mestrado*, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2022.
- [22] A. Anil, "Efficient data management in a BIM-based framework for circularity of products and materials," *Tese de Mestrado*, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2023.