

GESTÃO DO CICLO DE VIDA DE PRODUTOS DA CONSTRUÇÃO ATRAVÉS DE PASSAPORTES DIGITAIS BASEADOS EM BLOCKCHAIN E BIM

João Palma⁽¹⁾, António Aguiar Costa⁽²⁾, Pedro Santos⁽³⁾

(1) Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability (CERIS), Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal, 0000-0002-4837-5376

(2) Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability (CERIS), Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal, 0000-0002-5123-4451

(3) Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability (CERIS), Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal, 0009-0007-4477-2124

Resumo

Os Passaportes Digitais de Produtos (DPP) estão a tornar-se uma ferramenta essencial para melhorar a transparência, a rastreabilidade e a sustentabilidade em todo o ambiente construído. Este artigo apresenta uma plataforma de DPP baseada em blockchain que estrutura os dados dos produtos de acordo com normas europeias, de modo a garantir a interoperabilidade, a legibilidade por máquina e a conformidade regulamentar. Ao recorrer à tecnologia blockchain, a plataforma assegura uma gestão segura e resistente à adulteração da informação ao longo do ciclo de vida e permite que os utilizadores rastreiem produtos e partilhem seletivamente secções específicas de dados através de controlos de acesso baseados em tokens, protegendo assim informação sensível.

Um contributo fundamental deste trabalho é a integração da plataforma de DPP com fluxos de trabalho de Modelação da Informação da Construção (BIM), através de um plugin para software de modelação BIM. Esta integração permite que os projetistas naveguem, comparem e importem dados de passaportes diretamente para os seus modelos BIM, enriquecendo-os com informação precisa e normalizada associada a produtos reutilizáveis disponíveis no marketplace circular da plataforma de DPP. Em conjunto com uma ferramenta que realiza Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) automatizada, a solução reforça a tomada de decisão ao longo do ciclo de vida, reduz a perda de informação e apoia a conformidade com o enquadramento regulamentar da União Europeia para produtos sustentáveis, o Regulamento de Ecodesign para Produtos Sustentáveis (ESPR). Ao ligar conjuntos de dados de DPP protegidos por blockchain a ferramentas de conceção baseadas em BIM e de avaliação de ACV, o sistema proposto estabelece uma infraestrutura digital unificada que melhora a rastreabilidade, a fiabilidade e a sustentabilidade ao longo de toda a cadeia de valor da construção.

1. Introdução

A indústria da construção é responsável por uma parte significativa do impacto ambiental a nível global, representando 36% do consumo de energia e 39% das emissões de dióxido de carbono [1]. Para mitigar este impacto, a União Europeia lançou o Pacto Ecológico Europeu com o objetivo de se tornar o primeiro continente neutro em carbono até 2050. Um dos pilares do Pacto Ecológico é o Plano de Ação para a Economia Circular, adotado em 2020, que se foca na produção de produtos sustentáveis capazes de reduzir a pressão sobre o consumo de matérias-primas e a criação de resíduos ao longo do seu ciclo de vida [2]. Um elemento legislativo importante aprovado no âmbito deste Plano de Ação foi o Regulamento de Ecodesign para Produtos Sustentáveis (ESPR), que introduziu pela primeira vez o conceito de Passaporte Digital de Produto.

1.1 Passaporte Digital de Produto

O Passaporte Digital de Produto (DPP) é uma ferramenta orientada por políticas públicas que armazena informação relativa a instâncias específicas de produtos, incluindo dados sobre a sua composição material, componentes, reparabilidade, reciclabilidade e métodos de disposição, com o objetivo global de fornecer informação consistente de “track and trace” ao longo de todo o ciclo de vida de um produto [3]. Introduzido em julho de 2024 pelo Regulamento de Ecodesign para Produtos Sustentáveis (ESPR), é identificado como uma ferramenta essencial para alcançar os objetivos de sustentabilidade definidos pelo Pacto Ecológico Europeu, através da digitalização da informação dos produtos de uma forma a possibilitar a criação de valor circular na União Europeia [4]. Embora a informação exigida para a implementação completa do DPP para grupos específicos de produtos ainda esteja por definir pelo ESPR, prevê-se uma implementação faseada de atos delegados até 2030, altura em que a maioria dos produtos colocados no mercado da UE serão obrigados a incluir um DPP. Estes passaportes foram concebidos para serem eletronicamente acessíveis através de suportes de dados (por exemplo, RFID, código QR, etc.), de modo a facilitar a partilha de informação entre os intervenientes da cadeia de abastecimento, as autoridades e os consumidores [5]. Funcionam como cartões de identidade digitais para os produtos, registados junto das autoridades governamentais para apoiar os objetivos de sustentabilidade e reforçar a conformidade regulamentar [6]. A implementação destes passaportes digitais na indústria da construção enfrenta determinados desafios específicos do setor, sendo os dois principais a longa vida útil das construções e a fragmentação da indústria. Estes obstáculos podem ser mitigados através da utilização da tecnologia blockchain.

1.2 Blockchain

A tecnologia blockchain é um livro-razão descentralizado e distribuído que regista transações de forma segura, transparente e imutável. Estas transações são criptograficamente protegidas por uma rede de nós através da utilização de algoritmos de consenso, que resolvem o Problema dos Generais Bizantinos num ambiente aberto, descentralizado e sem necessidade de confiança [7]. A aplicação de tecnologia blockchain à gestão de DPPs na indústria da construção justifica-se pela sua capacidade de responder aos dois desafios estruturais do setor mencionados na secção 1.1. O primeiro prende-se com a longa duração de vida das construções: ao contrário das soluções Web2, que dependem de acesso centralizado aos dados detido por uma única entidade, o que constitui um potencial ponto único de falha, as redes descentralizadas Web3

não são controladas por nenhum interveniente singular, eliminando esse risco e conferindo-lhes uma maior robustez a longo prazo. O segundo desafio relaciona-se com a fragmentação do setor e a relutância em partilhar informação: enquanto as soluções Web2 armazenam os dados em sistemas centralizados geridos pelas entidades que os detêm, as soluções Web3 recorrem a sistemas de armazenamento descentralizados como o IPFS, onde os dados podem ser encriptados e tornados inacessíveis sem autenticação criptográfica, conferindo ao utilizador final verdadeira autocustódia sobre a sua informação, reduzindo com isso a relutância que os intervenientes ao longo da cadeia de abastecimento demonstram em partilhá-la [8].

Embora existam já plataformas de DPP que recorrem à tecnologia blockchain como a Circularise, especializada em rastreabilidade de cadeias de abastecimento e troca de dados com privacidade, ou a Madaster, focada na gestão de ativos do ambiente construído, estas adotam tipicamente uma abordagem híbrida em que a blockchain é utilizada apenas no backend como mecanismo de registo imutável, mantendo a autenticação e a gestão de dados em sistemas centralizados. A plataforma apresentada neste artigo distingue-se por constituir uma aplicação verdadeiramente descentralizada, onde os utilizadores autenticam-se diretamente através da extensão de carteira de criptomoedas, sem dependência de credenciais geridas por terceiros, conferindo-lhes autocustódia plena sobre os seus dados e passaportes.

1.3 Objetivos

A investigação apresentada neste artigo tem como objetivo atingir dois objetivos principais:

- Desenvolver uma plataforma de DPP que permita aos diversos intervenientes da cadeia de valor gerir e manter os DPPs ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos.
- Integrar esta plataforma num plugin de software de modelação BIM, de forma a facilitar o acesso aos dados dos DPP a projetistas que desenvolvem novos projetos.

Em última análise, o objetivo global é ligar os proprietários de produtos reutilizáveis aos projetistas que estão a desenvolver novos projetos, fechando assim o ciclo circular no ciclo de vida dos produtos sustentáveis.

2. Implementação da plataforma de DPPs

Conforme referido no relatório “Framework for Material Passports” do projeto BAMB [9], é crucial compreender que os passaportes podem ser compatíveis com BIM, mas não são dependentes dele. Adicionalmente, de acordo com o Regulamento de Ecodesign para Produtos Sustentáveis (ESPR), os DPPs devem basear-se em sistema de dados descentralizado e serem geridos pelos próprios operadores económicos. Esta infraestrutura descentralizada assegura que os DPPs permaneçam flexíveis, orientados pelo mercado e sob o controlo das entidades económicas responsáveis. Por esta razão, a plataforma foi desenvolvida como uma aplicação web React assente em tecnologias Web3.

Os passaportes alojados na plataforma têm três configurações de privacidade distintas: público, privado e partilhado. Os passaportes privados encriptam os dados ao nível do utilizador, os passaportes partilhados ao nível da aplicação, e os passaportes públicos armazenam os dados sem encriptação. A custódia dos passaportes e os controlos de partilha são governados por Tokens Não Fungíveis (NFTs), que são ativos digitais com identificadores únicos. Cada passaporte pode ser associado a um NFT de custódia, concedendo a posse do passaporte ao utilizador. Com este NFT de custódia, o utilizador pode criar múltiplos NFTs de permissão,

utilizados para conceder acesso a secções específicas do conjunto de dados do passaporte. Isto é importante para enfrentar desafios relacionados com a privacidade e confidencialidade dos dados, que são considerações cruciais no desenvolvimento de DPPs [10].

Isto é conseguido através da associação destes NFTs de permissão a funções personalizáveis definidas pelo utilizador. Estas funções estão alinhadas com a estrutura padronizada dos passaportes, que cumpre normas europeias como a EN ISO 23387 [11] e organiza os dados de acordo com coleções lógicas para troca digital. Isto permite aos intervenientes conceder acesso seletivo a grupos específicos de dados sem expor outros tipos de dados que devem permanecer inacessíveis, garantindo a conformidade com o princípio do “Need-To-Know”. Adicionalmente, a estrutura de dados está alinhada com a ISO 7817-1:2024, que visa fornecer uma compreensão comum sobre o nível correto de informação necessário ao longo das várias fases do ciclo de vida dos ativos construídos [12].

A plataforma utiliza atualmente dois tipos de armazenamento para os dados dos DPP:

- **Pinata:** Serviço de IPFS pinning utilizado para armazenamento de curto e médio prazo dos dados dos DPP. Fornece acesso rápido e disponibilidade através de um fornecedor de serviço centralizado que utiliza o IPFS para armazenar os dados.
- **Lighthouse (Filecoin):** Gateway que utiliza a rede Filecoin para armazenar dados indefinidamente. Esta solução facilita acordos de armazenamento a longo prazo totalmente descentralizados e verificáveis, ao custo de um desempenho inferior.

A decisão de disponibilizar estas duas opções de armazenamento está alinhada com os objetivos definidos pelo ESPR, que indica que deve existir especialização entre os fornecedores de serviços de DPP (DPPSPs). De acordo com este regulamento, os DPPSPs podem fornecer serviços que vão desde a criação de identificadores e o registo no sistema da UE até ao alojamento dos dados e ao arquivo de longo prazo. Os dois tipos de armazenamento disponibilizados pela plataforma estão alinhados com estas duas últimas funções. Estes tipos de passaportes estão organizados numa estrutura hierárquica, onde passaportes de nível superior englobam grupos de passaportes de nível inferior (por exemplo, um passaporte de edifício pode conter múltiplos passaportes de unidades modulares, cada um dos quais pode, por sua vez, incluir vários passaportes de componentes). Os passaportes estão estruturados como ficheiros JSON e incluem vários grupos de dados, alguns comuns a todos os tipos de passaporte e outros específicos do seu tipo, conforme apresentado na Tabela 2.

A plataforma é composta por seis secções principais: *Passaportes*, *Área Pessoal*, *Criar Passaporte*, *Validar Passaporte*, *Ler Código QR* e *Marketplace*. Através destas secções os utilizadores podem consultar, criar e gerir passaportes, validar a sua autenticidade, rastrear produtos ao longo da cadeia de abastecimento e participar num marketplace circular de produtos reutilizáveis. Na secção *Criar Passaporte*, os utilizadores podem seleccionar o tipo de passaporte que pretendem criar e o template de dados a utilizar. Uma vez criado, o passaporte torna-se acessível através da *Área Pessoal*, onde exibe toda a informação especificada na Tabela 2. Os utilizadores podem também visualizar os seus dados de sustentabilidade através de gráficos circulares, que representam a contribuição dos passaportes de nível inferior para o passaporte de nível superior, e gráficos de colunas empilhadas, que ilustram a contribuição de cada fase da ACV (A1–A3, A4–A5, B, C e D) para os valores globais nas diferentes categorias de impacto ambiental. A página do passaporte permite ainda a criação de dois tipos de códigos QR: um de acesso à página do passaporte e um de rastreio, utilizável apenas pelo proprietário do passaporte. Estes códigos de rastreio são posteriormente utilizados na secção *Ler Código QR*,

permitindo aos utilizadores submeter dados relativos a eventos de rastreio de produtos para a blockchain de forma imutável e com autenticidade criptograficamente assegurada. Isto permite registar e monitorizar os fluxos de produtos e as respetivas origens, assim como melhorar a transparência da cadeia de abastecimento.

Tabela 2: Dados comuns e específicos contidos em cada tipo de passaporte

Dados comuns	Dados específicos
- Nome, ID do passaporte, URL. - ID do PDT selecionado. - Conjunto de propriedades derivadas do PDT selecionado. - Ficheiros (por exemplo, qualquer ficheiro relevante para os dados exigidos pelas diretrizes preliminares do ESPR). - Dados de tokens de custódia e permissão (URI do token e endereço do detentor).	<i>Tipo de edificio</i>: Conjunto de unidades modulares que constituem o edifício. <i>Tipo de unidade modular</i>: Histórico (por exemplo, projetos em que foi utilizada ou modificações) e o conjunto de componentes que constituem a unidade. <i>Tipo de componente</i>: Histórico (por exemplo, a sua utilização e modificações).

A título ilustrativo, considere-se o caso de um fabricante de produtos CLT que utiliza a plataforma para criar um DPP. Os dados de desempenho estrutural são configurados como públicos, enquanto os dados de processo de fabrico ficam encriptados. Após a criação, o fabricante gera um código QR de rastreio que é afixado fisicamente no produto. Cada vez que o mesmo muda de localização geográfica, um operador lê o código QR e regista o evento na blockchain de forma imutável. A Figura 1a ilustra o formulário de rastreio e a Figura 1b apresenta o historial de rastreio do produto.

Figure 1 consists of two screenshots from a software application. Screenshot (a) shows a 'Produto verificado' (Product verified) form. It includes a green status bar at the top with a checkmark and the text 'Assinatura validada'. Below this, there's a section for 'ID do Passaporte' (Passport ID) and 'Nome' (Name), both with input fields. The 'Nome' field contains 'KW_VigaCLT_200x400'. There's also a 'Categoria' (Category) dropdown menu. Below the form, there's a section for 'Tipo de Evento' (Event Type) with a dropdown menu set to 'Recebido' (Received). To the right, there's a 'Estado de Qualidade' (Quality State) dropdown menu set to 'Nenhum' (None). Below this, there's a 'Localização GPS' (GPS Location) section with a 'Sistema de Coordenadas' (Coordinate System) dropdown set to 'DD (Graus Decimais)' (DD (Decimal Degrees)) and a 'Usar GPS' (Use GPS) button. There are also input fields for 'Latitude' and 'Longitude'. At the bottom, there's a 'Transferência de Custódia' (Custody Transfer) section with 'De' (From) and 'Para' (To) dropdown menus. Screenshot (b) shows the 'Rastreamento da Cadeia de Fornecimento - KW_VigaCLT_200x400' (Supply Chain Tracking - KW_VigaCLT_200x400) page. It features a list of 'Eventos de Rastreio' (Tracking Events) with three entries: 'Recebido' (Received) at Lisboa on 10/04/2026 at 04:45:17, 'Enviado' (Sent) at Porto on 10/04/2026 at 04:42:27, and 'Enviado' (Sent) at Esporão on 10/04/2026 at 04:33:51. Below the list, there's a 'Trajetória do Produto' (Product Trajectory) map showing the product's path from Lisboa to Porto to Esporão.

Figura 1 – Rastreio de uma viga CLT. (a) Formulário do evento de rastreio; (b) Página de rastreio do produto contendo todos os eventos registados.

Embora um registo imutável permanente de todas as versões dos dados dos DPPs não seja armazenado on-chain, a plataforma utiliza um mecanismo que permite aos utilizadores verificar

a autenticidade de cada versão criada. Sempre que um passaporte é criado ou atualizado, a aplicação calcula um hash dos dados e armazena-o num smart contract juntamente com o número da versão correspondente e o carimbo temporal. Para verificar a autenticidade dos dados, a plataforma fornece uma ferramenta na secção *Validar Passaporte* que permite aos utilizadores carregar qualquer versão de um passaporte. O validador calcula então o seu hash, pesquisa no smart contract o hash armazenado da respetiva versão do passaporte e compara ambos. Se os hashes coincidirem, o passaporte é considerado válido, e a aplicação fornece a data em que foi publicado na rede e indica se existem versões mais recentes.

A plataforma assenta em sete smart contracts responsáveis pela gestão de tokens de custódia e permissão, funções de utilizador, versionamento, rastreio, marketplace e lógica central. Os contratos de tokens, tanto o de custódia como o de permissão, contêm as funções básicas para definir, criar e transferir estes NFTs. Estes NFTs estão em conformidade com o padrão SIP009, que é um standard de interoperabilidade que permite que contratos e aplicações interajam de forma transparente com contratos NFT. O contrato de funções armazena todas as funções atribuíveis aos NFTs de permissão de cada utilizador, de forma a especificar quais as secções do passaporte que podem ser acedidas. O mapeamento armazena até dez funções por utilizador, sob a forma de uma tupla que contém o nome da função e a sua configuração. O contrato de versionamento mantém um mapeamento que regista todas as versões dos passaportes. Para cada entrada, armazena o hash calculado dos dados do passaporte, um carimbo temporal e o hash do bloco mais recente para fins de verificação.

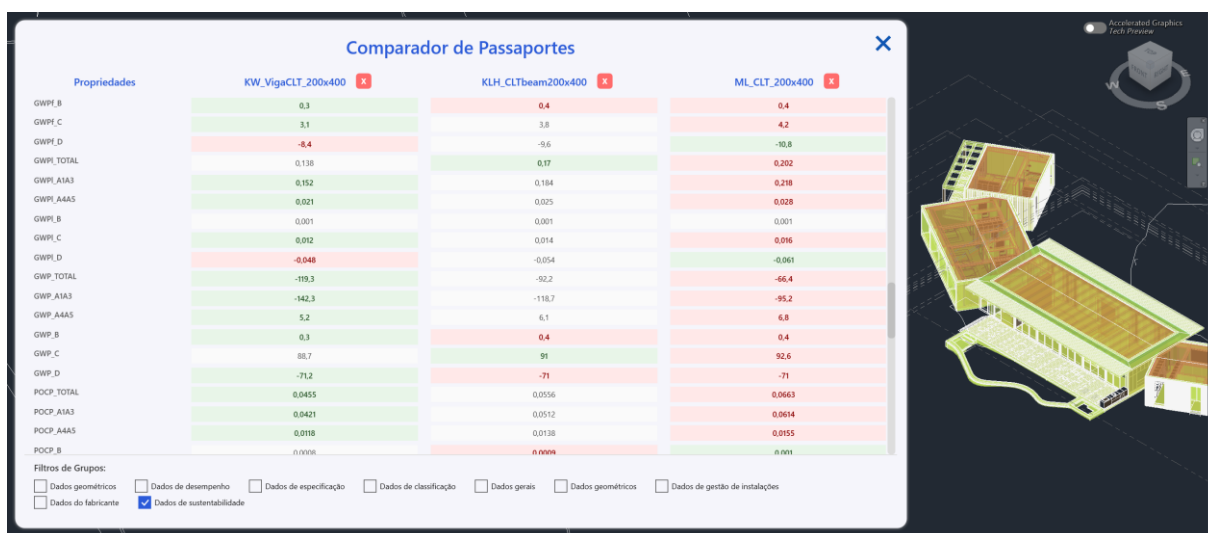
O contrato principal encapsula a lógica central e os controlos de segurança necessários para interagir com os restantes contratos, em particular com aqueles que gerem NFTs. Este contrato mantém todos os mapeamentos que definem as relações entre os IDs dos passaportes, os NFTs de custódia e os NFTs de permissão, bem como os mapeamentos entre os NFTs de permissão e as funções dos utilizadores. Estas relações são essenciais para permitir a partilha seletiva dos dados dos passaportes. O contrato de rastreio mantém um mapeamento que regista dados relacionados com eventos de rastreio de produtos ao longo da cadeia de abastecimento. Isto permite aos utilizadores recuperar informação como o ID do passaporte, o tipo de evento, os detalhes de transferência de custódia (de e para), a localização, o carimbo temporal, notas adicionais, o estado de qualidade e os endereços tanto da entidade que lê o código QR como do proprietário do passaporte. O contrato do Marketplace contém os mapeamentos dos passaportes listados no marketplace, onde os utilizadores podem verificar, para cada listagem, o endereço do vendedor, o preço, a opção de pagamento, o ID do passaporte e o carimbo temporal da listagem. O contrato do Marketplace funciona como um intermediário automatizado para a troca de tokens de custódia, suportando operações de listagem, compra e cancelamento, com o token retido em escrow durante o processo.

3. Integração com plugin para software de modelação BIM

O plugin de software de modelação BIM, que consiste numa biblioteca BIM e numa ferramenta de ACV compatível com os dados ambientais contidos nos passaportes, permite aos projetistas aceder aos dados dos DPPs e importá-los diretamente para os seus modelos 3D. Cada produto da biblioteca contém a sua própria página de produto, a partir da qual os utilizadores podem consultar os passaportes de produtos reais disponíveis no marketplace circular. Uma vez selecionado um passaporte, o utilizador é direcionado para uma página que exhibe toda a

informação do DPP apresentada na Tabela 2. A biblioteca BIM permite ainda aos utilizadores comparar até três passaportes diferentes, de forma a analisar rapidamente quais se ajustam melhor aos requisitos do seu projeto. Para garantir a consistência dos dados entre os passaportes selecionados para comparação, o utilizador deve escolher passaportes que partilhem o mesmo template de dados. Uma vez que a estrutura de dados dos passaportes e dos objetos BIM da biblioteca é compatível, seguindo normas como a EN ISO 23386 [13] e EN ISO 23387, o utilizador pode importar automaticamente estes dados de produtos reutilizáveis do mundo real para os seus modelos BIM. A ferramenta de ACV, que também faz parte do plugin BIM, é compatível com esta estrutura de dados, permitindo a realização de uma ACV automatizada em todo o modelo 3D.

A título ilustrativo, num projeto de reabilitação, um projetista utiliza o plugin BIM para consultar passaportes de vigas CLT disponíveis no marketplace circular. Selecionando três passaportes de fornecedores distintos, a ferramenta de comparação apresenta lado a lado os valores dos indicadores ambientais para as diferentes fases do ciclo de vida, permitindo identificar, por exemplo, a viga com menor pegada de carbono. Após importação para o modelo BIM, a ferramenta de ACV calcula automaticamente o impacto ambiental total e cria vistas 3D por gradiente de cor destacando os elementos com maior carga ambiental (Figura 2).



passaportes, dado que uma capacidade de processamento limitada compromete diretamente a sua viabilidade económica. A adoção da blockchain Solana visa responder a este desafio, oferecendo uma capacidade teórica de processamento superior a 65000 transações por segundo e taxas na ordem das frações de cêntimo, tornando-a uma das redes mais eficientes disponíveis atualmente. A arquitetura híbrida adotada, que combina armazenamento descentralizado com o registo on-chain de hashes criptográficos, reduz adicionalmente a carga sobre a rede, ainda que implique que não seja mantido um histórico imutável completo de todas as versões dos dados. No restante panorama blockchain, outras redes estão a endereçar os desafios de escalabilidade através de soluções de Layer 2 (L2), em particular os rollups, que processam transações em lote fora da cadeia principal e submetem apenas uma prova criptográfica ao registo imutável. O roadmap de escalamento da Ethereum prevê que estas soluções possam vir a proporcionar um aumento superior a 100 vezes na taxa de transferências da rede, com uma redução substancial dos custos associados, embora a plena maturidade destas tecnologias requeira ainda um período de desenvolvimento considerável.

A definição de um modelo de financiamento sustentável constitui um requisito essencial para a viabilidade da plataforma a longo prazo. Este problema é frequentemente enquadrado como um desalinhamento entre encargos e benefícios ao longo da cadeia de valor, com impacto particularmente significativo nas pequenas e médias empresas (PMEs) [14]. A questão de quem suporta os custos de manutenção dos passaportes ao longo do ciclo de vida do edifício não está ainda resolvida e constitui um requisito fundamental antes de qualquer implementação à escala industrial. O ESPR aborda parcialmente esta questão no ponto (e) do Artigo 11, ao estabelecer que os passaportes devem permanecer disponíveis mesmo após a insolvência ou cessação de atividade do operador económico responsável pela sua criação, prevendo para o efeito a figura dos Prestadores de Serviços de Passaportes Digitais de Produtos (DPPSPs). Consultas realizadas no âmbito do consórcio CIRPASS-2 identificaram mecanismos adicionais de financiamento, nomeadamente a possibilidade de os profissionais que beneficiam do acesso aos dados contribuírem para a sua manutenção através de licenciamento FRAND (justo, razoável e não discriminatório) ou de uma taxa associada à emissão dos respetivos identificadores de acesso, modelo esse já adotado noutros instrumentos regulatórios europeus, como o Regulamento relativo aos Veículos em Fim de Vida. Outras alternativas incluem a comercialização de dados de mercado anonimizados por parte dos DPPSPs, a criação de parcerias público-privadas para suportar os custos de arquivo obrigatório, e a eventual integração de mecanismos de financiamento em futuros atos delegados do ESPR. O consenso na literatura aponta para que os custos associados à gestão de dados diminuam progressivamente à medida que a tecnologia e a normalização amadureçam, tornando-se, a prazo, inferiores aos benefícios gerados por estes sistemas [15]. Sendo os fabricantes os principais responsáveis pela recolha de informação, a forma como percecionam o valor dos DPPs é determinante para o sucesso da sua adoção. Caso contrário, estes tenderão a reter informação sobre os seus produtos. Por outro lado, dados da PicoNext [16] indicam que 73% dos consumidores considera que o acesso a informação detalhada sobre sustentabilidade aumenta a sua confiança numa marca, o que sugere que a adoção de DPPs pode traduzir-se numa vantagem competitiva relevante para os fabricantes. Um desafio igualmente relevante prende-se com a continuidade do acesso aos passaportes ao longo de décadas. A plataforma recorre a NFTs para controlo de custódia, pelo que o acesso à informação depende da posse das chaves privadas correspondentes. Num contexto industrial em que o gestor de ativos de um edifício pode ser substituído múltiplas vezes ao longo de várias décadas, a perda dessas

credenciais representa um risco concreto de inacessibilidade permanente. Mecanismos como a custódia multi-assinatura, a recuperação delegada a entidades fiduciárias, ou a designação contratual de um responsável de recuperação constituem direções a explorar em trabalho futuro.

5. Conclusões

O DPP é uma ferramenta essencial para alcançar os objetivos definidos pelo Plano de Ação para a Economia Circular da UE, que procura transformar os atuais modelos económicos de lineares em circulares e tornar os produtos sustentáveis a norma na UE. A padronização de dados é um aspeto essencial para uma gestão eficaz de dados e interoperabilidade, assegurando que os dados são representados num formato consistente e permitindo que diferentes sistemas interpretem corretamente e de forma automática o seu significado. A padronização dos modelos de dados tanto dos DPPs como dos objetos BIM da biblioteca permite que os dados dos DPPs sejam importados automaticamente para os objetos e vice-versa. Adicionalmente, permite também que a ferramenta de ACV identifique automaticamente cada uma das propriedades e como estas devem ser interpretadas para realizar a ACV à escala do modelo BIM.

No que diz respeito à adoção pela indústria, a plataforma pressupõe familiaridade com carteiras de criptomoeda e com a gestão de chaves privadas, o que representa uma barreira de entrada relevante no contexto da construção. A adoção generalizada deste tipo de sistemas dependerá, em última análise, da realização de casos de estudo em condições reais que permitam demonstrar o valor concreto gerado por estas plataformas. O autor, juntamente com o grupo de investigação do CERIS em que se insere, está correntemente a participar num caso piloto com a empresa de pré-fabricados de madeira Kozowood com o intuito de demonstrar a viabilidade da plataforma. A solução proposta visa colmatar a lacuna existente na informação sobre o ciclo de vida, um desafio crítico que deve ser abordado para possibilitar a criação de marketplaces circulares e, consequentemente, a implementação bem-sucedida dos princípios da economia circular. A integração da plataforma de DPP com o plugin BIM fornece aos projetistas acesso facilitado a dados relativos a produtos reais disponíveis em marketplaces circulares, o que tem o potencial de melhorar a tomada de decisão sustentável e reduzir desperdícios. Não obstante, alcançar estes objetivos requer maturidade em termos de legislação, padronização e também uma mudança cultural rumo à abertura, à colaboração orientada por dados e à gestão responsável e de longo prazo dos ativos do ambiente construído.

Agradecimentos

Esta investigação foi financiada total ou parcialmente pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P. (FCT, <https://ror.org/00snfq58>) sob o Financiamento UID/6438/2025 da unidade de investigação CERIS. Para efeitos de Acesso Aberto, o autor aplicou a qualquer versão do manuscrito aceite (AAM) resultante desta submissão uma licença Creative Commons CC-BY.

Referências

- [1] L. Chen, H. Lepeng, J. Hua, Z. Chen, L. Wei, A. Osman, S. Fawzy, D. Rooney, L. Dong and P. S. Yap, "Green construction for low-carbon cities: a review", *Environmental Chemistry Letters*, 2023, vol. 21, doi: 10.1007/s10311-022-01544-4.

- [2] A. Bonoli, S. Zanni and F. Serrano-Bernardo, "Sustainability in Building and Construction within the Framework of Circular Cities and European New Green Deal. The Contribution of Concrete Recycling", *Sustainability*, 2021, vol. 13, doi: 10.3390/su13042139.
- [3] T. Adisorn, L. Tholen and T. Götz, "Towards a Digital Product Passport Fit for Contributing to a Circular Economy", *Energies*, 2021, vol. 14, doi:10.3390/en14082289.
- [4] K. Jaskula, D. Kifokeris, E. Papadonikolaki and D. Rovas, "Blockchain-Based Decentralized Common Data Environment: User Requirements and Conceptual Framework", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 159, 2025, doi: 10.1061/JCEMD4.COENG-14852.
- [5] P. Wan and S. Jiang, "Enabling a dynamic information flow in digital product passports during product use phase: A literature review and proposed framework", *Sustainable Production and Consumption*, vol. 54, 2025, doi: 10.1016/j.spc.2025.01.014.
- [6] A. Yurchyshyna, A. Zarli, E. Yontem and R. Koppelaar, "Built4People: Building Innovation Networks and Associated IT Services for a Sustainable Construction Industry" in *2025 IEEE International Conference on Engineering, Technology, and Innovation (ICE/ITMC)*, Valencia, Spain, 2025, doi: 10.1109/ICE/ITMC65658.2025.11106575.
- [7] G. Zhang, F. Pan, Y. Mao, S. Tijanic, M. Dang'ana, S. Motepalli, S. Zhang and H. Jacobsen, "Reaching Consensus in the Byzantine Empire: A Comprehensive Review of BFT Consensus Algorithms", *ACM Computing Surveys*, 2023, vol. 56, doi: 10.1145/3636553.
- [8] G. Zhang, Z. Yang and W. Liu, "Blockchain-based decentralized supply chain system with secure information sharing", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 182, 2023, doi: 10.1016/j.cie.2023.109392.
- [9] Buildings as Material Banks (BAMB2020), "Framework for Material Passports", Available at: <https://www.bamb2020.eu/passports/framework-report/>, Acedido em: 12 de abril de 2026.
- [10] C. Ducuing and R. H. Reich, "Data governance: digital product passports as a case study", *Competition and Regulation in Network Industries*, 2023.
- [11] ISO 23387:2025, "ISO 23387:2025 Building information modelling (BIM) — Data templates for objects used in the life cycle of assets", International Organization for Standardization (ISO), 2025.
- [12] ISO 7817-1:2024, "ISO 7817-1:2024 Building information modelling — Level of information need — Part 1: Concepts and principles", International Organization for Standardization (ISO), 2024.
- [13] ISO 23386:2020, "ISO 23386:2020 Building information modelling and other digital processes used in construction — Methodology to describe, author and maintain properties in interconnected data dictionaries", International Organization for Standardization (ISO), 2020.
- [14] CIRPASS Project. (2024). A study on DPP costs and benefits for SMEs. Version 1.0.
- [15] van Capelleveen, Guido & Vegter, Dennis & Olthaar, Matthias & Hillegersberg, Jos. (2023). The anatomy of a passport for the circular economy: a conceptual definition, vision and structured literature review. *Resources, Conservation & Recycling Advances*. 17. 200131. 10.1016/j.rcradv.2023.200131.
- [16] PicoNext. Digital Product Passports: Unlocking sustainability transparency. (2023). <https://piconext.com/landing/digital-product-passport-sustainability/>. Acedido em: 15 de abril de 2026