

## Micro-indicadores de Circularidade para o Setor de Construção Civil na Perspetiva de Produtos Plásticos

### Circularity Micro-Indicators to Building and Construction Sector: Plastic Products Perspective

Joana Matos<sup>a†</sup>, Carla I. Martins<sup>a</sup>, Carla L. Simões<sup>b</sup>, Ricardo Simões<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Polímeros e compósitos (IPC), Universidade do Minho, 4800-058 Guimarães, Portugal

<sup>b</sup> Instituto Politécnico do Cávado e do Ave (IPCA), 4750-810 Barcelos, Portugal

<sup>†</sup> Autor para correspondência: [id9458@alunos.uminho.pt](mailto:id9458@alunos.uminho.pt)

#### RESUMO

O setor da Construção Civil é um dos maiores contribuintes da atualidade para o aumento contínuo no consumo global dos plásticos. No entanto, apesar das propriedades dos plásticos se adequar a várias aplicações neste setor, a sua sustentabilidade é uma preocupação, principalmente porque as aplicações plásticas atuais são projetadas e fabricadas sem uma prudente reflexão sobre o seu ciclo de vida e a sua gestão em fim de vida. Este fator, impulsionado pelo crescimento global da população e aumento na procura por habitação, juntamente com um comportamento social irresponsável com a gestão dos resíduos de construção e demolição, resultou num agravamento da crise global de poluição ambiental. A maioria do plástico reciclado que entra atualmente no mercado europeu é aplicado na construção civil em aplicações não ecológicas, que simplesmente consomem recursos plásticos. É vital preservar e otimizar os recursos existentes, o que requer empregar conceitos e estratégias da economia circular e, para isso, é preciso medir a circularidade de um produto. Os indicadores de circularidade são muito interessantes nesta abordagem. No entanto, existe uma infinidade destas ferramentas na literatura, com características e metodologias incompatíveis. Este artigo fornece uma análise dos micro-indicadores de circularidade mais relevantes para o setor da Construção Civil, enquanto identifica diretrizes e boas práticas para promover a transição do setor para uma economia mais circular.

#### ABSTRACT

The civil construction sector has been a large contributor for the continuous global increase in the consumption of plastics. However, while the properties of plastics make them very suitable for several civil construction applications, their sustainability is a concern, mostly because current approaches for design and manufacturing do not properly consider their entire lifecycle and end-of-life management. The combined factors of a global population growth and increase demand for housing, together with a standard irresponsible societal behaviour with construction and demolition wastes, is worsening the global environmental pollution crisis. Much of the recycled plastic entering the European market is applied into civil construction applications, but most current usage is not environmentally friendly. It is vital to preserve and optimize existing resources, which requires employing circular economy concepts and strategies, and for that, one must be able to measure the circularity of a product. Circularity indicators are very interesting in this scope. However, a plethora of such tools exist in the literature, with mismatched features and scope. This paper provides an analysis of the circularity micro-indicators more relevant to the Building and Construction sector, while identifying guidelines and good practices to promote this application

#### Palavras-chave:

Economia Circular,  
Avaliação da  
Circularidade,  
Micro-indicadores,  
Construção Civil,  
Plásticos

#### Keywords:

Circular Economy,  
Circularity  
Assessment,  
CE Micro-indicators,  
Civil Construction,  
Plastics

sector transition to a more circular economy.

## 1. Introdução

O sector da construção civil é responsável por cerca de 9% do PIB europeu e por 18 milhões de postos de trabalho [1]. Do ponto de vista dos materiais, é um setor altamente intensivo no consumo de recursos e na geração de resíduos [2], sendo responsável por cerca de 39% da emissão de gases efeito de estufa na Europa [1]. Os impactos ambientais provocado por este sector na europa ronda os 50% do uso total de matérias-primas, 40% da energia final global consumida, 30% do consumo de água e 35% da geração de resíduos [2], [3].

Mais de 20% da produção total de plásticos na europa é encaminhada para aplicações na construção civil, tornando o setor da construção o segundo maior consumidor de plástico da europa [4], [5]. Os plásticos estão presentes em todas as peças de um edifício, como por exemplo, em tubagens, condutas, perfis de janelas, revestimentos de chão e paredes, tintas, colas, entre outros [4], [6], [7]. Häkkinen, Kuittinen, and Vares 2019, no seu estudo, concluiu que o consumo de plástico num edifício ronda no seu total entre as 23-51 toneladas durante o seu ciclo de vida, e 58-79% destes plásticos são colocados no edifício na sua fase de construção. No entanto, o seu peso é inferior a 1% quando comparado com o peso total do edifício [4].

Atualmente, a população mundial corresponde a 7,9 biliões de habitantes, esperando-se que em 2050 seja de aproximadamente 9,6 biliões de pessoas [8]. Um pouco mais de metade da população mundial (54%) vive em áreas urbanas, sendo estas áreas responsáveis por 75% do consumo de recursos do planeta e 60-80% das emissões GEE [8]. Assim sendo, com o aumento da população e a sua aglomeração nas áreas urbanas, estima-se uma extração de 180 biliões de toneladas de matérias-primas do planeta em 2050 (o equivalente a 3 planetas terra) e como consequência uma alta geração de resíduos para suprir as necessidades habitacionais da população [8].

Quando direcionamos a nossa atenção para os RCDs (Resíduos de Construção e Demolição), os plásticos estão posicionados na segunda maior fração de resíduos, juntamente com os metais e o cartão, sendo a primeira fração referente aos minerais [9], [10]. Enquanto resíduos de betão e aço são cada vez mais retidos no ciclo dos materiais, por meio da reciclagem, para os restantes RCDs o cenário é bem diferente. Embora os plásticos provenientes das fases de construção do edifício, sejam separados, reaproveitados e reciclados, os plásticos resultantes da fase de demolição continuam a ser incinerados ou no pior cenário, depositados em aterros [4], [11].

Outra questão importante é o aumento dos custos das matérias-primas que impulsionam a construção civil a utilizar materiais alternativos de forma mais eficiente, por exemplo, materiais reutilizados ou reciclados [1].

Mais de 45% dos plásticos reciclados que entram na economia europeia são aplicados na construção de novos edifícios e em obras públicas [5]. E apesar de Awoyera and Adesina afirmar que as introduções de resíduos plásticos reciclados em aplicações na construção civil poderão solucionar o problema da gestão de resíduos sólidos e a exaustão de matérias-primas plásticas para fins na construção civil [12], esta afirmação por vezes não corresponde à verdade. Algumas aplicações na construção, tais como a incorporação de material plástico reciclado em betão ou asfalto, por exemplo, aumenta o impacto ambiental no fim de vida deste produto, devido à dificuldade em separar estes materiais, levando-os para aterro ao invés de recuperar os seus recursos.

Neste contexto e como prevenção da rutura da capacidade de produção e extração de recursos do planeta ao ponto dos danos serem irreversíveis, existe uma urgente necessidade e pressão para que ocorra a transição do setor da construção civil para um paradigma mais sustentável [1], sendo a implementação de uma Economia Circular (EC) o caminho mais correto a seguir [8], [11].

Os próximos passos para mudar a atual abordagem econômica da indústria da Construção exige o fecho de ciclos, a reutilização de resíduos e recursos, bem como o desacelerar do ciclo do material, desenvolvendo produtos duráveis com vários ciclos de reutilização [1]. Redução,

reutilização e reciclagem são conceitos bem implementados em outros setores industriais, contudo a sua implementação na construção civil é recente e limitada à prevenção e gestão de resíduos, principalmente na reciclagem [1]. A reutilização de materiais e componentes é menos intensiva na produção de carbono e consumo de energia, quando comparada com a reciclagem, trazendo não apenas vantagens ambientais, mas também econômicas ao setor [11]. Assim sendo, a progressão da transição para uma EC pode ser aferida através de indicadores de circularidade [13], [14].

Alguns autores [15]–[17] desenvolveram revisões focadas na reunião de indicadores de circularidade, que confirmou a existência de mais de 100 microindicadores de circularidade na literatura para calcular a circularidade de um produto ou de uma empresa. No entanto, nem todos são relevantes para as aplicações plásticas no sector da construção civil.

Ao avaliar o trabalho de Kristensen e Mosgaard [16], concluiu-se que este é a tentativa de categorização mais extensa e rigorosa feita em indicadores de nível micro até à atualidade. Kristensen and Mosgaard, no seu Artigo [16], analisa estes micro indicadores de circularidade e identifica quais são predominantes na mensuração de cada categoria de foco da EC. Categorias estas que emergiram de uma análise exaustiva da literatura, resultando em 9 diferentes categorias de foco da EC, sendo elas: Reutilização, Eficiência de Recursos, Desmontagem, Extensão da Vida Útil, Gestão de Resíduos, Indicadores Multidimensionais, Gestão de Fim-de-vida, Remanufatura e Reciclagem.

Assim sendo, decidiu-se centralizar este trabalho em 28 dos 30 indicadores que foram considerados por Kristensen e Mosgaard [16], uma vez que continuam relevantes e apoiados na literatura científica (os outros 2 incluem uma ferramenta online e um modelo para o qual não se encontrou uma fonte adequada que os documentassem e apoiasse).

Neste artigo, pretende-se identificar quais os microindicadores de circularidade mais relevantes para avaliar a circularidade de aplicações plásticas para o setor da construção civil, tendo como ponto de partida a caracterização documentada em [16] e a avaliação individual da literatura e metodologia de cada indicador. Em seguida, pretende-se avaliar quais as direções e boas práticas que podem ser extraídas desses indicadores de circularidade para promover uma adoção mais efusiva da circularidade nas aplicações plásticas aplicadas na construção civil.

### *1.1. Plásticos no Setor da Construção Civil*

Os plásticos trouxeram muitas propriedades vantajosas, que são essenciais para a construção de edifícios modernos, pois são um material leve em peso, durável em diferentes ambientes (boa resistência química e mecânica), com bom desempenho térmico e isolamento elétrico, resistente à humidade, e barato [4], [10]. Propriedades estas que levam ao setor da construção civil ser o segundo maior consumidor de plástico na Europa.

O PVC (policloreto de vinil) é o tipo de polímero mais usado na construção civil. Cerca de 69% da produção total de PVC é usada para aplicações de uso final de construção, sendo que 38% desta produção é usada para produzir tubagens (tubagens de drenagem, para aplicações de saneamento e ventilação, aplicações para águas superficiais e pluviais), e 20% é usado para produzir perfis de janelas. A produção remanescente é aplicada em chapas para pisos e telhados, tapumes, caleiros e condutas para cabos elétricos e telecomunicações, incluindo o revestimento e as calhas dos cabos [4].

Plásticos como EPS, XPS (Poliestireno expandido e extrudido, respetivamente), PU (poliuretano), e PIR (Poliisocianurato) são usados em aplicações plásticas para isolamento. O PE (polietileno) é usado em tubagens de drenagem, isolamentos elétricos, barreiras de humidade, e para impermeabilização de pisos, paredes e telhados. Para além disto, o PE está também presente nas embalagens que acondicionam os produtos e materiais da construção civil, e também em coberturas e lonas que protegem a construção e seus materiais da exposição às intempéries e à sujidade [4]. O PP (polipropileno) é aplicado na construção em produtos relacionados com o sistema HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning), tubos de esgoto e drenos de piso. O ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), PC (policarbonato) e PET (Polietileno tereftalato) estão presentes nos eletrodomésticos e itens de iluminação presentes no edifício [4].

Ainda que em pequenas quantidades, também diferentes tipos de resinas estão presentes

em muitos produtos para a construção, tais como resinas fenólicas, epóxi, copolímeros fenol formaldeído-ureia, ureia-formaldeído, melamina-ureia formaldeído e acrílica. As aplicações de uso final mais comuns são lã de rocha e vidro, para manter as fibras unidas, em painéis de fibra de média densidade (MDFs), painéis de partículas, laminados, colas, vernizes, ceras, tintas e lacas [4]. Os resumos da aplicação de plásticos em produtos de uso final aplicados na construção estão presentes na Tabela 1.

A participação de plásticos é muito alta nas peças elétricas e nos componentes do sistema HVAC, em contraste com as peças estruturais, onde a participação de plásticos é mínima [4].

As principais aplicações de plásticos que geraram resíduos no setor de construção e demolição são revestimentos de pisos e paredes (PVC), tubagens, condutas, materiais isolantes (PU) e perfis (PVC). A percentagem de resíduos plásticos no total de RCDs (resíduos de construção e demolição) recolhidos corresponde a 1%. A atual taxa de reciclagem mecânica é baixa (< 20%), e a maioria dos plásticos presentes nos RCDs vão para incineração ou aterro, uma vez que o plástico aplicado em edifícios tem uma longa vida útil e uma localização subterrânea acumulando lixo e impurezas, que dificultam o processo de reciclagem [4].

Para além disto, os tipos de polímeros utilizados na construção contêm frequentemente elevado teor de cargas como talco e calcário (acima de 20-30%), que lhes confere uma boa resistência à radiação UV, impactos mecânicos e maior resistência à abrasão. Contudo, condicionam as propriedades dos plásticos reciclados através do processo de reciclagem de RCDs. Em 2018, 5 milhões de toneladas de resíduos plásticos foram reciclados na Europa, onde 4 milhões de toneladas voltaram a entrar na economia europeia para fabricar novos produtos. Cerca de 46% deste plástico reciclado é utilizado para a construção de novos edifícios e obras públicas, sendo este setor o maior consumidor de plástico reciclado na Europa [5].

Os plásticos reciclados são utilizados em diversas aplicações da construção civil, como base e sub-base de construção de estradas, componentes de asfalto, cargas em compósitos comestíveis e misturas asfálticas, substituição de madeira, painéis de portas, material isolante, paredes e tijolos [12].

**Tabela 1** - Aplicação de plásticos em Produtos destinados à construção civil (Adaptado de [4]).

Aplicações da Construção Civil	Plástico
Isolamento	Materiais de isolamento baseado em plásticos EPS, XPS, PU, PIR e PUR
	Materiais de isolamento de base mineral (lã de rocha e lã de vidro) Resina copolímero de ureia-formaldeído fenólico e fenol
Sistemas de Saneamento e Irrigação	Tubagens, tubagens de drenagem, aplicações de águas superficiais e pluviais e condutas PVC-U, PVC-P, PE e PP
Sistemas elétricos e de Telecomunicações	Condutas e revestimento de cabos PVC-U e PVC-P
Janelas	Perfis de janelas, vidro, persianas, e outros perfis PVC-U
	Chapas para pisos e telhados, tapumes, caleiros PVC-U
Coberturas, Pisos e Telhado	Impermeabilização e revestimentos de pisos, paredes e telhados PE, Resinas de UF e MUF Ureia-formaldeído, Melamina-ureia formaldeído
Sistemas HVAC	Condutas de ventilação e de AC PP
Iluminação e Aplicativos Domésticos	- ABS, PC e PET
Revestimentos	Colas, vernizes, ceras Tintas e lacas Resina acrílica e epóxi Copolímeros de Acrilato, Epóxi e PU

Embora essas aplicações sejam apelidadas de sustentáveis, circulares e ecologicamente corretas, nem todas o são. O uso desses plásticos reciclados em aplicações de construção pode criar um caminho para usar esses resíduos para aplicações de longo prazo em comparação com as

de curto prazo, como reciclagem em novos produtos plásticos que têm um curto período de tempo [12], mas ao unir os materiais plásticos a outros materiais, como betão, asfalto, madeira, entre outros, os processos de separação e reciclagem no seu fim de vida tornar-se-ão difíceis, promovendo a sua incineração ou deposição em aterro. Consequentemente, essas aplicações apenas atrasam o tratamento desses resíduos em 50-70 anos, pois não fizeram mais do que consumir recursos plásticos, que antes poderiam ser reciclados, recuperando o seu recurso.

Para aplicar materiais plásticos em qualquer aplicação para fins na construção civil, sejam eles virgens ou reciclados, é muito importante seguir os princípios e estratégias da economia circular, pensar no seu tratamento em fim de vida, e não incorporar materiais reciclados apenas para obter uma melhoria das propriedades de um outro produto existente ou mesmo para consumir um resíduo.

## 2. Materiais e métodos

Os micro indicadores podem ser uma ferramenta valiosa para as empresas quando usados como fator de decisão em aquisições, design, opções de fim de vida ou processos de *takeback*. No entanto, diferentemente do que geralmente é postulado pelos criadores dos indicadores, a maioria não é fácil de utilizar. E embora a categorização de Kristensen e Mosgaard tenha sido muito relevante, ela não ajuda a entender cada indicador ou suas principais características. Além disso, não ajuda investigadores ou empresas a decidir quais indicadores usar para uma determinada aplicação.

Assim sendo, a partir da compilação e categorização dos microindicadores de circularidade documentada no artigo de Kristensen and Mosgaard [16], identificamos quais dos 28 micro-indicadores de circularidade são os mais relevantes para avaliar a circularidade de produtos plásticos aplicados na construção civil. A extensa lista de referências de fontes com as definições dos microindicadores pode ser encontrada na revisão acima mencionada [16], e foi revista e resumida por nós na Tabela 1 do Apêndice.

Para a realização deste estudo, reuniu-se um painel de investigadores multidisciplinar, com conhecimento na área da economia circular e avaliação da sustentabilidade de um produto, engenharia de polímeros e engenharia civil. Para além disso, realizaram-se inquéritos focados às indústrias transformadoras de produtos plásticos para aplicação na construção civil, onde se questionou as empresas quanto aos seus conhecimentos nos indicadores de circularidade e a sua importância em implementá-los no seio industrial.

Considerando as categorias de foco da EC e o ciclo de vida dos produtos plásticos típicos aplicados ao setor da construção (tubos, laminados de pavimentos e coberturas, materiais isolantes, outros), começou-se por identificar quais as categorias que tem ou não aplicação direta neste setor.

Após a identificação de cada uma das categorias foco relevantes para o ciclo de vida de uma típica aplicação plástica para a construção civil, analisou-se individualmente cada um dos indicadores contidos nessas categorias, tendo como critérios de seleção o seu alinhamento com o ciclo de vida e tratamentos em fim de vida típico de um edifício, facilidade de acesso aos dados necessários para o cálculo do indicador numa fase de desenvolvimento do produto e a facilidade em implementar o indicador em meio industrial, por ordem decrescente de importância. Para cada um dos indicadores rejeitados ou selecionados, a decisão foi devidamente argumentada através das características e metodologia de cálculo desse indicador.

Reunidos os micro-indicadores relevantes para o cálculo de produtos plásticos para aplicação na construção civil, foram identificadas as diretrizes que potenciam a circularidade nos indicadores relevantes para este sector industrial.

## 3. Resultados

Apenas 6 categorias têm aplicação direta no setor da construção civil, nomeadamente a Reciclagem, Remanufatura, Gestão em fim-de-vida, Gestão de Resíduos, Eficiência de Recursos, e Indicadores Multidimensionais.

Os Microindicadores de circularidade mais relevantes para aferir a circularidade das

aplicações plásticas da construção civil são Material Circularity Index (MCI)[27], Reuse potential indicator (RPI)[28], Value-based resource efficiency indicator (VRE)[29], Model expanded zero waste practice (EZWP)[30], Circularity Design Guidelines (CDG)[31] e Circular Economy Indicator Prototype (CEIP)[32]. Esses indicadores estão dentro das categorias de reciclagem, eficiência de recursos, gestão de resíduos e indicadores multidimensionais e são, na sua maioria, microindicadores ambientais ou econômicos. Além disso, o EZWP é tridimensional, pois envolve em sua metodologia de cálculo as três dimensões da sustentabilidade: social, ambiental e econômica[16].

Para além destes, existem outros indicadores que podem aferir a circularidade das aplicações plásticas da construção, contudo necessitam de uma avaliação prévia do produto a estudar, pois a informação necessária para o cálculo pode não estar disponível ou então não apresentarem correspondência com as etapas do ciclo de vida das comuns aplicações plásticas da construção. Estes microindicadores são o Recycling Desirability Index (RDI)[33], Material Reutilization Score (MRS)[34], Circular Economy index (CEI)[35], Combination Matrix (CM)[36], End-of-life Index (EOLI)[37], End-of-life Indices – Design Methodology (EOL-DM)[38], Eco-cost and Value Creation (EVR)[39] e Typology for Quality Properties (TPQ)[40]. Como referido, antes da utilização destes microindicadores deve ser analisada a sua pertinência para o produto específico.

O MCI avalia o fluxo de materiais envolvidos, considerando a quantidade de material reciclável, biodegradável e compostável no produto, quantidade de resíduos irre recuperáveis e eficiência do processo de reciclagem, relacionando-os com a utilidade e vida útil do produto. Nesta abordagem, um produto que é produzido apenas com matéria-prima virgem, que acaba sendo depositado em aterro após o seu uso é considerado um produto totalmente linear, ou seja,  $MCI=0$ . No entanto, se um produto não contém nenhuma matéria-prima virgem e foi recolhido para reciclagem de seus componentes, onde a eficiência de reciclagem é de 100%, é considerado um produto totalmente circular, ou seja,  $MCI=1$ [27].

O RPI é um indicador que avalia a semelhança do material de um produto a um recurso ou resíduo, após passar por um processo de tratamento de fim de vida. O RPI varia entre 0 e 1. Se  $RPI=0$ , significa que o material contém uma alta concentração de elementos poluentes cuja remoção será altamente dispendiosa ou ainda não estão disponíveis desenvolvimentos tecnológicos EOL capazes de proceder à separação dos materiais, sendo por esta razão mais semelhante a um resíduo. Se  $RPI=1$  o material pode ser recuperado pelas tecnologias de fim-de-vida existentes, sendo semelhante a um recurso[28].

O VRE considera o valor das entradas não sustentáveis para a economia em relação ao produto, como energia, matérias-primas, mão de obra, componentes semiacabados, entre outros. Para um VRE ideal, o produto utilizou recursos de fontes sustentáveis, como energia renovável, componentes reutilizados ou materiais reciclados, gerando emprego e alto valor agregado. Este indicador é ideal para avaliar se o setor da construção utiliza de forma sustentável os recursos plásticos[29].

O EZWP é um modelo que fornece indicadores potenciais para a monitorização do compromisso dos funcionários na resolução de práticas de desperdício zero. Este indicador inclui medidas específicas de impacto social e econômico e fornece diretrizes para as empresas avaliarem a responsabilidade social de seus colaboradores em relação à hierarquia de redução de resíduos e medir o impacto das estratégias de negócios circulares[30].

O nível de melhoria da circularidade para cada grupo de diretrizes é definido como o produto do grau de IM e do grau de relevância. Portanto, o nível de melhoria de circularidade calculado para um produto varia de 1 a 9 para cada grupo de diretrizes, que é posteriormente representado graficamente por um gráfico radar [31].

O CEIP é uma ferramenta holística, assim como o CDG, para avaliar o desempenho do produto em relação aos princípios da economia circular, por meio de um conjunto de 15 questões divididas em cinco etapas do ciclo de vida do produto, onde cada uma dessas questões recebe uma pontuação. Os resultados são apresentados de acordo com a soma das correspondências das pontuações das respostas positivas às questões anteriores, que indicam o limite de desempenho da circularidade do produto em estudo, sendo o limite máximo correspondente a 152 pontos[32].

#### 4. Discussão

Para promover a implementação da EC no setor da construção em termos de aplicações de plástico, todas as fases da vida do imóvel devem ser repensadas. A maioria das decisões deve ser tomada na fase de desenvolvimento e design do produto, onde o designer deve escolher materiais plásticos seguros, não tóxicos e não escassos (promovendo sempre que possível o uso de materiais reciclados), verificar a necessidade de envolver mais de um tipo de material e avaliar a viabilidade de recuperação desse material por meio de tecnologias de gestão de resíduos existentes.

No entanto, a utilização de material plástico reciclado misturado com outros materiais de construção (concreto ou argamassa, fibras sintéticas ou naturais), atuando apenas como carga ou matriz, não pode ser considerada uma solução circular ou sustentável, pois, no fim de vida da construção ou do edifício, os plásticos envolvidos não possuem alternativas para uma gestão sustentável dos seus resíduos - devido à dificuldade de separar os materiais plásticos destes materiais orgânicos e minerais - acabando por ser encaminhados para incineração ou no pior cenário para aterro. Este ato apenas impede a recuperação do plástico que outrora poderia ter sido recuperado, limitando a sua circularidade e a possibilidade de continuar a gerar valor económico, promovendo a procura contínua por material plástico virgem.

Além disso, decisões como tipos de ligação e métodos construtivos empregados devem garantir que os resíduos e componentes sejam adequadamente geridos no seu fim de vida, assim como o local da obra, que deve ter espaço suficiente para possibilitar a desconstrução, para recuperar o máximo possível de componentes sem danos.

Outra fase do ciclo de vida de uma construção que merece atenção dos construtores é a gestão dos resíduos, sejam eles decorrentes da construção ou demolição do edifício. O atual sistema de gestão de RCDs deve ser reconfigurado para um sistema onde pensamentos como a redução, reutilização e reciclagem são altamente incutidos para todos os resíduos gerados, colocando a incineração ou o aterro como direções alternativas insustentáveis. A colaboração e coordenação entre arquitetos, engenheiros e comerciantes também são fundamentais para fechar o ciclo de materiais e proporcionar harmonia e sustentabilidade no setor da construção civil.

#### 5. Conclusão

Entre o vasto leque de microindicadores de circularidade que podem ser encontrados na literatura, 15 podem ser considerados relevantes para os produtos plásticos com aplicação no setor da construção. No entanto, se considerarmos um contexto industrial prático, nem todos esses indicadores são viáveis de calcular. A complexidade nos cálculos, a dificuldade em reunir os dados ao longo do ciclo de vida do produto, que geralmente não são registados pela empresa ou dependem de fontes externas (cuja confiança pode não ser garantida), e a falta de documentação suficientemente detalhada sobre quais indicadores se deve calcular, são alguns dos principais aspetos que as empresa transformadoras de produtos plásticos identificaram como obstáculo.

Estamos certos de que o set de microindicadores de circularidade selecionados e identificados neste artigo como relevantes para a construção, irá solucionar algum dos obstáculos identificados no paragrafo anterior, e simultaneamente auxiliar nas decisões a serem tomadas ao longo do processo de seleção de materiais, processos construtivos, soluções de montagem, e elementos construtivos, sejam as aplicações com materiais plásticos ou outros, apoiando o setor da construção na transição para uma economia circular e na construção de estruturas mais circulares.

No entanto, temos a noção que somente se conseguirá uma transição total e irreversível para uma EC se alguma coisa mudar a nível legislativo. Por exemplo, a criação de incentivos para construtores que utilizam materiais reciclados ou reutilizam resíduos ou que separam os resíduos no local da obra ou demolição.

#### Agradecimentos

Apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) ao IPC pelos projetos UIDB/05256/2020 e UIDP/05256/2020, e a bolsa de Doutoramento UI/BD/150827/2021 (JM).

## Referências

- [1] M. Norouzi, M. Chàfer, L. F. Cabeza, L. Jiménez, D. Boer, Circular economy in the building and construction sector: A scientific evolution analysis, *J. Build. Eng.*, 44 (2021).
- [2] A. González, C. Sendra, A. Herena, M. Rosquillas, D. Vaz, Methodology to assess the circularity in building construction and refurbishment activities, *Resour. Conserv. Recycl. Adv.*, 12 (2021) 200051.
- [3] Ö. Çimen, Construction and built environment in circular economy: A comprehensive literature review, *J. Clean. Prod.*, 305 (2021).
- [4] T. Häkkinen, M. Kuittinen, S. Vares, *Plastics in buildings*, 2019.
- [5] PlasticEurope, *Plastics – the Facts 2020*, 2020.
- [6] S. Mudgal et al., *Plastic Waste in the Environment - Final Report.*, 2011.
- [7] M. Sadat-Shojai, G. R. Bakhshandeh, Recycling of PVC wastes,” *Polym. Degrad. Stab.*, 96 (2011) 404–415.
- [8] B. Konstantinovas, N. V. Bento, T. Sanches, *Economia Circular No Setor Da Construção Civil I- Ciclo dos Materiais*, 2019.
- [9] D. Briassoulis, M. Hiskakis, E. Babou, Technical specifications for mechanical recycling of agricultural plastic waste, *Waste Manag.*, 33 (2013) 1516–1530.
- [10] M. Liikanen et al., Construction and demolition waste as a raw material for wood polymer composites – Assessment of environmental impacts, *J. Clean. Prod.*, 225 (2019) 716–727.
- [11] T. O’Grady, R. Minunno, H. Y. Chong, G. M. Morrison, Design for disassembly, deconstruction and resilience: A circular economy index for the built environment, *Resour. Conserv. Recycl.*, 175 (2021) 105847.
- [12] P. O. Awoyera, A. Adesina, Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective, *Case Stud. Constr. Mater.*, 12 (2020) 003300.
- [13] G. Lonca, P. Lesage, G. Majeau-Bettez, S. Bernard, M. Margni, Assessing scaling effects of circular economy strategies: A case study on plastic bottle closed-loop recycling in the USA PET market, *Resour. Conserv. Recycl.*, 162 (2020) 105013.
- [14] M. Saidani, B. Yannou, Y. Leroy, F. Cluzel, A. Kendall, A taxonomy of circular economy indicators, *J. Clean. Prod.*, 207 (2019) 542–559.
- [15] B. Corona, L. Shen, D. Reike, J. Rosales Carreón, E. Worrell, Towards sustainable development through the circular economy—A review and critical assessment on current circularity metrics, *Resour. Conserv. Recycl.*, 151 (2019) 104498.
- [16] H. S. Kristensen, M. A. Mosgaard, A review of micro level indicators for a circular economy – moving away from the three dimensions of sustainability?, *J. Clean. Prod.*, 243 (2020) 118531.
- [17] M. Saidani, B. Yannou, Y. Leroy, F. Cluzel, A. Kendall, A taxonomy of circular economy indicators, *J. Clean. Prod.*, 207 (2019) 542–559.
- [18] J. Mesa, I. Esparragoza, H. Maury, Developing a set of sustainability indicators for product families based on the circular economy model, *J. Clean. Prod.*, 196 (2018) 1429–1442.
- [19] Y. A. Alamerew, D. Brissaud, Evaluation of Remanufacturing for Product Recovery : Multi-criteria Decision Tool for End-of-Life Selection Strategy, In 3rd International Conference on Remanufacturing, 2017.
- [20] L. Cong, F. Zhao, J. W. Sutherland, Product Redesign for Improved Value Recovery via Disassembly Bottleneck Identification and Removal, *Procedia CIRP*, 61 (2017) 81–86.
- [21] P. Van Loon, L. N. Van Wassenhove, Assessing the economic and environmental impact of remanufacturing: a decision support tool for OEM suppliers, *Int. J. Prod. Res.*, 56 (2018) 1662–1674.
- [22] M. Linder, S. Sarasini, P. van Loon, A Metric for Quantifying Product-Level Circularity, *J. Ind. Ecol.*, 21 (2017) 545–558.
- [23] P. Zwolinski, M. A. Lopez-Ontiveros, D. Brissaud, Integrated design of remanufacturable products based on product profiles, *J. Clean. Prod.*, 14 (2006) 1333–1345.
- [24] IDEAL & CO Explore, “Circularity Calculator,” 2021. Available: <http://www.circularitycalculator.com/>. [Accessed: 01-Feb-2021].
- [25] A. Van Schaik, M. A. Reuter, Recycling indices visualizing the performance of the circular

- economy, *World Metall.* - ERZMETALL, 69 (2016) 201–216.
- [26] M. Ameli, S. Mansour, A. Ahmadi-javid, Resources , Conservation & Recycling A simulation-optimization model for sustainable product design and efficient end-of-life management based on individual producer responsibility, *Resour. Conserv. Recycl.*, 140 (2019) 246–258.
- [27] Ellen MacArthur Foudation and ANSYS Granta, *Circularity Indicators - An Approach to Measuring Circularity - Methodolofy*, (2019) 1–64.
- [28] J. Y. Park, M. R. Chertow, Establishing and testing the ‘reuse potential’ indicator for managing wastes as resources, *J. Environ. Manage.*, 137 (2014) 45–53.
- [29] F. Di Maio, P. Carlo, K. Baldé, M. Polder, Resources , Conservation and Recycling Measuring resource efficiency and circular economy : A market value approach, *Resources, Conserv. Recycl.*, 122 (2017) 163–171.
- [30] V. Veleva, G. Bodkin, S. Todorova, The need for better measurement and employee engagement to advance a circular economy: Lessons from Biogen’s ‘zero waste’ journey, *J. Clean. Prod.*, 154 (2017) 517–529.
- [31] M. D. Bovea, V. Pérez-Belis, Identifying design guidelines to meet the circular economy principles: A case study on electric and electronic equipment, *J. Environ. Manage.*, 228 (2018) 483–494.
- [32] S. Cayzer, P. Griffiths, V. Beghetto, Design of indicators for measuring product performance in the circular economy, *Int. J. Sustain. Eng.*, 10 (2017) 289–298.
- [33] A. A. Mohamed Sultan, E. Lou, P. Tarisai Mativenga, What should be recycled: An integrated model for product recycling desirability, *J. Clean. Prod.*, 154 (2017) 51–60.
- [34] CradletoCradle, Version 3.1 cradle to cradle certified product standard, 2016.
- [35] F. Di Maio, P. C. Rem, A Robust Indicator for Promoting Circular Economy through Recycling, *J. Environ. Prot. (Irvine,. Calif.)*, 6 (2015) 1095–1104.
- [36] F. Figge, A. S. Thorpe, P. Givry, L. Canning, E. Franklin-Johnson, Longevity and Circularity as Indicators of Eco-Efficient Resource Use in the Circular Economy, *Ecol. Econ.*, 150 (2018) 297–306.
- [37] K. Y. Lee, Y. Aitomäki, L. A. Berglund, K. Oksman, A. Bismarck, On the use of nanocellulose as reinforcement in polymer matrix composites, *Compos. Sci. Technol.*, 105 (2014) 15–27.
- [38] C. Favi, M. Germani, A. Luzi, M. Mandolini, A design for EoL approach and metrics to favour closed-loop scenarios for products A design for EoL approach and metrics to favour closed-loop scenarios for products, *Int. J. Sustain. Eng.*, 7038 (2017).
- [39] J. Vogtlander, A. Mestre, A. Scheepens, R. Wever, *Eco-efficient value creation, sustainable design and business strategies*, 2nd ed. Delft Academic Press / VSSD, 2014.
- [40] E. Lacovidou, A. P. M. Velenturf, P. Purnell, Science of the Total Environment Quality of resources : A typology for supporting transitions towards resource ef fi ciency using the single-use plastic bottle as an example, *Sci. Total Environ.*, 647 (2019) 441–448.
- [41] P. Vanegas et al., Ease of disassembly of products to support circular economy strategies, *Resour. Conserv. Recycl.*, 135 (2018) 323–334.
- [42] M. Mandolini, C. Favi, M. Germani, M. Marconi, Time-based disassembly method : how to assess the best disassembly sequence and time of target components in complex products, (2018) 409–430.
- [43] E. Franklin-Johnson, F. Figge, L. Canning, Resource duration as a managerial indicator for Circular Economy performance, *J. Clean. Prod.*, 133 (2016) 589–598.
- [44] S. K. Das, P. Yedlarajiah, R. Narendra, An approach for estimating the end-of-life product disassembly effort and cost, *Int. J. Prod. Res.*, 38 (2000) 657–673.

## Apêndice

**Tabela 1** - Sumário dos indicadores presentes no estudo (adaptado de [16]).

Nome	Descrição	Princípio	Autor
<b>RDI</b>	Recycling Desirability Index	Quão desejável é a reciclagem.	[33]
<b>RPI</b>	Reuse Potential Indicator	Quão semelhante um material recuperado é a um recurso ou resíduo.	[28]
<b>CEI</b>	Circular Economy Index	Valor econômico dos materiais de produtos em fim de vida.	[35]
<b>MCI</b>	Material Circularity Indicator	Grau de circularidade de um produto com base no fluxo de seus materiais.	[27]
<b>MRS</b>	Material Reutilization Score	Pontue o produto de acordo com sua fração de material reciclável.	[34]
<b>EVR</b>	Eco-cost /value Creation	Eficiência de recursos pela relação entre eco custos e o valor de um produto.	[39]
<b>VRE</b>	Value-Based Resource Efficiency	Eficiência de recursos baseada na massa e alinhada com as políticas ambientais/sociais/econômicas.	[29]
<b>EDIM</b>	Ease of Disassembly Metric	Tempo de desmontagem de um produto.	[41]
<b>EDT</b>	Effective Disassembly Time	Tempo efetivo para desmontar um produto para isolar um componente alvo.	[42]
<b>LI</b>	Longevity Indicator	Período em que um material é retido em um ciclo de produto.	[43]
<b>PLCM</b>	Product-level Circularity Metric	Com base no valor econômico de todas as peças como unidade básica e o produto é agregado em uma métrica circular.	[22]
<b>CC</b>	Circularity Calculator	Conteúdo reciclado de um produto.	[24]
<b>EPVR</b>	End-of-use product value recovery	Método com diferentes opções para gerenciar produtos em fim de uso.	[20]
<b>SDEO</b>	Sustainable design and end-of-life options	Desempenho de design sustentável de uma família de produtos em fim de uso.	[26]
<b>PR-MCDT</b>	Product Recovery Multi-criteria Decision Tool	Viabilidade de selecionar a remanufatura como opção para recuperar um produto em fim de uso.	[19]
<b>REPRO2</b>	Remanufacturing Product Profiles	Ferramenta que auxilia no design de produtos remanufaturados, com base em propostas de eco design.	[23]
<b>TPQ</b>	Typology for Quality Properties	Ferramenta de triagem da qualidade dos materiais/componentes de um produto, para melhorar a eficiência dos recursos	[40]
<b>EZWP</b>	Model of Expanded Zero Waste Practice	Ponto de partida para as empresas desenvolverem indicadores de gestão de resíduos (numa abordagem de desperdício zero).	[30]
<b>CDG</b>	Circularity Design Guidelines	Diretrizes de design para melhorar o design de produtos de uma perspectiva de economia circular.	[31]
<b>DSTR</b>	Decision Support Tool for Remanufacturing	Avalia se a remanufatura é um processo economicamente e ambientalmente viável.	[21]
<b>RI</b>	Recycling Indices	Define a taxa de reciclagem e recuperação de um produto e atribui uma categoria de eficiência à reciclagem.	[25]
<b>SICE</b>	Sustainability indicators in EC	Conjunto de 5 indicadores baseados na sustentabilidade e desempenho funcional de um produto.	[18]
<b>CM</b>	Combination Matrix	Contribui para o uso circular de recursos na empresa.	[36]
<b>EOLI</b>	End-of-life Index	Custos totais de cada processo de gerenciamento de produtos em fim de vida.	[37]

---

<b>EOLI-DM</b>	End-of-life Indices (Design Methodology)	Custos totais de cada processo de gestão de produtos em fim de vida com base em metodologias de eco design.	[38]
<b>EEVC</b>	Eco-efficient Value Creation	Baseado no EVR em um modelo para avaliar o potencial de remanufatura.	[39]
<b>DEI</b>	Disassembly Effort Index	Trabalho e processos necessários para desmontar um produto para fornecer uma pontuação para o produto.	[44]
<b>CEIP</b>	Circular Economy Indicator Prototype	Ferramenta que avalia o desempenho do produto no contexto da economia circular.	[32]

---