

ECONOMIA CIRCULAR NA GEOTECNIA: CASO DE ESTUDO NO RIOMAR SHOPPING

Circular economy in geotechnics: case study at RioMar Shopping

André Azevedo Borgatto^a, Castorina Silva Vieira^a, Alexandre Duarte Gusmão^b, Stela Fucale^b, Andréa Batista de Farias Dias^b

^a Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

^b Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Brasil.

RESUMO – A construção civil permanece como um dos sectores que mais contribui para as emissões globais de gases com efeito de estufa e para o consumo de recursos naturais. Este estudo investigou a aplicação dos princípios da economia circular como estratégia para mitigar esses impactes ambientais, através de uma Avaliação do Ciclo de Vida comparativa entre dois cenários de pavimentação no estacionamento do RioMar Shopping, localizado em Recife, no nordeste do Brasil: um cenário de construção tradicional e outro baseado em práticas de construção circular. Os resultados demonstraram que a adoção do cenário circular reduziu as emissões de CO₂ em cerca de 91% e promoveu uma gestão mais eficiente dos resíduos. Conclui-se que a economia circular se revela uma abordagem viável para a sustentabilidade no sector, contribuindo para a mitigação das alterações climáticas e a conservação de recursos naturais.

ABSTRACT – The construction sector remains one of the main contributors to global greenhouse gas emissions and natural resource depletion. This study investigated the application of circular economy principles through a comparative Life Cycle Assessment of two pavement scenarios at RioMar Shopping's parking facility in Recife, Northeast Brazil: conventional construction versus circular construction practices. Results demonstrated that implementing the circular approach reduced CO₂ emissions by approximately 91% while significantly improving waste management efficiency. The findings confirm that circular economy models represent a viable strategy for sustainable construction, effectively supporting climate change mitigation and natural resource conservation efforts.

Palavras Chave – construção civil, economia circular, avaliação do ciclo de vida.

Keywords – civil construction, circular economy, life cycle assessment.

1 – INTRODUÇÃO

O sector da construção civil desempenha um papel crucial na economia global, contribuindo significativamente para o Produto Interno Bruto de vários países. Para além da sua importância económica, o sector é um motor de progresso social e ambiental, atendendo a necessidades básicas, como infraestruturas urbanas, habitação e transportes, melhorando assim a qualidade de vida e alinhando-se com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas, particularmente no que diz respeito ao desenvolvimento de infraestruturas resilientes, urbanização

E-mails: andre.borgatto@ufrpe.br (A. Borgatto), cvieira@fe.up.pt (C. Vieira), gusmao.alex@poli.br (A. Gusmão), sfucale@poli.br (S. Fucale), abfd1@poli.br (A. Dias)

ORCID: orcid.org/0000-0002-9467-8677 (A. Borgatto), orcid.org/0000-0001-6328-4504 (C. Vieira), orcid.org/0000-0002-7817-6124 (A. Gusmão), orcid.org/0000-0002-7536-498X (S. Fucale), orcid.org/0000-0002-3894-933X (A. Dias)

sustentável e padrões de produção responsáveis. Desta forma, a construção civil não só impulsiona o crescimento económico, mas também promove o desenvolvimento e o bem-estar social.

Contudo, este sector é igualmente responsável por impactes ambientais substanciais. Estima-se que contribua com cerca de 21% das emissões globais de gases com efeito de estufa (GEE), 34% da procura global de energia e 37% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) relacionadas com a energia e processos industriais, incluindo a produção de cimento, aço e outros materiais de construção, bem como as operações de construção e demolição (United Nations Environment Programme, 2024). Além disso, a construção civil gera aproximadamente 10 mil milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) anualmente, representando entre 30% e 40% dos resíduos sólidos globais (Borracheiro et al., 2022; Chen et al., 2021; Ginga et al., 2020; Ng e Engelsen, 2018). Este sector também consome entre 40% e 50% dos recursos naturais extraídos globalmente, incluindo areia, pedra e água, para suprir a demanda da sua cadeia de materiais e aplicações (World Green Building Council, 2021). Estes factos evidenciam a elevada pegada ambiental do sector, sendo, portanto, imperativa a adoção de práticas de construção mais sustentáveis e de políticas públicas que promovam a eficiência energética, a redução de emissões e a gestão eficiente dos resíduos.

A adoção de princípios da economia circular surge como uma alternativa promissora para mitigar os impactes ambientais do sector da construção civil (Ellen MacArthur Foundation, 2019a). A economia circular propõe um modelo de produção e consumo baseado na partilha, reutilização, reparação, renovação e reciclagem de materiais, estendendo o ciclo de vida dos produtos e reduzindo a geração de resíduos (Geissdoerfer et al., 2017). A implementação desses princípios no sector pode oferecer uma solução eficaz para questões críticas de sustentabilidade, promovendo a reutilização e a reciclagem de materiais, reduzindo a demanda energética e de recursos naturais, e minimizando a extração de novos recursos (Kirchherr et al., 2017). Além disso, a gestão de resíduos beneficia-se da redução na geração de RCD, promovendo um sistema mais eficiente e sustentável (Korhonen et al., 2018).

Este estudo tem como objetivo analisar o desempenho ambiental de uma solução construtiva baseada nos princípios da economia circular, aplicada à construção de um grande centro comercial em Recife, Pernambuco, Brasil. Durante a execução do projeto foram exploradas alternativas para a utilização de resíduos no processo construtivo das camadas de regularização e reforço de áreas de estacionamento e vias internas de acesso, com destaque para os resíduos provenientes do sistema de fundações profundas e da demolição de estruturas antigas. O foco principal é avaliar de forma abrangente todos os impactes ambientais relacionados à gestão dos RCD gerados nas fases iniciais do empreendimento.

Para tanto, será aplicada uma modelagem completa da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), abrangendo todas as etapas do ciclo de vida dos materiais, desde a extração das matérias-primas até à disposição final dos resíduos. Esta metodologia permitirá, não apenas a quantificação das emissões de GEE, especialmente CO₂, mas também a avaliação de outros impactes ambientais, como o consumo de energia, a utilização de recursos naturais, a produção de resíduos e a emissão de poluentes. Os resíduos reciclados foram utilizados na regularização do terreno e na criação das camadas de suporte das áreas de estacionamentos e vias internas de acesso do empreendimento.

Os resultados obtidos têm o potencial de incentivar os decisores a integrar a dimensão ambiental como um dos pilares essenciais no desenvolvimento de projetos, promovendo soluções mais sustentáveis e alinhadas com os objetivos globais de redução das emissões de carbono e da preservação ambiental.

2 – REVISÃO DA LITERATURA

2.1 – Desafios e oportunidades na gestão de RCD

O aumento contínuo da geração de RCD representa um desafio global significativo, especialmente em países em desenvolvimento, como o Brasil, onde a infraestrutura para reciclagem ainda é incipiente. No contexto brasileiro, estima-se que a geração de RCD ultrapasse os 45 milhões de toneladas por ano, com uma taxa de reciclagem de cerca de 15% (ABREMA, 2023; Angulo et al., 2022). Em contraste, na União Europeia, a geração de RCD é estimada em cerca de 800 milhões de toneladas por ano (EUROSTAT, 2022), com países como a Dinamarca e os Países Baixos a atingirem taxas de reciclagem superiores a 90% (Vieira e Pereira, 2015). Este contraste evidencia a necessidade urgente de políticas e práticas mais eficazes de gestão de resíduos que promovam a transição para uma economia mais circular e sustentável.

Diversos estudos têm investigado o potencial da utilização de RCD reciclados em diferentes aplicações na construção civil, nomeadamente em obras de pavimentação (Pereira e Vieira, 2022; Pourkhorshidi et al., 2020; Cardoso et al., 2016; Lee et al., 2010; Park, 2003). Estas pesquisas destacam os benefícios ambientais e económicos do uso de agregados reciclados em projetos viários, incluindo a redução do consumo de recursos naturais e a minimização das emissões de poluentes atmosféricos. A utilização de RCD no processo construtivo de pavimentos pode reduzir significativamente a necessidade de novas matérias-primas e diminuir a pegada de carbono das infraestruturas de transporte (Fanijo et al., 2023; Zhao et al., 2021; Chowdhury et al., 2010). Como demonstrado por Azam et al. (2024), agregados reciclados de concreto e cerâmica (RCD) permitem a construção de camadas de base viária com espessura reduzida, mantendo desempenho estrutural equivalente a agregados naturais e reduzindo em até 40% as emissões de CO₂ associadas à produção de materiais virgens.

A reciclagem de RCD não só contribui para a conservação dos recursos naturais, como também aumenta a eficiência dos sistemas de gestão de resíduos. A implementação de práticas de reutilização e reciclagem de RCD promove um sistema mais eficiente e sustentável, alinhado com os princípios da economia circular. Estudos como os de Santolini et al. (2023) e Zhang et al. (2020) reforçam ainda mais a importância de integrar materiais reciclados em projetos de construção, sublinhando os benefícios económicos e ambientais a longo prazo.

2.2 – Normas e especificações técnicas aplicáveis ao uso de RCD

A crescente aceitação de resíduos reciclados nas normas e especificações técnicas, desempenha um papel fundamental para facilitar a sua adoção em projetos públicos e privados. Neste contexto, a Comissão Europeia (2020) tem promovido diretrizes para aumentar a utilização de RCD na construção, demonstrando que o uso de materiais reciclados pode contribuir significativamente para o objetivo de uma economia neutra em carbono até 2050. Normas europeias (EN) como a EN 13242:2002+A1:2007 (CEN, 2008a) e a EN 12620:2002+A1:2008 (CEN, 2008b) estabelecem os requisitos para o uso de agregados reciclados e naturais em materiais não ligados e materiais tratados com ligantes hidráulicos para obras de engenharia civil e construção rodoviária e na produção de betão, respetivamente. Nos Estados Unidos, as normas ASTM D6155-15 (ASTM, 2015) e AASHTO M 319-02 (AASHTO, 2019) definem padrões para o uso de agregados reciclados em misturas betuminosas e bases não ligadas, aplicáveis a nível nacional. Essas normas fornecem diretrizes claras para a indústria da construção, assegurando a qualidade e o desempenho dos materiais reciclados utilizados em infraestruturas rodoviárias.

No Brasil, as normas técnicas ABNT NBR 15115 (ABNT, 2004) e ABNT NBR 15116 (ABNT, 2021) estabelecem requisitos para a aplicação de agregados reciclados em pavimentação e em betão, sem função estrutural, sendo válidas em todo o território nacional. Estas normas são cruciais para a promoção da reciclagem de RCD no país, garantindo a viabilidade técnica dos

materiais reciclados em diversas aplicações da construção civil. Além disso, países como o Japão, Austrália, Canadá e Índia têm desenvolvido normas específicas para o uso de agregados reciclados. Entre os exemplos, incluem-se a JIS A 5021:2018 (JIS, 2018), no Japão, a AS 2758.1:2014 (Standards Australia, 2014), na Austrália, a CSA A23.1-19 (CSA, 2019), no Canadá e a IS 383:2016 (BSI, 2016), na Índia. Estas normas refletem o compromisso desses países com a sustentabilidade e a inovação na gestão de RCD.

2.3 – Avaliação do ciclo de vida aplicável ao uso de RCD

Estudos recentes têm utilizado ferramentas de ACV para avaliar o desempenho ambiental e económico da utilização de RCD reciclados em comparação com materiais convencionais (Bayram e Greiff, 2023; Santolini et al., 2023; Tefa et al., 2022; Zhao et al., 2021; Zhang et al., 2020). A ACV é uma metodologia robusta que avalia os impactos ambientais associados a todas as etapas do ciclo de vida de um produto ou processo, desde a extração das matérias-primas até à disposição final dos resíduos, conforme descrito na norma ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2014a). No entanto, persistem lacunas significativas na integração de dimensões regionais e socioeconómicas na ACV, que precisam ser preenchidas para tornar a avaliação dos impactos ambientais dos RCD mais precisa e relevante.

Diversos estudos destacam a importância da ACV na avaliação do impacto ambiental de materiais reciclados. Por exemplo, Marinković et al. (2010) examinaram a aplicação da ACV na comparação de agregados reciclados e naturais na produção de betão, destacando os benefícios ambientais dos primeiros. De forma semelhante, Shi et al. (2019) demonstraram que o uso de agregados reciclados na construção de pavimento rodoviário é geralmente mais ecológico e socialmente benéfico em comparação com pavimentos à base de agregados virgens, especialmente nas categorias de ecotoxicidade e saúde humana (cancerígena e não cancerígena). Thapa et al. (2023) também salientaram que a ACV pode orientar a tomada de decisões sustentáveis no desenvolvimento de infraestruturas, embora seja necessário continuar a preencher as lacunas na integração das dimensões regionais e socioeconómicas nas análises. Recentemente, Santolini et al. (2024) confirmaram que a utilização da ACV permitiu avaliar os efeitos positivos da incorporação de maiores teores de materiais reciclados numa nova central de asfalto, o que levou à redução das emissões de CO₂ equivalente durante o ciclo de produção e de vida útil do pavimento, além de benefícios económicos que diminuíram o custo total de produção.

2.4 – Inovações tecnológicas na gestão e reciclagem de RCD

As inovações tecnológicas têm desempenhado um papel crucial na melhoria da eficiência e da sustentabilidade na gestão de RCD, abrangendo tanto a reciclagem como a reutilização de materiais. Novas tecnologias estão a emergir para enfrentar os desafios associados à separação, processamento e aproveitamento dos resíduos, contribuindo significativamente para a transição para uma economia circular no sector da construção civil.

Uma das principais áreas de inovação é a triagem automatizada de resíduos. Sistemas avançados que utilizam inteligência artificial (IA) e tecnologias de visão por computador são agora capazes de identificar e separar materiais recicláveis de forma mais precisa e eficiente do que os métodos manuais tradicionais (Ellen MacArthur Foundation, 2019b). Estes sistemas permitem a recuperação de uma maior quantidade de materiais de alta qualidade, reduzindo o volume de resíduos destinados a aterros e aumentando a eficiência dos processos de reciclagem. Um exemplo desta inovação é o projeto RECONMATIC, no qual se desenvolveram soluções tecnológicas avançadas para melhorar a eficiência e a sustentabilidade na gestão de RCD através da implementação de sistemas automatizados de triagem e reciclagem, integrados com tecnologias de IA e Internet das Coisas (Koroxenidis et al., 2023). O RECONMATIC visou maximizar a recuperação de materiais

recicláveis, reduzir os resíduos destinados a aterros e diminuir a pegada de carbono do sector da construção.

Além da reciclagem, avanços na reutilização de materiais provenientes de RCD têm demonstrado potencial significativo na construção civil. Investigação recente tem explorado a aplicação direta de componentes e agregados reciclados na fabricação de novos materiais, como betões auto-reparáveis e compósitos avançados. Robayo-Salazar et al. (2022) investigaram o desenvolvimento de cimentos híbridos ativados com álcalis e a incorporação de agregados reciclados na produção de argamassas e de betão para aplicação na fabricação de artefactos pré-fabricados, blocos para alvenaria e pavimentos. Os resultados obtidos validaram o potencial de aplicação destes materiais à base de RCD no sector da construção, alcançando resistências à compressão de até 40 MPa para argamassas e cerca de 37 MPa para betões. Em termos de sustentabilidade ambiental, os resultados da ACV demonstraram que a pegada de carbono dos RCD mistos ativados com álcalis pode ser até 40% inferior à dos materiais fabricados à base de cimento Portland comum.

2.5 – Políticas públicas e incentivos para a reciclagem de RCD

As políticas públicas e os incentivos fiscais desempenham um papel crucial na promoção da reciclagem de RCD. Em vários países, programas e regulamentações específicas têm sido implementados para aumentar as taxas de reciclagem, reduzindo, assim, o impacto ambiental do sector da construção civil. Na União Europeia, a Diretiva 2008/98/EC (União Europeia, 2008), alterada pela Diretiva (UE) 2018/851, estabelece um quadro legal para o tratamento de resíduos, incentivando a reciclagem e a reutilização de RCD. Países como a Dinamarca e os Países Baixos adotaram políticas de reciclagem obrigatória, resultando em taxas de reciclagem superiores a 90% (Vieira e Pereira, 2015). Estes países introduziram sistemas de taxas de aterro e incentivos fiscais para encorajar a reciclagem e desencorajar o descarte dos resíduos em aterro.

Em Portugal, o regime geral da gestão de resíduos (Portugal, 2020), estabelece a obrigatoriedade de utilização em obras públicas (obras ao abrigo do Código dos Contratos Públicos) de pelo menos 10 % de materiais reciclados, ou que incorporem materiais reciclados, relativamente à quantidade total de matérias-primas usadas em obra. Este diploma recomenda, ainda, que sejam favorecidos métodos construtivos que facilitem a demolição seletiva e a conceção para a desconstrução que permita desmontar o edifício em elementos e reduzir a produção de RCD. No caso de demolição ou renovação de edifícios ou infraestruturas, particularmente nas obras públicas, é recomendado que sejam promovidas auditorias de pré-demolição. A obrigatoriedade de triagem em obra e previamente à deposição de RCD em aterro são também medidas que pretendem contribuir para o aumento da reciclagem ou de outras formas de valorização de RCD.

Nos Estados Unidos, alguns Estados implementaram programas de reciclagem obrigatória e incentivos fiscais. Por exemplo, a Califórnia adotou a *Lei de Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição* (CalRecycle), que estipula que pelo menos 65% dos resíduos gerados em projetos de construção devem ser reciclados ou recuperados. Adicionalmente, incentivos fiscais, como créditos tributários e subsídios, têm sido aplicados para promover a reciclagem de RCD (CALRECYCLE, 2021). No Brasil, embora ainda exista um longo caminho a percorrer, algumas iniciativas estão a ser desenvolvidas. A *Política Nacional de Resíduos Sólidos* estabelece diretrizes para a gestão de resíduos, incluindo a reciclagem de RCD. No entanto, a implementação efetiva dessas diretrizes enfrenta desafios, tais como a carência de infraestruturas adequadas, incentivos financeiros e fiscais, a falta de informações fiáveis sobre o número de unidades de reciclagem de RCD no Brasil e a destinação dos RCD nas diversas jurisdições (Angulo et al., 2022).

3 – METODOLOGIA

Esta secção detalha a metodologia utilizada para a avaliação dos impactos ambientais associados a dois cenários de construção distintos, incluindo a definição do caso de estudo, a estrutura da

investigação, o objetivo e escopo da ACV, as fronteiras do sistema, o inventário do ciclo de vida (ICV), a avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) e a análise de sensibilidade (AS).

3.1 – Caso de estudo

Este estudo fundamenta-se numa investigação realizada na Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Brasil, detalhada na dissertação de mestrado de Farias (2013), intitulada "Análise Técnica e Económica de Resíduos de Construção e Demolição Aplicados em Pavimentação". A pesquisa explorou alternativas para a utilização de resíduos no processo construtivo, com ênfase nos provenientes da execução de fundações profundas (solo escavado na implantação de estacas do tipo hélice contínua monitorada) e da demolição de galpões de uma antiga fábrica. O objetivo era empregá-los nas camadas da estrutura de pavimentação do sistema viário do novo projeto.

Durante a construção de um grande centro comercial em Recife, Pernambuco, Brasil, foram realizados ensaios laboratoriais e de campo para avaliar a viabilidade técnica e económica da utilização de misturas de solo e RCD na regularização do subleito e na execução da sub-base. A combinação de 40% de solo proveniente do estaqueamento com 60% de RCD beneficiado resultou não só em melhorias significativas nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais, mas também numa redução de cerca de 89% nos custos de pavimentação nas áreas onde os resíduos valorizados foram aplicados. Essa economia foi alcançada por meio da reutilização do solo escavado durante o processo de estaqueamento e da aplicação de reciclagem, com a substituição parcial dos agregados naturais por agregados reciclados provenientes da britagem dos resíduos de demolição gerados na própria obra.

As análises económicas indicaram uma economia superior a 4,6 milhões de reais (cerca de 1,6 milhões de euros), com a utilização integral de aproximadamente 24 mil toneladas de RCD beneficiado e 43 mil toneladas de solo do estaqueamento.

Esta pesquisa não só evidenciou a viabilidade técnica e económica desta abordagem, como também destacou seu potencial para impulsionar práticas mais sustentáveis no sector da construção, alinhadas aos princípios da Construção Circular. O caso de estudo demonstra que a valorização de RCD pode ser uma estratégia eficaz para melhorar a sustentabilidade e a eficiência económica dos projetos de construção civil, contribuindo para a redução da pegada ambiental e promovendo a economia circular.

3.2 – Estrutura da investigação

Este estudo empregou uma abordagem detalhada do método de ACV para quantificar os impactos ambientais associados a dois cenários distintos de construção.

O primeiro cenário, denominado Cenário de Construção Tradicional (CCT), adotou um modelo convencional, no qual os RCD incluindo os materiais provenientes da demolição dos galpões de uma fábrica antiga no terreno e os solos escavados durante a execução das fundações, foram destinados a aterros de inertes, enquanto agregados naturais foram utilizados na construção. Este método reflete o modelo de economia linear predominante, caracterizado pelo descarte dos RCD e a contínua extração de novos recursos naturais, resultando em impactos ambientais significativos associados à gestão de resíduos e ao uso de materiais virgens. Em contraste, o segundo cenário, designado como Cenário de Construção Circular (CCC), aplicou princípios de economia circular ao valorizar os RCD como agregados reciclados. Além da reutilização de materiais existentes no local, os resíduos de demolição foram reciclados e utilizados na composição da camada de reforço do subleito e na sub-base dos pavimentos flexíveis, semirrígidos e rígidos do empreendimento. Neste cenário, os RCD substituíram parcialmente os agregados naturais, promovendo a reciclagem de materiais e minimizando a necessidade de extração de novos recursos. Essa abordagem também considera a redução do volume de solos escavados descartados, priorizando sua reutilização quando tecnicamente viável. Esta abordagem está alinhada com a filosofia da Construção Circular, que visa

reduzir o impacto ambiental ao maximizar a reutilização e reciclagem de recursos e diminuir o volume de resíduos gerados.

Nas Figuras 1a e 1b, apresentam-se esquematicamente os cenários estudados, destacando as diferenças nos fluxos de materiais e nas etapas do processo construtivo de cada abordagem. No esquema, também está representada a camada de base do pavimento, que, no CCC, incorpora materiais reciclados, reduzindo a dependência de agregados naturais. Esta visualização facilita a comparação entre os cenários e possibilita uma análise aprofundada dos benefícios e desafios ambientais de cada abordagem, contribuindo para a identificação de práticas mais sustentáveis no sector da construção civil.

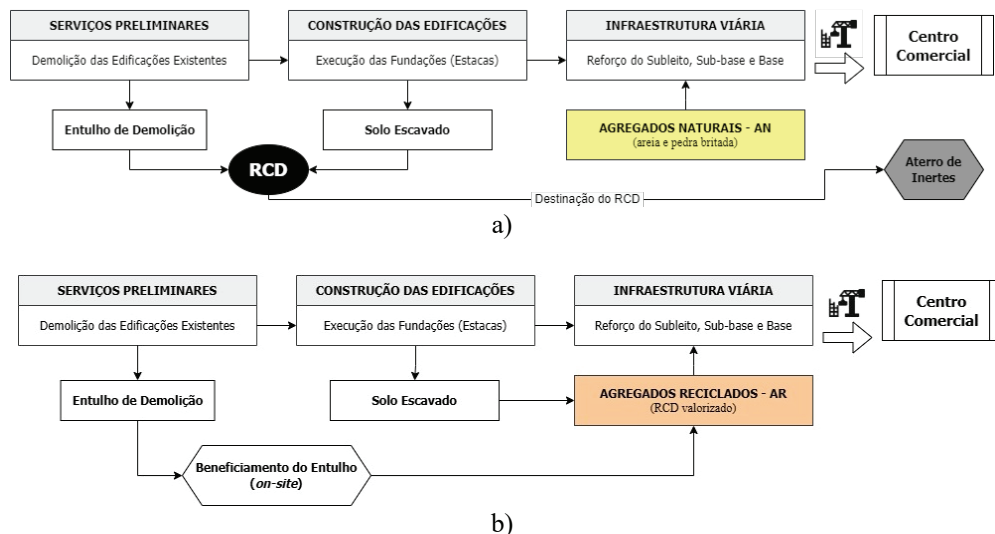


Fig. 1 – Representação esquemática dos cenários de construção estudados:
a) cenário de construção tradicional; b) cenário de construção circular.

3.3 – Objetivo e escopo da ACV

O objetivo deste artigo foi avaliar o desempenho ambiental de cenários de construção estudados na dissertação de Farias (2013) com base na metodologia de ACV. A investigação visou identificar e quantificar os impactos ambientais e as emissões associadas a cada cenário, comparando duas abordagens distintas para a construção do sistema viário do centro comercial em estudo. Os resultados focaram-se nas consequências ambientais da substituição de agregados naturais por agregados reciclados gerados na própria obra, sem refletir o desempenho ambiental dos produtos em si (areia e brita graduada simples versus solo de estaqueamento e entulho beneficiado).

Para tal, a unidade funcional (UF) definida foi 1 tonelada de agregado, seja natural ou reciclado, aplicado nas camadas de infraestrutura do sistema viário do centro comercial, conforme o cenário. A escolha da UF foi crucial para assegurar a comparabilidade e precisão dos resultados, conforme recomendado por Visintin et al. (2020) e Terán-Cuadrado et al. (2024). Esta unidade foi respaldada por diversos estudos (Rosado et al., 2017; Penteado e Rosado, 2016; Paz et al., 2023; Leite et al., 2011) e está em conformidade com a norma brasileira ABNT NBR 15115 (ABNT, 2004), que regulamenta o uso de agregados reciclados provenientes de resíduos sólidos da construção civil para reforçar o subleito, a sub-base e a base dos pavimentos, substituindo os agregados naturais numa proporção de 1:1.

Seguindo as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2014a) e pela ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2014b), foi selecionado um horizonte temporal de análise de 100 anos. Embora os pavimentos tenham uma vida útil de 20 a 40 anos (Birgisdottir, 2005), as camadas de reforço de subleito, sub-base e base raramente sejam refeitas nesse período. Assim, um horizonte temporal de 100 anos foi considerado apropriado para capturar os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida dos materiais utilizados. Impactes que ocorram após os 100 anos não foram considerados neste estudo. A investigação abrangeu não só as emissões de CO₂, mas também outros impactes ambientais, utilizando métodos como o IPCC 2021 AR6 GWP 100a (IPCC, 2023) para avaliar o potencial de aquecimento global e o ReCiPe (Huijbregts et al., 2017) para uma análise mais abrangente das categorias de impacte ambiental.

3.4 – Fronteiras do sistema

As fronteiras do sistema para os dois cenários e as unidades funcionais são apresentadas de forma esquemática nas Figuras 2a e 2b. Para esta investigação, algumas exclusões foram necessárias, devido às limitações inerentes ao caso de estudo de uma obra já executada, o que impossibilitou a obtenção de algumas informações detalhadas.

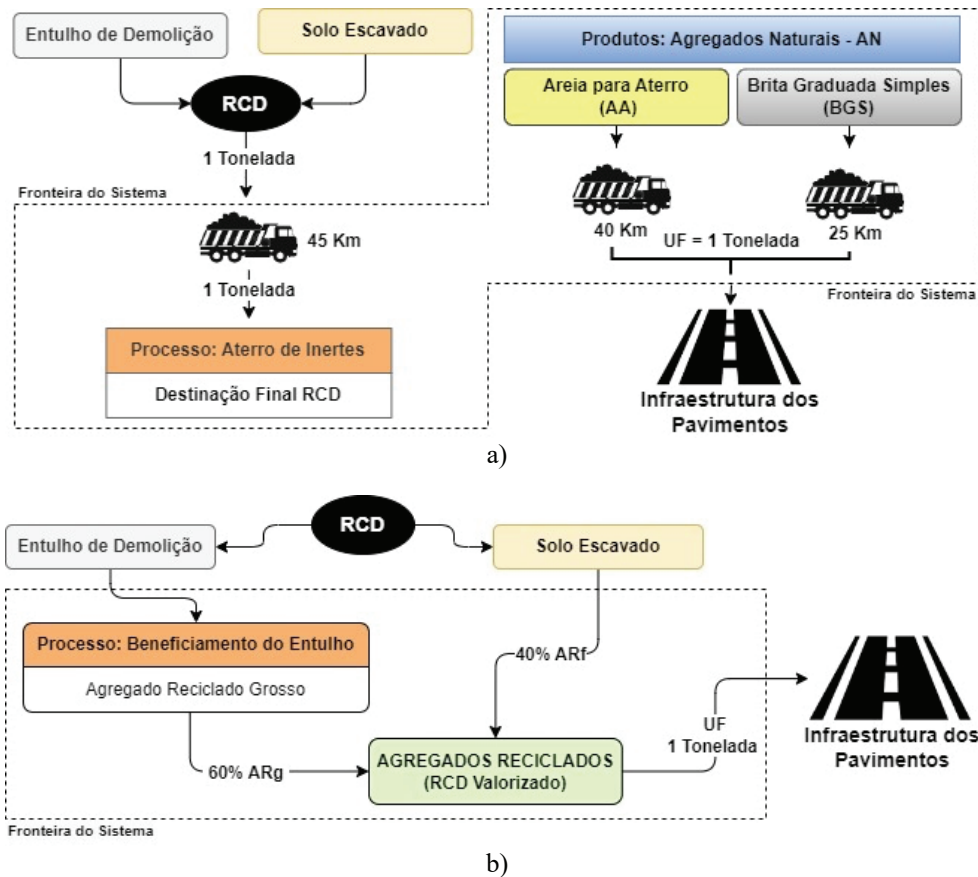


Fig. 2 – Fronteiras do sistema e unidades funcionais:
a) cenário de construção tradicional; b) cenário de construção circular.

As emissões e os respetivos impactes associados ao processo construtivo do sistema viário, incluindo as fases executivas de regularização, reforço e revestimento, não foram considerados. Da mesma forma, as movimentações de materiais e os transportes de qualquer natureza dentro do estaleiro da obra foram excluídos desta análise. Estas exclusões são justificadas pelo facto de que os impactes e as emissões destas atividades ocorreriam independentemente da utilização de agregados reciclados ou naturais, não afetando, portanto, os objetivos principais deste estudo.

Os impactes ambientais relacionados ao ciclo de vida dos galpões demolidos e ao processo de demolição foram excluídos das fronteiras do sistema, pois ocorreriam independentemente do cenário construtivo adotado. A análise concentra-se, portanto, nos processos de reciclagem e nos benefícios específicos que essa valorização proporciona.

Considerou-se o processo de beneficiamento dos resíduos de demolição realizado com equipamentos móveis, etapa realizada no próprio estaleiro da obra. Esta decisão foi baseada numa análise de viabilidade económica que apontou para esta solução, em vez de enviar os resíduos para uma unidade de beneficiamento estacionário fora da obra. Esta abordagem reduz os custos de transporte e minimiza o impacto ambiental associado ao transporte de resíduos. Adicionalmente, não foram considerados os transportes dos equipamentos de britagem (mobilização e desmobilização) na ACV, pois são atividades que, embora relevantes, não afetam significativamente o objetivo do estudo. Também os resíduos provenientes do beneficiamento do entulho de demolição não foram considerados devido à sua pequena quantidade gerada, que não tem um impacto significativo nos resultados gerais da ACV.

Estas fronteiras permitem focar a análise nos aspetos mais relevantes para a comparação entre os dois cenários, assegurando que os resultados obtidos são representativos dos benefícios e desvantagens ambientais associados ao uso de agregados reciclados gerados na obra em comparação com agregados naturais.

3.5 – Inventário do ciclo de vida (ICV)

O ICV tem como objetivo identificar e quantificar as intervenções ambientais (entradas e saídas) presentes nas fronteiras do sistema de um produto ou serviço. Nesta etapa, contabilizam-se as matérias-primas, insumos, energia, emissões para o ar, água e solo, bem como os resíduos sólidos gerados em termos da unidade funcional analisada. De acordo com a norma ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2014b), esta etapa envolve a compilação e quantificação de entradas e saídas para os sistemas estudados ao longo de seu ciclo de vida, fornecendo a base para a avaliação de impactes.

A modelagem da ACV foi desenvolvida utilizando o software SimaPro® 9.6.0.1, enquanto os inventários dos produtos e processos de suporte foram obtidos no banco de dados Ecoinvent v.3.9.1 (Wernet et al., 2016). Sempre que possível, foram utilizados dados brasileiros. Na inexistência de dados específicos do Brasil, foram utilizados produtos e processos do tipo RoW (*Rest of the World*), que abrangem a média global, excluindo os países europeus. Quando nenhum desses produtos e processos estava disponível, foram escolhidos os processos do tipo GLO (*Global*), que representam uma média para todos os países do mundo.

Os dados quantitativos dos produtos e processos analisados foram obtidos da investigação de Farias (2013). No CCT, são avaliados os impactes ambientais decorrentes do transporte e utilização dos agregados naturais (areia para aterro e brita graduada simples) até o estaleiro da obra, bem como o processo de transporte dos RCD e sua destinação final em aterros de inertes. As quantidades destes produtos e processos são detalhadas no Quadro 1.

No CCC, o processo predominante é o beneficiamento do entulho de demolição, que resulta em agregado reciclado grosso (ARg), utilizando duas instalações móveis de britagem no estaleiro da obra. O solo escavado do estaqueamento foi diretamente valorizado como agregado reciclado fino (ARf) sem beneficiamento, mas passou por inspeção visual para a remoção de impurezas (Farias, 2013). Apesar de ambos os resíduos serem convertidos em RCD valorizados, somente o beneficiamento do entulho de demolição foi contabilizado na ACV. Para garantir a viabilidade

técnica da solução, foi necessário adicionar uma pequena quantidade de brita graduada simples, cuja aquisição e transporte também foram incluídos na ACV. Os valores quantitativos dos materiais utilizados e processados estão no Quadro 2.

No contexto da análise do CCT, o transporte rodoviário de agregados naturais e RCD foi modelado para camiões basculantes com três eixos, a diesel. Considerou-se o serviço de transporte de carga de 1 tonelada por quilómetro (tkm) em um camião com capacidade até 32 toneladas de peso bruto do veículo. Como não foi possível especificar exatamente o tipo de camião utilizado durante a construção, optou-se pelo modelo de camião terrestre Euro 3 {BR} da base de dados Ecoinvent®, por ser o mais comum no Brasil.

Quadro 1 – Dados gerais para o ICV do Cenário de Construção Tradicional.

Produto / Processo	Aplicação	Tipologia do Material	Volume (m³)	M. Específica (kg/m³)	Massa (t)
Utilização de AN	Infraestrutura Viária	Areia para Aterro (AA)	39.388,00	1.500,00	59.082,00
Utilização de AN	Infraestrutura Viária	Brita Graduada Simples (BGS)	3.788,00	1.500,00	5.682,00
Aterro de Inerte	Destinação Final do RCD	Entulho de Demolição	16.830,00	1.400,00	23.562,00
Aterro de Inerte	Destinação Final do RCD	Solo Escavado do Estaqueamento	25.036,00	1.700,00	42.561,20

AN – Agregado Natural

Quadro 2 – Dados gerais para o ICV do Cenário de Construção Circular.

Produto / Processo	Aplicação	Tipologia do Material	Volume (m³)	M. Específica (kg/m³)	Massa (t)
Valorização do RCD	Infraestrutura Viária	AR Grosso (ARg)	16.830,00	1.400,00	23.562,00
Valorização do RCD	Infraestrutura Viária	AR Fino (ARf)	25.036,00	1.700,00	42.561,20
Utilização de AN	Infraestrutura Viária	Brita Graduada Simples (BGS)	11.310,00	1.500,00	1.965,00

AR – Agregado Reciclado

As distâncias médias de transporte entre a jazida de areia, a pedreira e o aterro de inertes até ao estaleiro da obra foram determinadas por referência geográfica. Estas distâncias são aproximadas, mas representam com elevada precisão as reais, visto que foram obtidas a partir de fontes georreferenciadas. Pequenas variações nas distâncias não induzem impactos significativos nos resultados da análise, dado que a influência do transporte no CCT segue uma relação proporcional e foi considerada de forma coerente dentro do modelo adotado. Os detalhes sobre o processo de transporte são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Dados sobre o transporte dos agregados naturais e RCD.

Tipologia do Material	Origem - Destino	Distância (km)
Areia para Aterro (AA)	Jazida – Estaleiro da Obra	40,00
Brita Graduada Simples (BGS)	Pedreira – Estaleiro da Obra	25,00
Resíduos de Construção e Demolição (RCD)	Estaleiro da Obra - Aterro	45,00

3.6 – Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

A AICV foi conduzida conforme norma ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2014b). Esta etapa é essencial na ACV, pois visa identificar e quantificar os potenciais efeitos ambientais associados aos sistemas estudados, correlacionando os dados do inventário com categorias de impacto ambiental e respetivos indicadores, proporcionando uma compreensão detalhada do ciclo de vida dos produtos ou serviços analisados. Neste estudo, a AICV foi conduzida no nível *midpoint* para mudanças climáticas (GWP100) utilizando o método IPCC 2021, bem como para 18 categorias adicionais de impacto utilizando o método ReCiPe 2016 (H) (Dierks et al., 2024; Huijbregts et al., 2017).

O método IPCC 2021 AR6-GWP-100a, desenvolvido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), quantifica as emissões de GEE em termos de CO₂ equivalente (CO₂-eq), frequentemente referido como fator de emissão. Este método utiliza métricas de emissões para Potencial de Aquecimento Global (GPW) e Potencial de Mudança de Temperatura Global (GTP) ao longo de um período de 100 anos para os GEE relevantes. Considera todas as fontes e sumidouros dentro das fronteiras do sistema de ciclo de vida dos produtos ou serviços avaliados, fornecendo uma visão detalhada das emissões totais de CO₂-eq.

O segundo método, ReCiPe 2016 (H), desenvolvido por universidades holandesas em colaboração com a empresa *PRé Sustainability* e o Instituto Nacional de Saúde Pública e Meio Ambiente da Holanda (Huijbregts et al., 2017), oferece uma análise abrangente dos impactos ambientais. As categorias de impacto ambiental avaliadas incluem: Potencial de Aquecimento Global (GWP), Depleção da Camada de Ozono (OD), Toxicidade Humana (HT), Ecotoxicidade Aquática de Água Doce (FE), Ecotoxicidade Aquática Marinha (ME), Ecotoxicidade Terrestre (TE), Formação de Partículas (PM), Formação de Oxidantes Fotoquímicos (POF), Acidificação Terrestre (TA), Eutrofização de Água Doce (FE), Eutrofização Marinha (ME), Eutrofização Terrestre (TE), Uso da Terra (LU), Depleção de Recursos Fósseis (FD), Depleção de Recursos Minerais (MD), Uso da Água (WU), Formação de Radicais (IR) e Depleção de Recursos Naturais (NL).

Os resultados foram obtidos em termos de duas etapas, nomeadamente caracterização e normalização. Na etapa de caracterização, as emissões e extrações de recursos (fluxos elementares) foram convertidas em categorias de impacto através de fatores de caracterização (FC). Esses FC permitem quantificar a contribuição de cada fluxo para os diferentes impactos ambientais, resultando em valores de caracterização, que refletem a pontuação ambiental associada a cada fluxo. Na etapa seguinte, normalização, os valores obtidos são contextualizados, dividindo as pontuações de impacto pela carga ambiental total de uma referência, como uma média regional ou global. Os valores normalizados são adimensionais e facilitam a comparação entre diferentes categorias de impacto, destacando as áreas mais significativas em termos ambientais (Huijbregts et al., 2017).

A combinação dos métodos IPCC 2021 e ReCiPe 2016 proporciona uma análise multifacetada e detalhada dos impactos ambientais dos cenários estudados. Esta abordagem abrangente assegura a consideração de todos os aspetos relevantes do ciclo de vida dos materiais e processos, fornecendo uma base sólida para a tomada de decisões sustentáveis no sector da construção civil. Além disso, a avaliação inclui tanto as emissões de GEE quanto uma ampla gama de outros impactos ambientais, permitindo uma compreensão completa das consequências associadas aos diferentes cenários de construção.

3.7 – Análise de sensibilidade

A AS desempenha um papel crítico na ACV, permitindo avaliar a robustez dos resultados frente à variabilidade e incerteza dos dados de entrada. No contexto da ACV, onde as escolhas de inventário, métodos de avaliação e suposições iniciais podem exercer uma influência substancial sobre os resultados, a AS se torna essencial. Este processo identifica as variáveis com maior impacto nos resultados, garantindo que as conclusões sejam fiáveis, mesmo em cenários de incerteza.

Neste estudo, a AS foi aplicada aos resultados obtidos pelo método IPCC, com foco na avaliação da pegada de carbono associada aos CCT e CCC. A escolha do método IPCC se justifica por sua ampla aceitação e pela facilidade de interpretação de seus resultados, já que a pegada de carbono é um indicador essencial para avaliar os impactos das mudanças climáticas (Dierks et al., 2024; Santolini et al., 2023; De Bortoli et al., 2023; Lucanto, 2022; Caldas et al., 2021; Scrucça et al., 2020).

A metodologia da AS consistiu na substituição dos FC utilizados neste estudo, originalmente derivados do banco de dados Ecoinvent, pelos fatores correspondentes do Sistema Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SIDAC). Para isso, foi utilizada uma folha de cálculo eletrônica, onde os valores de FC do Ecoinvent foram sistematicamente substituídos pelos valores obtidos no SIDAC para cada processo estudado. Esta substituição permitiu reavaliar os impactos ambientais considerando as especificidades do contexto brasileiro, refletidas no SIDAC.

O Ecoinvent é um banco de dados globalmente reconhecido que oferece inventários padronizados para uma ampla gama de processos. Contudo, por ser de natureza mais genérica e global, pode não capturar adequadamente as particularidades do contexto brasileiro. Por outro lado, o SIDAC foi desenvolvido especificamente para refletir as condições locais, incluindo práticas industriais, matrizes energéticas e padrões de consumo característicos do Brasil. Assim, a AS realizada visa explorar como essas diferenças nos bancos de dados influenciam os resultados da pegada de carbono nos cenários analisados.

Durante a realização da AS, cada processo identificado no inventário de ciclo de vida foi reavaliado com os FC do SIDAC. As etapas envolveram a substituição dos valores de FC no modelo original e o subsequente recálculo das emissões totais de CO₂-eq para ambos os cenários (CCT e CCC). Essa abordagem permitiu comparar diretamente os resultados obtidos com os dois bancos de dados e identificar como a escolha do inventário pode alterar as conclusões sobre o impacto ambiental. É importante ressaltar que, embora o ideal seja a utilização de dados primários na ACV, a aplicação de dados secundários validados, como os oferecidos pelo Ecoinvent e SIDAC, é amplamente aceita. Ambos os bancos de dados são amplamente utilizados na comunidade científica, proporcionando uma base sólida para a realização de ACV robustas (Thapa et al., 2023; Belizario-Silva et al., 2022; Farias et al., 2021; Rosado et al., 2017). A AS realizada neste trabalho sublinha a importância de utilizar dados representativos do contexto local para garantir a precisão e a relevância dos resultados.

Ao final da análise, os resultados foram comparados para avaliar a magnitude das mudanças nas emissões de CO₂-eq e como isso influencia a interpretação dos cenários de construção analisados. Essa etapa foi crucial para entender a robustez das conclusões obtidas inicialmente e para garantir que as decisões baseadas nesses resultados sejam informadas e adequadas ao contexto específico estudado.

3.8 – Interpretação dos resultados

A interpretação dos resultados é uma etapa fundamental na ACV, destinada a compreender e contextualizar os dados obtidos nas fases anteriores de inventário e avaliação de impacto. De acordo com as normas técnicas ABNT NBR ISO 14040 (ABNT, 2014a) e ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2014b), esta etapa envolve a análise crítica dos resultados com o objetivo de identificar e explicar as implicações ambientais e as potenciais melhorias nos processos analisados.

Nesta fase, as emissões de CO₂ e outros impactos ambientais obtidos a partir dos métodos IPCC 2021 e ReCiPe 2016, foram interpretados para fornecer uma visão abrangente dos benefícios e desvantagens de cada cenário estudado. Além disso, a AS conduzida anteriormente foi considerada para garantir a robustez e a confiabilidade dos resultados. A interpretação dos resultados permite identificar as áreas onde as práticas de construção podem ser otimizadas para reduzir os impactos ambientais e promover a sustentabilidade. Assim, discutem-se as possíveis implicações das escolhas

de materiais e processos, bem como as estratégias para a implementação de práticas mais sustentáveis no sector da construção civil.

Os resultados desta etapa foram detalhadamente apresentados e discutidos no capítulo de resultados e discussão, onde foram elaboradas conclusões finais sobre o desempenho ambiental dos cenários de construção estudados. Esta abordagem garantirá que as informações obtidas sejam utilizadas de forma efetiva para orientar futuras decisões no âmbito da construção sustentável.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Resultados da AICV para mudanças climáticas pelo método IPCC

A análise dos impactes ambientais relacionados às mudanças climáticas foi conduzida utilizando o método IPCC 2021 AR6 (GWP 100), reconhecido pela sua precisão na estimativa das emissões de GEE. Este método permitiu a identificação detalhada das pegadas de carbono associadas aos dois cenários de construção estudados, CCT e CCC.

As Figuras 3 e 4 apresentam, respetivamente, as pegadas de carbono para os cenários CCT e CCC. Estas figuras mostram claramente a contribuição de cada processo individual para as emissões totais de GEE em cada cenário.

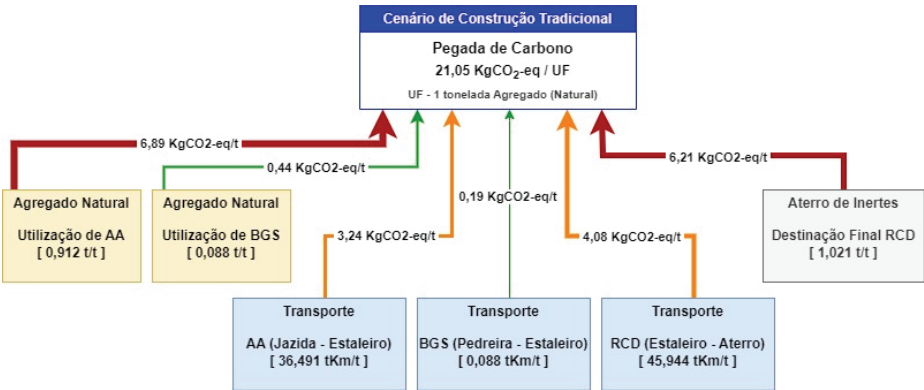


Fig. 3 – Pegada de carbono por unidade funcional para o CCT.

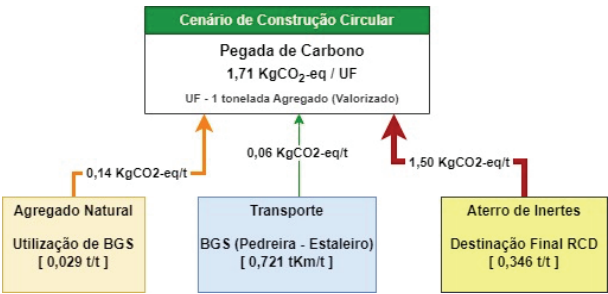


Fig. 4 – Pegada de carbono por unidade funcional para o CCC.

Na Figura 5 verifica-se que, no CCT, o transporte rodoviário de carga contribui com 35,70% do total das emissões de GEE, sendo a maior contribuição. Seguem-se a aquisição de agregados naturais (AA e BGS), que representam 34,81%, e a destinação final dos RCD em aterro de inertes, responsáveis por 29,49% das emissões. Estes dados evidenciam a importância crítica do transporte e da gestão de resíduos no ciclo de vida do CCT.

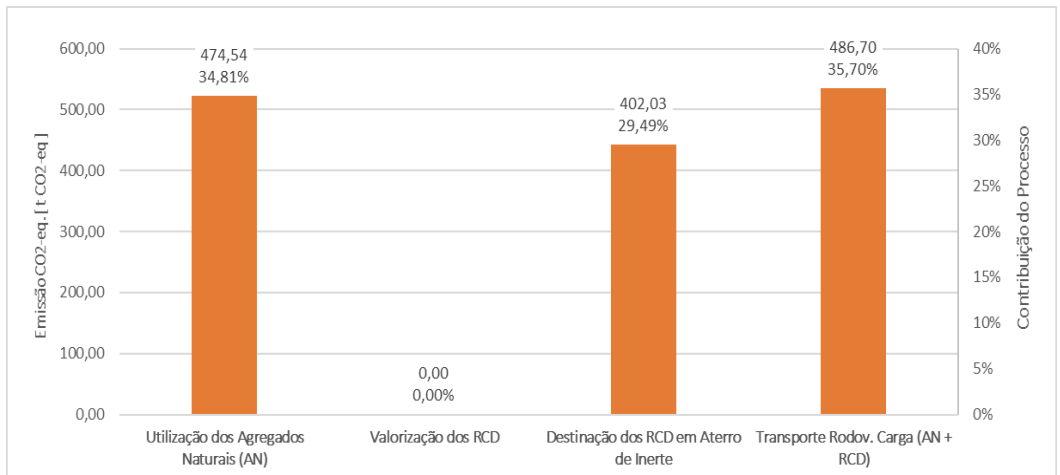


Fig. 5 – Resultados da avaliação de impactes para mudanças climáticas (GWP 100) para o CCT.

No CCC (Figura 6), a valorização dos RCD predomina como o processo principal, contribuindo com 87,80% das emissões totais. A utilização de BGS e o seu transporte representam 8,45% e 3,75%, respetivamente. Esta análise destaca o papel central do beneficiamento de resíduos na economia circular, evidenciando que, embora seja o principal processo gerador de emissões, os valores de CO2-eq emitidos são inferiores quando comparados aos métodos convencionais empregados no CCT, contribuindo assim para a mitigação das emissões.

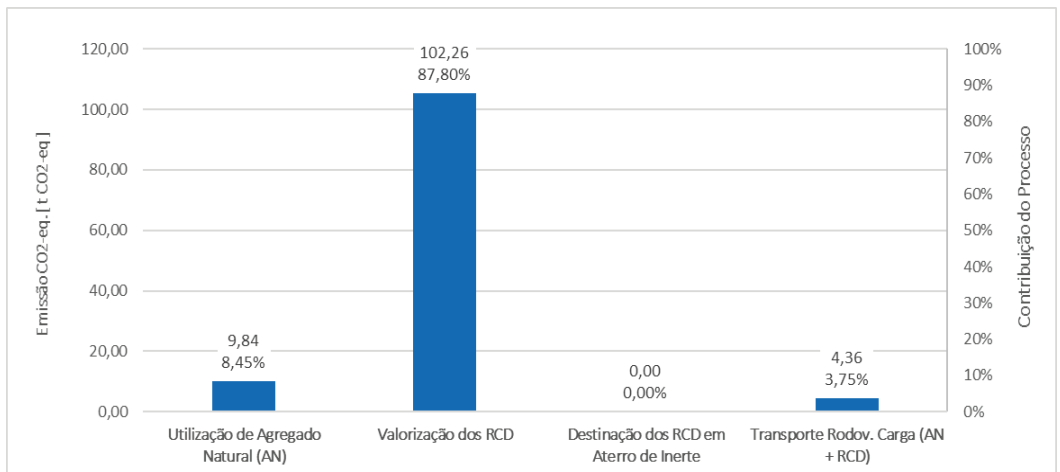


Fig. 6 – Resultados da avaliação de impactes para mudanças climáticas (GWP 100) para o CCC.

A Figura 7 mostra que a comparação entre os cenários evidencia uma redução significativa nas emissões totais no CCC em relação ao CCT. Enquanto o CCT totaliza 1.363,27 kg CO₂-eq, o CCC apresenta uma emissão significativamente menor, de 116,47 kg CO₂-eq. Essa diferença de 1.246,80 kg CO₂-eq destaca as emissões evitadas com a implementação do CCC.

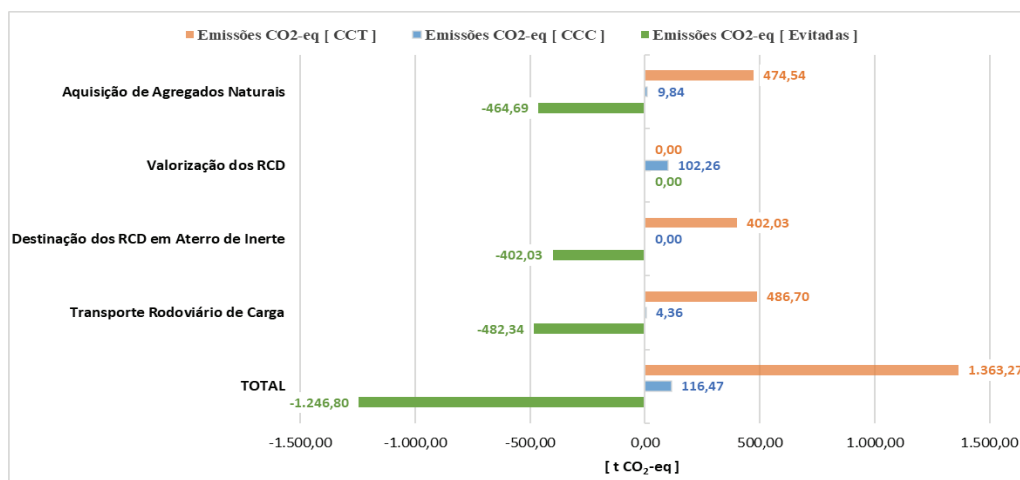


Fig. 7 – Comparação do desempenho ambiental (emissões de CO₂-eq) dos cenários estudados.

4.2 – Resultados da AICV pelo método ReCiPe 2016 (H)

O método ReCiPe 2016 (H) no nível intermediário (*midpoint*) foi utilizado para avaliar uma ampla gama de impactos ambientais, complementando a análise focada nas mudanças climáticas realizada pelo método IPCC. Este método proporciona uma análise detalhada dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos cenários CCT e CCC, organizada em duas fases principais: caracterização e normalização.

Na fase de caracterização do CCT, os resultados indicam que a categoria GWP é significativamente influenciada pelo transporte rodoviário de cargas, que contribui com 35,54% do impacto total. Em seguida, a disposição de RCD em aterro de inertes representa 29,79%, enquanto a utilização de agregados naturais, com 32,58% para AA e 2,10% para BGS, também desempenha um papel importante. Esse padrão sublinha a importância crítica do transporte e da gestão de resíduos no ciclo de vida do CCT (Figura 8).

Outras categorias como IR, POF-H, e POF-T seguem um padrão semelhante, onde o transporte de carga e a disposição de RCD dominam os impactos. Em IR, o transporte de carga contribui com 41,40% dos impactos, seguido pela disposição de RCD em aterro de inertes (37,62%), com AA e BGS a contribuírem com 17,70% e 3,28%, respectivamente. Em POF-H e POF-T, a utilização de agregados naturais e o transporte emergem como os principais fatores de impacto. Entretanto, nas categorias TE e FE-eco, o transporte de carga emerge como o processo dominante, contribuindo com 86,97% e 93,54% dos impactos, respectivamente. Esses valores destacam a importância do transporte no ciclo de vida, especialmente nas categorias relacionadas com a toxicidade, devido às emissões de poluentes como NO_x, partículas, e metais pesados, além da deposição atmosférica de substâncias químicas tóxicas, que têm efeitos adversos significativos nos ecossistemas terrestres e aquáticos.

Por outro lado, a categoria LU é principalmente afetada pela extração de areia, que contribui com 75,54% dos impactos. O resultado negativo observado nesta categoria deve-se à premissa de regeneração de terras ou restauração de ecossistemas prevista na metodologia, como a recuperação

de vegetação nativa ou a conversão de áreas degradadas, resultando em benefícios ambientais refletidos em valores negativos na caracterização. Em contraste, a categoria PMF apresenta uma distribuição mais equilibrada entre os diferentes processos, sublinhando a complexidade dos impactes associados a esta categoria.

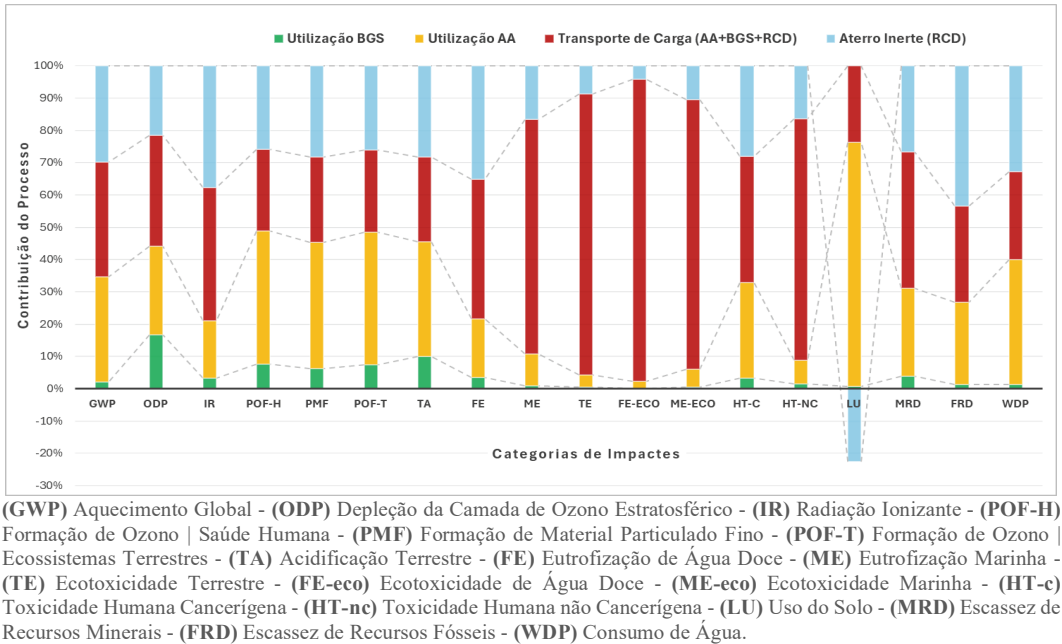
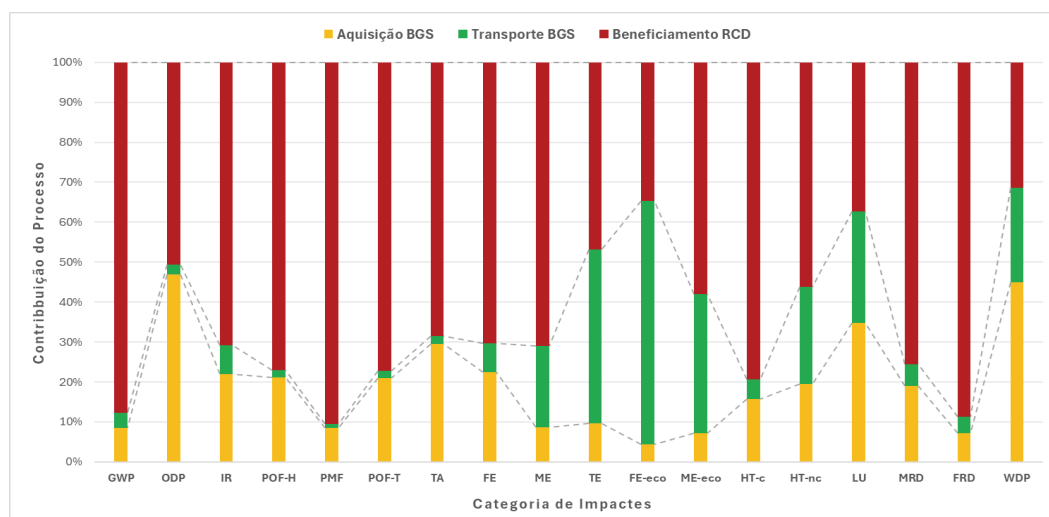


Fig. 8 – Caracterização da contribuição dos processos nas categorias de impacto no CCT.

A análise das categorias WDP e MRD é particularmente relevante no contexto da construção civil, onde o uso intensivo de recursos naturais é uma constante. Na caracterização do CCT, WDP revela que a utilização de agregados naturais (AA e BGS) contribui com 40,07% do impacto, enquanto a disposição de RCD em aterro de inertes e o processo de transporte representam 32,75% e 27,18%, respetivamente. Em MRD, o transporte de cargas é responsável por 42,14% do impacto, seguido pela utilização de agregados naturais com 31,12% e pela disposição de RCD em aterro de inertes com 26,74%. Esses resultados reforçam a necessidade de otimizar o uso de recursos e práticas de transporte para reduzir os impactes ambientais no sector da construção.

No CCC, os resultados da caracterização apresentam uma distribuição distinta em relação ao CCT, refletindo as particularidades do cenário circular, onde o processamento de resíduos assume um papel central. Na categoria GWP, o beneficiamento dos RCD é o principal contribuinte, representando 87,72% dos impactes, seguido pela utilização de BGS com 8,54% e pelo transporte com 3,73% (Figura 9).

Esse padrão sublinha a importância do processamento dos RCD no cenário circular e a sua contribuição para a mitigação dos impactes ambientais. Nas categorias IR e PMF, o beneficiamento dos RCD também domina, com 70,80% e 90,56% dos impactes, respetivamente. Isso evidencia como o processamento de resíduos, mesmo em processos mais intensivos em energia, desempenha um papel crucial na redução dos impactes associados às emissões ionizantes e à formação de material particulado fino. O transporte continua a ser uma contribuição relevante, especialmente nas categorias TE e FE-eco, onde representa 43,48% e 61,03% dos impactes, respetivamente. Essa tendência pode ser explicada pela emissão de poluentes e substâncias tóxicas durante o transporte, que afetam significativamente os ecossistemas terrestres e aquáticos.

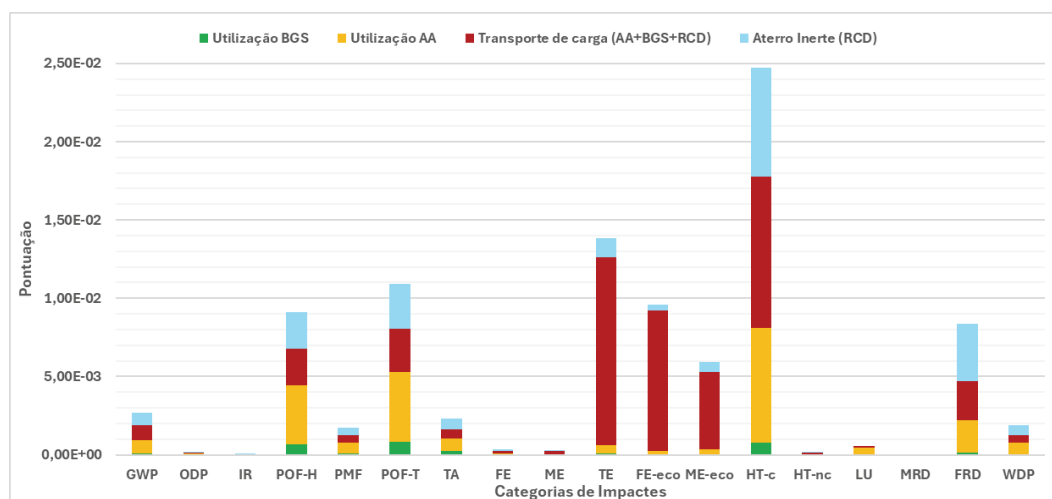


(GWP) Aquecimento Global - (ODP) Depleção da Camada de Ozono Estratosférico - (IR) Radiação Ionizante - (POF-H) Formação de Ozono | Saúde Humana - (PMF) Formação de Material Particulado Fino - (POF-T) Formação de Ozono | Ecossistemas Terrestres - (TA) Acidificação Terrestre - (FE) Eutrofização de Água Doce - (ME) Eutrofização Marinha - (TE) Ecotoxicidade Terrestre - (FE-eco) Ecotoxicidade de Água Doce - (ME-eco) Ecotoxicidade Marinha - (HT-c) Toxicidade Humana Cancerígena - (HT-nc) Toxicidade Humana não Cancerígena - (LU) Uso do Solo - (MRD) Escassez de Recursos Minerais - (FRD) Escassez de Recursos Fósseis - (WDP) Consumo de Água.

Fig. 9 – Caracterização da contribuição dos processos nas categorias de impacto no CCC.

A categoria LU apresenta uma distribuição mais equilibrada, com o beneficiamento dos RCD contribuindo com 37,28%, seguido pela aquisição de BGS com 34,77% e pelo transporte com 27,94%. Este equilíbrio reflete o impacto diversificado do uso do solo nos diferentes processos do cenário circular. Adicionalmente, nas categorias MRD e WDP, o beneficiamento dos RCD contribui significativamente para MRD (75,63%) e para WDP (31,43%), realçando a necessidade de práticas de reciclagem e reutilização que minimizem a extração de recursos naturais e o consumo de água. A aquisição de BGS, mesmo em menor quantidade, também apresenta uma contribuição relevante para WDP (44,90%), reforçando a importância de otimizar a extração e utilização de agregados naturais para mitigar os impactos ambientais associados.

Avançando para a fase de normalização, tem-se uma visão contextualizada da relevância de cada categoria de impacto e comparações diretas entre as diferentes categorias e os processos que contribuem para cada uma delas. No CCT, a normalização dos resultados (Figura 10) revela que as categorias HT-c, TE e POF-T se destacam como as mais significativas. Estes resultados indicam que os processos relacionados ao transporte de materiais têm um impacto ambiental substancial, especialmente nas áreas de toxicidade humana e na saúde dos ecossistemas. A elevada contribuição do transporte para HT-c ($2,47E-02$) e TE ($1,38E-02$) ressalta o impacto significativo das emissões de substâncias tóxicas ao longo do ciclo de vida do CCT, sugerindo a necessidade de estratégias de mitigação direcionadas à redução dessas emissões. Por outro lado, as categorias MRD e IR emergem como as menos significativas, com valores normalizados consideravelmente inferiores em comparação com outras categorias de impacto. O valor total de apenas $4,13E-07$ para MRD e $3,66E-05$ para IR sugere que, no contexto geral do CCT, os impactos relacionados à escassez de recursos minerais e à radiação ionizante não são tão predominantes quanto outras categorias. Este cenário indica que, embora estas categorias sejam relevantes, elas podem ser consideradas como prioridade secundária nas estratégias de mitigação, permitindo que os esforços sejam direcionados para áreas com maior impacto ambiental.



(GWP) Aquecimento Global - (ODP) Depleção da Camada de Ozono Estratosférico - (IR) Radiação Ionizante - (POF-H) Formação de Ozono | Saúde Humana - (PMF) Formação de Material Particulado Fino - (POF-T) Formação de Ozono | Ecossistemas Terrestres - (TA) Acidificação Terrestre - (FE) Eutrofização de Água Doce - (ME) Eutrofização Marinha - (TE) Ecotoxicidade Terrestre - (FE-eco) Ecotoxicidade de Água Doce - (ME-eco) Ecotoxicidade Marinha - (HT-c) Toxicidade Humana Cancerígena - (HT-nc) Toxicidade Humana não Cancerígena - (LU) Uso do Solo - (MRD) Escassez de Recursos Minerais - (FRD) Escassez de Recursos Fósseis - (WDP) Consumo de Água.

Fig. 10 – Normalização das categorias de impacto para o CCT.

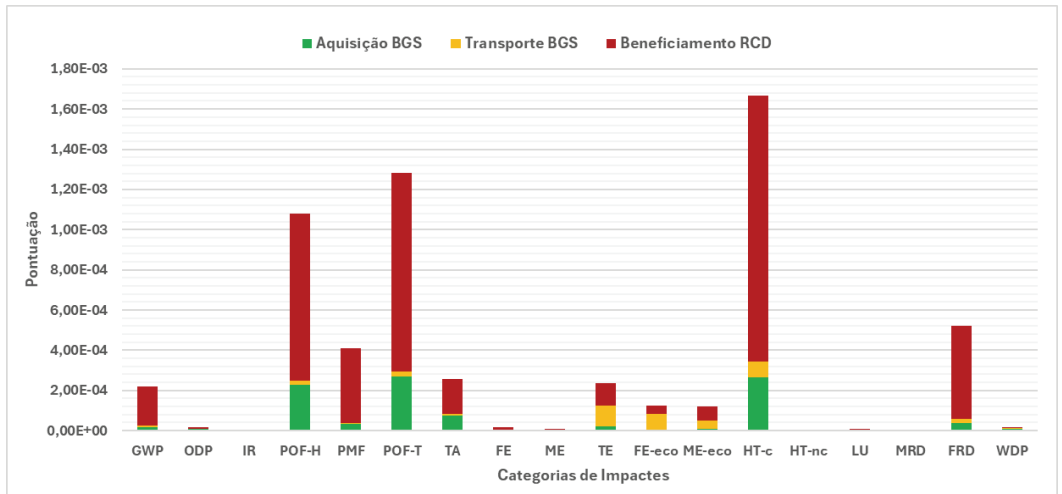
Ao analisar os resultados normalizados para o CCC (Figura 11), observa-se que a categoria HT- c permanece como a mais significativa, com um valor total de 1,67E-03, evidenciando a considerável contribuição do beneficiamento de RCD para esta categoria. Este dado reforça a importância crítica do tratamento de resíduos no contexto de uma economia circular, onde o processamento de materiais reciclados pode potencialmente liberar substâncias cancerígenas, aumentando o impacto nesta categoria. As categorias POF-T e POF-H seguem em termos de importância, com valores de 1,28E-03 e 1,08E-03, respetivamente, o que reflete a relevância das emissões que afetam tanto a saúde dos ecossistemas terrestres quanto a saúde humana.

Por outro lado, as categorias MRD e IR continuam a apresentar os valores mais baixos na normalização, com 2,73E-08 e 1,78E-06, respetivamente. Estes resultados estão em consonância com as observações feitas no CCT, confirmando que os impactos relacionados à escassez de recursos minerais e à radiação ionizante são menos expressivos no contexto geral do CCC. Isso indica que, embora sejam áreas relevantes, elas podem ser tratadas como uma prioridade secundária nas estratégias de mitigação, direcionando o foco para categorias com impactos mais substanciais, como HT-c e POF-T.

Por outro lado, as categorias MRD e IR continuam a apresentar os valores mais baixos na normalização, com 2,73E-08 e 1,78E-06, respetivamente. Estes resultados estão em consonância com as observações feitas no CCT, confirmando que os impactos relacionados à escassez de recursos minerais e à radiação ionizante são menos expressivos no contexto geral do CCC. Isso indica que, embora sejam áreas relevantes, elas podem ser tratadas como uma prioridade secundária nas estratégias de mitigação, direcionando o foco para categorias com impactos mais substanciais, como HT-c e POF-T.

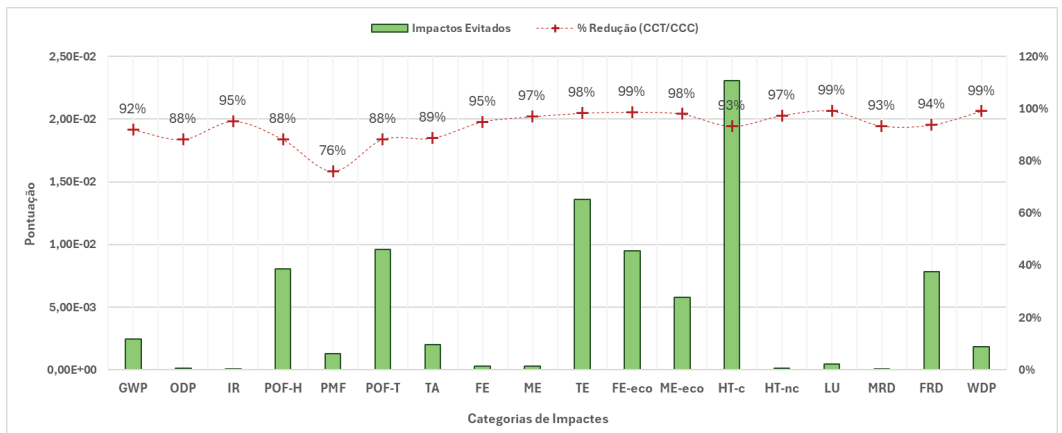
Após a apresentação dos resultados normalizados para os CCT e CCC em termos absolutos, torna-se pertinente aprofundar a análise comparativa para avaliar as diferenças nos impactos ambientais entre os dois cenários. Esta comparação sublinha as reduções de impacto obtidas com a transição do CCT para o CCC, destacando a eficácia do modelo de economia circular na mitigação dos efeitos ambientais adversos. A Figura 12 ilustra as pontuações de redução e os respetivos

percentuais de diminuição dos impactos ambientais para cada categoria. Nota-se que o CCC oferece significativas vantagens em diversas categorias de impacto. A maior redução foi verificada na categoria de LU, com uma diminuição de 99,07%, seguida pelo WDP, que apresentou uma redução de 99,02%. Estes resultados indicam a alta eficácia do CCC na preservação de recursos naturais críticos.



(GWP) Aquecimento Global - (ODP) Depleção da Camada de Ozono Estratosférico - (IR) Radiação Ionizante - (POF-H) Formação de Ozono | Saúde Humana - (PMF) Formação de Material Particulado Fino - (POF-T) Formação de Ozono | Ecossistemas Terrestres - (TA) Acidificação Terrestre - (FE) Eutrofização de Água Doce - (ME) Eutrofização Marinha - (TE) Ecotoxicidade Terrestre - (FE-eco) Ecotoxicidade de Água Doce - (ME-eco) Ecotoxicidade Marinha - (HT-c) Toxicidade Humana Cancerígena - (HT-nc) Toxicidade Humana não Cancerígena - (LU) Uso do Solo - (MRD) Escassez de Recursos Minerais - (FRD) Escassez de Recursos Fósseis - (WDP) Consumo de Água.

Fig. 11 – Normalização das categorias de impacto para o CCC.



(GWP) Aquecimento Global - (ODP) Depleção da Camada de Ozono Estratosférico - (IR) Radiação Ionizante - (POF-H) Formação de Ozono | Saúde Humana - (PMF) Formação de Material Particulado Fino - (POF-T) Formação de Ozono | Ecossistemas Terrestres - (TA) Acidificação Terrestre - (FE) Eutrofização de Água Doce - (ME) Eutrofização Marinha - (TE) Ecotoxicidade Terrestre - (FE-eco) Ecotoxicidade de Água Doce - (ME-eco) Ecotoxicidade Marinha - (HT-c) Toxicidade Humana Cancerígena - (HT-nc) Toxicidade Humana não Cancerígena - (LU) Uso do Solo - (MRD) Escassez de Recursos Minerais - (FRD) Escassez de Recursos Fósseis - (WDP) Consumo de Água.

Fig. 12 – Comparação da Redução de Impactes Ambientais entre o CCT e CCC.

Em relação às categorias ME-eco e FE-eco, os percentuais de redução foram de 97,96% e 98,70%, respetivamente. Esses resultados evidenciam a menor carga de poluentes liberados no ambiente aquático no cenário circular, comparado ao tradicional, reforçando o papel da economia circular na proteção dos ecossistemas aquáticos. O GWP, uma métrica crucial para medir os impactos das mudanças climáticas, apresentou uma redução de 91,90% no CCC em comparação ao CCT. Este dado é de particular relevância, dado que o GWP é uma das categorias mais críticas na avaliação dos impactos ambientais relacionados ao sector da construção. A significativa redução nas emissões de GEE demonstra o benefício de adotar práticas circulares para mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Além disso, as categorias relacionadas à toxicidade, como HT-c e HT-nc, mostraram reduções de 93,26% e 97,38%, respetivamente, ao comparar o CCC com o CCT. Tais resultados indicam que o cenário circular contribui significativamente para a redução de riscos à saúde humana associados à exposição a substâncias tóxicas.

4.3 – Análise de sensibilidade

A AS realizada demonstrou que a escolha do banco de dados de inventário influencia significativamente a avaliação da pegada de carbono nos CCT e CCC. Essa análise é essencial para avaliar a robustez dos resultados de uma ACV, especialmente ao se considerarem variáveis críticas como os FC.

No CCT, a substituição dos dados do Ecoinvent pelos do SIDAC resultou em variações consideráveis na contribuição percentual dos processos em termos de emissões totais de CO₂-eq. Com o Ecoinvent, a utilização dos AN representava 34,81% do total das emissões, enquanto o transporte de cargas e a destinação dos RCD em aterros de inertes contribuíam com 35,70% e 29,49%, respetivamente. No entanto, ao aplicar os dados do SIDAC, a contribuição da utilização de AN aumentou para 47,24%, enquanto o transporte de cargas e a destinação de RCD apresentaram reduções para 27,96% e 24,80%, respetivamente (Figura 13). Esse aumento na contribuição dos AN deve-se ao facto de que o FC para o processo de extração de areia, conforme registado no SIDAC, apresenta um impacto mais elevado nas emissões de CO₂-eq em comparação com o Ecoinvent.

No CCC, o impacto da mudança de banco de dados é ainda mais pronunciado. A valorização dos RCD, que inicialmente representava 87,80% das emissões totais de CO₂-eq com o Ecoinvent, reduziu-se para 66,06% com o SIDAC. Consequentemente, as contribuições da utilização de AN e do transporte de cargas aumentaram de 8,45% para 20,21% e de 3,75% para 13,73%, respetivamente. Essa redistribuição ocorre porque o FC para o processo de valorização dos RCD é significativamente menor no SIDAC em comparação com o Ecoinvent, levando a um aumento relativo na contribuição dos demais processos, apesar de uma redução observada no FC para o transporte de cargas e para a utilização da BGS. Em termos gerais, o aumento no FC foi verificado exclusivamente no processo de utilização de areia.

Além disso, ao comparar as emissões totais para ambos os cenários, observa-se que as emissões calculadas com o SIDAC são superiores às obtidas com o Ecoinvent no CCT (1.620,79 tCO₂-eq em comparação a 1.363,27 tCO₂-eq), enquanto no CCC, as emissões calculadas com o SIDAC são inferiores às obtidas com o Ecoinvent (45,40 tCO₂-eq em comparação a 116,47 tCO₂-eq). Esse contraste indica que, embora o SIDAC indique para um maior impacto ambiental no cenário tradicional, também destaca de forma mais acentuada os benefícios da economia circular, com uma redução de emissões mais significativa no CCC (97,20% de redução com o SIDAC contra 91,46% com o Ecoinvent) (Figura 14).

Esta AS sublinha a importância de se avaliar a fiabilidade dos resultados de uma ACV ao se alterarem variáveis importantes, como os FC. Apesar das variações significativas observadas, com destaque para o aumento da contribuição da utilização de areia e a redução do impacto da valorização dos RCD, os resultados continuam a demonstrar que a adoção de práticas sustentáveis e de economia circular resulta em benefícios ambientais substanciais.

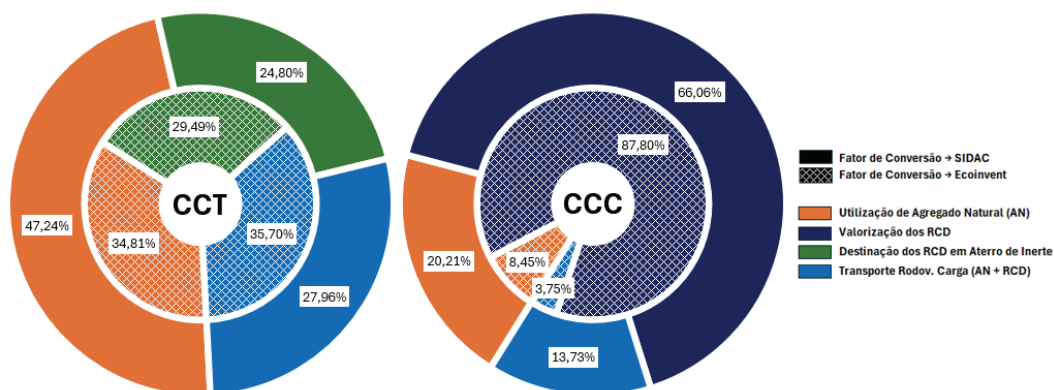


Fig. 13 – Análise de sensibilidade: variação nos fatores de contribuição dos processos em função da alteração do banco de dados de inventário.

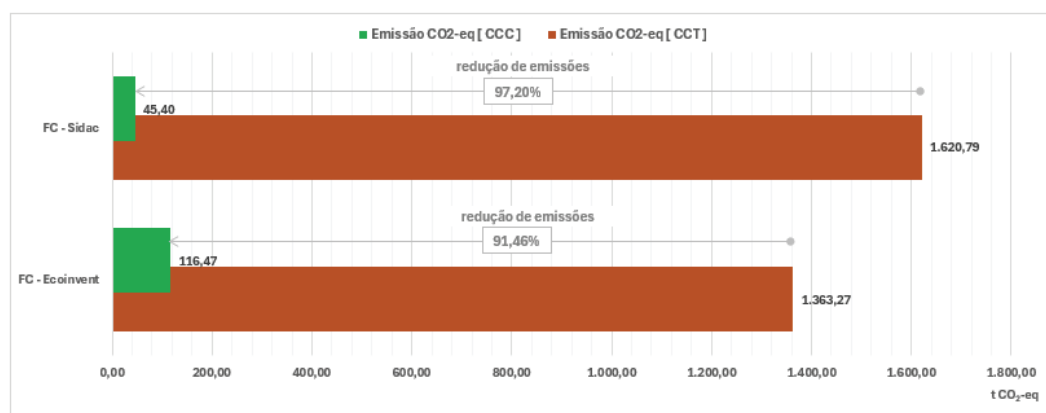


Fig. 14 – Análise de sensibilidade: emissões totais nos CCT e CCC com a alteração do banco de dados de inventário.

4.4 – Discussão dos resultados

A análise dos resultados evidencia, de forma clara, a eficácia do CCC, em comparação com o CCT, na mitigação dos impactos ambientais, confirmando o potencial transformador da economia circular no sector da construção civil. Este resultado corrobora o crescente corpo de literatura que sublinha os benefícios ambientais da reciclagem de RCD em práticas construtivas sustentáveis.

Os resultados obtidos pelo método IPCC 2021 AR6, que avalia o potencial de aquecimento global, revelaram uma redução significativa, em cerca de 91%, nas emissões de GEE ao adotar o CCC em relação ao CCT. Este dado é particularmente relevante ao ser comparado com estudos semelhantes, como os de Zhao et al. (2021), que também relataram reduções substanciais nas emissões de CO₂ com a integração de práticas de economia circular. Além disso, a substituição de agregados naturais por reciclados evitou a extração de aproximadamente 0,9 toneladas de areia e 0,1 tonelada de brita por tonelada de RCD, resultados que estão em consonância com as conclusões de Rosado et al. (2017), que apontaram uma redução na extração de 0,2 toneladas de areia por tonelada de RCD reciclado.

Considerando a análise pelo método ReCiPe 2016 (H), os resultados reforçam ainda mais a superioridade ambiental do CCC. As categorias de uso do solo e consumo de água destacaram-se com reduções de aproximadamente 99% em comparação com o CCT. Estes resultados evidenciam não apenas uma menor necessidade de novas áreas para a extração de recursos, mas também uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos. Estas conclusões estão alinhadas com a literatura, que reconhece a economia circular como uma estratégia essencial para a preservação dos recursos naturais em contextos de crescente escassez, conforme apontado nos estudos de Korhonen et al. (2018) e Geissdoerfer et al. (2017).

Comparando os resultados obtidos para o GWP entre os métodos IPCC e ReCiPe, observam-se valores muito próximos: o método IPCC indicou 21,05 kgCO₂-eq/t para o CCT e 1,71 kgCO₂-eq/t para o CCC, enquanto o ReCiPe apresentou 21,519 kgCO₂-eq/t para o CCT e 1,7441 kgCO₂-eq/t para o CCC. Essa convergência de resultados reforça a confiabilidade das conclusões obtidas, apesar das variações metodológicas inerentes a cada abordagem, sublinhando a consistência das reduções significativas de emissões de GEE no CCC. A normalização dos resultados pelo ReCiPe revelou uma redução significativa em todas as categorias de impacto, especialmente na categoria de toxicidade humana, com uma redução em cerca de 93%. Este resultado está em sintonia com estudos que demonstram os benefícios da utilização de RCD na mitigação dos impactos tóxicos ao longo do ciclo de vida dos materiais (Azam et al., 2024; Dierks et al., 2024; Santolini et al., 2024; Chen et al., 2021; Penteado e Rosado, 2016; Chowdhury et al., 2010).

Vale destacar que, ao contrário de outros estudos, este trabalho não contabilizou a geração de resíduos no processo de beneficiamento dos RCD, devido à baixa quantidade gerada e à ausência de dados precisos, conforme documentado em Farias (2013). No entanto, essa exclusão não compromete a fiabilidade deste estudo, uma vez que a quantidade de resíduos gerados durante o beneficiamento foi mínima e não teria impacto significativo nos resultados. Adicionalmente, os impactos ambientais positivos frequentemente relatados em estudos similares, como a reciclagem de componentes ferrosos e de madeira, também não foram considerados devido à falta de informações detalhadas. Estes fatores, apesar de não estarem incluídos, não colocam em risco a validade das conclusões aqui apresentadas, mas sim reforçam a necessidade de maior precisão na recolha de dados para futuras ACV. É igualmente importante observar que o impacto da mobilização e da desmobilização dos equipamentos móveis utilizados para o processamento dos resíduos de demolição não foi contabilizado, conforme justificado anteriormente. Embora o uso de equipamentos móveis movidos a diesel seja uma prática comum, essa escolha contribui, significativamente, para o aumento dos impactos ambientais relacionados ao consumo de combustíveis fósseis. Alternativamente, centrais de beneficiamento em instalações externas, que geralmente utilizam eletricidade, tendem a reduzir esses impactos diretos, mas introduzem desafios adicionais, como o aumento do consumo de combustível e dos impactos ambientais associados ao transporte dos RCD para a central e dos agregados reciclados de volta ao local de uso. Estudos apontaram a inviabilidade econômica do uso de centrais externas para o beneficiamento de RDC, conforme relatado por Farias (2013), além de destacar o aumento significativo do tráfego de caminhões entre o estaleiro da obra e a central externa, especialmente numa área urbana já saturada, o que levou à opção por equipamentos móveis, apesar dos impactos ambientais adicionais.

A AS realizada reforça a robustez dos resultados, demonstrando como a escolha do banco de dados de inventário pode influenciar significativamente as conclusões de uma ACV. A substituição dos fatores de contribuição do Ecoinvent pelos do SIDAC, que reflete as especificidades brasileiras, resultou em uma maior redução das emissões de CO₂-eq no CCC, sublinhando a importância de utilizar dados regionais para aumentar a precisão e a relevância das análises ambientais (Belizario-Silva et al., 2022; Bueno, 2014). Mesmo com as variações nos fatores de contribuição, o CCC manteve-se superior em termos de redução de impactos ambientais, comprovando a fiabilidade dos resultados obtidos.

Este estudo contribui, significativamente, para a evidência científica de que a economia circular não só é viável, mas essencial para mitigar os impactos ambientais na construção civil. Alinhando-

se às tendências globais de minimização de impactes e de conservação dos recursos naturais, os resultados apresentados fornecem uma base sólida para futuras iniciativas de sustentabilidade no sector. No caso do centro comercial estudado, a adoção de premissas sustentáveis ainda na fase de projeto permitiu ao empreendimento a conquista da certificação AQUA (Alta Qualidade Ambiental) tornando-o o primeiro centro comercial da América Latina a obter essa distinção no processo de Construção Nova (RioMar Recife, 2018).

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo evidenciou a eficácia da aplicação dos princípios da economia circular no sector da construção civil, ao comparar abordagens tradicionais com práticas sustentáveis através da ACV aplicada à pavimentação do RioMar Shopping. Os resultados mostraram uma redução de cerca de 91% nas emissões de GEE no CCC, equivalente à retirada de aproximadamente 270 veículos das estradas por um ano ou ao sequestro de carbono de cerca de 125 hectares de floresta tropical, uma área equivalente a 175 campos de futebol. Estes dados destacam os notáveis benefícios ambientais dessa abordagem.

Além disso, o cenário circular apresentou uma redução de 99% no consumo de água, o que economizou cerca de 32 mil metros cúbicos. Esta quantidade seria suficiente para abastecer uma cidade de médio porte durante quatro dias ou para a produção de 160 mil metros cúbicos de betão. A eficiência no uso de recursos hídricos torna-se ainda mais relevante em regiões que enfrentam escassez crescente de água.

Outro aspeto relevante do CCC foi a redução substancial das distâncias percorridas por camiões no transporte de materiais. A utilização de RCD diretamente no local da obra eliminou a necessidade de cerca de 390 mil quilómetros de transporte, o que corresponde a 225 viagens entre Rio de Janeiro e São Paulo, no Brasil, ou a cerca de 650 viagens entre Porto e Lisboa, em Portugal. Esta medida resultou em menores emissões de GEE, menor desgaste das infraestruturas rodoviárias e menor consumo de combustíveis fósseis.

A substituição de agregados naturais por materiais reciclados contribuiu para uma redução de 90% na extração de areia e de 10% na de brita, aliviando significativamente a pressão sobre os recursos naturais. O estudo confirma, assim, que é possível aliar alto desempenho ambiental à viabilidade económica, consolidando a sustentabilidade nos projetos de construção civil.

A pavimentação, tradicionalmente uma atividade intensiva no uso de recursos naturais e fortemente emissora de gases poluentes devido ao uso de equipamentos movidos a combustíveis fósseis, demonstrou poder beneficiar amplamente de práticas mais sustentáveis, como a reciclagem de RCD. No CCC, esta alternativa mostrou ser uma solução viável, tanto ambientalmente, como economicamente.

O uso de misturas de solo e RCD beneficiado também proporcionou melhorias significativas nas propriedades mecânicas dos materiais, além de reduzir em cerca de 89% os custos de pavimentação nas áreas onde foram aplicados os resíduos valorizados. Embora o processo de reciclagem de RCD envolva certos impactes, como consumo de energia e emissões, a análise de sensibilidade realizada demonstrou que os benefícios ambientais superam largamente os impactes adversos, especialmente quando se utilizam dados regionais e inventários primários.

Conclui-se, portanto, que a economia circular é uma abordagem eficaz para promover o desenvolvimento sustentável na geotecnia, designadamente em atividades de pavimentação. As reduções significativas nas emissões, no consumo de água, nos custos de transporte e no uso de recursos naturais comprovam que práticas sustentáveis podem ser implementadas de forma eficiente, contribuindo para um futuro mais equilibrado e ambientalmente consciente.

6 – AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 DOI 10.54499/UIDB/04708/2020 e Financiamento Programático - UIDP/04708/2020 DOI 10.54499/UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

Agradece-se ao RioMar Shopping pela disponibilização do caso de estudo, o que foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Também se agradece à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE-UACSA) pelo suporte financeiro que possibilitou a realização deste trabalho.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2019). M 319-02 - *Standard Specification for Reclaimed Concrete Aggregate for Unbound Soil-Aggregate Base Course. M 319-19*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- ABNT (2021). NBR 15116 - *Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 16 p.
- ABNT (2014a). NBR ISO 14040 - *Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 21 p.
- ABNT (2014b). NBR ISO 14044 - *Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 46 p.
- ABNT (2004). NBR 15115 - *Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 10 p.
- ABREMA (2023). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023*. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, 51 p. Disponível em: https://www.abrema.org.br/wp-content/uploads/dlm_uploads/2024/03/Panorama_2023_P1.pdf (Acesso em 05 de julho de 2024).
- Angulo, S. C.; Oliveira, L. S.; Machado, L. C. (2022). *Pesquisa setorial ABRECON 2020: A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil*. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, SP, Brasil. <https://doi.org/10.11606/9786589190103>
- ASTM (2015). ASTM D6155-15 - *Standard Specification for Nontraditional Coarse Aggregates for Bituminous Paving Mixtures*. ASTM International, West Conshohocken, PA, EUA.
- Azam, A.; Gabr, A.; Ezzat, H.; Arab, M.; Alshammari, T. O.; Zeiada, W. (2024). *Life cycle assessment and pavement performance of recycled aggregates in road construction*. Case Studies in Construction Materials, 20, e03062. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03062>
- Bayram, B.; Greiff, K. (2023). *Life cycle assessment on construction and demolition waste recycling: A systematic review analyzing three important quality aspects*. International Journal of Life Cycle Assessment, 28, 967–989. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02145-1>
- Belizario-Silva, F.; Oliveira, L. S.; Reis, D. C.; Pato, G. T. G.; Marinho, A. C.; Degani, C.; Caldas, L. R.; Punhagui, K. R. G.; Pacca, S. A.; John, V. (2022). *Sistema de informação do desempenho ambiental da construção: uma ferramenta para incorporar indicadores ambientais na*

construção civil brasileira. In: Anais do 19º Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Canela, RS, Brasil. <https://doi.org/10.46421/entac.v19i1.2034>

Birgisdottir, H. (2005). *Life cycle assessment model for road construction and use of residues from waste incineration*. Institute of Environment & Resources, Technical University of Denmark, 45 p. ISBN 87-89220-92-7. Disponível em: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/life-cycle-assessment-model-for-road-construction-and-use-of-resi> (Acesso em 23 de julho de 2024).

Borracheiro, M. V.; Payá, J.; Brito, S.; Segura, Y. P.; Soriano, L.; Tashima, M. M.; Monzó, J. M. (2022). *Reusing construction and demolition waste to prepare alkali-activated cement*. Materials, 15, 3437. <https://doi.org/10.3390/ma15103437>

BSI (2016). BIS. IS 383:2016 - *Coarse and Fine Aggregate for Concrete - Specification*. Bureau of Indian Standards, Nova Deli.

Bueno, C. (2014). *Avaliação de ciclo de vida na construção civil: análise de sensibilidade*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos. <https://doi.org/10.11606/T.102.2014.tde-10112014-144911>

Caldas, L. R.; Saraiva, A. B.; Lucena, A. F. P.; Da Gloria, M. Y.; Santos, A. S.; Filho, R. D. T. (2021). *Building materials in a circular economy: The case of wood waste as CO₂-sink in bio concrete*. Resources, Conservation and Recycling, 166, 105346. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105346>

CalRecycle (2021). *Construction and Demolition (C&D) Diversion Informational Guide*. Disponível em: <https://calrecycle.ca.gov/lgcentral/library/canddmodel/> (Acesso em 23 de julho de 2024).

Cardoso, R.; Silva, R. V.; Brito, J.; Dhir, R. (2016). *Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review*. Waste Management, 49, pp. 131–145. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.021>

CEN (2008a). EN 13242:2002+A1:2007 - *Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction*. Comité Européen de Normalisation, Bruxelas, Bélgica.

CEN (2008b). EN 12620:2002+A1:2008 - *Aggregates for concrete*. Comité Européen de Normalisation, Bruxelas, Bélgica.

Chen, K.; Wang, J.; Yu, B.; Wu, H.; Zhang, J. (2021). *Critical evaluation of construction and demolition waste and associated environmental impacts: A scientometric analysis*. Journal of Cleaner Production, 287, 125071. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125071>

Chowdhury, R.; Apul, D.; Fry, T. (2010). *A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction*. Resources, Conservation and Recycling, 54 (4), 250–255. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.007>

Comissão Europeia (2020). *Plano de Ação para a Economia Circular*. Disponível em: https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en (Acesso em 23 de julho de 2024).

CSA (2019). A23.1-19 - *Concrete materials and methods of concrete construction*. Canadian Standards Association, Toronto.

De Bortoli, A.; Baouch, Y.; Masdan, M. (2023). *BIM can help decarbonize the construction sector: Primary life cycle evidence from pavement management systems*. Journal of Cleaner Production, 391, 136056. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136056>

- Dierks, C.; Hagedorn, T.; Mack, T.; Zeller, V. (2024). *Consequential life cycle assessment of demolition waste management in Germany*. *Frontiers in Sustainability*, 5. <https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1417637>
- Ellen MacArthur Foundation (2019a). *Completing the picture: How the circular economy tackles climate change*. Ellen MacArthur Foundation. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/climate/overview> (Acesso em 23 de julho de 2024).
- Ellen MacArthur Foundation (2019b). *Artificial Intelligence and the circular economy: AI as a tool to accelerate the transition*. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/artificial-intelligence-and-the-circular-economy> (Acesso em 23 de julho de 2024).
- Eurostat (2022). *Generation of waste by economic activity*. Disponível em: <https://doi.org/10.2908/TEN00106> (Acesso em 20 de julho de 2024).
- Fanijo, E. O.; Kolawole, J. T.; Babafemi, A. J.; Liu, J. (2023). *A comprehensive review on the use of recycled concrete aggregate for pavement construction: Properties, performance, and sustainability*. *Cleaner Materials*, 9, 100199. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100199>
- Farias, A. B. (2013). *Análise técnica e econômica de resíduos de construção e demolição aplicados em pavimentação*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.
- Farias, L. N.; Rocha, J. H. A.; Caldas, L. R.; Filho, R. D. T. (2021). *Avaliação dos impactos ambientais de concretos e argamassas contendo materiais cimentícios suplementares (MCS) e agregados reciclados (AR) por meio da avaliação do ciclo de vida (ACV): Uma revisão da literatura*. Encontro Latino-Americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 290–303.
- Geissdoerfer, M.; Savaget, P.; Bocken, N. M. P.; Hultink, E. J. (2017). *The Circular Economy – A new sustainability paradigm*. *Journal of Cleaner Production*, 143, pp. 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Ginga, C. P.; Ongpeng, J. M. C.; Daly, M. K. M. (2020). *Circular economy on construction and demolition waste: A literature review on material recovery and production*. *Materials*, 13, 2970. <https://doi.org/10.3390/ma13132970>
- Huijbregts, M. A. J.; Steinmann, Z. J. N.; Elshout, P. M. F.; Stam, G.; Veronesi, F.; Vieira, M.; Zipj, M.; Hollander, A.; Zelm, R. V. (2017). *ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level*. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22 (2), pp. 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- IPCC (2023). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- JIS (2018). A 5021:2018 - *Recycled aggregate for concrete-class H*. Japanese Standards Association, Tóquio.
- Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M. (2017). *Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions*. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, pp. 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>

- Korhonen, J.; Nuur, C.; Feldmann, A.; Birkie, S. E. (2018). *Circular economy as an essentially contested concept*. Journal of Cleaner Production, 175, pp. 544–552. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.111>
- Koroxenidis, E.; Karanafti, A.; Tsikaloudaki, K.; Theodosiou, T. (2023). *Towards the digitalization and automation of circular and sustainable construction and demolition waste management – project RECONMATIC*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1196, 012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1196/1/012044>
- Lee, J. C.; Edil, T. B.; Benson, C. H. (2010). *Quantitative assessment of environmental and economic benefits of recycled materials in highway construction*. Transportation Research Record, 2158 (1), pp. 138–142. <https://doi.org/10.3141/2158-17>
- Leite, F. C.; Motta, R. S.; Vasconcelos, K. L.; Bernucci, L. (2011). *Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements*. Construction and Building Materials, 25 (6), pp. 2972–2979. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105>
- Lucanto, D. (2022). *Advanced Circular Design, a Life Cycle Approach: Methods and Tools for an Eco-Innovative Life Cycle Approach for Buildings Energy and Resource Optimization*. In: Calabrò, F., Della Spina, L., & Piñeira Mantiñán, M.J. (Eds.), New Metropolitan Perspectives, Lecture Notes in Networks and Systems. Springer International Publishing, Cham, pp. 1870–1878. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06825-6_180
- Marinković, S.; Radonjanin, V.; Malešev, M.; Ignjatović, I. (2010). *Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete*. Waste Management, 30 (11), pp. 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>
- Ng, S.; Engelsen, C. J. (2018). *Construction and demolition wastes*. In: Siddique, R., & Cachin, P. (Eds.), Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete, Woodhead Publishing, pp. 229–255. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00008-0>
- Park, T. (2003). *Application of construction and building debris as base and subbase materials in rigid pavement*. Journal of Transportation Engineering, 129 (5), pp. 558–563. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2003\)129:5\(558\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:5(558))
- Paz, C. F.; Biela, R.; Punhagui, K. R. G.; Possan, E. (2023). *Life cycle inventory of recycled aggregates derived from construction and demolition waste*. Journal of Material Cycles and Waste Management, 25, pp. 1082–1095. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01594-y>
- Penteado, C. S. G.; Rosado, L. P. (2016). *Comparison of scenarios for the integrated management of construction and demolition waste by life cycle assessment: A case study in Brazil*. Waste Management & Research, 34 (10), pp. 1026–1035. <https://doi.org/10.1177/0734242X16657605>
- Pereira, P. M.; Vieira, C. S. (2022). *A literature review on the use of recycled construction and demolition materials in unbound pavement applications*. Sustainability 14, 13918. <https://doi.org/10.3390/su142113918>
- Portugal. (2020). *Decreto-Lei n.º 102-D/2020 de 10 de dezembro – Regime geral da gestão de resíduos, o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e altera o regime da gestão de fluxos específicos de resíduos, transpondo as Diretivas (UE) 2018/849, 2018/850, 2018/851 e 2018/852*. Diário da República, 1.ª série, n.º 239 (Suplemento), pp. 2-(1)–2-(62). Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/102-d-2020-150908012> (Acesso em 23 de julho de 2024).

- Pourkhorshidi, S.; Sangiorgi, C.; Torreggiani, D.; Tassinari, P. (2020). *Using recycled aggregates from construction and demolition waste in unbound layers of pavements*. Sustainability 12, 9386. <https://doi.org/10.3390/su12229386>
- RioMar Recife (2018). *Socioambiental*. Disponível em: <https://vivariomarrecife.com.br/socioambiental/> (Acesso em 5 de agosto de 2024).
- Robayo-Salazar, R.; Valencia-Saavedra, W.; Gutiérrez, R. M. (2022). *Reuse of powders and recycled aggregates from mixed construction and demolition waste in alkali-activated materials and precast concrete units*. Sustainability 14, 9685. <https://doi.org/10.3390/su14159685>
- Rosado, L. P.; Vitale, P.; Penteado, C. S. G.; arena, U. (2017). *Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil*. Journal of Cleaner Production, 151, pp. 634–642. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.068>
- Santolini, E.; Tarsi, G.; Torreggiani, D.; Sangiorgi, C. (2024). *Towards more sustainable infrastructures through circular processes: Environmental performance assessment of a case study pavement with recycled asphalt in a life cycle perspective*. Journal of Cleaner Production, 448, 141380. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141380>
- Santolini, E.; Bovo, M.; Barbaresi, A.; Torreggiani, D.; Tassinari, P. (2023). *LCA of virgin and recycled materials to assess the sustainability of paved surfaces in agricultural environment*. Journal of Cleaner Production, 393, 136291. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136291>
- Scrucca, F.; Ingrao, C.; Maalouf, C.; Moussa, T.; Polidori, G.; Messineo, A.; Arcidiacono, C.; Asdrubali, F. (2020). *Energy and carbon footprint assessment of production of hemp hurds for application in buildings*. Environmental Impact Assessment Review, 84, 106417. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106417>
- Shi, X.; Mukhopadhyay, A.; Zollinger, D.; Grasley, Z. (2019). *Economic input-output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete aggregate*. Journal of Cleaner Production, 225, pp. 414–425. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.288>
- Standards Australia (2014). AS 2758.1:2014 - *Aggregates and rock for engineering purposes - Concrete aggregates*. Standards Australia, Sydney.
- Tefa, L.; Bianco, L.; Blengini, G. A.; Bassani, M. (2022). *Integrated and comparative Structural-LCA analysis of unbound and cement-stabilized construction and demolition waste aggregate for subbase road pavement layers formation*. Journal of Cleaner Production, 352, 131599. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131599>
- Terán-Cuadrado, G.; Sbahieh, S.; Tahir, F.; Nurdawati, A.; Almarshoud, M. A.; Al-Ghamdi, S. G. (2024). *Evaluating the influence of functional unit on life cycle assessment (LCA) reliability of concrete*. Materials Today: Proceedings. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.04.079>
- Thapa, I.; Baral, N. P.; Adhikari, K. R. (2023). *Comprehensive review of LCA studies in Civil Engineering*. BIBECHANA, 20 (3), 326–338. <https://doi.org/10.3126/bibechana.v20i3.58552>
- União Europeia (2008). *Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de novembro de 2008 relativa aos resíduos e que revoga determinadas diretivas (Diretiva 2008/98/CE)*. Jornal Oficial da União Europeia, L312/3.
- United Nations Environment Programme (2024). *Global Status Report for Buildings and Construction - Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>

- Vieira, C. S.; Pereira, P. M. (2015). *Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review*. Resources, Conservation and Recycling, 103, pp. 192–204. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.023>
- Visintin, P.; Xie, T.; Bennett, B. (2020). *A large-scale life-cycle assessment of recycled aggregate concrete: The influence of functional unit, emissions allocation and carbon dioxide uptake*. Journal of Cleaner Production, 248, 119243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119243>
- Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E.; Weidema, B. (2016). *The Ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 21 (9), pp. 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- World Green Building Council (2021). *Beyond The Business Case*. Disponível em: <https://viewer.ipaper.io/worldgbc/beyond-the-business-case/?page=20> (Acesso em 19 de julho de 2024).
- Zhang, J.; Ding, L.; Li, F.; Peng, J. (2020). *Recycled aggregates from construction and demolition wastes as alternative filling materials for highway subgrades in China*. Journal of Cleaner Production, 255, 120223. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120223>
- Zhao, Y.; Goulias, D.; Tefa, L.; Bassani, M. (2021). *Life cycle economic and environmental impacts of CDW recycled aggregates in roadway construction and rehabilitation*. Sustainability, 13 (15), 8611. <https://doi.org/10.3390/su13158611>