



Campus São Mateus
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO



AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE AGREGADOS RECICLADOS APLICADOS A MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO DE BASE CIMENTÍCIA

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF RECYCLED AGGREGATES APPLIED TO CEMENT-BASED CONSTRUCTION MATERIALS

EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE ÁRIDOS RECICLADOS APLICADOS A MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN A BASE DE CEMENTO

Lukas Bruno Damazio Bello ^{1*} & João Luiz Calmon ²

^{1,2} Universidade Federal do Espírito Santo

^{1*} lukasdbello@gmail.com ² calmonbarcelona@gmail.com

ARTIGO INFO.

Recebido: 25.04.2024

Aprovado: 14.05.2024

Disponibilizado: 11.06.2024

PALAVRAS-CHAVE: ACV; Sustentabilidade; RCD; Agregado Reciclado.

KEYWORDS: LCA; Sustainability; CDW; Recycled Aggregates.

PALABRAS CLAVE: ACV; sostenibilidad; RCD; Áridos Reciclados.

*Autor Correspondente: Bello, L. B. D.

RESUMO

Os Agregados Reciclados (AR) emergem como uma solução para diminuir os impactos ambientais convertendo Resíduos da Construção e Demolição (RCD) em material de construção. O objetivo geral da pesquisa é realizar uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do uso de AR para a produção de materiais de construção civil à base de cimento, visando avaliar a influência do AR nos indicadores de impactos ambientais. Ao todo foram utilizados 24 traços para o uso do AR; em argamassas, blocos pré-fabricados, concreto sem fins estruturais, estruturais e autoadensáveis. Foi utilizado o programa OpenLCA para o cálculo dos impactos ambientais por meio de 5 diferentes métodos de impacto. Ao analisar o Inventário de Ciclo de Vida e interpretar os resultados da ACV nota-se que a produção de AR se apresenta como solução viável ambientalmente em relação ao material referência desde que os impactos evitados pela reciclagem sejam contabilizados. O transporte de RCD é o principal responsável pelos impactos gerados. O material reciclado se mostrou ambientalmente viável em diversos teores de substituição tendo obtido reduções de até 43,6% nos indicadores. O AR tem potencial para substituir os Agregados Naturais (AN) em quase todos os cenários analisados.

ABSTRACT

Recycled Aggregates (RA) emerge as a solution to reduce environmental impacts by converting Construction and Demolition Waste (CDW) into construction material. The general objective of the research is to carry out a Life Cycle Assessment (LCA) of the use of RA for the production of cement-based construction materials, aiming to evaluate the influence of RA on environmental impact indicators. In total, 24 traits were used for the use of RA; in mortars, prefabricated blocks, non-structural, structural and self-

compacting concrete. The OpenLCA program was used to calculate environmental impacts using 5 different impact methods. When analyzing the Life Cycle Inventory and interpreting the LCA results, it is noted that the production of RA presents itself as an environmentally viable solution in relation to the reference material as long as the impacts avoided by recycling are accounted for. CDW transport is mainly responsible for the impacts generated. The recycled material proved to be environmentally viable at various replacement levels, achieving reductions of up to 43.6% in indicators. RA has the potential to replace Natural Aggregates (NA) in almost all scenarios analyzed.

RESUMEN

Los Áridos Reciclados (AR) surgen como una solución para reducir los impactos ambientales al convertir los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en material de construcción. El objetivo general de la investigación es realizar un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) del uso de AR para la producción de materiales de construcción a base de cemento, con el objetivo de evaluar la influencia de la AR en los indicadores de impacto ambiental. En total, se utilizaron 24 rasgos para el uso de AR; en morteros, bloques prefabricados, hormigones no estructurales, estructurales y autocompactantes. Se utilizó el programa OpenLCA para calcular los impactos ambientales utilizando 5 métodos de impacto diferentes. Al analizar el Inventario del Ciclo de Vida e interpretar los resultados del ACV, se observa que la producción de AR se presenta como una solución ambientalmente viable en relación al material de referencia, siempre que se tengan en cuenta los impactos evitados por el reciclaje. El transporte RCD es el principal responsable de los impactos generados. El material reciclado demostró ser ambientalmente viable en varios niveles de reposición, logrando reducciones de hasta un 43,6% en los indicadores. La RA tiene el potencial de sustituir a los Agregados Naturales (AN) en casi todos los escenarios analizados.

1 INTRODUÇÃO

Em 2021, foi coletado nos municípios brasileiros mais de 48 milhões de toneladas de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), o que representou um aumento de 2,9% em comparação com o ano anterior. A média, em 2021, de coleta por habitante foi de 227 kg por ano, sendo que a maior parte corresponde a resíduos abandonados em vias públicas e logradouros. Pouco mais da metade dos RCD coletados no Brasil vem da região Sudeste, cerca de 52% (ABRELPE, 2022).

A construção civil está sempre buscando formas de tornar os processos mais sustentáveis, assim os Agregados Reciclados (AR) emergem como uma solução para diminuir os impactos ambientais convertendo RCD em recursos (Zhang et al., 2019). Os RCD têm diversas origens — restos da construção civil, demolição de edificações em final da vida, reconstrução de estradas — e podem ser convertidos em agregados que substituem o uso de matéria-prima natural em várias aplicações (Di Maria et al., 2018).

Além disso, a reciclagem de RCD é uma importante fonte de materiais para a construção civil, o que pode ser uma alternativa econômica e sustentável para a indústria da construção. Portanto, é importante que a coleta e o tratamento de RCD sejam priorizados e regulamentados de forma eficaz (Braga et al., 2017; Brasil, 2022; Waskow et al., 2021).

Com o aumento da consciência ambiental e a busca por soluções sustentáveis, a utilização de materiais reciclados na construção civil tem se tornado cada vez mais comum. O AR pode ser utilizado na composição de concreto para fins estruturais e não estruturais, argamassas, artefatos pré-fabricados como blocos de vedação e pavimentação, além de camadas de pavimentação como base, sub-base e reforço (Agrela et al., 2021; Alzard et al., 2021; Grabois et al., 2020; Mariaková et al., 2022; Menegatti et al., 2022).

Contudo a produção de AR pode gerar impactos negativos ao meio ambiente devido ao consumo de energia, à presença de contaminantes e pelo consumo de combustível fóssil para transporte (Colangelo et al., 2021). Deve-se então considerar minuciosamente cada etapa de produção, observando-se as peculiaridades de cada sistema. Para avaliar e quantificar os impactos ambientais, a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) preconizada pela série ISO 14000 é utilizada em diversos estudos (Marinković et al., 2023; Zhang et al., 2019).

A ACV é uma técnica que permite ao pesquisador avaliar os impactos relacionados às diversas fases do ciclo de vida de um produto ou processo, desde a extração das matérias-primas até o seu fim de vida sendo um importante instrumento para avaliar os impactos da utilização de Agregados Reciclados (Ding et al., 2016; Xing et al., 2022). Devido à importância das questões ambientais, diversas empresas e centros de pesquisa estão aperfeiçoando suas práticas de desenvolvimento sustentável. Esse movimento é incentivado por agências de controle ambiental e pela mídia, que refletem o interesse global em diminuir os impactos ambientais para preservar a qualidade dos ecossistemas e assegurar uma melhor qualidade de vida para todos os seres vivos (Vieira et al., 2016).

2 METODOLOGIA

Este presente estudo, segue como base a metodologia ACV, definida pelas normas NBR 14040 (ABNT, 2014a) e NBR 14044 (ABNT, 2014b), que consiste em 4 fases: a) Definição do objetivo e escopo; b) Análise de inventário; c) Avaliação do impacto do ciclo de vida e d) interpretação.

2.1 DEFINIÇÃO DO ESCOPO E OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é realizar a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do uso de AR para a produção de materiais de construção civil à base de cimento, visando avaliar a influência do AR nos indicadores de impactos ambientais.

A Unidade Funcional (UF), com o intuito de manter certa uniformidade, será de 1m³ para as análises comparativas dos traços, independente do material de construção civil avaliado. Para as análises de produção de agregado também será utilizada a unidade de 1m³.

Portanto, todas as entradas do sistema de produto são expressas em relação a esta UF. Dessa forma no inventário de ciclo de vida, entradas como: tonelada de RCD, metro cúbico de água, MJ de energia, dentre outros, serão contabilizadas com o intuito de originar 1m³ de cada traço. Isso também se faz necessário para garantir comparabilidade dos resultados da ACV com outros trabalhos.

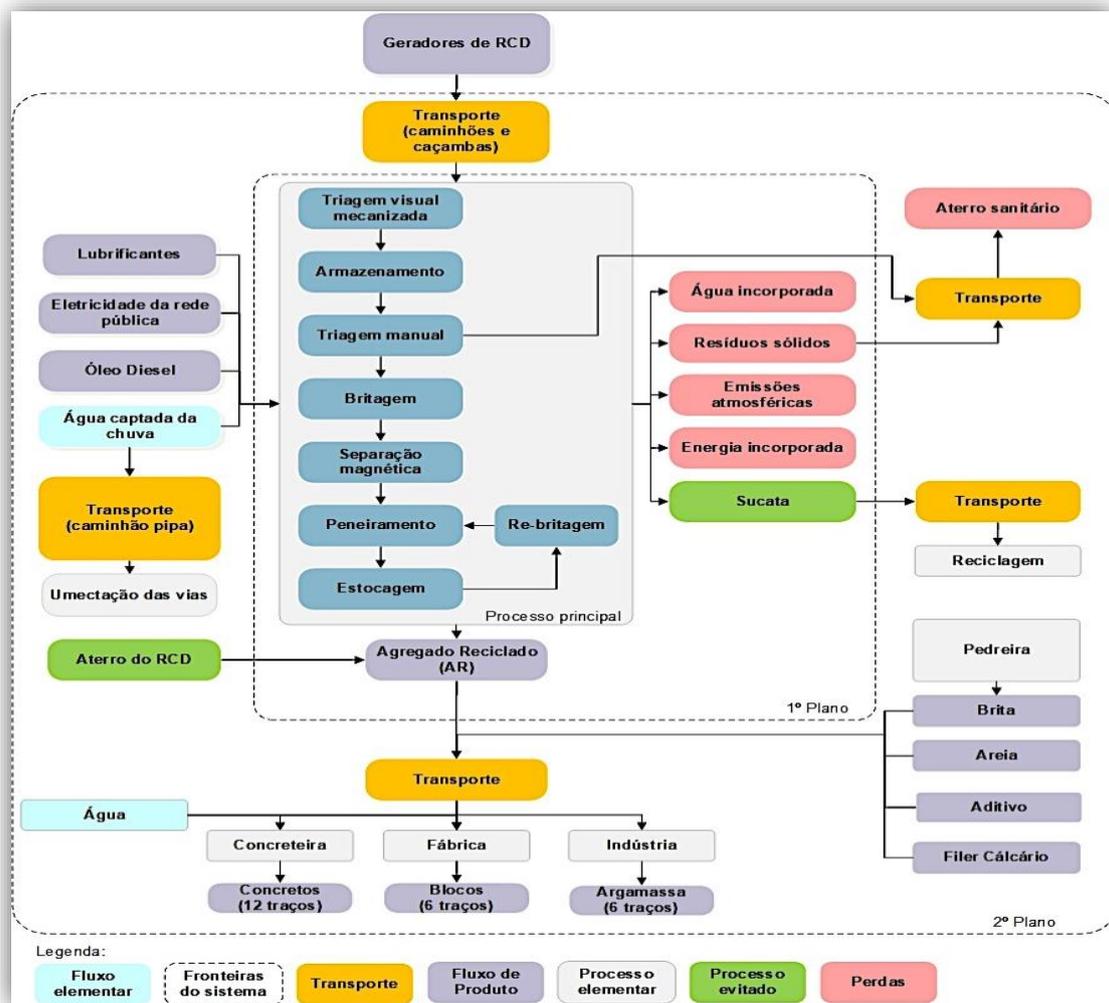
Além disso, foi realizada uma análise comparativa considerando os impactos de 1 m³ dos traços dividido pela resistência à compressão axial aos 28 dias como referência para os indicadores de impacto avaliados. Isso resultou em uma análise da "intensidade dos indicadores", evidenciando o impacto do volume de material necessário para alcançar 1 MPa de resistência à compressão (Vieira et al., 2018; Zulcão et al., 2020). É importante ressaltar que os materiais em questão possuem aplicações distintas, portanto, a comparação deve ser feita exclusivamente entre as misturas compostas pelo mesmo material, e não entre diferentes materiais.

2.1.1 FRONTEIRAS DO SISTEMA

No que se refere ao ciclo de vida dos AR, inicialmente, são coletados RCD dos canteiros de obras e pontos viciados que são transportados para as plantas de reciclagem, onde passam por processos de beneficiamento, triagem, separação magnética, peneiramento e por fim são estocados para na sequência serem transportados para o uso. A Figura 1 ilustra um fluxograma das fronteiras de primeiro e segundo plano do sistema principal em estudo, que consiste nos fluxos e processos de coleta do RCD até a produção dos 24 traços de materiais de construção civil.

A fronteira do sistema estudado é denominada "do berço ao canteiro" (*cradle-to-site*), isto é, nela considera-se as etapas do ciclo de vida do sistema cobrindo: coleta de matéria-prima, beneficiamento e transporte do material até o ponto de uso. Os dados de primários consistem naqueles coletados durante a visita e relativos à operação da usina de reciclagem de RCD.

Figura 1. Fronteira do sistema



Fonte: Autores (2023). Nota: 6 Traços de Argamassa, 6 Traços de Blocos pré-fabricados, 4 traços de Concreto Convencional, 4 traços de concreto com fins estruturais, 4 traços de concreto autoadensável. Cada material de construção tem um traço referência produzido com 100% de agregado natural dentre os citados anteriormente.

2.1.2 OBJETIVOS DE QUALIDADE DOS DADOS DO INVENTÁRIO

Os *Data Quality Goals* (DQG) para este estudo são apresentados a seguir:

- Representatividade temporal: Ano de 2023;
- Representatividade geográfica: Serra – Estado do Espírito Santo;
- Representatividade tecnológica: Tecnologia disponível no mercado brasileiro;
- Confiabilidade dos dados: Ordem de prioridade como fonte dos dados: 1) Dados verificados baseados em medidas ou fornecidos/informados por empresa por meio de formulários; 2) Dados verificados parcialmente baseados em estimativas ou dados não verificados baseados em medidas; 3) Dados disponíveis na base de dados Ecoinvent
- Integridade dos dados: Dados representativos do mercado de construção civil no ramo de plantas de reciclagem.

Com base no DQG, atribuem-se os *Data Quality Indicators* (DQI's) para os fluxos dos processos, em que os dados são categorizados de 1 a 5, sendo 1 o dado mais representativo (Weidema & Wesnaes, 1996; Weidema et al., 2013).

2.1.3 SELEÇÃO DOS TRAÇOS

A fim de avaliar a influência da substituição de agregado natural pelo reciclado nos materiais de construção precisou-se montar um banco de dados de traços para atingir o objetivo da pesquisa. Para isto foram selecionados artigos no portal de periódicos da capes com as seguintes palavras-chave e operadores booleanos: “*Recycled Aggregate*” AND “*Construction and demolition waste*” OR “*CDW*” AND “*Concrete*” OR “*OR “Mortar” OR “Brick” OR “Block”*” com os seguintes filtros: revisado por pares, artigos de periódicos com classificação Qualis Capes A, na língua inglesa e nos últimos 10 anos. Foi selecionado apenas 1 artigo para cada material de construção, que continha informações sobre o teor de substituição, resistência a compressão aos 28 dias, traço em massa para produção de 1m³, e traço referência com 100% de agregado natural.

Tabela 1. Resumo dos traços a serem utilizados

Fonte	Nome do traço	Cimento (kg)	Brita (kg)	AR (kg)	Areia (kg)	Aditivo (kg)	Filer (kg)	Água (kg)	Res. Comp. 28 dias (MPa)	% subst.
Argamassa (1m³)										
(Fang et al., 2022)	RSA0	214	-	0	1460	-	-	310	5,86	0
	RSA20	214	-	292	1168	-	-	310	5,91	20
	RSA40	214	-	584	876	-	-	310	6,19	40
	RSA60	214	-	876	584	-	-	310	6,16	60
	RSA80	214	-	1168	292	-	-	310	6,27	80
	RSA100	214	-	1460	0	-	-	310	6,25	100
Bloco (1m³)										
(Attri et al., 2022)	CR0	421	756	0	1108	1,67	-	156	56,9	0
	CR15	421	643	113	1108	1,67	-	156	52,4	15
	CR30	421	526	227	1108	1,67	-	156	50,2	30
	CR45	421	416	340	1108	1,67	-	156	47,3	45
	CR60	421	302	454	1108	1,67	-	156	41,56	60
	CR75	421	189	567	1108	1,67	-	156	34,24	75
Concreto não estrutural (1m³)										
(Zhang et al., 2023)	NC30	291	1169	0	780	-	-	160	38,85	0
	RC30-TR-R25	291	877	292	780	-	-	160	33,19	25
	RC30-TR-R50	291	584	585	780	-	-	160	31,64	50
	RC30-TR-R100	291	0	1169	780	-	-	160	27,55	100
Concreto estrutural (1m³)										
(Thomas et al., 2016)	0	300	1002	0	926	1,35	-	175	36,5	0
	20	300	800	280	900	1,5	-	175	36,7	20
	50	300	500	560	900	1,95	-	175	37,7	50
	100	300	0	1115	800	2,1	-	175	38,4	100
Concreto autoadensável (1m³)										
(Fiol et al., 2018)	CC30	250	1150	0	650	1,7	320	112	49,9	0
	CC30-20%	250	820	250	650	1,7	320	112	49,98	20
	CC30-50%	250	540	540	670	2,25	320	112	55,64	50
	CC30-100%	250	0	1040	720	2,85	320	112	56,75	100

Fonte: Autores (2024).

Ao final, foram extraídos 24 traços dos 5 artigos escolhidos, com aplicações em material cimentício com diversos teores de substituição conforme resumo apresentado na Tabela 1. A pesquisa pretende mostrar qual das aplicações apresenta o melhor desempenho ambiental e analisar os cenários propostos.

2.2 INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

Para coletar dados sobre a reciclagem do Resíduo da Construção e Demolição (RCD), foi conduzida uma visita técnica à instalação de reciclagem da empresa Vila Recicla, Serra/ES-Brasil, (Figura 2), esta usina recebe em torno de 60 mil toneladas de RCD a cada ano de seus parceiros comerciais (Construtoras de médio porte).

Figura 2. Visão geral da planta de reciclagem de resíduos da construção civil



Fonte: Autores (2023).

A planta de produção de agregados reciclados visitada possui comandos elétricos para operação (Figura 3a). O processo de beneficiamento dos resíduos começa com a pá carregadeira alimentando o sistema, na sequência o material passa pela esteira onde é realizada a triagem manual onde possíveis contaminantes são retirados, como metais, plásticos e papelão (Figura 3b). Após triagem, o resíduo passa pelo britador de mandíbula (Figura 3c) caindo em uma outra esteira onde é feita a separação magnética (Figura 3d), caso haja algum metal aderido ao resíduo este será separado em uma caçamba e posteriormente enviado para reciclagem própria.

Figura 3. Planta de reciclagem. (a) Comando elétrico (b) Esteira de triagem (c) Britador de mandíbula (d) separador magnético



Fonte: Autores (2023).

Por fim, o peneiramento (Figura 4a) é a última etapa de produção do AR, o agregado é distribuído em diversas granulometrias e depositados em pilhas. Todavia, os agregados de maior granulometria, os rachões, por conveniência da empresa recicladora, podem passar por uma outra esteira que leva a um segundo britador mandíbula realimentando a planta para

obter agregados de menor tamanho nominal (Figura 4b). Na Figura 4c pode-se visualizar o Agregado Reciclado pronto, separado em diversas granulometrias: areia, brita e rachão, já na Figura 4d encontram-se os resíduos retirados da triagem manual e da separação magnética.

Figura 4. Planta de reciclagem. (a) Peneiramento (b) Rebritador (c) Agregado reciclado (d) Coproduto



Fonte: Autores (2023).

A empresa, hoje, vende o produto na forma de uma mistura de diferentes granulometrias contendo agregado graúdo e miúdo, para uso em sub-bases, principalmente de pisos industriais, porém vê crescer o interesse no uso desse tipo de reciclado em outras aplicações. Para os outros dados e cenários foram utilizados dados encontrados na literatura (Mello, 2018; Rosado et al., 2017; 2019) que foram completados por dados da base Ecoinvent na versão 3.6 disponibilizada pelo grupo de pesquisa ACVamb (Quadro 1).

Quadro 1. Resumo do Inventário de Ciclo de Vida

Processo principal	Fluxo	Qte.	UN	Fonte
RCD (1kg)	Transporte	20	kg*km	Estimativa fornecida por empresa de logística
Reciclagem de sucata (1kg)	Produção de aço de baixa liga	1	kg	Ecoinvent 3.6
	Transporte	9,9	kg*km	Estimado via Google Maps.
Aterro (1kg)	Transporte	22	kg*km	Estimado via Google Maps.
	Aterro sanitário	1	kg	Ecoinvent 3.6
Agregado reciclado (1kg)	RCD	1,01	kg	Fornecido por Vila Recicla
	Água coleta da chuva	0,03278	kg	Fornecido por Vila Recicla
	Óleo lubrificante	1,65E-5	g	Fornecido por Vila Recicla
	Reciclagem de sucata	0,005	kg	Fornecido por Vila Recicla
	Energia elétrica	0,00141	kWh	Fornecido por Vila Recicla
	Caminhão a diesel (basculante)	2,416E-5	h	Fornecido por Vila Recicla
	Escavação à diesel	0,0013	m ³	Fornecido por Vila Recicla
Caminhão a diesel (pipa)	1,51E-5	h	Fornecido por Vila Recicla	
Agregado reciclado (1kg)	Transformação de solo para área industrial	0,03278	m ²	Fornecido por Vila Recicla
	Ocupação de terra para área industrial	1,373E-5	m ² a	Fornecido por Vila Recicla
	Sucata	-0,005	kg	Fornecido por Vila Recicla
	Aterro sanitário (sucata) evitado	0,005	kg	Fornecido por Vila Recicla
	Aterro sanitário (RCD) evitado	-0,99	kg	Fornecido por Vila Recicla
Aterro sanitário (impurezas não recicláveis)	0,005	kg	Fornecido por Vila Recicla	
Agregado Natural - Brita (1kg)	Granito	1,05	kg	Rosado et al. 2017
	Água de Poço	8,07E-03	dm ³	Rosado et al. 2017
	Ocupação do Solo	1,34E-03	m ² a	Ecoinvent 3.6
	Explosivos	1,45E-04	kg	Ecoinvent 3.6
	Energia elétrica	3,72E-03	kWh	Ecoinvent 3.6
	Diesel	8,28E-03	MJ	Ecoinvent 3.6
Óleo Lubrificante	6,00E-03	g	Ecoinvent 3.6	

	Transporte interno	1	kg*km	Ecoinvent 3.6
	Particulados, <2.5 um	6,08E+06	kg	Ecoinvent 3.6
	Particulados, >2.5 um, e <10 um	5,89E-05	kg	Ecoinvent 3.6
	Particulados, >10 um	1,59E-04	kg	Ecoinvent 3.6
	Instalações	4,16E-9	m ²	Rosado et al. 2017
	Correias transportadoras	3,9E-9	m	Ecoinvent 3.6
	Máquina industrial	5,8E-6	kg	Ecoinvent 3.6
	Ocupação de lago artificial	9,824E-6	m ² *a	Ecoinvent 3.6
	Ocupação de terra para extração mineral	0,00134	m ² *a	Ecoinvent 3.6
	Aço de baixa liga	3,16E-5	kg	Rosado et al. 2017
	Borracha sintética	8,91E-6	kg	Rosado et al. 2017
	Transformação de terra	3,07E-6	m ²	Rosado et al. 2017
	Transformação de terra para lago artificial	1,228E-7	m ²	Rosado et al. 2017
	Transformação de terra para extração mineral	2,9472E-6	m ²	Rosado et al. 2017
	Sucata	3,16E-5	kg	Rosado et al. 2017
	Resíduo de óleo mineral	8,56E-6	kg	Rosado et al. 2017
	Resíduo de borracha	2,05E-5	kg	Rosado et al. 2017
Aditivo (1kg)	Não modificado no Ecoinvent	Variável	kg	Ecoinvent 3.6
Areia (1kg)	Extração de areia	Variável	kg*km	Ecoinvent 3.6
	Transporte	Variável	kg	Estimado via Google Maps.
Filer calcário (1kg)	Extração de calcário britado e moído	Variável	kg	Ecoinvent 3.6
	Energia elétrica	0,06334	kWh	Zulcão (2018)
	Transporte	Variável	kg*km	Estimado via Google Maps.
Cimento (1kg)	Variável	Variável	kg	Ecoinvent 3.6
	Transporte	Variável	kg*km	Estimado via Google Maps.
Concreteira (1m ³ do traço)	Energia elétrica	5,05	kWh	Zulcão (2018)
	Diesel	26,73	MJ	Zulcão (2018)
Indústria de argamassa (1m ³ do traço)	Energia elétrica	6,768	kWh	Zulcão (2018)
	Empacotamento	1,7	t	Aproximado pelo rótulo da embalagem
Fábrica de blocos (1m ³ do traço)	Energia elétrica	0,63	kWh	CSM (2018)
	Energia elétrica	14,6	kWh	Evangelista, Rosado e Penteadó (2018)

Fonte: Autores (2024). Nota: RCD (Resíduo da construção e demolição).

2.2.1 DISTÂNCIAS DE TRANSPORTES

As informações a respeito de cada insumo, o modo de transporte utilizado e as distâncias entre os fornecedores dos componentes dos materiais até o local de produção, são detalhadas no Quadro 2. Foram escolhidas para a produção dos traços, fábricas reais localizadas próximas à planta de reciclagem. É importante observar que o transporte foi avaliado apenas no sentido de ida, ou seja, da origem até o local de produção.

Quadro 2. Distâncias de transporte

Produção do Agregado Reciclado			
Material	Origem (Cidade/Estado)	Destino (Cidade/Estado)	Distância (Km)
Água	Coleta de água da chuva	Vila Recicla (Serra/ES)	-
RCD	Empreendimento parceiros (Serra/ES)	Vila Recicla (Serra/ES)	20
Sucata	Vila Recicla (Serra/ES)	Recicladora (Serra/ES)	9,9
Aterro Sanitário	Vila Recicla (Serra/ES)	Aterro (Cariacica/ES)	32,5
Produção das argamassas			
Água	Rede de abastecimento local	Indústria (Cariacica/ES)	-
Areia (AN)	Jazida (Linhares/ES)	Indústria (Cariacica/ES)	136
AR	Vila Recicla (Serra/ES)	Indústria (Cariacica/ES)	31,7
Cimento Portland	Cimenteira (Serra/ES)	Indústria (Cariacica/ES)	29,9
Produção dos blocos			
Água	Rede de abastecimento local	Fábrica de pré-moldados (Serra/ES)	-
Aditivos	Indústria (São Paulo/SP)	Fábrica de pré-moldados (Serra/ES)	934
Areia (AN)	Jazida (Linhares/ES)	Fábrica de pré-moldados (Serra/ES)	126

AR	Vila Recicla (Serra/ES)	Fábrica de pré-moldados (Serra/ES)	8,9
Brita (AN)	Jazida (Serra/ES)	Fábrica de pré-moldados (Serra/ES)	8,5
Cimento Portland	Cimenteira (Serra/ES)	Fábrica de pré-moldados (Serra/ES)	2
Produção dos Concretos			
Água	Rede de abastecimento local	Concreteira (Vitoria/ES)	-
Aditivos	Indústria (São Paulo/SP)	Concreteira (Vitoria/ES)	934
Areia (AN)	Jazida (Linhares/ES)	Concreteira (Vitoria/ES)	133
Agregado Reciclado	Vila Recicla (Serra/ES)	Concreteira (Vitoria/ES)	12,1
Brita (AN)	Jazida (Serra/ES)	Concreteira (Vitoria/ES)	9,9
Cimento Portland	Cimenteira (Serra/ES)	Concreteira (Vitoria/ES)	9,5
Filer Calcário	Jazida (Cachoeiro Itapemirim/ES)	Concreteira (Vitoria/ES)	162

Fonte: Autores (2024). Nota: RCD (Resíduo da construção e demolição); AN (Agregado Natural); ES (Espírito Santo/Brasil).

2.3 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA

A utilização de diversos de métodos de impacto se revela essencial para mitigar os potenciais limitações originadas pela adoção exclusiva de apenas um método, o que resulta em uma avaliação mais robusta e confiável nas conclusões (Steinmann et al., 2007).

Para análise dos dados foi utilizado o software OpenLCA na versão 2.0.2, um programa gratuito e acessível que permite o uso de diversos métodos de impactos, em conjunto com a base de dados Ecoinvent na versão 3.6. Nesta pesquisa, foi utilizado um método principal de avaliação de impacto, o *Impact2002+*, por ser um dos mais utilizados pela bibliografia relacionada ao tema (Bello & Calmon, 2023). Das 15 categorias de impacto fornecidas pelo método principal foram escolhidas as 5 categorias, Tabela 2, que representam mais de 99% dos impactos totais gerados pelo sistema de produto analisado. Adicionalmente, e para fins comparativos, foi utilizado de forma auxiliar os métodos de impacto CED (Demanda de Energia Acumulada), CML-IA-Baseline (nas categorias Aquecimento Global e Energia Não Renovável), ReCiPe (H) 2016 (na categoria de impacto Aquecimento Global) e IPCC 2021 (Aquecimento Global). Esses métodos foram escolhidos por apresentarem a mesma unidade de medida em categorias iguais entres os métodos permitindo a comparabilidade.

Tabela 2. Categorias de impacto midpoint

Categoria de Impacto	CED	CML-IA (baseline)	Impact 2002+	ReCiPe (H) 2016	IPCC 2021	Unidade
Aquecimento Global		x	x	x	x	kg CO ₂ eq
Energia não renovável	x	x	x			MJ
Extração mineral			x			MJ surplus
Ocupação da Terra			x			m ² org.arable
Ecotoxicidade terrestre			x			kg TEG soil

Fonte: Autores (2023).

No entanto, avaliar os mais diversos indicadores simultaneamente em diversos traços pode se tornar impraticável em algumas análises deste estudo, sendo assim, uma redução na quantidade de indicadores foi necessária para considerar apenas aqueles que melhor representem o Impacto Total (IT). O software OpenLCA permite a agregação de todas as categorias de impacto em uma unidade de pontuação única (*Single Score*), logo, foi utilizado a soma dos impactos normalizados e ponderados do método principal (*Impact 2002+*) resultando em um indicador único de IT para as análises dos traços (IT *Impact 2002+*).

Esse indicador, *IT Impact 2002+*, é a soma das 15 categorias de impacto do método após a normalização e ponderação dos resultados gerando uma pontuação única traduzida em impacto total.

Além disso, foi realizada uma análise comparativa dos traços, considerando 1 metro cúbico (m³) das misturas, utilizando a resistência à compressão axial como referência para os indicadores de impacto avaliados. Isso resultou em uma análise da "intensidade dos indicadores" (Celik et al., 2015), evidenciando o impacto do volume de material necessário para alcançar 1 Mega pascal (MPa) de resistência à compressão. É importante ressaltar que os materiais em questão possuem aplicações distintas, portanto, a comparação deve ser feita exclusivamente entre as misturas compostas pelo mesmo material, e não entre diferentes materiais.

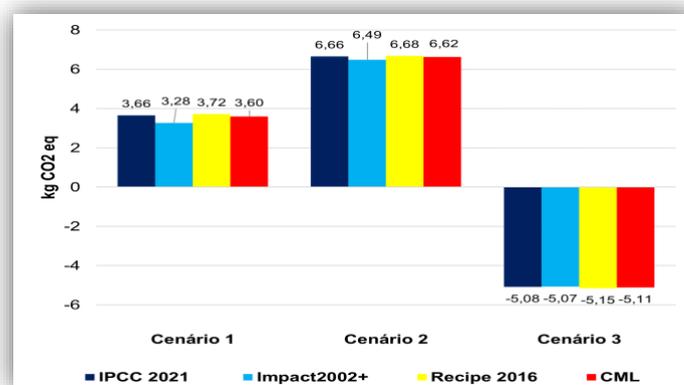
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 A PRODUÇÃO DE AR É VIÁVEL AMBIENTALMENTE EM COMPARAÇÃO COM OS AGREGADOS NATURAIS?

A primeira questão a ser respondida é referente à viabilidade ambiental da produção de agregados reciclados. Logo, foi necessário quantificar os impactos da coleta de RCD, seu transporte e seu beneficiamento a fim de comparar com a produção de agregado natural levando em consideração os impactos evitados pela reciclagem de RCD. Portanto, 3 cenários foram analisados: a) **Cenário 1:** Produção de AN (referência) b) **Cenário 2:** Produção de AR sem contabilizar os impactos evitados c) **Cenário 3:** Produção de AR contabilizando os impactos evitados. Para o Cenário 3 foi considerado o dano evitado pelo transporte do RCD para o aterro, além dos danos de uso, transformação e ocupação do solo pelo aterro sanitário. Contudo foram adicionados os impactos da reciclagem das sucatas bem como seu transporte até a unidade recicladora.

Na Figura 5 apresenta-se uma comparação entre os 4 métodos de impacto (IPCC 2021, CML, Impact 2002+ e ReCiPe) na categoria Aquecimento Global, para os 3 cenários analisados. Nota-se que os 4 métodos apresentaram valores de impacto bem semelhantes para o mesmo cenário sendo que o cenário 3 apresenta variação negativa indicando que os impactos evitados são maiores que os impactos causados.

Figura 5. Comparação entre os agregados na categoria Aquecimento Global em 4 diferentes métodos

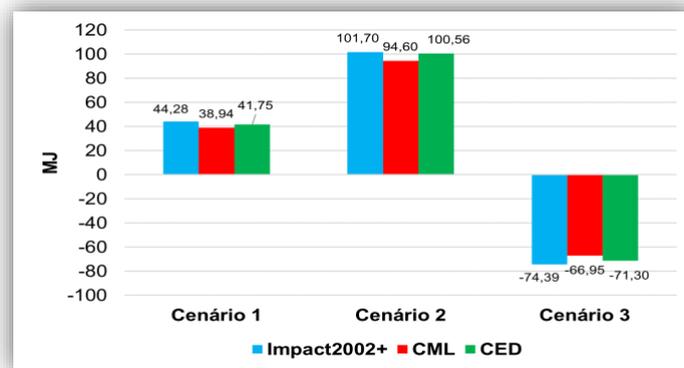


Fonte: Autores (2024).

O aumento dos impactos gerados pelo cenário 2 em relação ao cenário 1 (referência) se dá pela contribuição do transporte do RCD até a usina que é feita por caminhões que consomem combustível fóssil e emitem gases do efeito estufa. Ao inserir os impactos evitados no processo de produção de AR é contabilizado, dentre outros, o dano evitado pelo transporte do RCD até o aterro sanitário, essa contabilização logística permite a redução dos impactos nessa categoria de impacto.

A categoria de "Energia Não Renovável" se refere a fontes de energia que são esgotáveis e que não se regeneram naturalmente em um período de tempo significativo em comparação com a escala de tempo humana. Na Figura 6, nota-se que o Cenário 2 foi o que teve maior necessidade energética pois está contabilizado na além do transporte do RCD para a usina, a reciclagem da sucata cuja demanda energética é demasiadamente alta. Ainda na categoria de impacto Energia não renovável nota-se que a produção de AR (cenário 3) tem impacto negativo ao considerar os danos evitados e valores maiores que o cenário referência quando esses danos evitados não são considerados (cenário 2).

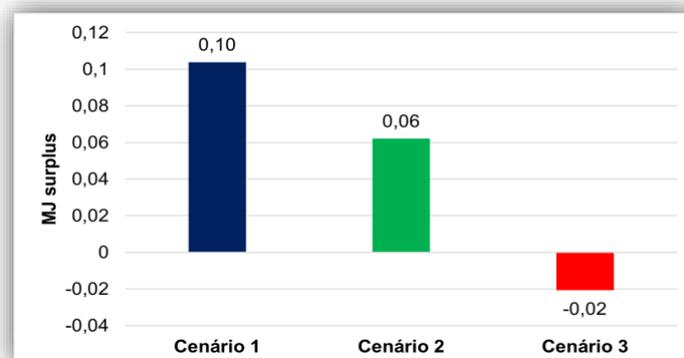
Figura 6. Comparação da produção dos agregados na categoria Energia Não Renovável em 3 diferentes métodos (CED, CML-baseline, *Impact 2002+*)



Fonte: Autores (2024).

A categoria Extração Mineral utiliza a unidade MJ *surplus* que indica o aumento na quantidade de energia necessária para extrair uma unidade de combustível fóssil no futuro. Nesta categoria, Figura 7, o cenário referência é o que apresenta maior valor, uma vez que, a produção de agregado natural é diretamente dependente da extração de matéria-prima.

Figura 7. Comparação da produção dos agregados na categoria Extração Mineral (*Impact 2002+*)



Fonte: Autores (2024).

A categoria "Ocupação do Solo" utiliza a unidade de medida m² de terra arável (m²org.arable), que avalia a quantidade desse espaço ocupada por uma atividade específica. Neste contexto, Figura 8, a produção de agregado natural obteve maior valor de impacto já que necessita de maior espaço para produção. A usina de reciclagem de RCD podem operar em espaços reduzidos até mesmo no próprio canteiro de obras o que justifica menores impactos nessa categoria enquanto no cenário 3 grande parte desse dano é evitado.

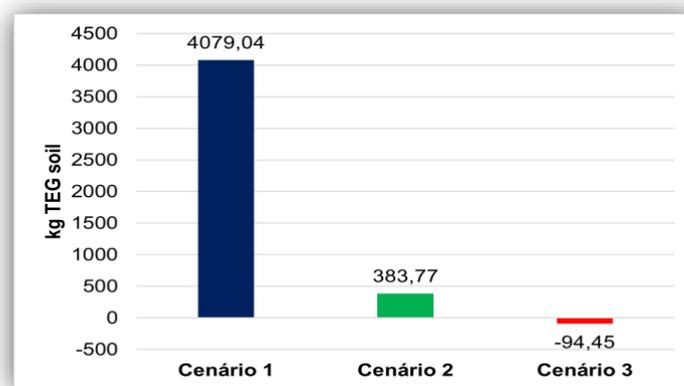
Figura 8. Comparação da produção dos agregados na categoria Ocupação do Solo (*Impact 2002+*)



Fonte: Autores (2024).

A categoria de Ecotoxicidade Terrestre é avaliada pela contaminação no solo, medida em kg de Trietilenoglicol no solo (kg TEG soil), além de outras substâncias que contribuem para os efeitos de ecotoxicidade. Essas substâncias são convertidas em uma quantidade equivalente de TEG no solo. Nessa categoria obteve-se a maior disparidade percentual entre os cenários, sendo a produção de agregados naturais a que mais contamina o solo, Figura 9.

Figura 9. Comparação da produção dos agregados na categoria Ecotoxicidade Terrestre (*Impact 2002+*)



Fonte: Autores (2024).

3.2 QUAL A ETAPA RESPONSÁVEL POR GERAR A MAIOR PARCELA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS?

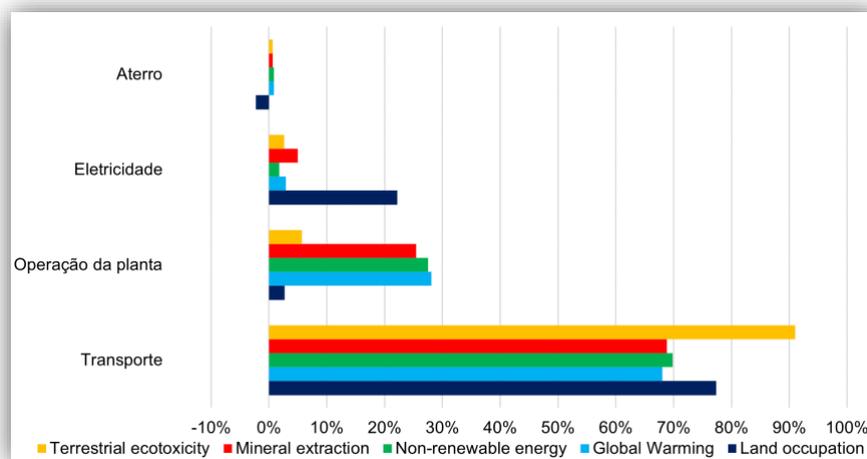
A fim de facilitar a interpretação do impacto total da produção do AR, optou-se por atrelar os resultados aos principais processos reciclagem de RCD: Transporte, operação da planta, eletricidade e aterro, foi utilizado o cenário 2 para esta simulação excluindo assim os impactos evitados.

A Figura 10 apresenta as porcentagens de impactos das cinco categorias de impacto do método *Impact 2002+*, correspondentes a cada grupo escolhido. Pode-se notar que o transporte foi responsável por aproximadamente 70% do impacto ambiental em todas as categorias.

A operação da planta, corresponde a cerca de 25% os impactos totais nas categorias Extração mineral, Energia não renovável e Aquecimento Global além de aproximadamente 5% dos impactos totais nas categorias Ecotoxicidade terrestre e Ocupação da terra.

Esses dados mostram que a etapa mais significativa para a produção do AR é o transporte do RCD dos pontos de coleta até a planta e reciclagem.

Figura 10. Caracterização das categorias de impacto por grupo (*Impact 2002+*)



Fonte: Autores (2024).

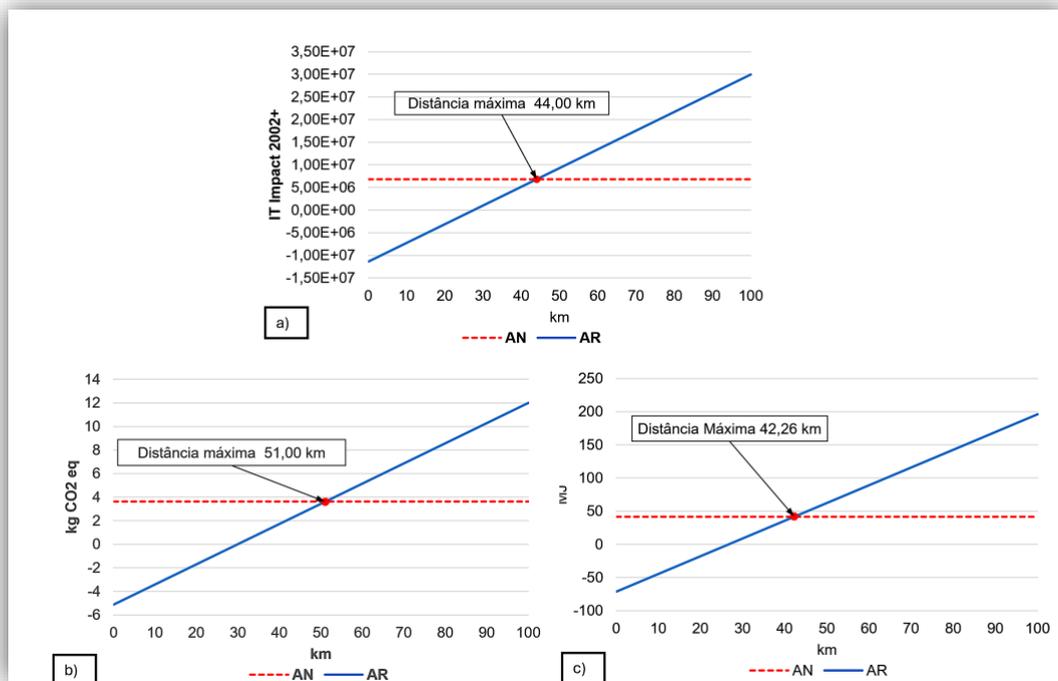
3.3 QUAL A DISTÂNCIA LIMITE, ONDE É VIÁVEL AMBIENTALMENTE O TRANSPORTE DOS AGREGADOS RECICLADOS EM RELAÇÃO AOS AGREGADOS NATURAIS?

Considerando a significativa contribuição do transporte para o impacto ambiental dos materiais de construção civil, é importante determinar a distância de transporte que ainda permita a viabilidade do uso do AR. Para esta análise foi fixado o valor do impacto gerado pela produção de agregado natural para cada indicador de impacto escolhido, enquanto a distância de transporte do AR pronto foi sendo gradativamente aumentada até que o valor do impacto ultrapassasse o valor fixado.

Na Figura 11, percebe-se que a linha em vermelho pontilhado representa os valores contínuos do impacto da produção de AN, já a linha azul reflete o crescimento do impacto gerado pelo AR à medida que a distância de transporte para o consumidor final aumenta. Esta análise indica a distância adicional máxima a qual o AR pode ser transportado que gere impactos iguais ou menores que o material referência. Para cada indicador de impacto, uma distância máxima foi encontrada no cruzamento entre as duas retas, sendo que no indicador IPCC 2021, encontrou-se o cenário mais otimista onde o AR poderia ser transportado até 51 km a mais que o AN. Neste contexto, o AR se mostra competitivo ambientalmente mesmo se estiver 51km mais distante que o AN nesse indicador especificamente.

O cenário mais pessimista ocorre no indicador CED, onde a distância máxima adicional é de 42,26 km, ou seja, é a categoria que resultou na menor diferença de distância adicional onde o AR seria menos impactante que o natural. Os resultados obtidos se assemelham ao estudo de Rosado et al. (2017), que encontrou para o cenário geográfico do estado de São Paulo (Brasil) distâncias máximas de 40 km e 30 km para as categorias Aquecimento Global e Energia não Renovável respectivamente.

Figura 11. Distância de disponibilidade do AR

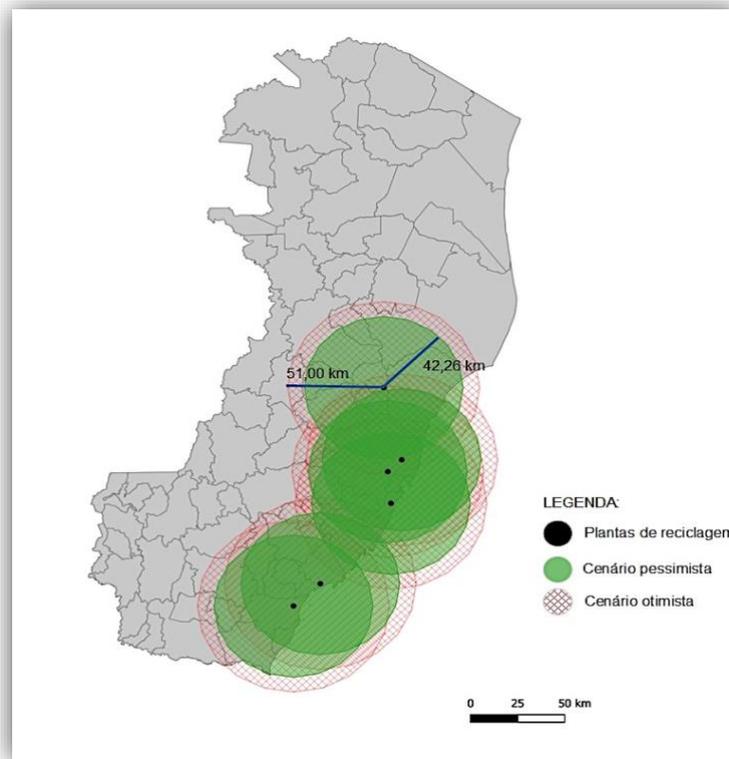


Fonte: Autores (2024).

A fim de facilitar a visualização dessas distâncias, apresenta-se na Figura 12, o mapa do ES com os raios dos cenários otimista e pessimista para as distâncias máximas adicionais projetadas nas 6 usinas em operação no estado. Essa análise deve ser interpretada com cautela, uma vez que, os dados relativos a uma usina específica estão sendo transpostos para outras localidades, contudo a reciclagem de AR é um processo simples com maquinários similares em diversas regiões.

Nota-se que a região central do estado está bem coberta pela disponibilidade de AR, enquanto a região norte não possui nenhuma abrangência. Isto indica a viabilidade, do ponto de vista ambiental, da construção de novas instalações recicladoras na área cinza do mapa e até mesmo dentro dos raios vermelhos, cenário otimista, local onde nem todas os indicadores impactos menores. Por fim entende-se que o AR se mantém competitivo ambientalmente mesmo transportado a distâncias bem maiores que o AN.

Figura 12. Distância de disponibilidade projetado para outras usinas de reciclagem no estado

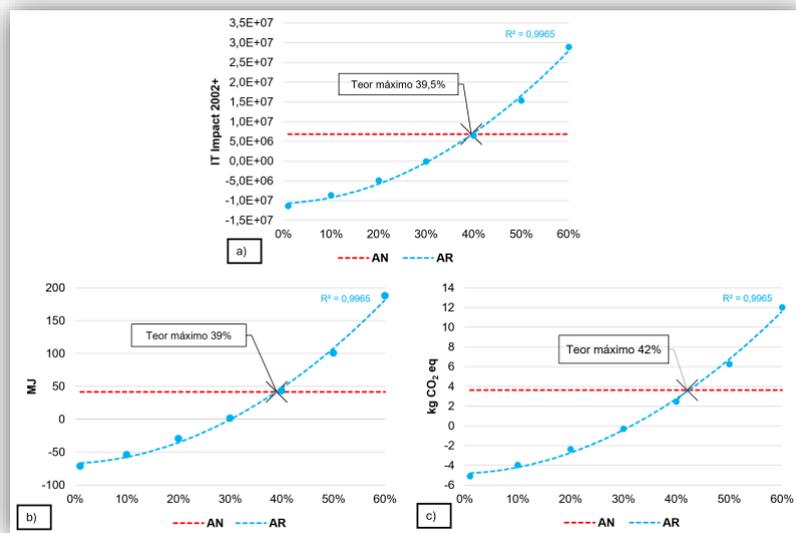


Fonte: Autores (2024). Nota: Cenário Pessimista (O Agregado Reciclado é menos impactante em todos os indicadores analisados); Cenário Otimista (O Agregado Reciclado é menos impactante em pelo menos 1 dos indicadores analisados).

3.4 QUAL A INFLUÊNCIA DO TEOR DE IMPUREZA DO RCD NO IMPACTO DA PRODUÇÃO DE AR?

Uma das grandes preocupações do reciclador de RCD é em relação à qualidade do material recebido. Na Planta de reciclagem visitada o RCD é proveniente de parceiros e o teor de impureza nos resíduos gira em torno de 1% em massa. O teor de impurezas nos RCDs coletados no Brasil pode variar até mais de 41% (Angulo et al., 2022) . Portanto, procurou-se investigar o teor máximo de impureza do RCD, onde a produção de AR ainda se manteria viável ambientalmente em relação ao material referência. Para isso foi fixada o valor dos impactos gerados pela produção de AN, e variou-se gradualmente o teor de impureza presentes no RCD coletado. Na Figura 13, pode-se observar a linha pontilhada representando o valor fixo dos impactos do material referência para 3 indicadores: a) IPCC 2021, b) CED c) IT *Impact2002+*. A linha azul representa o crescimento do impacto gerado pela reciclagem de RCD à medida que o teor de impureza aumenta. Para cada indicador calculou-se os impactos a cada 10% de aumento de impurezas e depois buscou-se uma curva para representar os pontos encontrados de maneira mais assertiva. Nota-se então que, mesmo com teores de impurezas no RCD de até 39%, 39,5% e 42% para os indicadores CED, IT *Impact 2002+*, e IPCC 2021, respectivamente, ainda vale a pena, do ponto de vista ambiental, o processo de reciclagem. Em 2021, no Brasil, tem-se que apenas 6% do RCD coletado no Brasil tem níveis de impurezas maiores que 41%, logo acredita-se que grande parte dos resíduos coletados possam ser reciclados com saldo ambiental positivo (Angulo et al., 2022).

Figura 13. Teores máximos de impurezas dos Resíduos de Construção e Demolição nos 3 indicadores escolhidos a) IPCC 2021 b) CED c) IT Impact2002+



Fonte: Autores (2024). Nota: AR (Agregado Reciclado); AN (Agregado Natural – Brita).

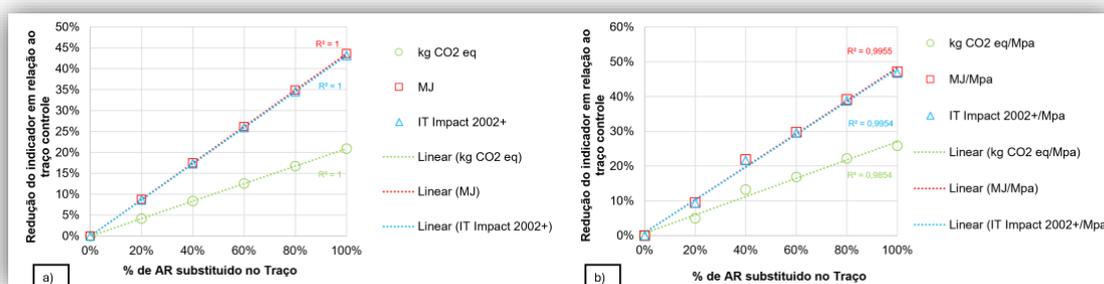
3.5 QUAL A INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO NATURAL POR AGREGADO RECICLADO PARA A REDUÇÃO DOS INDICADORES DE IMPACTO AMBIENTAL NAS DOSAGENS ONDE É INCORPORADO?

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que auxilia na tomada de decisões, fornecendo estimativas de impacto potencial. Portanto, para uma análise mais aprofundada foram feitas duas análises. A primeira relaciona o percentual de redução/aumento do impacto à medida que o teor de substituição aumenta. A segunda análise relaciona o valor do impacto do traço dividido por sua resistência à compressão axial aos 28 dias em relação ao teor de substituição, representando assim o percentual de redução do impacto por 1 MPa. Esta última análise tenta correlacionar o desempenho ambiental com o desempenho técnico.

3.5.1 ARGAMASSA

Nos traços de argamassas nota-se Figura 14a, que à proporção que o teor de substituição aumenta a redução de todos os indicadores analisados diminuiu chegando a reduzir o impacto em até 43,6% no indicador CED para o traço com 100% de substituição. Essa grande diminuição deve-se principalmente à longa distância de transporte da areia no cenário estudado que sendo gradualmente substituída por agregado reciclado diminui os percentuais dos indicadores.

Figura 14. Influência da substituição na redução dos indicadores para argamassa a) Redução do impacto b) Redução da “intensidade de impacto”



Fonte: Autores (2024). Nota: AR (Agregado Reciclado).

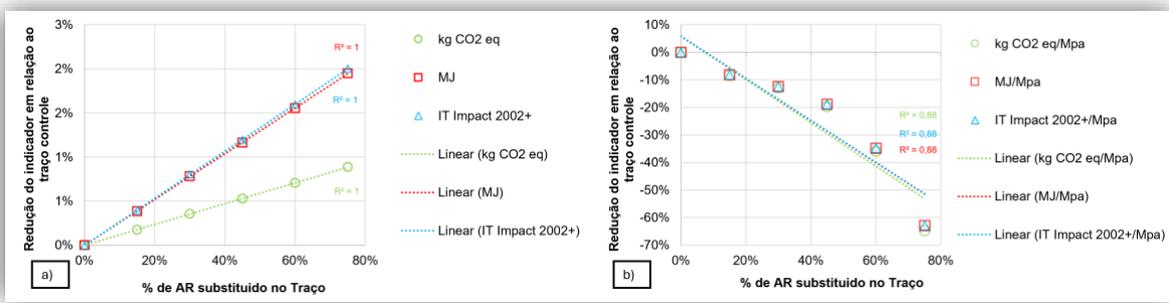
Ao lado, na Figura 14b, tem-se que o percentual de redução por MPa de traço acompanha os valores de redução de impacto do traço já que a resistência a compressão dos traços pouco foi alterada.

3.5.2 BLOCO PRÉ-FABRICADO

Na Figura 15a, apresenta-se os percentuais de redução dos indicadores de impacto para os traços de blocos. Pode-se conferir que há ligeira redução nos indicadores, cerca de 2,0% para o indicador IT Impact 2002+ e apenas 0,9% para o indicador IPCC 2021. A pouca influência da substituição no traço pode ser explicada pelo alto consumo de cimento no traço (421kg de cimento por m³).

Mostra-se na Figura 15b, que devido à perda de resistência, ao passo que o teor de substituição aumenta a eficiência ambiental do traço diminui em todos os indicadores.

Figura 15. Influência da substituição na redução dos indicadores para bloco pré-fabricado a) Redução do impacto b) Redução da “intensidade de impacto”

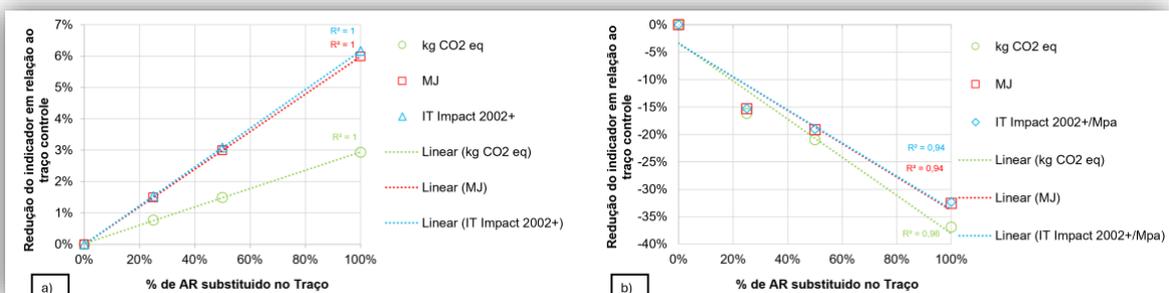


Fonte: Autores (2024). Nota: AR (Agregado Reciclado).

3.5.3 CONCRETO SEM FINS ESTRUTURAIS

Na Figura 16a, observa-se que há uma redução dos indicadores de forma geral com o aumento do teor de substituição nos traços de concreto convencional analisados. Percebe-se que o indicado IT *Impact 2002+* aponta uma redução de 6,2%, enquanto o indicado IPCC 2021 mostra uma redução de 2,9%. O indicador CED de energia não renovável segue um padrão parecido ao *Impact 2002+* reduzindo em até 6% os danos quando ocorre substituições por teores iguais a 100% de AR.

Figura 16. Influência da substituição na redução dos indicadores para concreto convencional a) Redução do impacto b) Redução da “intensidade de impacto”



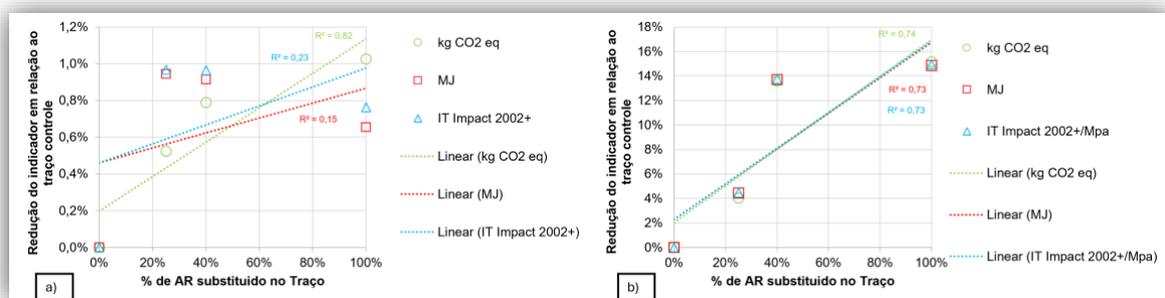
Fonte: Autores (2024). Nota: AR (Agregado Reciclado).

Já na Figura 16b, devido a perda de resistência provocada pela substituição do agregado aconteceu uma perda gradual de eficiência ambiental com o aumento do teor de substituição, contudo por se tratar de um concreto sem fins estruturais esse parâmetro possui peso menor na análise e deve ser avaliado com cautela.

3.5.4 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Para os teores de substituição no concreto autoadensável, Figura 17a, obteve-se que ligeiro aumento dos indicadores ao aumentar a concentração de AR no traço. Para os 3 indicadores utilizados, ainda se tem reduções positivas mesmo com substituições de até 100%, entretanto para os métodos IT *Impact 2002+* e CED os teores ótimos do ponto de vista ambiental giram em torno de 20%, momento que o percentual de redução começa a decair.

Figura 17. Influência da substituição na redução dos indicadores para concreto autoadensável a) Redução do impacto b) Redução da “intensidade de impacto”



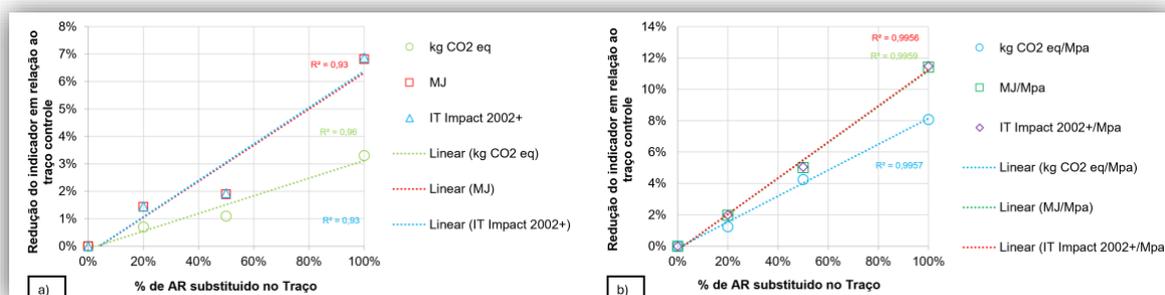
Fonte: Autores (2024). Nota: AR (Agregado Reciclado).

Na Figura 17b, mostra-se que ao normalizar os impactos pela resistência a compressão aos 28 dias os traços de concreto autoadensável ganham desempenho ambiental à medida que o teor de substituição cresce. O aumento do uso de aditivo para correção no traço pode ter sido um dos fatores para o aumento da resistência mecânica, bem como a origem e a qualidade do AR podem influenciar na resistência final do produto de construção civil.

3.5.5 CONCRETO COM FIM ESTRUTURAL

Na Figura 18a, percebe-se que em todos os indicadores há uma redução com o aumento do teor de substituição chegando a 6,9% para o indicador IT *Impact 2002+*, 6,8% para CED e 3,3% para IPCC 2021 com teor de substituição de 100%.

Figura 18. Influência da substituição na redução dos indicadores para concreto estrutural a) Redução do impacto b) redução da “intensidade de impacto”



Fonte: Autores (2024). Nota: AR (Agregado Reciclado).

É importante atentar-se que a NBR 15116 (ABNT, 2021), estipula um limite máximo de 20% da massa total de AR para a substituição em concreto com fins estruturais, portanto na Figura 18b, tem-se que, para um teor de substituição de 20%, os impactos por unidade de compressão axial (MPa) sofrem redução, mostrando que o AR pode ser competitivo tanto do ponto ambiental quanto do ponto de vista de desempenho técnico no parâmetro analisado.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O propósito desta investigação foi conduzir uma ACV da produção de Agregados Reciclados utilizando este produto em materiais de construção civil a base cimentícia. A análise incluiu 24 traços extraídos de 5 artigos de alto fator de impacto de diversos materiais de construção. Análises sobre a produção de AR, transporte, teor de impurezas e utilização na fabricação de materiais foram feitas.

O estudo demonstrou que o AR é competitivo do ponto de vista em relação ao Agregado Natural em todas as categorias de impacto dos métodos utilizados, desde que os impactos evitados pela reciclagem de RCD sejam considerados na modelagem do sistema.

O transporte de RCD do ponto de coleta até a planta de reciclagem é a etapa mais impactante da produção de AR correspondendo em torno de 70 a 90% dos impactos totais. Mesmo com teores de impurezas de até 42%, o RCD ainda se mostra com potencial, do ponto de vista ambiental, de ser reciclado.

No que diz respeito ao transporte do AR pronto para uso, este pode ser transportado a uma distância limite de até 42,26 km, sendo ainda sim menos impactante que o material referência.

Em relação à substituição em materiais de base cimentícia, o material reciclado se mostrou ambientalmente viável em diversos teores em praticamente todos os cenários tendo obtido reduções de até 43,6% nos indicadores para uso em argamassas, entretanto ao se inserir o parâmetro técnico de resistência a compressão axial aos 28 dias, houve perda de eficiência ambiental para a produção de blocos e concretos convencionais em até 64,7% e 36,9%, respectivamente. Muitos estudos que investigam o uso deste resíduo frequentemente presumem que essa substituição é uma solução ambientalmente positiva, mas isso nem sempre é verdadeiro como foi mostrado neste estudo.

Por fim, cabe ressaltar que este estudo leva em conta um cenário específico de logística de materiais e componentes, e neste contexto o AR pode ser empregado nos mais diversos materiais de construção civil e ainda se manter ambientalmente competitivo.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste estudo agradecem o apoio financeiro concedido pela Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES).

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. (2022). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil*. Recuperado de <https://abrelpe.org.br/panorama/>

Agrela, F., Díaz-López, J. L., Rosales, J., Cuenca-Moyano, G. M., Cano, H., & Cabrera, M. (2021). Environmental assessment, mechanical behavior and new leaching impact proposal of mixed recycled aggregates to be used in road construction. *Journal of*

Cleaner Production, 280, 124362. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124362>

Alzard, M. H., El-Hassan, H., & El-Maaddawy, T. (2021). Environmental and Economic Life Cycle Assessment of Recycled Aggregates Concrete in the United Arab Emirates. *Sustainability*, 13(18), 10348. <https://doi.org/10.3390/su131810348>

Angulo, S. C., Oliveira, L. S., & Machado, L. (2022). Pesquisa setorial ABRECON 2020: a reciclagem de

- resíduos de construção e demolição no Brasil. In S. C. Angulo, L. S. Oliveira, & L. C. Machado (Eds.), *Pesquisa setorial ABRECON 2020: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil*. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. <https://doi.org/10.11606/9786589190103>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014a). *NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura*. ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014b). *NBR ISO 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações*. ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). *NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios*. ABNT.
- Attri, G. K., Gupta, R. C., & Shrivastava, S. (2022). Sustainable precast concrete blocks incorporating recycled concrete aggregate, stone crusher, and silica dust. *Journal of Cleaner Production*, *362*, 132354. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132354>
- Bello, L. B. D., & Calmon, J. L. (2023). Avaliação do Ciclo de Vida de agregados reciclados : Uma revisão crítica e proposta de diretrizes. *IBRACON*, *64*(1), 1–16.
- Braga, A. M., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2017). Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, *162*, 529–543. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.06.057>
- Brasil. (2022). *Estimativas anuais de emissões de gases estufa no Brasil: Vol. 6 Edição (6ª Edição)*. Recuperado de <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee>
- Celik, K., Meral, C., Petek Gursel, A., Mehta, P. K., Horvath, A., & Monteiro, P. J. M. (2015). Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. *Cement and Concrete Composites*, *56*, 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003>
- Colangelo, F., Petrillo, A., & Farina, I. (2021). Comparative environmental evaluation of recycled aggregates from construction and demolition wastes in Italy. *Science of The Total Environment*, *798*, 149250. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149250>
- Di Maria, A., Eyckmans, J., & Van Acker, K. (2018). Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. *Waste Management*, *75*, 3–21. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.028>
- Ding, T., Xiao, J., & Tam, V. W. Y. (2016). A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China. *Waste Management*, *56*, 367–375. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.031>
- Fang, C., Feng, J., Huang, S., Hu, J., Wang, W., & Li, N. (2022). Mechanical properties and microscopic characterization of mortar with recycled aggregate from waste road. *Case Studies in Construction Materials*, *17*, e01441. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01441>
- Fiol, F., Thomas, C., Muñoz, C., Ortega-López, V., & Manso, J. M. (2018). The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, *182*, 309–323. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.132>
- Grabois, T. M., Caldas, L. R., Julião, N. R., & Toledo Filho, R. D. (2020). An Experimental and Environmental Evaluation of Mortars with Recycled Demolition Waste from a Hospital Implosion in Rio de Janeiro. *Sustainability*, *12*(21), 8945. <https://doi.org/10.3390/su12218945>
- Mariaková, D., Mocová, K. A., Pešta, J., Fořtová, K., Tripathi, B., Pavlů, T., & Hájek, P. (2022). Ecotoxicity of Concrete Containing Fine-Recycled Aggregate: Effect on Photosynthetic Pigments, Soil Enzymatic Activity and Carbonation Process. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(3). <https://doi.org/10.3390/su14031732>
- Marinković, S., Josa, I., Braymand, S., & Tošić, N. (2023). Sustainability assessment of recycled aggregate concrete structures: A critical view on the current state-of-knowledge and practice. *Structural Concrete*, *March*. <https://doi.org/10.1002/suco.202201245>
- Mello, R. Z. (2018). *AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL À BASE DE CIMENTO* [Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Espírito Santo]. Recuperado de <http://repositorio.ufes.br/handle/10/10699>
- Menegatti, L. C., Castrillon Fernandez, L. I., Caldas, L. R., Pepe, M., Pittau, F., Zani, G., Rampini, M. C., Michels, J., Toledo Filho, R. D., & Martinelli, E. (2022). Environmental Performance of Deconstructable Concrete Beams Made with Recycled Aggregates. *Sustainability*, *14*(18), 11457. <https://doi.org/10.3390/su141811457>

- Rosado, L. P., Vitale, P., Penteadó, C. S. G., & Arena, U. (2019). Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of São Paulo State, Brazil. *Waste Management*, *85*, 477–489. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.011>
- Rosado, L. Peixoto., Vitale, Pierluca., Penteadó, C. S. G. ., & Arena, Umberto. (2017). Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, *151*, 634–642. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.068>
- Steinmann, Z. J. N., Schipper, A. M., Hauck, M., & Huijbregts, M. A. J. (2007). How Many Environmental Impact Indicators Are Needed in the Evaluation of Product Life Cycles? *Journal of Statistical Software*, *18*(2), 3–6. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05179>
- Thomas, C., Setién, J., & Polanco, J. A. (2016). Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes. *Construction and Building Materials*, *114*, 536–546. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.03.203>
- Vieira, D. R., Calmon, J. L., & Coelho, F. Z. (2016). Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. *Construction and Building Materials*, *124*, 656–666. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125>
- Vieira, D. R., Calmon, J. L., Zulcão, R., & Coelho, F. Z. (2018). Consideration of strength and service life in cradle-to-gate life cycle assessment of self-compacting concrete in a maritime area: a study in the Brazilian context. *Environment, Development and Sustainability*, *20*(4), 1849–1871. <https://doi.org/10.1007/s10668-017-9970-4>
- Waskow, R., Gonçalves Maciel, V., Tubino, R., & Passuello, A. (2021). Environmental performance of construction and demolition waste management strategies for valorization of recycled coarse aggregate. *Journal of Environmental Management*, *295*, 113094. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113094>
- Weidema, B. P., & Wesnaes, M. S. (1996). Data quality management for life cycle inventories-an example of using data quality indicators. *Journal of Cleaner Production*, *4*(3–4), 167–174. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(96\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(96)00043-1)
- Weidema, B. Pedersen., Bauer, C. ., Hischer, R., Mutel, C., Nemecek, T., Reinhard, J., Vadenbo, C. O., & Wernet, G. (2013). Overview and methodology Data quality guideline for the ecoinvent database version 3 Weidema,. *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*, 12-. Recuperado de <https://lca-net.com/publications/show/overview-methodology-data-quality-guideline-ecoinvent-database-version-3/>
-