UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

COLEGIADO DE ENGENHARIA CIVIL

Alessandro Yung Ho Kwak Neto

Victória Vasconcellos Torres de Aguiar

FACILITADORES E BARREIRAS NA APLICAÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR À CADEIA DE SUPRIMENTOS DO AÇO DE CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E SISTÊMICA

Vitória, ES

2021

Alessandro Yung Ho Kwak Neto
Victória Vasconcellos Torres de Aguiar

FACILITADORES E BARREIRAS NA APLICAÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR À CADEIA DE SUPRIMENTOS DO AÇO DE CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E SISTÊMICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Centro Tecnológico

Departamento de Engenharia Civil

Orientador: Prof^a. Dr^a. Patrícia Alcântara Cardoso

Vitória, ES

2021

Alessandro Yung Ho Kwak Neto
Victória Vasconcellos Torres de Aguiar
Facilitadores e Barreiras na Aplicação da Economia Circular à Cadeia de Suprimentos do Aço de Construção Civil: uma Análise Bibliométrica Sistêmica / Alessandro Yung Ho Kwak Neto
Victória Vasconcellos Torres de Aguiar. – Vitória, ES, 2021-
81 p.

Orientador: Prof^{a}. Dr^{a}. Patrícia Alcântara Cardoso

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
Centro Tecnológico
Departamento de Engenharia Civil, 2021.

1. Economia circular. 2. Aço de construção civil. I. Universidade Federal do Espírito Santo. II. Facilitadores e Barreiras na Aplicação da Economia Circular à Cadeia de Suprimentos do Aço de Construção Civil: uma Análise Bibliométrica Sistêmica

Alessandro Yung Ho Kwak Neto
Victória Vasconcellos Torres de Aguiar

FACILITADORES E BARREIRAS NA APLICAÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR À CADEIA DE SUPRIMENTOS DO AÇO DE CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E SISTÊMICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho aprovado. Vitória, ES, 19 de maio de 2021:

Prof^a. Dr^a. Patrícia Alcântara Cardoso
Orientador

Prof. Dr. Lorenzo Augusto Ruschi e Luchi
Convidado 1

Msc. Marcos Wagner Jesus Servare Junior
Convidado 2

Vitória, ES
2021

Aos nossos pais e irmãos.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradecemos a Deus pelo dom da vida, por nos guiar e iluminar nosso caminho durante essa jornada.

Aos nossos pais, irmãos e familiares, nossos primeiros professores, pelo amor incondicional, por todo o apoio, ensinamentos e pelo exemplo de força e entrega.

À Professora e Orientadora Doutora Patrícia Alcântara Cardoso pelos ensinamentos, por acreditar em nosso potencial e pela oportunidade concedida em desenvolver este trabalho sob sua orientação.

Aos Professores Msc. Marcos Wagner Jesus Servare Junior e Doutor Lorenzo Augusto Ruschi e Luchi por aceitarem compor a banca examinadora e pela ajuda na realização desta pesquisa.

Ao Professor Doutor Leonardo Ensslin pela atenção e pelos materiais fornecidos que tanto contribuíram para o desenvolvimento deste projeto.

Aos nossos amigos e colegas de trabalho pelo apoio e incentivo.

E a todos não mencionados aqui mas que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

“The mind that opens to a new idea
never returns to its original size"
Albert Einstein

Resumo

O modelo econômico linear tem produzido impactos indesejados ao meio sócio-ambiental, acumulando cada vez mais desafios para as gerações futuras. O modelo econômico circular por outro lado, aborda tais questões de maneira mais sustentável, buscando obter máxima eficiência, ao mesmo tempo, preservando o atual estoque de recursos e matérias-prima. Este trabalho objetiva analisar e identificar as principais barreiras e facilitadores para a adoção do modelo circular aplicado à indústria do aço de construção civil. Para alcançar estes objetivos, realizou-se uma pesquisa exploratória-descritiva, utilizando o ProKnow-C como metodologia para obtenção do capital científico necessário. Foram analisados inicialmente 4280 artigos, os quais após a aplicação das etapas da metodologia, geraram um portfólio final de 27 artigos. Os resultados apresentados neste estudo revelam os principais autores, países e periódicos que publicam artigos sobre economia circular e o mercado do aço de construção civil em uma escala global.

Palavras-chaves: Economia circular. Aço de construção civil. Barreiras. Facilitadores. Análise bibliométrica. ProKnow-C.

Abstract

The linear economy has negatively impacted societies and the environment, presenting challenges to future generations. On the other hand, the circular economy model approaches these issues in a sustainable manner, aiming at maximum resource efficiency, whilst preserving the current raw material stocks. This work is built upon the analysis and identification of circular economy's main drivers and barriers applied to the steel construction industry. In order to achieve these objectives, a descriptive-exploratory research was made, using the ProKnow-C as methodology for building the required knowledge. A total of 4280 articles were initially analyzed where methodological filters were applied, resulting in 27 articles in the final Bibliographic Portfolio. The results achieved reveal the main authors, countries and journals with the largest number of publications about circular economy implementation within the steel construction sector.

Keywords: Circular economy. Steel. Barriers. Drivers. Building sector. Bibliometric analysis. ProKnow-C.

Lista de ilustrações

Figura 1 – INCC-DI Mensal 15
Figura 2 – A Indústria do Aço Brasileira 16
Figura 3 – Fluxo de recursos em uma economia circular 21
Figura 4 – Ciclo de vida de elementos estruturais 23
Figura 5 – Processo de produção do aço brasileiro 25
Figura 6 – Fluxo global de aço em 2008 26
Figura 7 – Produção do aço no Brasil dividida por modelo produtivo 27
Figura 8 – Cadeia de valor do aço estrutural 29
Figura 9 – Etapas do método ProKnow-C 31
Figura 10 – Etapas do método ProKnow-C 31
Figura 11 – Palavras-chave 32
Figura 12 – Banco de dados 33
Figura 13 – Metodologia esquematizada 34
Figura 14 – Número de artigos por ano de publicação 38
Figura 15 – Número de artigos conforme origem da pesquisa 39
Figura 16 – Artigos por periódico/instituição 40
Figura 17 – Análise das palavras-chave 41
Figura 18 – Rede de co-ocorrência das palavras-chave do PB 42
Figura 19 – Periódicos de maior destaque das referências do portfólio bibliográfico 43
Figura 20 – Autores citados pelo menos 5 vezes nas referências 45
Figura 21 – Diagrama de Pareto dos artigos das referências 46
Figura 22 – Artigos do PB citados nas referências 51
Figura 23 – Países das instituições de ensino dos autores da amostra 51
Figura 24 – Artigos e autores do Portfólio Bibliográfico de maior destaque para o tema de pesquisa 53
Figura 25 – Quantidade de artigos das referências e do PB para cada autor do PB 58
Figura 26 – Barreiras identificadas na literatura 71
Figura 27 – Facilitadores identificados na literatura 72

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resistência do aço e demais materiais 28
Tabela 2 – Portfólio final de artigos 35
Tabela 3 – Amostra de artigos das referências 47
Tabela 4 – Artigos do PB citados nas referências 49
Tabela 5 – Tabela de autores pertencentes ao PB e quantidade de citações . . 53

Lista de abreviaturas e siglas

ABCEM	Associação Brasileira da Construção Metálica
BAB	Banco de artigos bruto
BD	Banco de dados
BIM	*Building information modeling*
BOF	*Basic Oxygen Furnace*
CBCA	Centro Brasileiro da Construção em Aço
DfD	*Design for Disassembly*
EC	Economia Circular
EMF	Ellen MacArthur Foundation
FEA	Forno Elétrico a Arco
IEA	Agência Internacional de Energia
INCC	Índice Nacional de Custo de Construção
LCA	*Life cycle assessment*
LEED	*Leadership in Energy and Environmental Design*
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONG	Organização não governamental
PC	Palavras-chave
PB	Portfólio bibliográfico
UE	União Europeia

Sumário

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 Contextualização 14
1.2 Justificativa 16
1.3 Objetivos 18
1.3.1 Objetivo geral 18
1.3.2 Objetivos específicos 18
1.4 Estrutura 18

2 REFERENCIAL TEÓRICO 20
2.1 Economia Circular 20
2.1.1 Construção Civil e Aço 22
2.2 Indústria do aço 23
2.2.1 Processo de produção 24
2.2.2 Construção civil 25

3 SELEÇÃO DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO 30
3.1 Enquadramento metodológico 30
3.2 Aplicação da metodologia 30

4 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E SISTÊMICA 37
4.1 Análise bibliométrica dos artigos do portfólio bibliográfico . . . 37
4.1.1 Reconhecimento científico dos artigos 37
4.1.2 Autores de maior destaque 39
4.1.3 Análise dos países de origem dos autores do PB 39
4.1.4 Relevância dos periódicos e instituições dos artigos do PB 40
4.1.5 Palavras-chave mais utilizadas 41
4.1.6 Análise das referências dos artigos do portfólio bibliográfico 43
4.1.7 Análise dos artigos do Portfólio Bibliográfico e suas referências . . . 52
4.2 Análise sistêmica dos artigos do portfólio bibliográfico 58
4.2.1 Discussão e resultados 59

4.2.1.1 Barreiras e facilitadores por publicação 69

5 CONCLUSÃO 73

5.1 Sugestões para trabalhos futuros 75

REFERÊNCIAS 76

1 Introdução

1.1 Contextualização

A indústria de construção civil é um setor estrategicamente importante tanto para a economia global quanto para a economia doméstica. Nos últimos anos, viu-se que ainda há um grande espaço para avanços tecnológicos e inovações com foco na sustentabilidade do setor (WANG et al., 2021). Contudo, mesmo neste cenário, pôde-se observar uma crescente na produção e extração de matérias-primas voltadas para as atividades de construção civil nos últimos anos, consequência da alta demanda por infra-estrutura de qualidade nas principais economias mundiais.

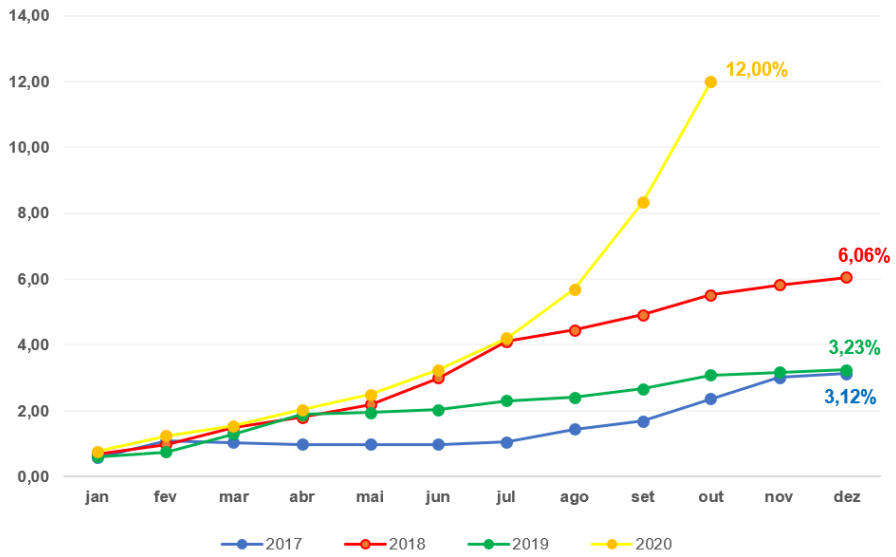
A construção civil é um dos setores responsáveis pela maior parte do consumo de matéria-prima no mundo. Segundo pesquisa feita pela OCDE em 2018 estima-se que o consumo de matérias-primas até 2060 irá duplicar, gerando consequências negativas ao meio ambiente e a saúde do planeta (OCDE, 2018). No Brasil, estima-se que, em 2017, 34,1% do consumo aparente de aço foi proveniente de atividades deste setor (Associação Brasileira de Construção Metálica, 2019). Apesar da expectativa positiva para o crescimento do setor nos próximos anos, as consequências ambientais e a alta dependência das companhias quanto à oferta de aço no mercado são desafios ainda não abordados atualmente.

Segundo relatório publicado pelo World Steel Association (2020b), no ano de 2019, o setor da construção civil foi responsável por 52% do uso global de aço, e a expectativa é de que a demanda por aço para construção aumente em 2,1% ao ano pelos próximos 15 anos.

No ano de 2020, durante a pandemia do Covid-19, observou-se um forte aumento nos preços das matérias-primas utilizadas na construção civil, em especial no preço do aço. Este aumento teve diversas consequências, mas talvez a mais relevante seja o impacto da oferta na indústria interna brasileira. Segundo o indicador INCC (Índice Nacional de Custo de Construção), referente a parcela de materiais e serviços, o custo de construção em 2020, contabilizado até outubro, apresentou a maior alta nos

últimos anos.

Figura 1 – INCC-DI Mensal



Fonte: adaptado de FGV (2021)

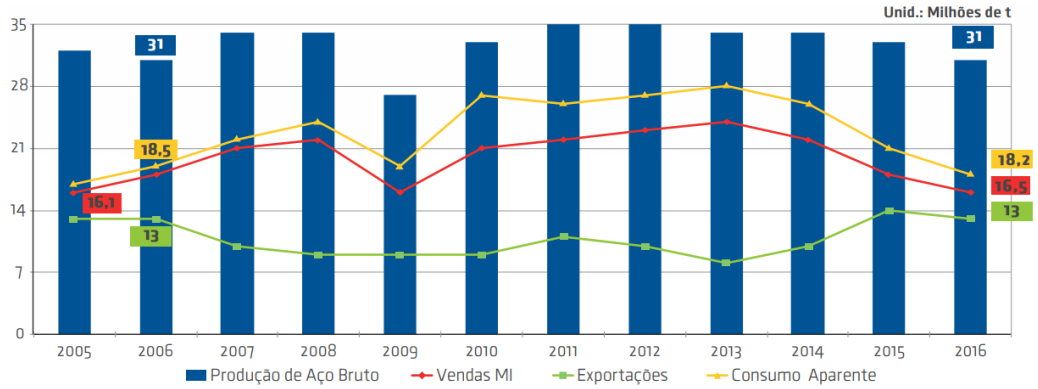
Economias e mercados baseados no modelo linear buscam extrair recursos para a produção de bens de consumo sem incorporar o retorno destes bens, ou resíduos dos mesmos, em processos produtivos futuros. Além disso, na maior parte das vezes, os produtos gerados em tais mercados não são planejados para oferecer soluções de uso prolongadas e sustentáveis, que por consequência, acaba gerando resíduos em abundância.

A Figura 1 mostra o resultado deste problema no ambiente brasileiro: a ineficiência do modelo de economia linear do mercado de aço no Brasil. Um problema que não só afeta grandes indústrias e corporações, mas também os pequenos agentes da construção civil.

Além disso, segundo relatório produzido por Confederação Nacional da Indústria e Instituto Aço Brasil (2017), o consumo aparente de aço, consumo bruto somado às importações, do mercado interno nos anos de 2005 — 2016 superou a produção da indústria doméstica. Algo que, em um cenário de intensificação do uso da sucata, poderia apresentar um equilíbrio maior entre a oferta e demanda internas.

Portanto, a ideia de uma transição do modelo linear para o circular no mercado de aço torna-se altamente atrativa. Não obstante, este se trata de um processo de lenta adoção e que envolverá diversos agentes de interesse.

Figura 2 – A Indústria do Aço Brasileira



Fonte: Confederação Nacional da Indústria e Instituto Aço Brasil (2017)

O presente trabalho discutirá este tema através da análise das principais barreiras e facilitadores para a adoção de um modelo circular, produzindo uma revisão bibliométrica e sistêmica da literatura internacional até então existente com informações relevantes ao contexto global e brasileiro.

1.2 Justificativa

Quatro palavras-chave definem o conceito de Economia Circular (EC): reuso, reciclagem, remanufatura e redução. O modelo econômico circular baseia-se nos princípios de manter produtos e materiais em uso ao máximo, sem a geração de resíduos e promovendo a regeneração dos sistemas naturais (Ellen MacArthur Foundation, 2021). O impacto de uma transição para a EC abrange, portanto, os pilares ambiental, social e econômico.

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), a indústria da construção civil foi responsável por 36% do consumo global de energia, assim como 39% das emissões de dióxido de carbono em 2018. Tais dados indicam uma tendência crescente em relação aos anos anteriores. Além disso, constatou-se um aumento na demanda de metais utilizados no setor da construção civil nas últimas décadas (ELSHKAKI et al., 2016).

Dentre os materiais utilizados na construção civil, o aço possui vantagens competitivas significativas na perspectiva da EC, sendo considerado um material permanente e de alto potencial circular (World Steel Association, 2020a).

A possibilidade de reciclar a sucata do aço, por exemplo, assim como seus subprodutos, sem a perda das propriedades inerentes do produto original, torna o aço um material 100% reciclável (World Steel Association, 2020a).

Da mesma forma, o reuso de estruturas de aço torna-se de maior facilidade devido a presença de conexões reversíveis, o que permite a desmontagem da estrutura em componentes que podem, posteriormente, ser cortados e remoldados, com baixa geração de rejeitos (FIVET; BRÜTTING, 2020). Características como alta durabilidade, resistência, e longa vida útil também asseguram a parcial ou total reutilização do aço ao final de sua vida útil (World Steel Association, 2020a).

Segundo o World Steel Association (2020b), estima-se que a reutilização de aço na construção permita uma economia de 1 a 1.5kg nas emissões de dióxido de carbono por kilograma de aço.

A implementação da EC tem se provado vantajosa no desenvolvimento sustentável de países como os da União Europeia, Japão e China, que já estão à frente nessa transição, com programas de incentivo e estratégias políticas. A Comissão Europeia adotou, no ano de 2015, um plano de ação com uma série de medidas e propostas legislativas visando a transição para o modelo econômico circular. Já em 2020, a União Europeia lançou um novo plano de ação com 35 iniciativas que abrangem todo o ciclo de vida dos produtos (European Commission, 2021a).

O modelo econômico circular ainda é pouco explorado no cenário nacional, fato que pode ser evidenciado pela escassez de estudos relevantes relacionados a implementação da EC no país, bem como políticas governamentais que incentivem a total transição do modelo linear para o circular.

Assim, ressalta-se a relevância da elaboração do presente estudo, como forma de mapear a produção científica e assimilar o atual contexto mundial no que tange a implementação da EC na indústria do aço no ramo da construção civil e as principais barreiras e oportunidades na transição para este modelo econômico mais sustentável.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O presente Projeto de Graduação tem como objetivo geral analisar a produção científica internacional e identificar as barreiras e os facilitadores na implementação da Economia Circular na cadeia de suprimentos do aço estrutural e aço para concreto utilizados na construção civil, de forma a responder a pergunta de tese:

- *Quais são as principais barreiras e facilitadores para a implementação da Economia Circular na construção civil voltada para a utilização do aço citadas na produção científica internacional?*

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do estudo são:

- Identificar os principais autores e respectivos países que estudam sobre economia circular e o mercado do aço de construção civil no mundo
- Identificar os principais periódicos que publicam artigos sobre economia circular e o mercado do aço de construção civil no mundo
- Analisar as barreiras e os facilitadores para a implementação da economia circular no mercado do aço destinado à construção civil
- Identificar os artigos de destaque com foco em economia circular e o mercado do aço de construção civil no mundo

1.4 Estrutura

O presente trabalho consiste nos seguintes capítulos:

- Capítulo 1: Introdução, contextualização, justificativa e apresentação dos objetivos da pesquisa.
- Capítulo 2: Referencial teórico.

- Capítulo 3: Seleção do Portfólio Bibliográfico.
- Capítulo 4: Análise bibliométrica e sistêmica do Portfólio Bibliográfico.
- Capítulo 5: Conclusão.

2 Referencial teórico

2.1 Economia Circular

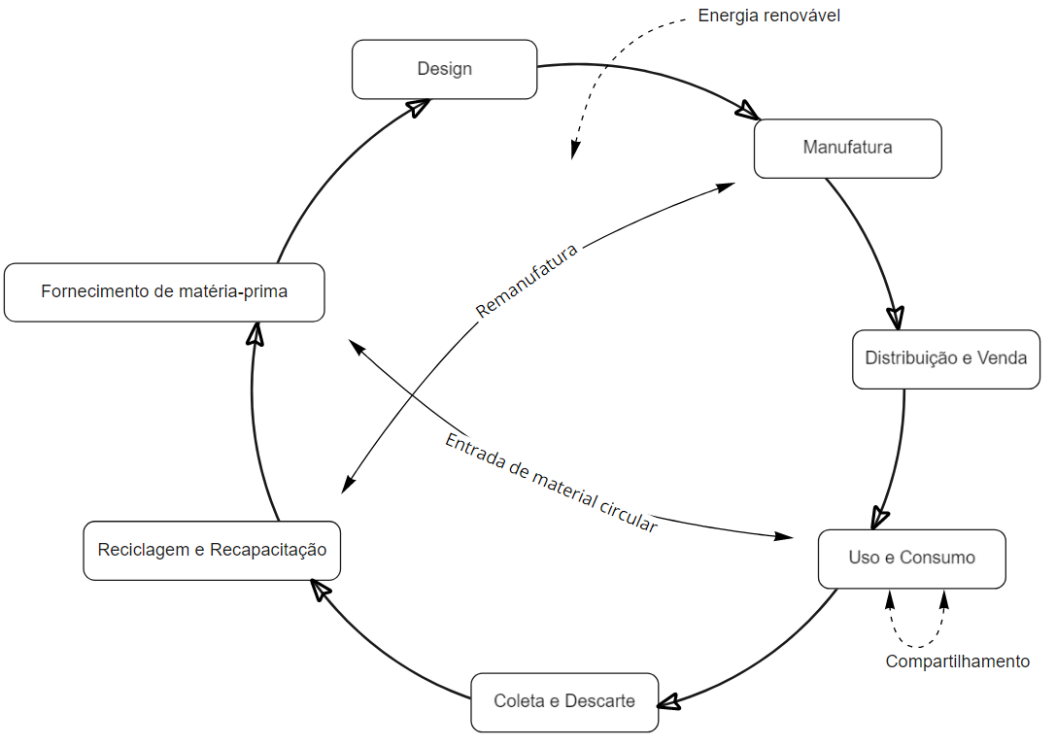
O atual modelo econômico linear de produção e consumo, “extrair, produzir, desperdiçar” (Ellen MacArthur Foundation, 2020), que se fundamenta na crescente extração e consumo de recursos naturais finitos é, cada vez mais, visto como insustentável e inviável frente ao crescimento demográfico exponencial e à enorme quantidade de resíduos gerados. De acordo com a Ellen MacArthur Foundation (2015), a população de classe média mundial deve mais do que dobrar até 2030, atingindo quase 5 bilhões de pessoas, indicando, portanto, uma aceleração das economias de consumo.

Nesse contexto, o conceito de Economia Circular emerge, então, da urgente necessidade de se adotar um modelo de negócios mais sustentável capaz de lidar com a crescente demanda por recursos naturais, e baseia-se em três princípios: (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

- Preservar o capital natural controlando estoques finitos e equilibrando os fluxos de recursos renováveis, por meio de tecnologias e processos que utilizem recursos renováveis e criando condições ideais para a regeneração do sistema.
- Possibilitar a circulação de produtos, materiais e componentes no mais alto nível de utilidade e valor, otimizando o rendimento de recursos. Para isso, deve-se projetar visando a renovação, reciclagem e remanufatura, bem como buscar maximizar o número de ciclos consecutivos, prolongando a vida útil dos materiais.
- Estimular a efetividade do sistema, buscando a redução de danos e externalidades negativas.

O conceito de EC é, portanto, de uma economia restaurativa e regenerativa, que propõe manter produtos e materiais no seu mais alto valor e nível de utilidade o tempo todo, e distingue o ciclo técnico do biológico (Ellen MacArthur Foundation, 2015). No

Figura 3 – Fluxo de recursos em uma economia circular



Fonte: Kalmykova, Sadagopan e Rosado (2018), adaptado pelos autores

ciclo técnico, ocorre a gestão de estoque dos materiais finitos, que são recuperados e restaurados. No ciclo biológico, nutrientes renováveis são regenerados.

Na esfera ambiental, estima-se que, com o desenvolvimento da EC, o consumo de materiais primários possa ser reduzido em 32% até 2030 e 53% até 2050 em relação aos níveis atuais e haja uma redução das externalidades negativas, como poluição do ar e da água, mudanças climáticas e liberação de substâncias tóxicas. Além disso, com a inserção da EC na União Europeia, pode haver uma redução de emissões de gases de efeito estufa em 48% até 2030 e 83% até 2050 (Ellen MacArthur Foundation; McKinsey Center for Business and Environment, 2015).

No âmbito econômico, Ellen MacArthur Foundation e McKinsey Center for Business and Environment (2015) demonstram a possibilidade de um aumento do PIB europeu em 27% até 2050 em um cenário circular tendo em vista a redução de custos de produção e serviços e a transformação de atividades não-produtivas em novas atividades produtivas. No cenário social, a EC pode gerar novos empregos e renda, sendo o setor da reciclagem promissor na criação de novas oportunidades.

Uma ferramenta chave na transição para a EC é o *Life Cycle Assessment* (LCA), ou Avaliação do Ciclo de Vida, metodologia utilizada internacionalmente para medir a "circularidade" dos materiais. Através desta técnica identifica-se os impactos associados a todos os estágios do ciclo de vida de um produto, material ou componente (van Maastrigt, 2019). A metodologia é amplamente utilizada no ramo da construção civil para medir e quantificar o consumo de energia e impacto ambiental dos edifícios. Deste modo, possibilita-se a identificação de estratégias apropriadas para o desenvolvimento da EC visando maior sustentabilidade e melhor performance ambiental.

Desenvolver uma logística reversa é outro aspecto fundamental na transição para a EC, visando a preservação do valor dos materiais e produtos e facilitando o retorno destes ao mercado (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

Atualmente, os principais responsáveis por impulsionar a implementação e o avanço da EC são órgãos governamentais, ONGs e empresas de consultoria (KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018). No entanto, toda a sociedade tem um papel chave nesta mudança.

Além disso, o conceito de economia circular existe desde a década de 70, mas, no Brasil, discussões acerca de uma possível transição ainda são recentes (AZEVEDO, 2015). A nível federal ainda não existe uma política pública para a transição para a EC.

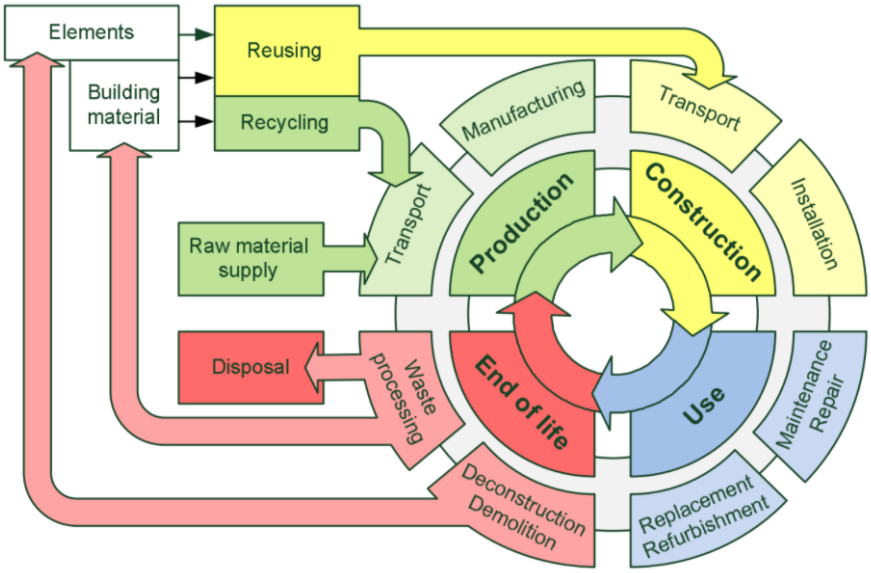
2.1.1 Construção Civil e Aço

A Figura 4 ilustra o ciclo de vida de elementos estruturais, que são reutilizados no próprio setor de construção, representando um ciclo fechado.

Um ponto relevante na viabilização da EC no setor da construção civil é a Certificação LEED, ou *Leadership in Energy and Environmental Design*, ferramenta desenvolvida com o objetivo de "incentivar e acelerar a adoção de práticas de construção sustentável" (Green Building Council Brasil, s.d.). Dentre as categorias avaliadas pelo LEED, enquadra-se Materiais e Recursos utilizados nos empreendimentos, e tem como pré-requisitos a gestão de resíduos de construção, reuso de edificações, utilização de conteúdos reciclados, reutilização de recursos, utilização de materiais regionais e, por fim, também abrange aspectos de depósito e coleta de materiais recicláveis durante a operação do edifício (GORGOLEWSKI et al.,

2006).

Figura 4 – Ciclo de vida de elementos estruturais



Fonte: Hradil et al. (2014)

A adoção de uma logística reversa, portanto, mostra-se relevante e apresenta benefícios na implementação da EC na construção civil. Por exemplo, a possível disponibilidade de itens a serem reutilizados na região da obra, o que reduz, assim, os custos de transporte e estoque de matérias-primas virgens (HOSSEINI et al., 2015).

2.2 Indústria do aço

Embora espera-se um aumento na extração do minério de ferro nos próximos anos, a oferta do material não será suficiente para suprir a demanda da indústrias de siderurgia. Segundo Wübbeke e Heroth (2014), a reciclagem da sucata de aço é uma alternativa para amenizar a intensidade de extração da matéria prima. Além disso, o uso da sucata pode beneficiar indústrias produtoras de aço gerando uma proteção cambial contra a volatilidade dos preços de minério de ferro no mercado mundial.

No contexto da sustentabilidade, observou-se nos últimos anos, uma crescente tendência na adoção de agendas pró ambientais e que reduzam os impactos da atividade econômica no meio ambiente. Dado a isso, a indústria siderúrgica torna-se alvo da interseção governamental através de medidas públicas na tentativa de tornar a produção mais sustentável, o que geraria um aumento direto nos custos de produção.

De acordo com o trabalho de Pauliuk et al. (2013), estima-se que a oferta de sucata de aço ao fim de seu ciclo de vida útil continuará crescendo significativamente, de forma que a produção primária de aço será ultrapassada pela secundária.

2.2.1 Processo de produção

Segundo a Confederação Nacional da Indústria e Instituto Aço Brasil (2017), o modelo de produção do aço brasileiro se divide em duas vertentes: usinas integradas e usinas semi-integradas. As usinas integradas utilizam uma combinação de minério de ferro e sucata em seu processo e passam por três etapas principais, redução, refino e laminação. Por outro lado, as usinas semi-integradas utilizam basicamente a sucata como matéria prima de produção e operam apenas os estágios de refino e laminação.

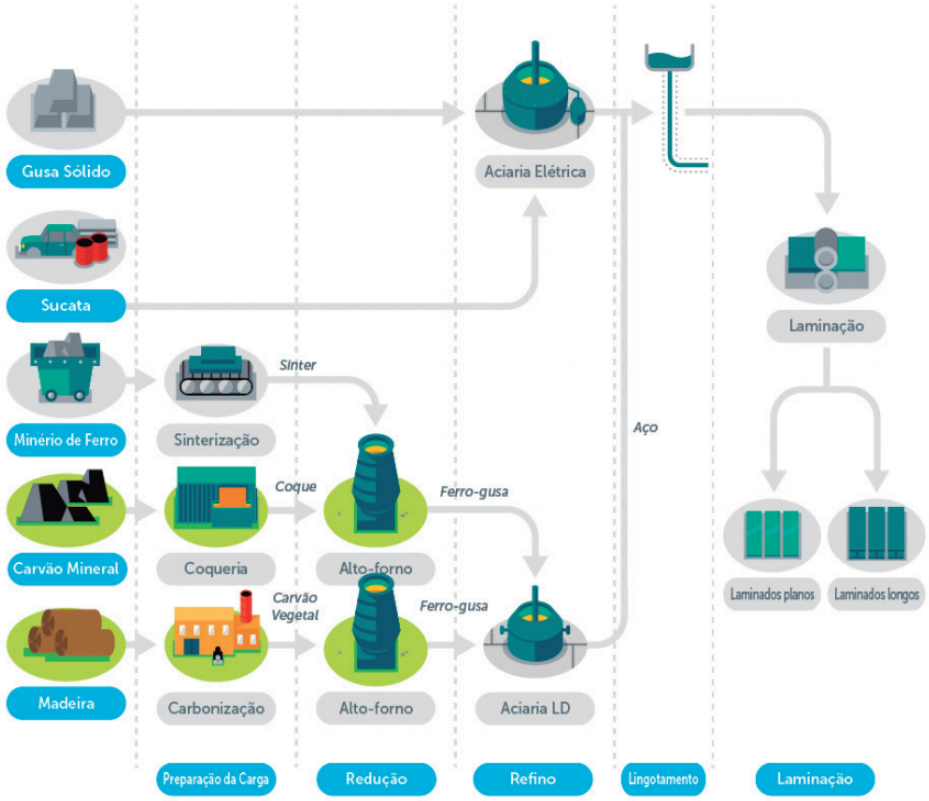
Na conjuntura atual, a produção no modelo semi-integrado é energeticamente mais econômica em relação ao modelo integrado e consequentemente um processo mais sustentável. Apesar disso, até 2016, aproximadamente 85% da produção de aço no Brasil se deu em usinas integradas (Confederação Nacional da Indústria; Instituto Aço Brasil, 2017).

O processo de produção integrado engloba as etapas de sinterização, coqueria e redução em alto-forno, dentre outras. Estas etapas, segundo Zhang et al. (2012), são responsáveis por gerar a maior parte da carga poluente durante o processo. Ao substituir o modelo integrado pelo semi-integrado, uma usina retiraria tais etapas do processo, devido ao uso da sucata metálica, tornando o processo mais eficiente.

Contudo, atualmente um movimento expressivo de adoção do modelo semi-integrado é dependente de avanços tecnológicos no emprego de fornos elétricos a arco (FEA), presentes na etapa de aciaria elétrica, e fornecimento de energia elétrica de baixo custo. Isso ocorre em decorrência do alto custo energético dos FEA. Estima-se que a aciaria elétrica (modelo semi-integrado) gasta até seis vezes mais energia do que a aciaria LD (modelo integrado) (WÜBBEKE; HEROTH, 2014).

A Figura 6, elaborada por Cullen, Allwood e Bambach (2012) ilustra o fluxo global de aço em 2008 e demonstra que um terço do aço líquido advém de sucata, sendo os outros dois terços derivados de minério de ferro. Observa-se que mais da metade do aço global é utilizado no setor de construção civil.

Figura 5 – Processo de produção do aço brasileiro



Fonte: Confederação Nacional da Indústria e Instituto Aço Brasil (2017)

Em um estudo elaborado por Yellishetty et al. (2011), os autores destacam que entre os anos de 2000 e 2006 nos Estados Unidos, o setor da construção civil foi o segundo em taxa de reciclagem de aço estrutural e aço para concreto, ficando atrás apenas do setor automotivo.

Finalmente, a Figura 7 ilustra a matriz produtora de aço em 2017 no Brasil. Claramente, a parcela representando a rota Integrada predomina sobre a rota Semi-Integrada, reforçando a ideia de uma transição para uma matriz mais sustentável e circular.

2.2.2 Construção civil

Algumas possibilidades de reuso e reciclagem aplicados ao aço utilizado na construção civil consistem no reuso de componentes, produção mista e “reciclagem pura”. A primeira consiste na reutilização direta de estruturas, como vigas e perfis de aço, em uma nova edificação ou no mesmo local (reutilização *in situ*). A produção

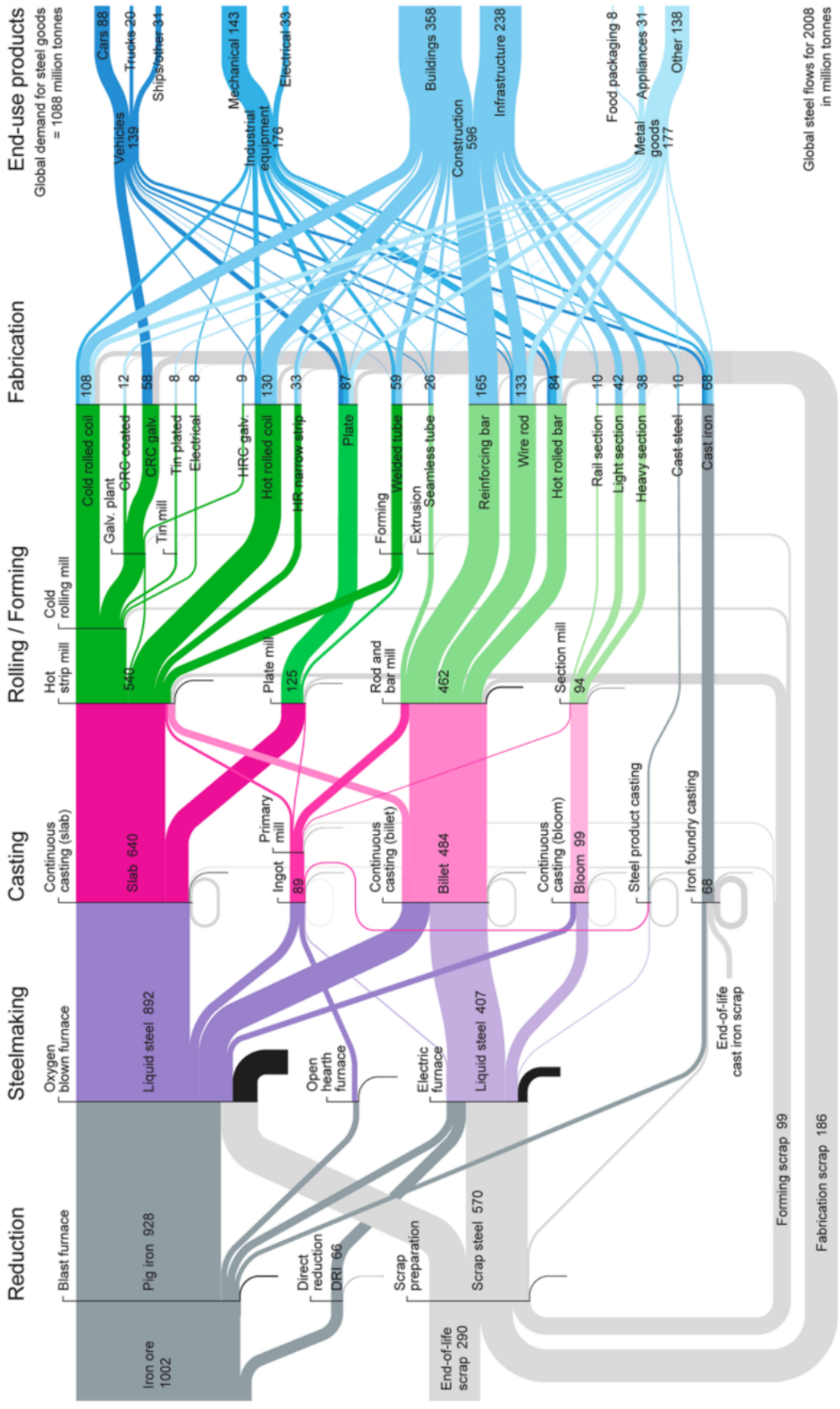
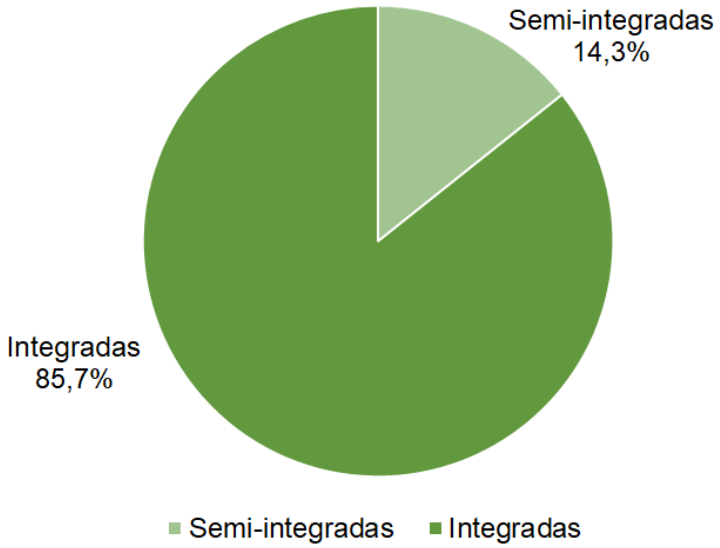


Figura 6 – Fluxo global de aço em 2008

Fonte: Cullen, Allwood e Bambach (2012)

Figura 7 – Produção do aço no Brasil dividida por modelo produtivo



Fonte: adaptado de Confederação Nacional da Indústria e Instituto Aço Brasil (2017)

mista baseia-se nos processos de recuperação e reprocessamento do aço via forno a oxigênio, transformando-o em sucata que, em seguida, se junta a outros materiais primários para produzir um novo aço. Por fim, o processo de reciclagem pura do aço ocorre via Forno Elétrico a Arco, sistema de produção cuja matéria-prima é a sucata (GORGOLEWSKI et al., 2006).

O conceito de reduzir no prisma da EC está diretamente relacionado com a eficiência do material. Constitui-se na redução do peso da estrutura, mediante redução da quantidade de metal utilizado, porém mantendo a mesma função. Reduzir o peso de componentes de aço também resulta em uma estrutura mais leve. Esta é uma estratégia promissora na redução de carbono incorporado na indústria da construção civil (ALLWOOD; CULLEN; CARRUTH, 2012).

Devido a crescente necessidade de redução de tempo de construção e eficiência construtiva no que tange o descarte de resíduos, o aço é um material altamente atrativo e que devido às suas características, será ainda mais empregado no futuro. Ao comparar o aço com outros materiais comumente utilizados na construção civil, nota-se que uma das principais vantagens é a grande resistência a esforços.

Tabela 1 – Resistência do aço e demais materiais

Tensão admissível à compressão	
σ aço	150 MPa
σ concreto	10 MPa
σ madeira	8 MPa
Tensão admissível à tração	
σ aço	150 MPa
σ concreto	1 MPa
σ madeira	9 MPa

Fonte: adaptado Centro Brasileiro da Construção em Aço (s.d.).

Esta característica permite o emprego de elementos estruturais com menores dimensões. A expansão dos centros urbanos e o desafio de se construir estruturas duradouras em espaços cada vez mais reduzidos é um cenário que se beneficiaria diretamente com o aumento da utilização do aço como matéria prima.

A característica de maior relevância para esta pesquisa, no entanto, é a alta capacidade circular do aço.

O aço é um dos materiais mais reutilizáveis do planeta. É possível reciclar componentes de aço, derretendo-os, e preservando suas propriedades originais após o processo. Estima-se que 99% do aço utilizado na construção civil é ou será reutilizado ou reciclado (Building Products, 2019). Materiais como o aço podem ser reciclados em dois processos distintos. O primeiro, intitulado *downcycling*, ou *cascata*, refere-se ao processo em que o material é reutilizado como um produto de valor inferior ao inicial.

Já no segundo, conhecido como reciclagem de ciclo fechado, o material não perde suas propriedades durante a reciclagem, como, por exemplo, quando uma viga de aço se transforma em outra viga de aço, podendo ser reutilizada na mesma ou em outra edificação.

O diagrama exposto na Figura 8 ilustra a cadeia de valor do aço estrutural ao longo de toda a sua vida útil. Embora não seja o foco principal deste estudo, o diagrama contribui para uma perspectiva holística de todas as etapas desde o processo produtivo até práticas de reuso e reciclagem do aço.

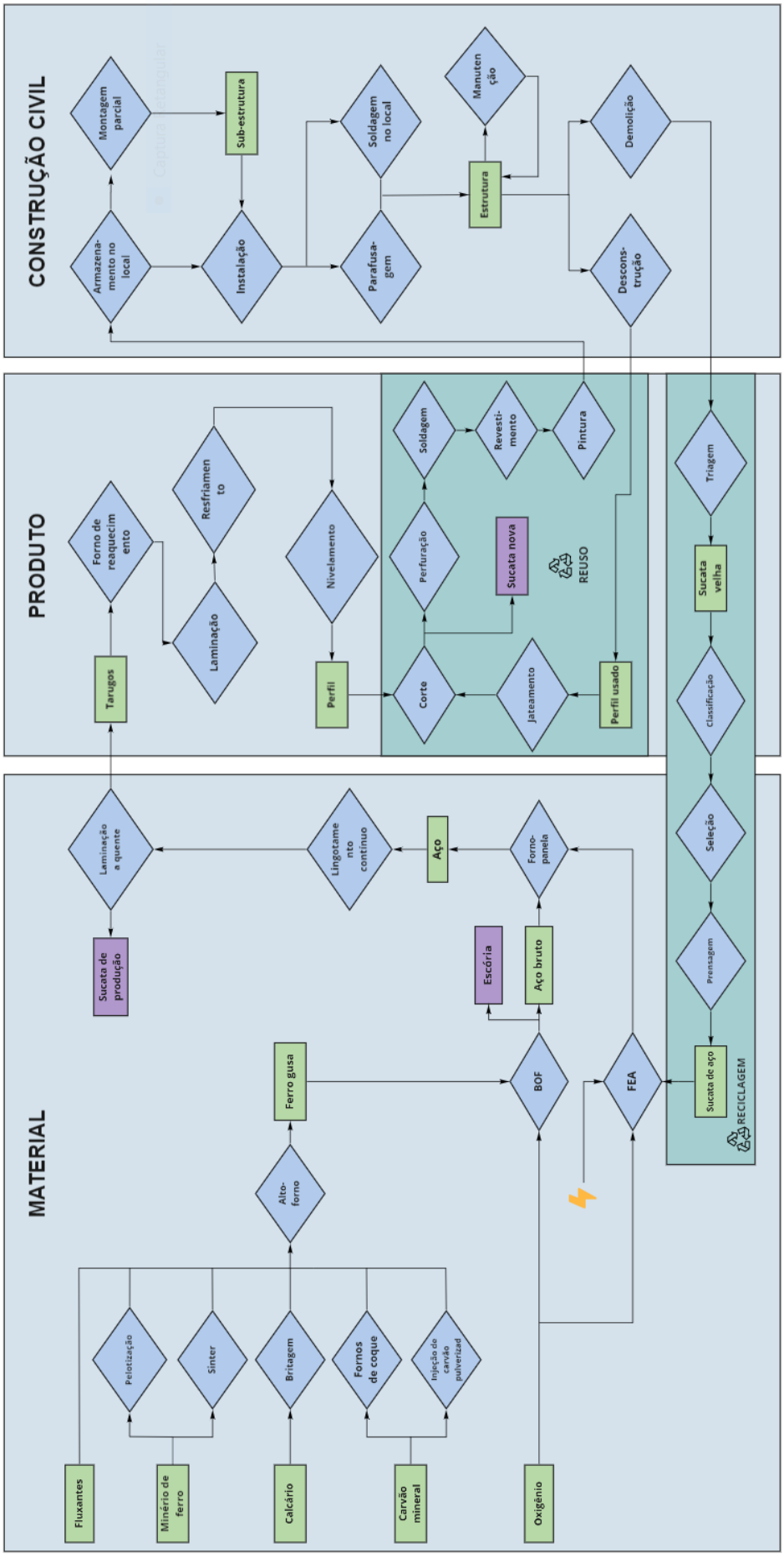


Figura 8 – Cadeia de valor do aço estrutural

Fonte: Adaptado de van Maastrigt (2019)

3 Seleção do portfólio bibliográfico

O presente capítulo caracterizará a metodologia de pesquisa aplicada no desenvolvimento deste projeto e descreverá as etapas envolvidas no processo, assim como as ferramentas utilizadas.

3.1 Enquadramento metodológico

O enquadramento metodológico da pesquisa foi realizado de acordo com a classificação metodológica proposta por Gil (2002). Dessa forma, pode-se dividir a classificação nas seguintes dimensões: natureza dos objetivos gerais; população e amostra; delineamento da pesquisa, procedimento técnico de análise e coleta de dados;

Quanto à natureza dos objetivos, a pesquisa é exploratória e descritiva. Exploratória, pois elucida os principais aspectos relacionados ao tema de pesquisa. Descritiva, pois trabalha a observação sistemática do tema, através da análise bibliométrica sistêmica dos artigos que compõem o PB.

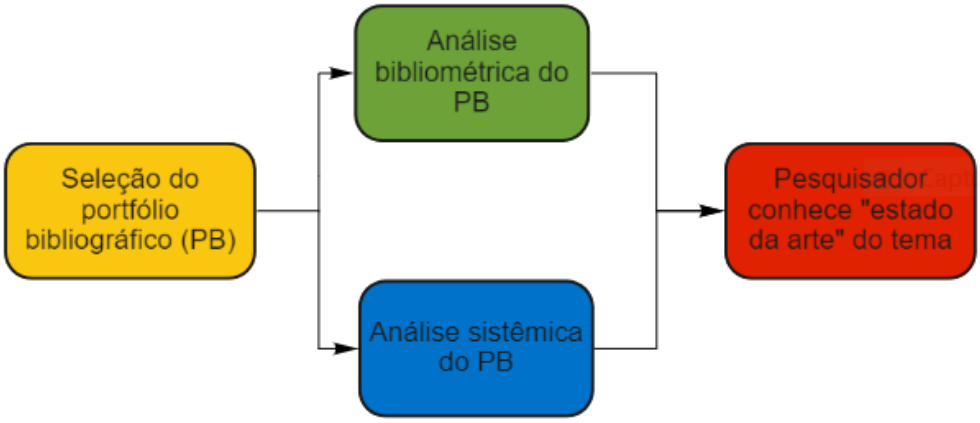
No que diz respeito à população e amostra, compõem a população-alvo da pesquisa toda publicação científica em periódico, tese de dissertação ou papel de conferência que aborde um dos eixos da pesquisa e com acesso disponível nas bases de dados selecionadas.

Com relação ao delineamento da pesquisa, classifica-se como pesquisa bibliográfica ao analisar uma coleção de trabalhos científicos publicados, os quais serviram de base na construção do PB.

3.2 Aplicação da metodologia

Para a obtenção do material teórico relevante para alcançar os objetivos propostos no presente estudo, utilizou-se da análise bibliométrica realizada por meio do método ProKnow-C de Ensslin et al. (2010), composto por 4 etapas, como ilustra o esquema abaixo.

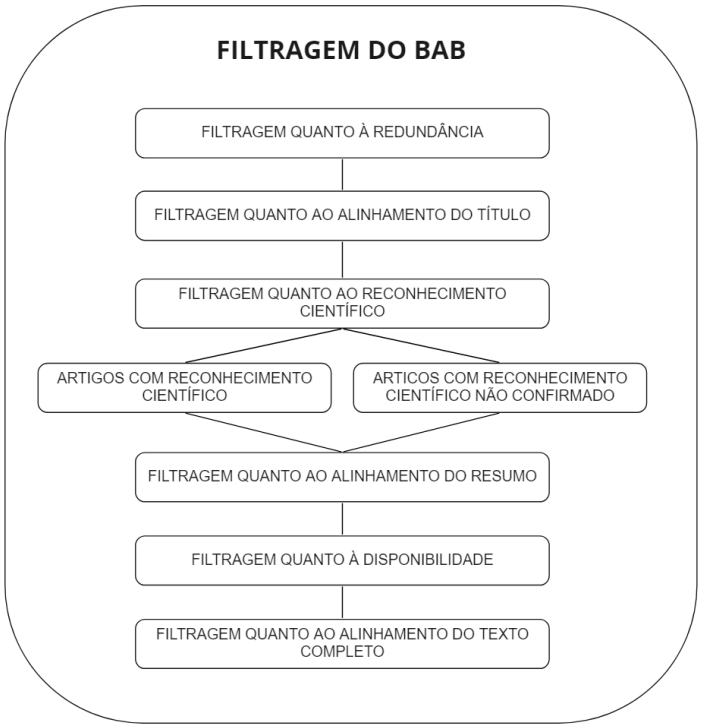
Figura 9 – Etapas do método ProKnow-C



Fonte: Adaptado de Ensslin et al. (2010)

A Seleção do PB consiste na aplicação de filtragens sucessivas, Filtragem do Banco de Artigos Bruto (BAB), até a obtenção do Portfólio Bibliográfico final, como ilustrado na Figura 10 abaixo:

Figura 10 – Etapas do método ProKnow-C



Fonte: Elaborada pelos autores

A primeira fase do método consistiu em identificar os 2 eixos de pesquisa

que constituem o tema de estudo, e, para cada eixo, definir as principais palavras-chave relacionadas com cada eixo nas línguas inglesa e portuguesa. Ensslin et al. (2010) sugerem a definição de quatro a dez palavras-chave (PC). Gerou-se, então, 16 combinações de PC, conforme ilustrado na Figura 11:

Figura 11 – Palavras-chave

Eixos	
Aço de construção civil	**Economia Circular**
Palavras-chave	
Aço estrutural	Economia circular
Indústria do aço	Logística Reversa
Aço de construção civil	Sustentabilidade
Reuso do aço	Cadeia de suprimentos

Fonte: Elaborada pelos autores

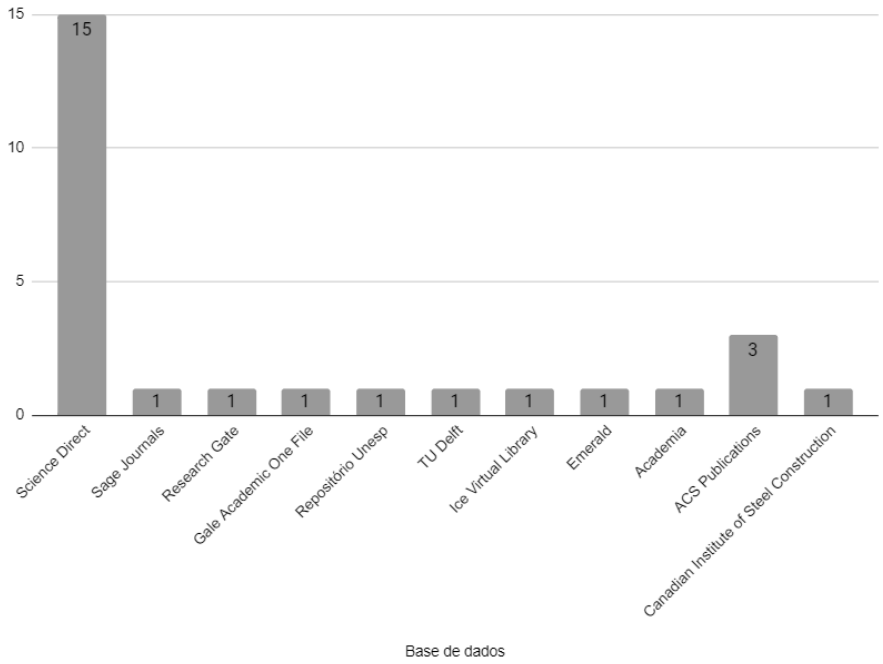
Partiu-se, então, para a seleção dos bancos de dados (BD). Esta fundamentou-se, inicialmente, no direito de acesso à base, e, em segundo lugar, na afinidade com o tema proposto. Finalmente, os bancos selecionados para a pesquisa foram o Science Direct e o Emerald. O Google Acadêmico também foi considerado na busca por artigos relevantes.

Pela Figura 12, verifica-se que o Science Direct é o BD com maior adesão ao tema da pesquisa, visto que mais de 50% do portfólio de artigos selecionados foi extraído de lá.

Utilizou-se das 16 combinações de PC na busca de artigos para o portfólio bibliográfico. O critério utilizado foi a presença das PC nos títulos, resumos, palavras-chave ou corpo do texto. Livros não foram considerados. Nesta fase, 4280 artigos reconhecidos cientificamente foram encontrados através do critério utilizado. Todos os artigos selecionados foram importados para o *software* EndNote, onde agrupou-se os artigos de acordo com o respectivo banco de dados e as combinações de PC.

Assim, deu-se início à fase de filtragem dos artigos quanto à redundância, através da eliminação dos artigos selecionados em mais de um banco de dados. Como resultado, o Banco de Artigos Bruto (BAB) passou de 4280 para 3004 artigos não

Figura 12 – Banco de dados



Fonte: Elaborado pelos autores

duplicados. Constata-se, portanto, que 29,81% dos artigos iniciais eram duplicados.

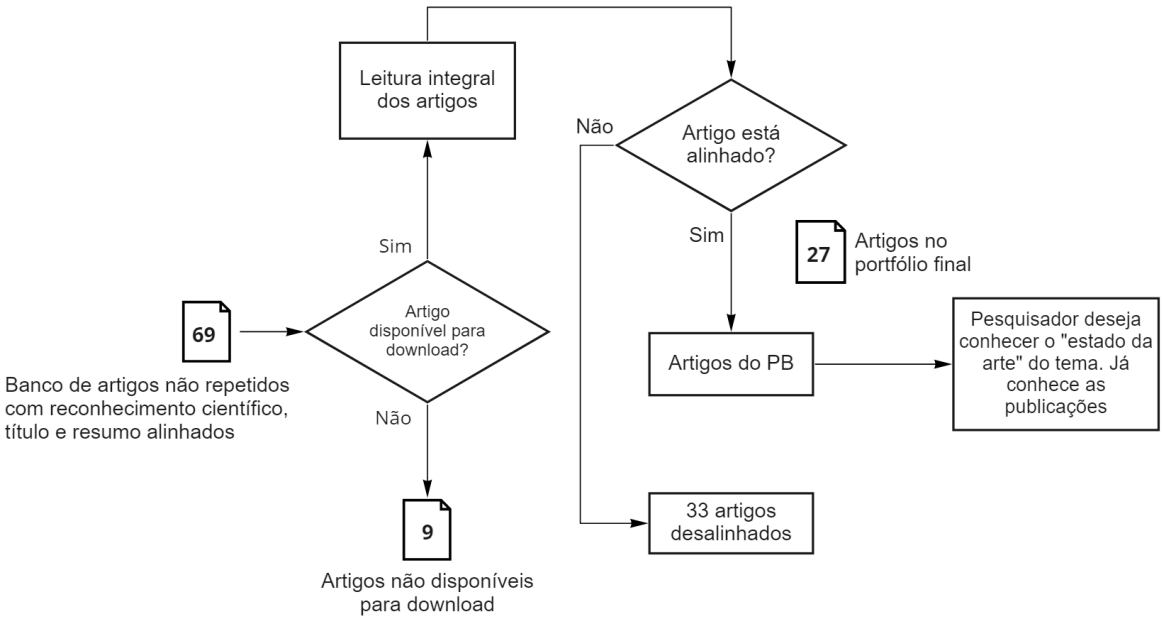
Em seguida, os 3004 títulos foram lidos e selecionados quanto ao alinhamento com o tema da pesquisa, resultando em 192 artigos relacionados à Economia Circular como um todo, à sustentabilidade no mercado do aço, ou, finalmente, à Economia Circular aplicada ao mercado do aço.

Na fase seguinte, foi realizada a filtragem dos artigos não repetidos quanto ao reconhecimento científico. Para isso, identificou-se o número de citações de cada artigo, de forma a selecionar aqueles com 15 ou mais citações, responsáveis por 94,21% das citações dos 192 artigos com título alinhado ao tema de pesquisa. Usualmente, utiliza-se 80% das citações como ponto de corte, porém, observou-se que tal amostra apresentava uma distribuição de citações muito variável, o que se deu com um grande número de artigos com citações relativamente menores que os artigos mais citados. Por isso, optou-se por utilizar o ponto de corte em 15 citações, o que geraria também, um resultado mais efetivo. Reduziu-se, então, o número de artigos de 192 para 62.

Posteriormente, realizou-se a leitura do resumo dos 62 artigos selecionados na etapa anterior, e, como resultado, obteve-se 39 artigos cujos resumos estão alinhados

com o tema em questão, o que corresponde a 62,9% dos artigos com 15 ou mais citações.

Figura 13 – Metodologia esquematizada



Fonte: Adaptado de Ensslin et al. (2010)

Os 130 artigos sem reconhecimento científico confirmado cujos títulos estão alinhados, passaram pelo filtro de verificação de reconhecimento científico e alinhamento do resumo, realizado através da leitura dos resumos dos artigos publicados a partir do ano de 2018. Este critério se deve ao fato de que artigos mais recentes possivelmente não possuem ou possuem poucas citações. Nesta etapa, 30 artigos foram julgados relevantes para a pesquisa, totalizando 69 artigos com reconhecimento científico confirmado.

A fase seguinte consistiu na verificação da disponibilidade de acesso dos 69 artigos com reconhecimento científico confirmado, cujos resumos estão alinhados com o tema de pesquisa. Ao final, apenas 9 artigos não estavam disponíveis.

Finalmente, através de uma leitura completa do corpo do texto dos 60 artigos do BAB, obteve-se um total de 27 artigos cientificamente reconhecidos e em conformidade com o tema da pesquisa.

Nesse sentido, o portfólio de artigos pode ser observado na Tabela 2:

Tabela 2 – Portfólio final de artigos

Autor	Título	Fonte	Ano	Citações
Yuliya Kalmykova, Madumita Sadagopan, Leonardo Rosado	Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools	Resources, Conservation and Recycling	2018	519
Francesco Pomponi, Alice Moncaster	Circular economy for the built environment: A research framework	Journal of Cleaner Production	2017	353
Mohan Yellishetty, Gavin M. Mudd, P.G. Ranjith, A. Tharumarajah	Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: sustainability issues, problems and prospects	Environmental Science and Policy	2011	200
Stefan Pauliuk, Rachel L. Milford, Daniel B. Müller, and Julian M. Allwood	The steel scrap age	Environmental Science and Technology	2013	183
Jonathan M. Cullen, Julian M. Allwood, and Margarita D. Bambach	Mapping the global flow of steel: from steelmaking to end-use goods	Environmental Science and Tecnology	2012	163
Fernanda Cruz Rios, Wai K. Chong, David Grau	Design for Disassembly and Deconstruction - Challenges and Opportunities	International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction	2015	82
Danielle Densley Tingley, Simone Cooper, Jonathan Cullen	Understanding and overcoming the barriers to structural steel reuse a UK perspective	Journal of Cleaner Production	2017	75
Lukumon O. Oyedele, Saheed O. Ajayi, Kabir O. Kadiri	Use of recycled products in UK construction industry: An empirical investigation into critical impediments and strategies for improvement	Resources, Conservation and Recycling	2012	75
Eleni Iacovidou, Phil Purnell	Mining the physical infrastructure: Opportunities, barriers and interventions in promoting structural components reuse	Science of the Total Environment	2016	75
Graziela Darla Araujo Galvão, Jennifer de Nadae, Diego Honorato Clemente, Guilherme Chinen, Marly Monteiro de Carvalho	Circular Economy: Overview of Barriers	10th CIRP Conference on Industrial Product-Service-Systems	2018	63
Jost Wübbeke and Timo Heroth	Challenges and political solutions for steel recycling in China	Resources, Conservation and Recycling	2014	62
Daniel R. Cooper and Julian M. Allwood	Reusing Steel and Aluminum Components at End of Product Life	Environmental Science and Technology	2014	58
Dr Mark Gorgolewski, Prof. Vera Straka, Jordan Edmonds, Carmela Sergio	Facilitating greater reuse and recycling of structural steel in the construction and demolition process	Canadian Institute for Steel Construction	2006	42
Cyrille F. Dunant, Michał P. Drewniok, Michael Sansom, Simon Corbey, Julian M. Allwood, Jonathan M. Cullen	Real and perceived barriers to steel reuse across the UK construction value chain	Resources, Conservation and Recycling	2017	32
Peng Wang, Wen Li, Sami Kara	Cradle-to-cradle modeling of the future steel flow in China	Resources, Conservation and Recycling	2017	30

Petr Hradil, Margareta Wahlström, Asko Talja, Satu Huukha	Re-use of structural elements	VTT Technology T200	2014	18
Peter Hopkinson, Han-Mei Chen, Kan Zhou, Yong Wang, Dennis Lam	Recovery and reuse of structural products from end-of-life buildings	Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability	2019	18
Muhammad Bilal, Khurram Iqbal Ahmad Khan, Muhammad Jamaluddin Thaheem, Abdur Rehman Nasir	Current state and barriers to the circular economy in the building sector: Towards a mitigation framework	Journal of Cleaner Production	2020	11
Md. Uzzal Hossain, S. Thomas Ng, Prince Antwi-Afari, Ben Amor	Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2020	11
Tuomo Joensuu, Harry Edelman, Arto Saari	Circular economy practices in the built environment	Journal of Cleaner Production	2020	11
Kambiz Rakhshan,Jean-Claude Morel, Hafiz Alaka and Rabia Charef	Components reuse in the building, sector – A systematic review	Waste Management and Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy	2020	9
Wei Gu, Chen Wang, Shufen Dai, Lirong Wei, I. Robert Chiang	Optimal strategies for reverse logistics network construction: A multi-criteria decision method for Chinese iron and steel industry	Resources Policy	2019	6
Corentin Fivet, Jan Brütting	Nothing is lost nothing is created everything is reused; structural design for a circular economy	The Structural Engineer	2020	6
Albert P.C. Chan, Yang Yang, Ran Gao	Factors affecting the market development of steel construction	Engineering, Construction and Architectural Management	2018	3
Vander Luiz da Silva,Tatiane Teixeira, Antonio Carlos de Francisco, Claudia Tania Picinin, João Luiz Kovaleski, Regina Negri Pagani	Advantages, barriers and strategies for circular economy: a theoretical approach	Exacta	2019	1
Wagner Colucci Izeppi	Estímulos e barreiras para a adoção da economia circular: uma pesquisa quantitativa nos setores de agronegócio, construção civil e eletroeletrônico	Universidade Estadual Paulista - FEB	2019	0
Joris van Maastrigt	Quantifying Life Cycle Environmental Benefits of Circular Steel Building Designs: development of an environmental assessment tool for reuse of steel members in building designs for the Netherlands	Delft University of Technology	2019	0

4 Análise bibliométrica e sistêmica

Segundo Vanti (2002), há uma discussão acerca da origem exata do termo bibliometria, alguns autores atribuem à figura de Alan Pritchard, outros à Paul Otlet. Porém, na década de 69 que foi apresentada a primeira aplicação da bibliotecometria, como chamada na época, tornando-se mais tarde bibliometria.

A bibliometria trata-se de uma técnica quantitativa e estatística que permite medir índices de produção e disseminação do conhecimento (ARAÚJO, 2006), acompanhar o desenvolvimento de diversas áreas científicas e os padrões de autoria, publicação e uso dos resultados de investigação (LOPES et al., 2012).

4.1 Análise bibliométrica dos artigos do portfólio bibliográfico

Nesta seção, apresentam-se os resultados do perfil das publicações do portfólio e de suas referências em termos das quatro características: (1) reconhecimento científico dos artigos; (2) relevância dos periódicos; (3) autores de maior destaque; e, (4) palavras-chave mais utilizadas.

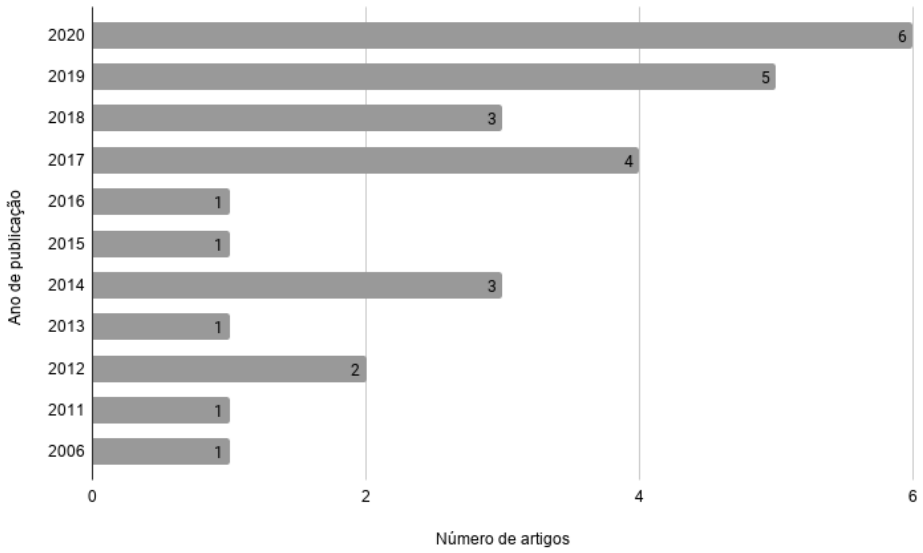
4.1.1 Reconhecimento científico dos artigos

Pela Tabela 2 torna-se possível avaliar os artigos com maior reconhecimento científico, de acordo com o número de citações de cada artigo do portfólio. Deve-se, contudo, considerar também o ano de publicação, visto que artigos publicados recentemente podem ainda não possuir citações, embora tenham grande aderência ao tema da pesquisa.

A análise do ano de publicação de cada artigo, apresentada pela Figura 14, evidencia a atualidade do tema abordado e a sua ampla discussão nos últimos anos. Dos 28 artigos do Portfólio Bibliográfico, 17 foram publicados entre os anos de 2017 e 2020. Dos 10 artigos restantes, 9 foram publicados entre os anos de 2011 e 2016 e apenas 1 no ano de 2006.

Infere-se, portanto, que a EC aplicada à indústria do aço e ao cenário da construção civil tem ganhado maior destaque em trabalhos recentes, ressaltando a relevância do presente trabalho.

Figura 14 – Número de artigos por ano de publicação



Fonte: Elaborado pelos autores

Ainda pela tabela 2, pode-se observar que o artigo mais citado no PB foi *Circular economy - from review of theories and practices to development of implementation tools*, dos autores Yuliya Kalmykova, Madumita Sadagopan e Leonardo Rosado, produzido em 2018, com 519 citações, segundo consulta realizada no *Google Scholar*. Citam-se ainda, os artigos *Circular economy for the built environment: a research framework* de Francesco Pomponi e Alice Moncaster, com 353 citações, e o *The steel scrap age*, de Stefan Pauliuk, Rachel L. Milford, Daniel B. Müller e Julian M. Allwood, com 183 citações.

Os últimos três artigos da tabela, de Silva et al., *Advantages, barriers and strategies for circular economy: a theoretical approach*, Izeppi, *Estímulos e barreiras para a adoção da economia circular: uma pesquisa quantitativa nos setores de agronegócio, construção civil e eletroeletrônico*, e Maastrigt, *Quantifying Life Cycle Environmental Benefits of Circular Steel Building Designs: development of an environmental assessment tool for reuse of steel members in building designs for the Netherlands* possuem uma ou nenhuma citação devido ao ano de publicação muito

recente.

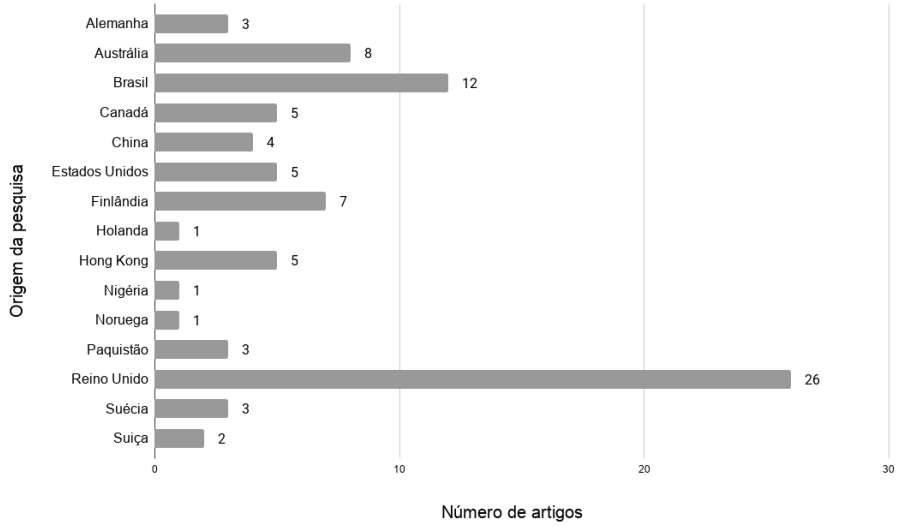
4.1.2 Autores de maior destaque

Para o portfólio considerado, pode-se observar pela análise da coluna “Autor” da Tabela 2, que apenas 2 autores, Julian M. Allwood (Universidade de Cambridge, Reino Unido) e Jonathan M. Cullen (Universidade de Cambridge, Reino Unido), são autores de mais de um artigo. O primeiro é autor de quatro artigos do portfólio, *”The steel scrap age"*, *“Mapping the global flow of steel: from steelmaking to end-use goods”*, *“Reusing Steel and Aluminum Components at End of Product Life”* e *“Real and perceived barriers to steel reuse across the UK construction value chain”*; enquanto o segundo, de três artigos diferentes, *“Mapping the global flow of steel: from steelmaking to end-use goods”*, *“Understanding and overcoming the barriers to structural steel reuse a UK perspective”* e *“Real and perceived barriers to steel reuse across the UK construction value chain”*.

4.1.3 Análise dos países de origem dos autores do PB

Quanto à abrangência do tema, como pode-se observar na Figura 15 abaixo, trata-se de um assunto de relevância internacional com notória presença no continente europeu.

Figura 15 – Número de artigos conforme origem da pesquisa



Fonte: Elaborado pelos autores

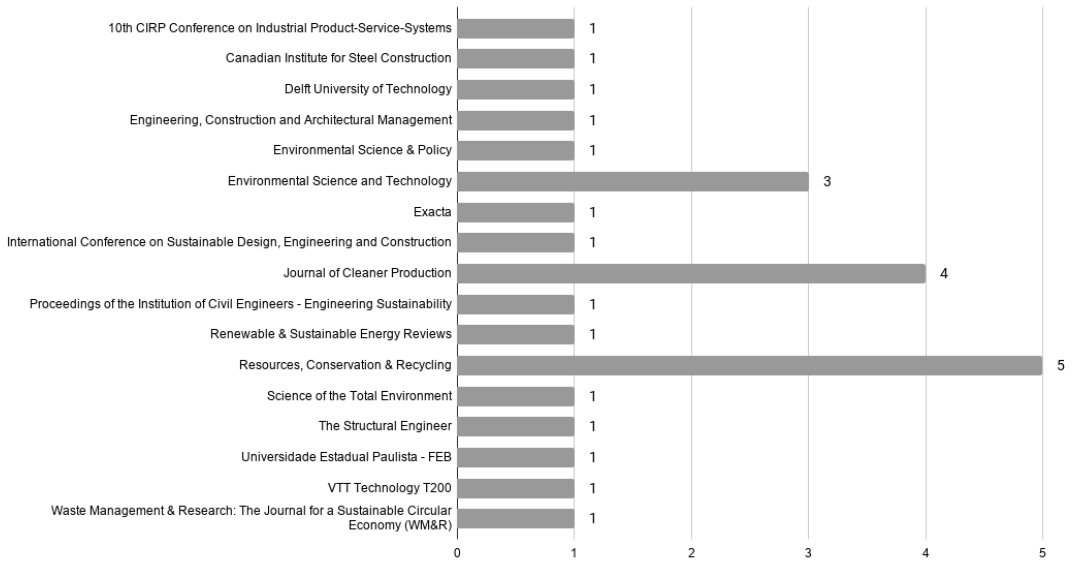
Embora o portfólio bibliográfico selecionado apresente poucos artigos de universidades chinesas, o país gera substanciais focos de pesquisa como será visto posteriormente na análise sistêmica.

A Figura 15 foi construída com base na origem das instituições de ensino e cada autor do PB. Nota-se que o Reino Unido tem o maior número de pesquisadores com foco no tema da pesquisa, o equivalente a 30% do total. Metade do número dos autores é de universidades europeias. Embora existam 12 autores de universidades brasileiras, há apenas 3 trabalhos com origem no Brasil.

4.1.4 Relevância dos periódicos e instituições dos artigos do PB

Conforme ilustrado na Figura 16 abaixo, nota-se que, dos 27 artigos selecionados, 11 pertencem a um dos periódicos a seguir: *Resources, Conservation and Recycling*, *Journal of Cleaner Production* e *Environmental Science and Technology*. Os dois primeiros são publicados pela editora Elsevier, ao passo que o último é publicado pela ACS Publications. Um total de 7 artigos são publicados por instituições ou conferências, e os demais artigos são publicados por 9 periódicos distintos. Pode-se observar, portanto, a abrangência do tema de pesquisa, sendo de interesse de diversos periódicos internacionalmente.

Figura 16 – Artigos por periódico/instituição



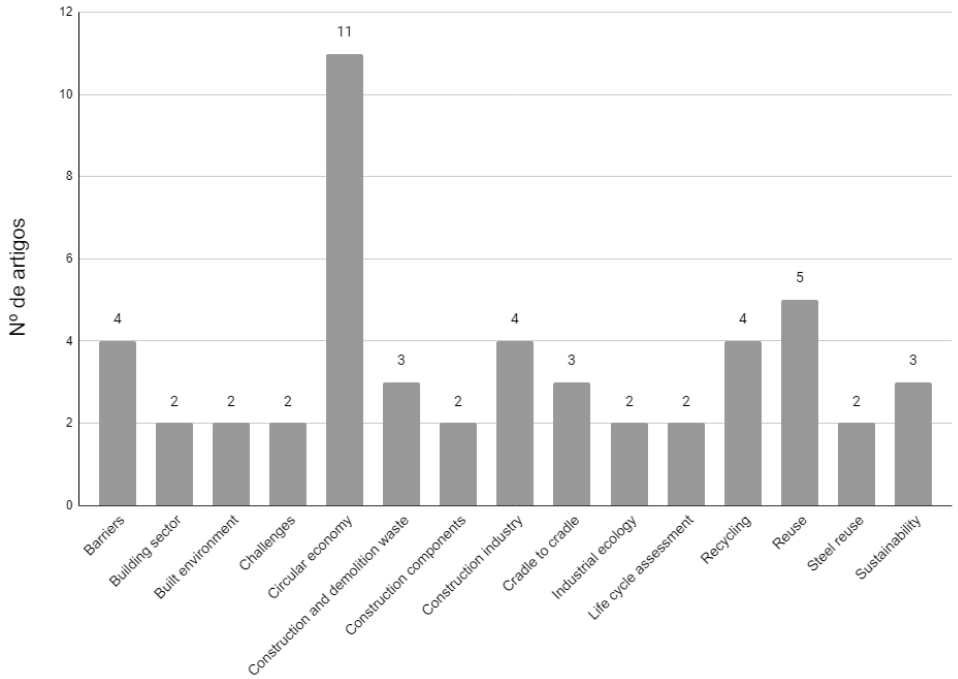
Fonte: Elaborado pelos autores

Os 3 periódicos de maior destaque, *Resources, Conservation and Recycling*, *Journal of Cleaner Production* e *Environmental Science and Technology*, abrangem temas relacionados a sustentabilidade, meio ambiente e aspectos tecnológicos, econômicos e políticos do desenvolvimento sustentável.

4.1.5 Palavras-chave mais utilizadas

Outro fator relevante a ser evidenciado e que demonstra a efetividade da construção do PB para a análise bibliométrica é o grupo das palavras-chave mais recorrentes dentre os artigos do PB. Identificou-se um total de 113 palavras-chave para os 27 artigos do PB.

Figura 17 – Análise das palavras-chave



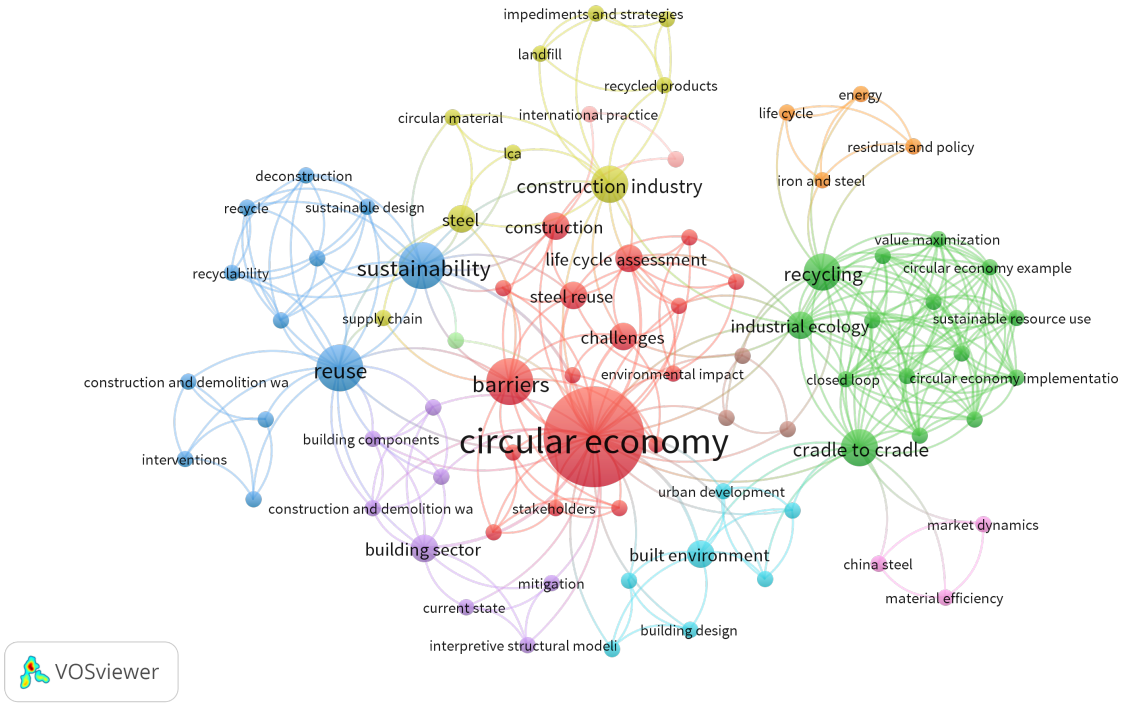
Fonte: Elaborado pelos autores

Na figura 17, é possível identificar as 15 PC encontradas pelo menos duas vezes na base de artigos. Destas, 9 estão diretamente relacionadas ao eixo de pesquisa *Economia Circular* e 6 ao eixo *Aço de construção civil*. É irrefutável, portanto, a validez das palavras-chave e os eixos de pesquisa escolhidos para a construção do PB.

Os artigos do PB foram exportados em arquivo CSV da base de dados *Scopus*

e o software *VOSviewer* (versão 1.6.16) foi utilizado a fim de contribuir para a análise das PCs dos artigos do PB. A Figura 18 ilustra a relação de co-ocorrência entre as palavras-chave dos artigos do PB. Através da imagem, confirma-se que a PC de maior ocorrência é *circular economy*, seguida por *sustainability*, *reuse*, *barriers*, *construction industry*, *cradle to cradle* e *recycling*.

Figura 18 – Rede de co-ocorrência das palavras-chave do PB



Fonte: Elaborado pelos autores

No primeiro *cluster*, em vermelho, as PCs que mais se destacam são, nessa ordem, *circular economy*, *barriers*, *challenges*, *steel reuse*, *construction* e *life cycle assessment*. Tais ocorrências permitem sugerir que há pesquisas abordando as principais barreiras e desafios para a implementação de uma EC, inclusive no âmbito da construção civil em aço, com base na avaliação do ciclo de vida dos materiais.

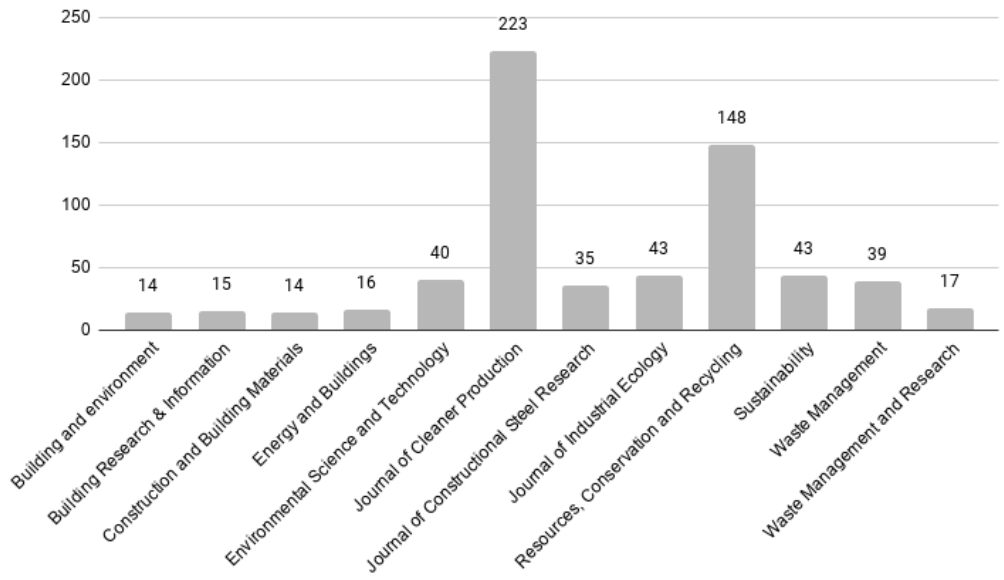
No segundo *cluster*, em azul, pode-se identificar as PCs *reuse* e *sustainability* com mais aparições, permitindo concluir que há um grupo de estudos com foco em sustentabilidade e reuso de materiais. Há também as palavras *recyclability*, *sustainable design*, *deconstruction*, *construction and demolition waste*, *interventions* e *recycle*.

4.1.6 Análise das referências dos artigos do portfólio bibliográfico

Para os 27 artigos do PB, identificou-se um total de 2128 referências, das quais 1207 são artigos publicados em periódicos, o que representa aproximadamente 57% do número total. O restante é composto por livros, congressos, sites, relatórios e conferências.

Os 1207 artigos foram publicados em 310 periódicos distintos, o que consiste em uma média de 3,90 artigos por periódico, número relativamente baixo. Contudo, apenas 12 periódicos concentram aproximadamente 53% dos artigos, enquanto os 47% têm como fonte 298 periódicos diferentes. A Figura 19 ilustra os 12 periódicos que mais se destacaram.

Figura 19 – Periódicos de maior destaque das referências do portfólio bibliográfico



Fonte: Elaborado pelos autores

A grande variedade de periódicos demonstra que temas relacionados a sustentabilidade são de interesse de variadas fontes, podendo abranger, na realidade, inúmeras áreas de pesquisa e conhecimento. Além disso, é um assunto que vem ganhando maior relevância mundial nos últimos anos.

Observa-se que o periódico que mais se destacou, com 223 artigos, é o *Journal of Cleaner Production*, periódico com classificação Qualis A1 para Engenharias I

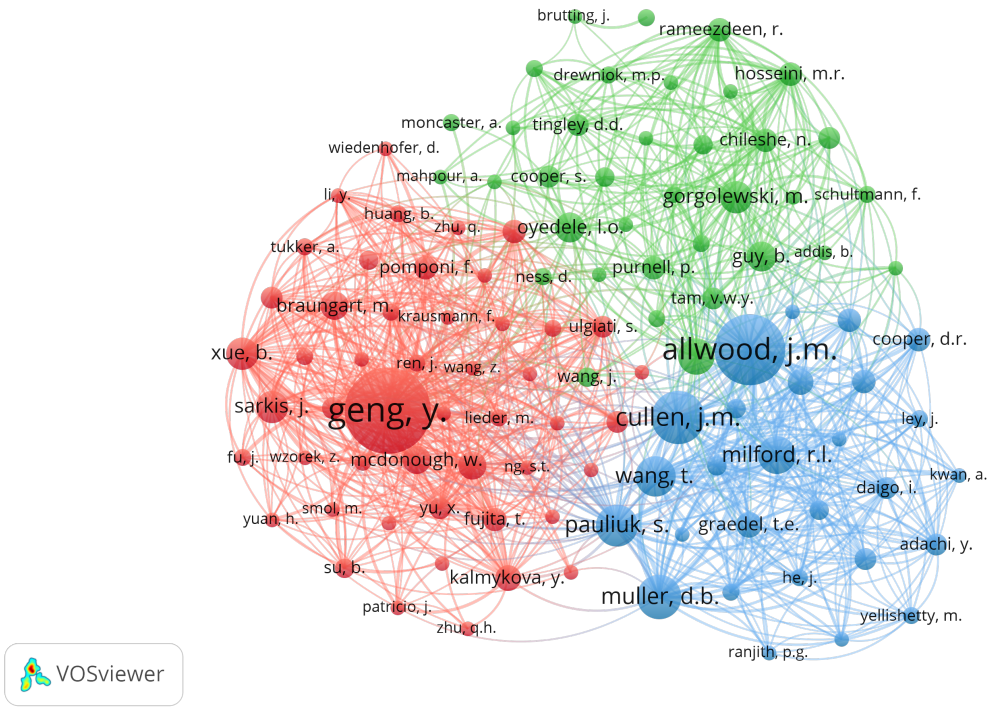
segundo a Capes. Em seguida, destaca-se o *Resources, Conservation and Recycling*, o qual publicou 148 artigos das referências do portfólio bibliográfico e também apresenta Qualis A1 para a área de Engenharias I da Capes. Ambos os periódicos têm como temas centrais a sustentabilidade e a produção e o consumo sustentáveis e são publicados pela editora Elsevier.

Aparecem, também, periódicos cujas publicações têm como foco a construção civil, tecnologias e materiais da construção, construção sustentável, inovações, design e engenharia.

O periódico *Journal of Constructional Steel Research*, que possui 35 artigos das referências do PB, publica artigos de pesquisas e aplicações da construção em aço.

Com o intuito de identificar os autores mais citados nas referências, o software *VOSviewer* (versão 1.6.16) foi também utilizado para a geração da Figura 20. São identificados 3 *clusters* (vermelho, verde e azul). O tamanho de cada nó corresponde ao número de citações que o respectivo autor recebeu. A proximidade de dois nós está diretamente relacionada à relação de co-citação entre os dois autores, isto é, maior é o número de ”terceiros autores” que citam ambos simultaneamente.

Figura 20 – Autores citados pelo menos 5 vezes nas referências



Fonte: Elaborado pelos autores

O autor mais citado nas referências dos artigos do PB é Yong Geng, professor em Economia Circular e Ecologia Industrial pela *Shanghai Jiao Tong University*, na China. Geng é autor de mais de 250 publicações com foco em ecologia industrial, desenvolvimento sustentável, gestão ambiental e mudanças climáticas (AIChE, 2021).

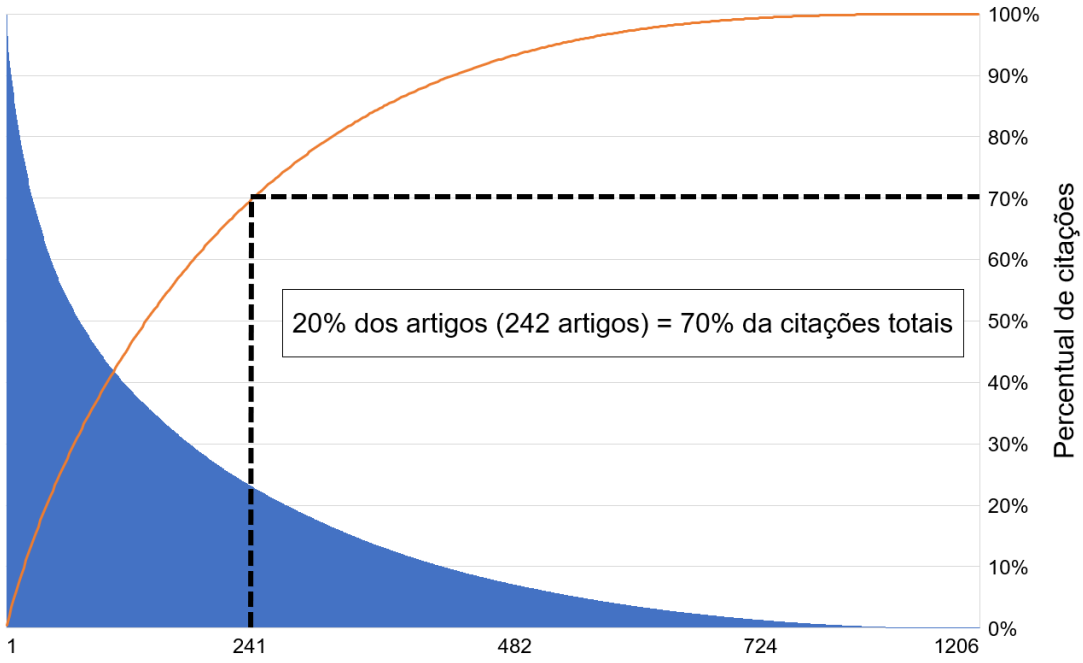
Julian M. Allwood, responsável pela autoria de 43 referências e autor de 4 artigos do PB, é professor de Engenharia e o Meio Ambiente na Universidade de Cambridge desde o ano de 2000 e pesquisador com foco em eficiência de materiais, conformação mecânica e eficiência energética (University of Cambridge, 2021b).

Jonathan M. Cullen, com 39 aparições nas referências e 3 artigos do PB, é professor do Departamento de Engenharia da Universidade de Cambridge, na área de Energia, Transporte e Infraestrutura Urbana. O autor realiza pesquisas com foco em eficiência energética e redução de emissões de dióxido de carbono pela produção de produtos de aço e alumínio (University of Cambridge, 2021a).

Allwood e Cullen também são autores do livro *"Sustainable Materials: with both*

eyes open", listado por Bill Gates como um dos 6 melhores livros de 2015.

Figura 21 – Diagrama de Pareto dos artigos das referências



Fonte: Elaborado pelos autores

Após a análise da relevância dos periódicos das referências dos artigos do portfólio bibliográfico, analisou-se a relevância acadêmica dos artigos das referências. Para isso, extraiu-se o número de citações de cada artigo das referências através do Google Acadêmico. Verificou-se, por meio do Diagrama de Pareto exposto no Gráfico 21, que 20% dos artigos são responsáveis por aproximadamente 72% do total de citações. Utilizou-se como amostra aqueles publicados a partir do ano de 2016, dado que os artigos mais recentes ainda possuem poucas citações, o que evidencia, portanto, a relevância científica da amostra selecionada. Após a eliminação dos artigos repetidos, o número de publicações da amostra foi de 30 artigos.

Para os 30 artigos analisados foram identificados 82 autores diferentes, dos quais 6 são autores de 2 artigos da amostra. São eles M. Geissdoerfer, J. Kirchherr, S. Witjes, M. Hekkert, D. Reike e J. Korhonen. A Tabela 3 expõe os artigos da amostra selecionada.

Tabela 3 – Amostra de artigos das referências

Autor	**Título**	**Ano**	**Citações**	**Aparições nas referências**
Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati, S.	A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems	2016	2569	4
Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N.M.P., Hultink, E.J.	The Circular Economy e a new sustainability paradigm?	2017	2378	1
Kirchherr J, Reike D, Hekkert M.	Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions	2017	1792	4
Murray, A., Skene, K., Haynes, K.	The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context	2017	1341	1
Lieder, M., Rashid, A.	Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry	2016	1208	3
Korhonen J., Honkasalo A., Seppala J.	Circular economy: the concept and its limitations	2018	1173	1
Lewandowski, M.	Designing the Business Models for Circular Economy Towards the Conceptual Framework	2016	743	2
Grey, C. P. and Tarascon, J. M.	Sustainability and in situ monitoring in battery development	2016	634	1
Genovese, A., Acquaye, A. A., Figueroa, A., Koh, S. L.	Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications	2017	622	3
Swain, B.	Recovery and recycling of lithium: a review	2017	529	1
Kalmykova, Y., Sadagopan, M., Rosado, L.	Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools	2018	518	2
Sheldon, R. A.	The E factor 25 years on: the rise of green chemistry and sustainability	2017	517	1
Blomsma, F. and Brennan, G.	The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity	2017	492	1
Korhonen, J. et al.	Circular Economy as an essentially contested concept. Journal of Cleaner Production	2018	470	1
Winans, K., Kendall, A., Deng, H.	The history and current applications of the circular economy concept	2017	411	1
Kirchherr, J., Piscicelli, L., Bour, R., Kostense-Smit, E., Muller, J., Huibrechtse-Truijens, A., Hekkert, M.	Barriers to the Circular Economy: Evidence From the European Union (EU)	2018	411	2

Witjes, S., Lozano, R.	Towards a more circular economy: Proposing a framework linking sustainable public procurement and sustainable public procurement and sustainable business models	2016	408	1
Merli, R., Preziosi, M., Acampora, A.	How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review	2016	406	2
Reike D., Vermeulen W.J., Witjes S.	The circular economy: new or refurbished as CE 3.0?—exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options	2018	402	1
Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., Ormazabal, M.	Towards a consensus on the circular economy	2018	379	1
Pomponi, F., Moncaster, A.	Circular economy for the built environment: a research framework	2017	353	4
Urbinati, A. Chiaroni, D.; Chiesa, V.	Towards a new taxonomy of circular economy business models	2017	349	1
Rajeev, A., Pati, R.K., Padhi, S.S., Govindan, K.	Evolution of sustainability in supply chain management: a literature review	2017	344	1
Rizos, V., Behrens, A., van der Gaast, W., Hofman, E., Ioannou, A., Kafyeke, T., Flamos, A., Rinaldi, R., Papadelis, S., Hirschnitz-Garbers, M., Topi, C.	Implementation of circular economy business models by small and medium-sized enterprises (SMEs): barriers and enablers	2016	339	1
Elia, V., Gnoni, M.G., Tornese, F.	Measuring circular economy strategies through index methods: a critical analysis	2017	324	2
Geissdoerfer M., Morioka S.N., de Carvalho M.M., Evans S.	Business models and supply chains for the circular economy	2018	318	1
de Jesus, A., Mendonça, S.	Lost in transition? Drivers and barriers in the ecoinnovation road to the circular economy	2018	303	1
Cohen, B., Munoz, P.	Sharing cities and sustainable consumption and production: towards an integrated framework	2016	296	1

Ghisellini e Ulgiati, autores do artigo de maior relevância da amostra, são da Universidade de Nápoles, na Itália, enquanto Cialani, também autora do artigo, é pesquisadora e professora da Universidade de Dalarna, na Suécia. O artigo *A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems*, com 2569 citações e 4 aparições nas referências do portfólio, analisa a origem da EC, implementação global e aplicação do modelo circular nos níveis micro, meso e macro.

Através da leitura dos títulos das publicações, constata-se que todos os artigos

da amostra têm como assunto central a sustentabilidade. A maioria disserta a respeito da EC e justifica-se por ser um tema de muita abrangência, que pode ser explorado por múltiplas áreas de estudo.

Não aparecem entre as publicações da amostra artigos sobre a implementação da EC no mercado do aço de construção civil, porque trata-se de um assunto mais específico e ainda pouco explorado.

Conforme exposto na Tabela 3, dentre os 30 artigos da amostra selecionada, aparecem os dois artigos de maior relevância científica do PB. São eles *Circular economy - From review of theories and practices to development of implementation tools* e *Circular economy for the built environment: a research framework*.

No entanto, pela análise de todos os artigos das referências, identificou-se 14 artigos do portfólio citados ao menos uma vez. O gráfico 22 e a tabela 4 mostram os artigos e o número total de vezes em que cada um é encontrado nas referências.

Tabela 4 – Artigos do PB citados nas referências

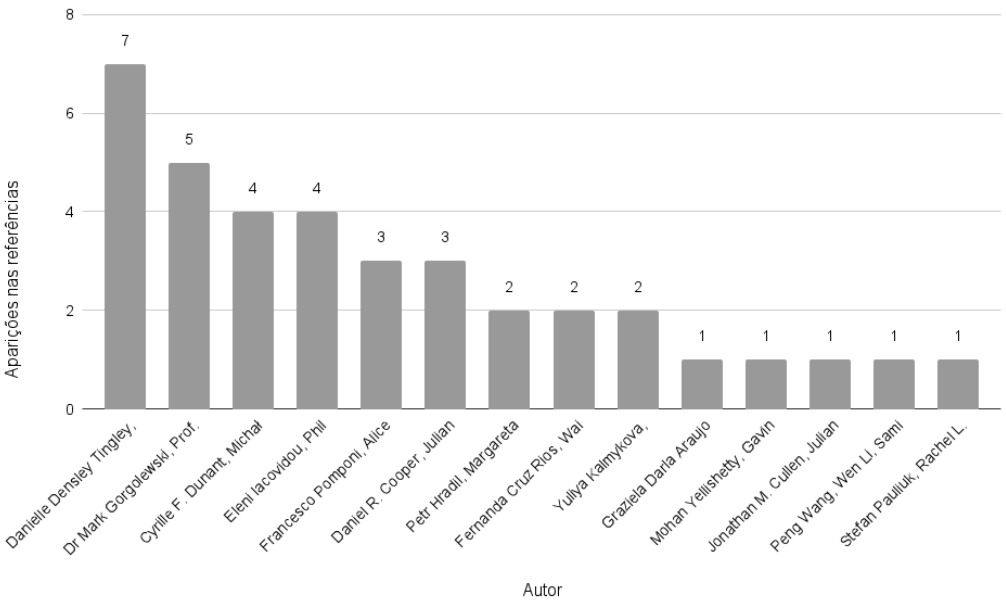
Autor	**Título**	**Periódico**	**Contagem**
Danielle Densley Tingley, Simone Cooper, Jonathan Cullen	Understanding and overcoming the barriers to structural steel reuse a UK perspective	Journal of Cleaner Production	7
Dr Mark Gorgolewski, Prof. Vera Straka, Jordan Edmonds, Carmela Sergio	Facilitating greater reuse and recycling of structural steel in the construction and demolition process	Canadian Institute for Steel Construction	5
Cyrille F. Dunant, Michał P. Drewniok, Michael Sansom, Simon Corbey, Julian M. Allwood, Jonathan M. Cullen	Real and perceived barriers to steel reuse across the UK construction value chain	Resources, Conservation and Recycling	4
Eleni Iacovidou, Phil Purnell	Mining the physical infrastructure: Opportunities, barriers and interventions in promoting structural components reuse	Science of the Total Environment	4
Francesco Pomponi, Alice Moncaster	Circular economy for the built environment: A research framework	Journal of Cleaner Production	3
Daniel R. Cooper, Julian M. Allwood	Reusing Steel and Aluminum Components at End of Product Life	Environmental Science and Technology	3
Petr Hradil, Margareta Wahlström, Asko Talja, Satu Huukha	Re-use of structural elements	VTT Technology T200	2
Fernanda Cruz Rios, Wai K. Chong, David Grau	Design for Disassembly and Deconstruction - Challenges and Opportunities	International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction	2

Yuliya Kalmykova, Madumita Sadagopan, Leonardo Rosado	Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools	Resources, Conservation and Recycling	2
Graziela Darla Araujo Galvão, Jennifer de Nadae, Diego Honorato Clemente, Guilherme Chinen, Marly Monteiro de Carvalho	Circular Economy: Overview of Barriers	10th CIRP Conference on Industrial Product-Service-Systems	1
Mohan Yellishetty, Gavin M. Mudd, P.G. Ranjith, A. Tharumarajah	Environmental life-cycle comparisons of steelproduction and recycling: sustainability issues,problems and prospects	Environmental Science and Policy	1
Jonathan M. Cullen, Julian M. Allwood, and Margarita D. Bambach	Mapping the global flow of steel: from steelmaking to end-use goods	Environmental Science and Tecnology	1
Peng Wang, Wen Li, Sami Kara	Cradle-to-cradle modeling of the future steel flow in China	Resources, Conservation and Recycling	1
Stefan Pauliuk, Rachel L. Milford, Daniel B. Müller, and Julian M. Allwood	The steel scrap age	Environmental Science and Technology	1

Os dois artigos do PB mais citados nas referências concentram-se na reutilização de aço estrutural na construção civil. O primeiro, escrito por Tingley et al. e citado 7 vezes nas referências dos artigos do PB, analisa as barreiras para o reuso no Reino Unido, enquanto o segundo, de autoria de Dr. Gorgolewski et al., com 5 citações, foca nos facilitadores para o reuso e reciclagem do aço estrutural.

Dos 13 artigos do PB que não aparecem nas referências, apenas 2 tem mais de três anos de publicação, o que justifica, portanto, a não aparição dos demais nas referências.

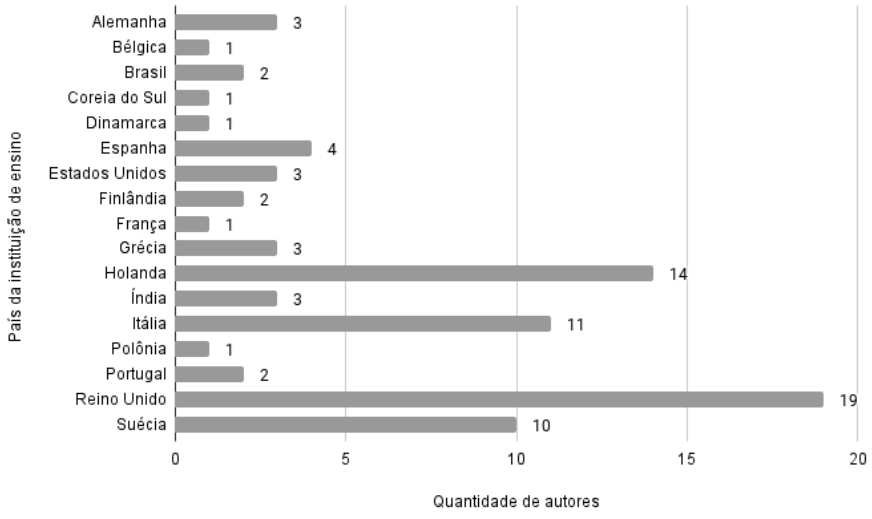
Figura 22 – Artigos do PB citados nas referências



Fonte: Elaborado pelos autores

Com o objetivo de identificar os países com maior foco de pesquisa sobre o tema do estudo, analisou-se os países onde estão localizadas as instituições de pesquisa dos autores dos artigos da amostra selecionada. A Figura 23 abaixo mostra os países dos 82 autores da amostra de artigos.

Figura 23 – Países das instituições de ensino dos autores da amostra



Fonte: Elaborado pelos autores

O país que mais se destacou foi o Reino Unido, com 19 autores, seguido pela Holanda e Itália, com 14 e 11 aparições respectivamente. Nota-se que, dos 82 autores, 72 são de instituições europeias. Apenas 2 autores são de universidades brasileiras.

O grande número de publicações por universidades europeias se justifica porque, em 2015, a União Europeia divulgou o primeiro plano de ação para a transição para a EC, com um total de 54 ações envolvendo desde a produção e consumo de materiais, até o gerenciamento de resíduos e do mercado de matérias-primas secundárias (European Commission, 2021b).

Dessa forma, empresas, organizações ambientais, indústrias, instituições de ensino e governos têm, cada vez mais, desenvolvido estratégias inovadoras e estudos voltados para o tema, buscando novas oportunidades, crescimento e desenvolvimento sustentável.

Em particular, em 2016 o governo central da Holanda elaborou estratégias para a EC, bem como o estabelecimento de metas e incentivos para governos locais, com o objetivo de alcançar uma economia livre de resíduos até o ano de 2050.

4.1.7 Análise dos artigos do Portfólio Bibliográfico e suas referências

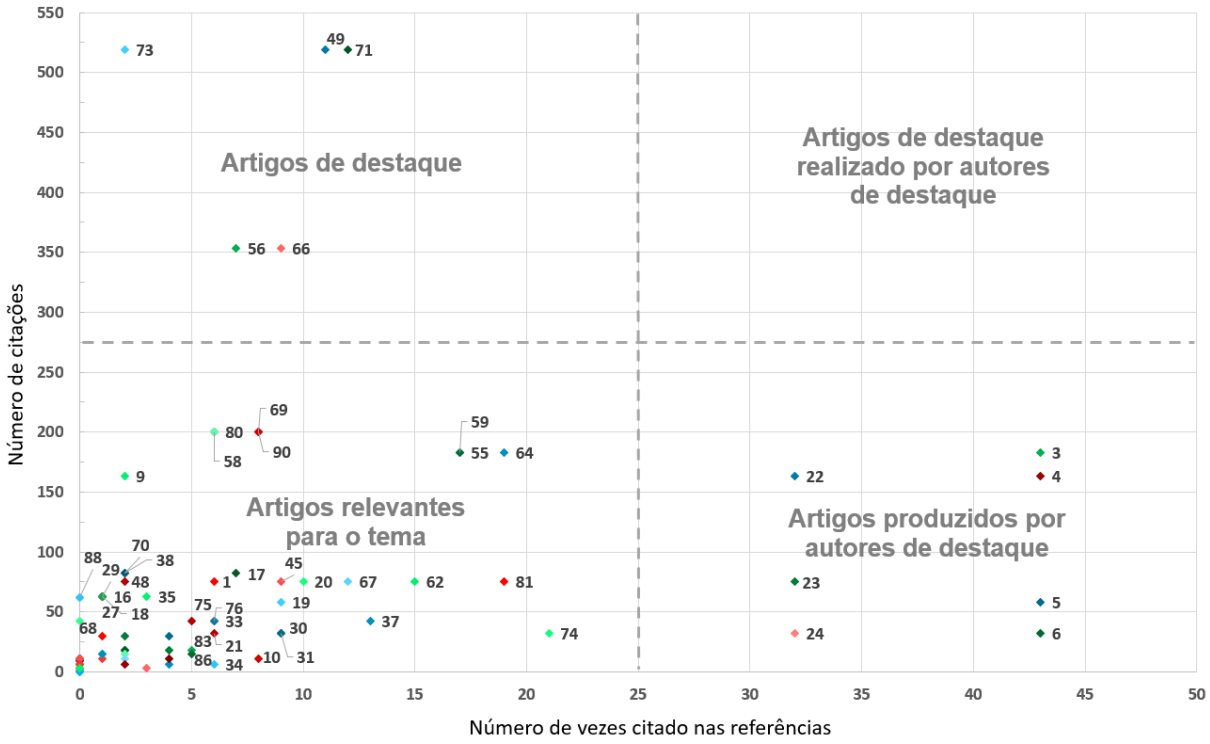
Após a análise bibliométrica do portfólio e suas referências, avaliou-se a relevância acadêmica dos artigos e autores do portfólio bibliográfico através da análise da relação entre o número de citações de cada autor do portfólio nas referências e o número de citações dos artigos do portfólio bibliográfico segundo o Google Acadêmico. A figura 24, dividido em 4 quadrantes, apresenta a relevância de cada artigo do portfólio.

Os artigos 3, 4, 5, 6, 22, 23 e 24 estão localizados no quadrante referente aos autores de maior destaque, uma vez que seus autores possuem maior número de citações. O número de citações desses artigos, entretanto, é relativamente baixo. Como pode-se observar na tabela 2, os autores com maior número de citações nas referências dos artigos do portfólio são Julian M. Allwood e Jonathan M. Cullen, que somam, respectivamente, 43 e 32 citações.

Os artigos 49, 56, 66, 71 e 73 encontram-se no quadrante referente a artigos de destaque, uma vez que possuem alto número de citações e são, portanto,

considerados artigos de grande reconhecimento científico.

Figura 24 – Artigos e autores do Portfólio Bibliográfico de maior destaque para o tema de pesquisa



Fonte: Elaborado pelos autores

No quadrante de artigos de destaque para o tema da pesquisa, concentra-se o maior número de artigos, cujos números de citações são baixos. Isso se deve ao fato de que o tema de estudo é muito abrangente e de interesse de diversos autores, além de estar ganhando maior visibilidade e destaque mundial nos últimos anos.

A tabela 5 apresenta os 86 autores do portfólio bibliográfico, o número de vezes que cada um é citado nas referências dos artigos do portfólio e a quantidade de citações dos artigos do portfólio segundo o Google Acadêmico.

Tabela 5 – Tabela de autores pertencentes ao PB e quantidade de citações

#	Autor	Artigo	Google Scholar	Referências
1	Ajayi, Saheed O.	Use of recycled products in UK construction industry: An empirical investigation into critical impediments and strategies for improvement	75	6

2	Alaka, Hafiz	Components reuse in the building, sector – A systematic review	9	0
3	Allwood, Julian M.	The steel scrap age	183	43
4	Allwood, Julian M.	Mapping the global flow of steel: from steelmaking to end-use goods	163	43
5	Allwood, Julian M.	Reusing Steel and Aluminum Components at End of Product Life	58	43
6	Allwood, Julian M.	Real and perceived barriers to steel reuse across the UK construction value chain	32	43
7	Amor, Ben	Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction	11	1
8	Antwi-Afari, Prince	Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction	11	0
9	Bambach, Margarita D.	Mapping the global flow of steel: from steelmaking to end-use goods	163	2
10	Bilal, Muhammad	Current state and barriers to the circular economy in the building sector: Towards a mitigation framework	11	8
11	Brütting, Jan	Nothing is lost nothing is created everything is reused; structural design for a circular economy	6	4
12	Chan, Albert P.C.	Factors affecting the market development of steel construction	3	3
13	Charef, Rabia	Components reuse in the building, sector – A systematic review	9	0
14	Chen, Han-Mei	Recovery and reuse of structural products from end-of-life buildings	15	1
15	Chiang, I. Robert	Optimal strategies for reverse logistics network construction: A multi-criteria decision method for Chinese iron and steel industry	6	0
16	Chinen, Guilherme	Circular Economy: Overview of Barriers	63	1
17	Chong, Wai K.	Design for Disassembly and Deconstruction - Challenges and Opportunities	82	7
18	Clemente, Diego Honorato	Circular Economy: Overview of Barriers	63	1
19	Cooper, Daniel R.	Reusing Steel and Aluminum Components at End of Product Life	58	9
20	Cooper, Simone	Understanding and overcoming the barriers to structural steel reuse a UK perspective	75	10
21	Corbey, Simon	Real and perceived barriers to steel reuse across the UK construction value chain	32	6
22	Cullen, Jonathan M.	Mapping the global flow of steel: from steelmaking to end-use goods	163	32
23	Cullen, Jonathan M.	Understanding and overcoming the barriers to structural steel reuse a UK perspective	75	32
24	Cullen, Jonathan M.	Real and perceived barriers to steel reuse across the UK construction value chain	32	32
25	da Silva, Vander Luiz	Advantages, barriers and strategies for circular economy: a theoretical approach/ Vantagens, barreiras e estrategias para economia circular: uma abordagem teorica	1	0

26	Dai, Shufen	Optimal strategies for reverse logistics network construction: A multi-criteria decision method for Chinese iron and steel industry	6	0
27	de Carvalho, Marly Monteiro	Circular Economy: Overview of Barriers	63	1
28	de Francisco, Antonio Carlos	Advantages, barriers and strategies for circular economy: a theoretical approach/ Vantagens, barreiras e estrategias para economia circular: uma abordagem teorica	1	0
29	de Nadae, Jennifer	Circular Economy: Overview of Barriers	63	1
30	Drewniok, Michał P.	Real and perceived barriers to steel reuse across the UK construction value chain	32	9
31	Dunant, Cyrille F.	Real and perceived barriers to steel reuse across the UK construction value chain	32	9
32	Edelman, Harry	Circular economy practices in the built environment	11	0
33	Edmonds, Jordan	Facilitating greater reuse and recycling of structural steel in the construction and demolition process	42	6
34	Fivet, Corentin	Nothing is lost nothing is created everything is reused; structural design for a circular economy	6	6
35	Galvão, Graziela Darla Araujo	Circular Economy: Overview of Barriers	63	3
36	Gao, Ran	Factors affecting the market development of steel construction	3	0
37	Gorgolewski, Dr Mark	Facilitating greater reuse and recycling of structural steel in the construction and demolition process	42	13
38	Grau, David	Design for Disassembly and Deconstruction - Challenges and Opportunities	82	2
39	Gu, Wei	Optimal strategies for reverse logistics network construction: A multi-criteria decision method for Chinese iron and steel industry	6	0
40	Heroth, Timo	Challenges and political solutions for steel recycling in China	62	0
41	Hopkinson, Peter	Recovery and reuse of structural products from end-of-life buildings	15	1
42	Hossain, Md. Uzzal	Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction	11	4
43	Hradil, Petr	Re-use of structural elements	18	2
44	Huukha, Satu	Re-use of structural elements	18	2
45	Iacovidou, Eleni	Mining the physical infrastructure: Opportunities, barriers and interventions in promoting structural components reuse	75	9
46	Izeppi, Wagner Colucci	Estímulos e barreiras para a adoção da economia circular: uma pesquisa quantitativa nos setores de agronegócio, construção civil e eletroeletrônico	0	0
47	Joensuu, Tuomo	Circular economy practices in the built environment	11	0
48	Kadiri, Kabir O.	Use of recycled products in UK construction industry: An empirical investigation into critical impediments and strategies for improvement	75	2
49	Kalmykova, Yuliya	Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools	519	11

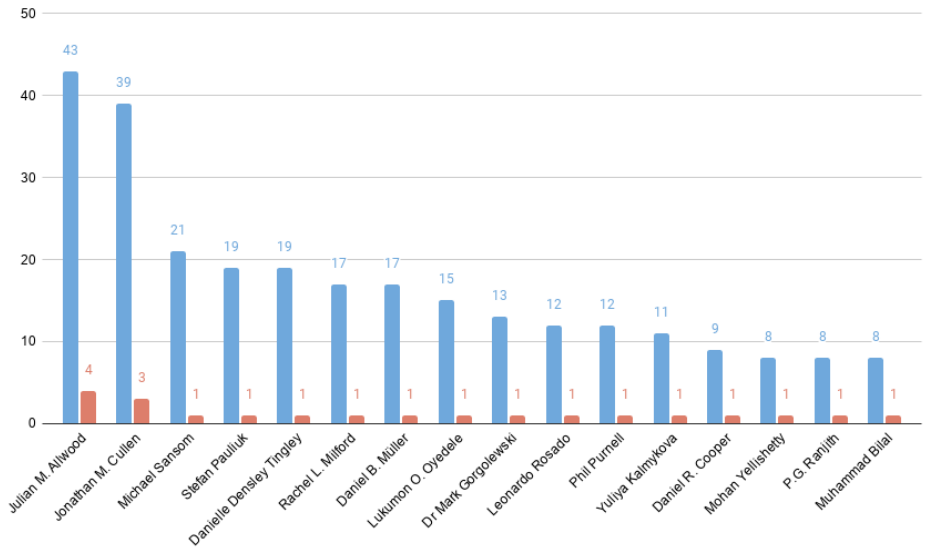
50	Kara, Sami	Cradle-to-cradle modeling of the future steel flow in China	30	0
51	Khan, Khurram Iqbal Ahmad	Current state and barriers to the circular economy in the building sector: Towards a mitigation framework	11	0
52	Kovaleski, João Luiz	Advantages, barriers and strategies for circular economy: a theoretical approach/ Vantagens, barreiras e estrategias para economia circular: uma abordagem teorica	1	0
53	Lam, Dennis	Recovery and reuse of structural products from end-of-life buildings	15	2
54	Li, Wen	Cradle-to-cradle modeling of the future steel flow in China	30	1
55	Milford, Rachel L.	The steel scrap age	183	17
56	Moncaster, Alice	Circular economy for the built environment: A research framework	353	7
57	Morel, Jean-Claude	Components reuse in the building, sector – A systematic review	9	0
58	Mudd, Gavin M.	Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: sustainability issues, problems and prospects	200	6
59	Müller, Daniel B.	The steel scrap age	183	17
60	Nasir, Abdur Rehman	Current state and barriers to the circular economy in the building sector: Towards a mitigation framework	11	0
61	Ng, S. Thomas	Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction	11	0
62	Oyedele, Lukumon O.	Use of recycled products in UK construction industry: An empirical investigation into critical impediments and strategies for improvement	75	15
63	Pagani, Regina Negri	Advantages, barriers and strategies for circular economy: a theoretical approach/ Vantagens, barreiras e estrategias para economia circular: uma abordagem teorica	1	0
64	Pauliuk, Stefan	The steel scrap age	183	19
65	Picinin, Claudia Tania	Advantages, barriers and strategies for circular economy: a theoretical approach/ Vantagens, barreiras e estrategias para economia circular: uma abordagem teorica	1	0
66	Pomponi, Francesco	Circular economy for the built environment: A research framework	353	9
67	Purnell, Phil	Mining the physical infrastructure: Opportunities, barriers and interventions in promoting structural components reuse	75	12
68	Rakhshan, Kambiz	Facilitating greater reuse and recycling of structural steel in the construction and demolition process	42	0
69	Ranjith, P.G.	Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: sustainability issues, problems and prospects	200	8
70	Rios, Fernanda Cruz e	Design for Disassembly and Deconstruction - Challenges and Opportunities	82	2
71	Rosado, Leonardo	Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools	519	12

72	Saari, Arto	Circular economy practices in the built environment	11	0
73	Sadagopan, Madumita	Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools	519	2
74	Sansom, Michael	Real and perceived barriers to steel reuse across the UK construction value chain	32	21
75	Sergio, Carmela	Facilitating greater reuse and recycling of structural steel in the construction and demolition process	42	5
76	Straka, Prof. Vera	Facilitating greater reuse and recycling of structural steel in the construction and demolition process	42	6
77	Talja, Asko	Re-use of structural elements	18	4
78	Teixeira, Tatiane	Advantages, barriers and strategies for circular economy: a theoretical approach/ Vantagens, barreiras e estrategias para economia circular: uma abordagem teorica	1	0
79	Thaheem, Muhammad Jamaluddin	Current state and barriers to the circular economy in the building sector: Towards a mitigation framework	11	2
80	Tharumarajah, A.	Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: sustainability issues, problems and prospects	200	6
81	Tingley, Danielle Densley	Understanding and overcoming the barriers to structural steel reuse a UK perspective	75	19
82	van Maastrigt, Joris	Quantifying Life Cycle Environmental Benefits of Circular Steel Building Designs: development of an environmental assessment tool for reuse of steel members in building designs for the Netherlands	0	0
83	Wahlström, Margareta	Re-use of structural elements	18	5
84	Wang, Chen	Optimal strategies for reverse logistics network construction: A multi-criteria decision method for Chinese iron and steel industry	6	2
85	Wang, Peng	Cradle-to-cradle modeling of the future steel flow in China	30	4
86	Wang, Yong	Recovery and reuse of structural products from end-of-life buildings	15	5
87	Wei, Lirong	Optimal strategies for reverse logistics network construction: A multi-criteria decision method for Chinese iron and steel industry	6	0
88	Wübbeke, Jost	Challenges and political solutions for steel recycling in China	62	0
89	Yang, Yang	Factors affecting the market development of steel construction	3	0
90	Yellishetty, Mohan	Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: sustainability issues, problems and prospects	200	8
91	Zhou, Kan	Recovery and reuse of structural products from end-of-life buildings	15	1

Dos 86 autores do PB, 59 são citados ao menos 1 vez nas referências dos artigos do portfólio. No gráfico abaixo, pode-se visualizar os autores citados pelo

menos 8 vezes nas referências. A barra azul corresponde ao número de vezes cada autor é citado nas referências, enquanto a barra vermelha reflete o número de vezes o autor aparece no portfólio bibliográfico.

Figura 25 – Quantidade de artigos das referências e do PB para cada autor do PB



Fonte: Elaborado pelos autores

4.2 Análise sistêmica dos artigos do portfólio bibliográfico

Após a seleção do portfólio bibliográfico e análise bibliométrica dos artigos, foi realizada uma análise sistêmica dos artigos selecionados com o objetivo de assimilar e sintetizar os diferentes fatores que impactam positiva e negativamente a implementação da EC no âmbito da construção civil em aço em uma escala global.

Segundo Denyer e Tranfield (2009), a análise sistêmica tem como objetivo extrair, sintetizar e avaliar contribuições relevantes de publicações científicas existentes, de modo a promover conclusões claras que respondam às perguntas de tese. Além disso, a análise sistêmica permite fazer associações entre os diferentes estudos, assim como a identificação de possíveis lacunas na literatura.

4.2.1 Discussão e resultados

No entanto, como sugere Allwood (2012), a prática de reduzir o peso de estruturas pelo uso de menor quantidade de metal durante a fase de design ainda é pouco aderida. Algumas barreiras citadas estão no entendimento, por parte dos clientes, de que produtos mais leves são de menor qualidade, e nos custos mais elevados de produção.

Um aspecto pertinente na reutilização de componentes estruturais está na implementação de *building information modeling* (BIM), ferramenta que possibilita o gerenciamento e a otimização da transferência de tais estruturas entre dois projetos (HRADIL et al., 2014).

A reutilização de elementos estruturais em novas edificações é um processo complexo, que envolve todos os integrantes da cadeia de produção e distribuição do aço. Designers, por exemplo, têm um papel importante nesse âmbito, devendo ter acesso a toda informação a respeito do atual e potencial fornecimento de componentes estruturais a serem reutilizados, bem como dimensões e grau do material (HRADIL et al., 2014).

Tingley, Cooper e Cullen (2017) destacam três possíveis fontes de obtenção de aço reutilizado: diretamente de fornecedores de aços novos, de empresas de demolição ou a partir de um eventual novo *stakeholder* na cadeia de suprimentos do aço, responsável pela estocagem de aço já utilizado. Contudo, segundo os autores, a emergência desse novo integrante da cadeia do aço depende do aumento da demanda por aço reutilizado e evidências dos benefícios do reuso.

Em paralelo, Yellishetty et al. (2011) trata da parcela da população que vive da coleta de lixo urbano e como ela pode beneficiar a circularidade do aço. Grande parte dos catadores de lixo coleta resíduos metálicos, em particular a sucata, e comercializa diretamente com empresas de reciclagem. Apesar desta atividade não ser formalmente regulamentada, ela contribui diretamente para a cadeia de suprimentos do aço, ligando o aço de fim de vida útil, a um agente do início da cadeia.

De acordo com Hradil et al. (2014), atualmente ainda há uma lacuna na comunicação entre os profissionais do setor de construção civil acerca do crescente número de *cases* de sucesso na reutilização de componentes estruturais de edifícios

antigos em novas edificações.

Assim, a implementação bem sucedida da EC na indústria construtiva deve-se basear na colaboração e integração entre todos os integrantes da cadeia, desde projetistas, consultores e fornecedores até clientes finais (HOSSAIN et al., 2020; SILVA et al., 2019).

Embora o conceito de EC esteja gerando maior repercussão nos últimos anos, poucos estudos foram desenvolvidos no âmbito da implementação da EC no setor da construção civil (BILAL et al., 2020). De acordo com Pomponi e Moncaster (2017), a sociedade atual já apresenta o avanço tecnológico necessário para a implementação da EC no âmbito da construção civil, porém considera o papel do indivíduo, como agente transformador, um dos obstáculos para essa mudança. A falta de pressão social em prol da EC, devido a desinformação dos benefícios gerados por ela, é uma das barreiras para a criação de políticas privadas e governamentais (GALVÃO et al., 2018).

Bilal et al. (2020), em um estudo de avaliação da atual situação de implementação da EC no setor de construção civil em 16 países em desenvolvimento, dentre os quais encontra-se o Brasil, concluíram que o nível de adesão a práticas do modelo circular no setor é de 58%, número que, idealmente, deveria se aproximar de 100%. Os autores identificaram as principais barreiras da implementação da EC na perspectiva do setor de construção de países em desenvolvimento como ’falta de regulamentações e leis ambientais’, ’falta de conscientização pública’, ’falta de apoio por parte de instituições públicas’ e ’recursos financeiros inadequados’.

Pela análise das barreiras e facilitadores para a transição para a EC no ramo da construção civil, diversos fatores e aspectos foram identificados na literatura. Hossain et al. (2020) estudaram, por meio de uma revisão sistemática da literatura, os principais desafios para a implementação da EC na indústria da construção civil. O primeiro aspecto abordado pelos autores é referente aos desafios identificados durante o processo de design. O principal obstáculo concerne a consideração do fim de vida dos materiais e componentes desde o início do processo. A utilização de ferramentas e softwares como BIM, assim como a determinação de diretrizes quanto a gestão sustentável do fim de vida de materiais são propostas pelos autores como possíveis soluções.

Segundo Iacovidou e Purnell (2016), a documentação e avaliação do potencial para reuso e a consideração de todo o ciclo de vida do material desde os estágios de concepção e design da estrutura são fatores chave para facilitar a prática ao fim da vida de uma estrutura.

A falta de incentivos financeiros aos integrantes da cadeia de suprimentos também mostra-se como um impasse relevante na pesquisa de Hossain et al. (2020). Evidencia-se, além disso, que o conceito de EC ainda não recebe atenção suficiente entre os *stakeholders* (HOSSAIN et al., 2020).

Dunant et al. (2017) analisaram as principais barreiras reais e percebidas pelos agentes da cadeia de suprimentos do aço no Reino Unido, no que concerne o reuso do aço de construção. Arquitetos constatam a falta de confiança e a percepção de que aço reutilizado é inferior ao novo. Para empreiteiras e construtoras, a disponibilidade e o fato de que a reutilização do aço ainda é algo incomum. Engenheiros estruturais consideram como principais obstáculos a não conformidade das dimensões das vigas de aço e o fato de que a maioria das construções não são projetadas visando a desconstrução. Para fabricantes, a falta de certificações para o aço, e o fato de ser considerada uma prática ainda pouco frequente são os principais impedimentos. Estoquistas se referem a falta de rastreabilidade do aço e a percepção de que aço reutilizado apresenta pior desempenho e qualidade que aços novos. Finalmente, empresas de demolições apontam a falta de tempo para processos de desconstrução e, assim como nomeado por engenheiros estruturais, o fato de a maioria das construções não serem projetadas para desconstrução.

Tingley, Cooper e Cullen (2017) também discutiram as principais barreiras para a reutilização de aço estrutural no Reino Unido. Os obstáculos mencionados com mais frequência pelos entrevistados estão relacionados à falta de integração entre os agentes da cadeia de suprimentos, à disponibilidade e armazenagem de aço reutilizado e ao pouco conhecimento sobre o assunto. Segundo os autores, muitos entrevistados consideram a concepção dos clientes como fator chave para a adoção de práticas de reuso de aço estrutural, sendo a baixa demanda por parte destes um obstáculo para o desenvolvimento da prática. Outros pontos abordados são a “falta de informações sobre estruturas e materiais existentes”, a “inércia do setor de construção” e quanto a qualidade das peças e materiais reutilizados.

Segundo Silva et al. (2019), as principais barreiras encontram-se no âmbito econômico e político. (OYEDELE; AJAYI; KADIRI, 2014) destacam que, embora muitas vezes produtos reciclados sejam mais baratos por serem considerados secundários, isso não é sempre verdade, principalmente no âmbito da construção civil.

Izeppi (2019) salienta que, na visão de microempresas do ramo da construção civil, “as principais barreiras são: estruturais, operacionais e as comportamentais”, além de fatores financeiros e tecnológicos. Para médias empresas do setor, barreiras estruturais são frequentemente percebidas, enquanto que, para grandes empresas, destacam-se as barreiras operacionais. Barreiras estruturais referem-se à pouca integração entre os agentes da cadeia de suprimentos, o que resulta na falta de clareza no que tange as responsabilidades de cada membro. Barreiras operacionais estão relacionadas à infraestrutura e capacidade operacional da cadeia de suprimentos. E, como barreiras comportamentais, entende-se a percepção de todas as partes interessadas quanto à transição.

A percepção, por parte dos clientes, de que materiais reutilizados possuem qualidade inferior (OYEDELE; AJAYI; KADIRI, 2014; IACOVIDOU; PURNELL, 2016; PAULIUK et al., 2013; GORGOLEWSKI et al., 2006; DUNANT et al., 2017), tanto esteticamente quanto em termos de segurança, representam outra barreira relevante (RIOS; CHONG; GRAU, 2015). Uma potencial solução para disseminar a importância e benefícios da reutilização de materiais no mercado está no crescente número de *cases* de sucesso relacionados ao reuso de materiais e componentes de aço (GORGOLEWSKI et al., 2006; OYEDELE; AJAYI; KADIRI, 2014). Além disso, a motivação de clientes, projetistas e empreiteiras são determinantes para normalizar o reuso de estruturas de aço (GORGOLEWSKI et al., 2006).

É necessário, portanto, estabelecer uma maior consciência ambiental e promover a educação de todos os envolvidos (GORGOLEWSKI et al., 2006) no que concerne a reutilização de estruturas e componentes de aço e todos os processos necessários para viabilizar a prática.

Hosseini et al. (2015) aponta que, embora o desenvolvimento de uma logística reversa apropriada seja de grande relevância, as dimensões das peças podem representar uma barreira à execução, uma vez que resulta em maiores custos e

complicações durante o transporte.

Rakhshan et al. (2020) estudaram a co-ocorrência de diversos fatores citados na literatura e identificados como barreiras à reutilização de componentes na construção civil. A barreira de maior índice de co-ocorrência está relacionada à percepção dos *stakeholders* quanto ao reuso e os riscos associados à prática.

Gu et al. (2019) dividiram os principais fatores que afetam diretamente a implementação de uma logística reversa na cadeia de suprimentos do aço e ferro na China em 6 aspectos. São eles: fatores econômicos, fatores sociais, políticas governamentais, fatores ambientais, gestão interna de empresas e mercado externo. Alguns fatores citados envolvem os custos operacionais e de implementação de uma cadeia reversa, políticas tributárias, aspectos tecnológicos, fornecimento, quantidade e qualidade da sucata de aço e competitividade do mercado. Em um estudo de caso conduzido pelos autores, políticas governamentais com incentivos à economia circular destacam-se como fator determinante para guiar e facilitar a tomada de decisões pelas organizações no desenvolvimento de uma logística reversa.

Em uma pesquisa realizada por Chan, Yang e Gao (2018), os autores destacam que, enquanto os principais impulsionadores para a construção em aço consistem em avanços tecnológicos nos processos e o desenvolvimento de novos regulamentos, códigos e especificações, a principal barreira identificada está relacionada aos altos custos de manutenção, logística e mão-de-obra. Da mesma forma, Izeppi (2019) identificou avanços tecnológicos como o principal facilitador para a EC.

Quando comparadas a outros materiais, estruturas de aço apresentam mais vantagens quanto ao reuso, devido à facilidade de desmonte através de componentes reversíveis, que posteriormente podem ser cortados e remodelados. A variedade de testes e ensaios para avaliar as propriedades do material também representa um estímulo para o reuso (FIVET; BRÜTTING, 2020). Entretanto, os atuais ensaios para validação de propriedades mecânicas do aço são comumente caros (COOPER; ALLWOOD, 2012).

Cooper e Allwood (2012) propõem a idealização de testes mais precisos e econômicos que possibilitem a identificação das propriedades mecânicas de estruturas de aço reutilizado e maximizem, portanto, o valor agregado do material para reuso.

O trabalho de Cooper e Allwood (2012) avalia a viabilidade técnica da reutilização de componentes de aço. Segundo os autores, a principal dificuldade no que concerne a reutilização de componentes de aço está na incompatibilidade com novas seções e estruturas, devido à falta de padronização ou especificação do material. Em uma pesquisa desenvolvida com diversas empresas canadenses, Gorgolewski et al. (2006) evidenciaram que para a maioria dos entrevistados, a falta de padronização na fabricação de aço constitui-se a maior preocupação quanto ao reuso, tendo em vista a dificuldade em verificar e confirmar as características estruturais dos componentes. Segundo Hossain et al. (2020), a insegurança e incerteza relacionada ao reuso de materiais constituem-se os maiores desafios associados a EC.

Da mesma forma, em um estudo desenvolvido por Hradil et al. (2014), as principais dificuldades da reutilização de componentes estruturais relacionam-se à escassez de informações técnicas referentes à capacidade das estruturas, à improcedência da qualidade e quantidade de material, assim como a não conformidade das características dimensionais das estruturas.

Nesse sentido, uma solução efetiva é a identificação dos produtos desde os estágios iniciais de fabricação, através de códigos de barras ou números, permitindo, assim, o rastreamento e a identificação destes durante toda a vida útil (COOPER; ALLWOOD, 2012; GORGOLEWSKI et al., 2006). Fivet e Brütting (2020) sugerem a elaboração de “passaportes” que documentem a composição, propriedades e outras informações relevantes de elementos estruturais, facilitando significativamente o reuso de tais estruturas. Gorgolewski et al. (2006) destacam a importância da documentação das especificações das estruturas e componentes de aço durante todo o ciclo de vida da edificação.

No tocante ao aço utilizado em estruturas de fundação, Cooper e Allwood (2012) destacam que estes acabam não podendo ser reciclados, uma vez que são deixados no solo ao fim da vida útil. Como alternativa, a idealização de estruturas de fundação reutilizáveis poderia inverter tal cenário.

Iacovidou e Purnell (2016) sugerem o desenvolvimento de um sistema que auxilie projetistas e empreiteiras na seleção de materiais reutilizados na construção civil. O foco do sistema estaria nas propriedades dos materiais, na natureza do processo

de recuperação (como por exemplo, demolição, desconstrução, probabilidade de sofrer danos, dentre outros) e da utilização primária (como magnitude e tempo de duração do carregamento) e nas condições de exposição do material. Por exemplo, estruturas de aço em pontes ou em estruturas *offshore* estão frequentemente sujeitas a corrosão (COOPER; ALLWOOD, 2012) e carregamentos constantes.

Segundo Hradil et al. (2014), um pré requisito para a correta reutilização do aço, é a demolição seletiva. É uma atividade fundamental para que as estruturas de aço não sejam danificadas durante o processo de desconstrução ou não recebam impurezas ou outras substâncias prejudiciais que afetem negativamente o posterior uso das mesmas, bem como a conformidade ambiental e técnica do material.

Infelizmente, este processo de desconstrução pode ser complexo, longo e caro devido a variedade de materiais e componentes utilizados na construção de uma edificação, evidenciando a importância de se considerar tais processos desde as etapas iniciais de design e concepção do projeto (van Maastrigt, 2019). Trata-se do conceito de *Design for Disassembly* (DfD), ou "design para desmontagem" (Ellen MacArthur Foundation, 2013). No entanto, ambas as práticas de desconstrução e desmontagem incorporam benefícios significativos, principalmente quando comparadas a práticas de demolição convencionais. Por exemplo, possibilitam a redução de emissões de carbono pela indústria da construção e a redução de custos dos materiais (RIOS; CHONG; GRAU, 2015). Mesmo que estruturas de aço sejam facilmente reutilizadas sem a necessidade de reprocessamento, frequentemente encontra-se elementos estruturais mistos de aço e concreto, o que caracteriza maiores dificuldades técnicas para a separação durante o processo de desconstrução (HOPKINSON et al., 2018). Atualmente, é necessário que as estruturas mistas de aço e concreto sejam totalmente quebradas para possibilitar a recuperação e reciclagem das armaduras de aço (COOPER; ALLWOOD, 2012). Apesar disso, o próprio caráter metálico do aço auxilia na separação em casos específicos, devido à sua propriedade de atração magnética.

Cooper e Allwood (2012) sugerem a utilização de estruturas modulares pré-fabricadas de fácil desmontagem como solução para oportunizar a reutilização e reciclagem das barras de aço no futuro.

Rakhshan et al. (2020) realizaram uma análise sistêmica acerca do reuso de componentes na indústria da construção civil buscando avaliar a promoção da circularidade dos materiais na construção civil. O trabalho foi realizado sob os aspectos econômicos, ambientais e sociais do reuso de componentes de construção civil. Sob estes aspectos, o autor avaliou correlações globais entre fatores, concluindo que variáveis como a percepção dos *stakeholders* é fortemente afetada pelos potenciais riscos associados ao reuso. Além disso, fatores econômicos e regulatórios figuram como os de maior relevância dentre os resultados da pesquisa.

Sob o aspecto econômico, as vantagens do reuso ainda são altamente dependentes do custo e geração de lucro envolvidos no processo. Da perspectiva social, a percepção dos principais *players* do mercado ainda é uma grande barreira. Tal percepção negativa é justificada na literatura baseada nos riscos financeiros e operacionais associados às etapas de projeto na desconstrução de estruturas, assim como desafios relacionados a *compliance* e políticas regulatórias.

Em relação ao aspecto regulatório, ainda há carência de políticas que abordem a desconstrução e o reuso, afetando negativamente o desenvolvimento e a integração dessas atividades no meio construtivo. Além disso, os atuais padrões de qualidade não englobam elementos reutilizados ou recuperados.

Tal fato releva que ainda é imperativo abordar estes fatores através de políticas públicas e trabalhos científicos para disseminar o reuso como prática de mercado na indústria de construção civil.

O trabalho de Joensuu, Edelman e Saari (2020) baseia-se numa revisão literária buscando fornecer uma perspectiva estruturada sobre o gerenciamento urbano através da EC. A implementação da EC em serviços urbanos e práticas de consumo é um tema presente no planejamento e gerenciamento urbano, onde pesquisadores introduziram o conceito de *waste hierarchy*, ou hierarquia de resíduos, como uma ferramenta eficiente para o desenvolvimento de sistemas de gestão de resíduos nos centros urbanos (JOENSUU; EDELMAN; SAARI, 2020).

A hierarquia de resíduos proposta destaca como prioridade máxima a redução do consumo e da geração de resíduos através do *smart design* e da utilização de técnicas como o DfD para promover o reuso no fim da vida útil dos materiais. Na mesma linha,

visando alcançar o desenvolvimento da EC, ressalta-se também o prolongamento da vida útil dos materiais, através do reuso, DfD e da remanufatura.

O trabalho de Wang, Li e Kara (2017) propõe um modelo *cradle-to-cradle*, ou ”do berço ao berço”, para descrever e prever o mecanismo do ciclo de vida útil do aço. Segundo os autores, aumentar o uso e prolongar a vida útil dos produtos e componentes de aço são as estratégias que mais contribuem para a diminuição da produção futura de novos produtos de aço e o seu gasto energético. Tal fato abriria espaço para maiores iniciativas e promoção de produtos derivados de aço reutilizado, contribuindo para uma circularidade maior na cadeia do aço.

Para Hopkinson et al. (2018), algumas inovações tecnológicas, como *marketplaces* para comercialização de resíduos e passaportes de rastreamento dos produtos, podem agir como mecanismos facilitadores para a adoção de um modelo mais circular. De fato, pode-se observar alguns autores considerando a falta de comunicação e compartilhamento de informações um aspecto limitante do modelo circular, iniciativas como as citadas pelo autor influenciaram diretamente este aspecto, criando maior facilidade de interação entre os agentes da cadeia.

Por outro lado, Wang, Li e Kara (2017) ressaltam que a fabricação de produtos derivados de sucata de aço é limitada no curto prazo devido, principalmente, a baixa disponibilidade do material, conferindo um custo relativamente maior quando comparado a projetos utilizando o aço de produção convencional.

Wübbeke e Heroth (2014) estudaram os principais desafios para a reciclagem do aço na China. Segundo os autores, embora o país seja responsável por 14% do consumo global de sucata de aço no ano de 2012, a utilização de sucata ainda é pouco explorada no país quando comparada a países como Japão, Estados Unidos e a UE. Contudo, uma vez que o consumo de aço em infraestrutura no país é significativo, a sucata gerada somente estará disponível para reciclagem em um período de 30 a 50 anos. Dessa forma, a utilização de sucata de aço limita-se, em grande parte, à sucata gerada durante o processo de produção. A baixa oferta de sucata doméstica disponível para reciclagem constitui-se, portanto, como a principal barreira à total transição para a EC no mercado de aço chinês.

Por esse motivo, a China ocupa o quarto lugar no mundo em importação de

sucata de aço. Entretanto, os custos de importação são maiores que os da utilização de ferro gusa na produção de aço, gerando um *spread* de preços, afetando negativamente sa perspectivas de utilização da sucata. Além disso, expôr a oferta de matéria prima à mercados externos é outro fator de risco para a indústria interna, que ficaria refém da volatilidade de *trades* internacionais.

Segundo Wübbeke e Heroth (2014), o fator econômico associado ao alto custo da sucata de aço comparado ao custo do ferro gusa na China é outra barreira para a reciclagem do aço no país.

Segundo Yellishetty et al. (2011), existe uma falta de entendimento por trás do conceito de reciclagem de sucata. Muito se fala acerca da taxa de reciclagem da sucata, sendo considerada uma métrica absoluta e individual. Contudo, o autor destaca a necessidade de adequar esta estratégia de metrificação, relativizando tal métrica ao comparar o atual estoque de sucata frente quanto desse estoque foi realmente aproveitado.

Apesar dos diversos benefícios provenientes do reuso da sucata, tais benefícios são limitados pela escassez e dificuldade de obtenção do material (YELLISHETTY et al., 2011). Alguns autores como Wübbeke e Heroth (2014), Joensuu, Edelman e Saari (2020), van Maastrigt (2019) introduzem o conceito de *urban mining* como uma alternativa para este desafio, ou seja, considera-se toda a infraestrutura urbana como uma jazida de matéria prima, no caso a sucata, que poderá ser extraída a medida que a vida útil dos produtos chegar ao fim.

Uma das causas da baixa disponibilidade da sucata atualmente é o fato da maioria dos produtos de aço permanecerem em uso por longos períodos de tempo antes de serem reintroduzidos como oferta no mercado (YELLISHETTY et al., 2011). Como consequência disto, a adoção da sucata acaba sendo prejudicada por não ter a capacidade de suprir toda a demanda de curto prazo. Em um ambiente de alta pressão por prazos de entrega mais curtos e cronogramas apertados, tal fato é evidenciado como um grande desafio para a construção civil.

Nesse sentido, não há volume suficiente de sucata para suprir por completo a crescente demanda para a produção de aço pela rota secundária (utilizando o FEA). Como forma de compensar essa defasagem, grande parte da indústria brasileira de

aço mescla as rotas primária (BOF) e secundária (FEA) na produção do aço.

Outra causa relevante da escassez de sucata de aço é a reutilização de produtos de aço sem passar novamente pela etapa de fusão (YELLISHETTY et al., 2011). Essa reutilização ocorre quando o aço no fim da sua vida útil é utilizado novamente sem passar pela etapa de fusão do metal, consequentemente, a oferta de sucata para a produção industrial de aço secundário é reduzida.

A utilização de sucata de aço pode ser economicamente mais vantajosa que o ferro gusa na fabricação de produtos, estruturas e componentes de aço. Esses benefícios originam-se do fato da sucata já ter passado pela etapa refino, o que demanda menos energia quando reintroduzida no processo de produção (YELLISHETTY et al., 2011). Tal benefício não apenas contribui para redução do custo das unidades produtoras quanto também para o aspecto ambiental.

Por outro lado, os custos inerentes à operação logística e ao tratamento dos resíduos de sucata que antecedem a produção do aço, podem torná-la mais custosa em relação à outras matérias-primas, como o ferro gusa, desestimulando o seu uso.

Para Yellishetty et al. (2011), o desafio mais crítico para a reciclagem da sucata de aço é a identificação e seleção dos metais de acordo com a sua composição. Produtos com finalidades diferentes, podem apresentar variações químicas variadas de acordo com a atividades as quais foram submetidos. Esses resíduos químicos, dependendo da concentração, podem contaminar a liga e causar efeitos indesejados, comprometendo a função do produto final.

Devido a isso, cria-se um paradigma entre utilizar a sucata alocando grande quantidade de recursos, ou adotar a rota primária e não expandir o orçamento. Como já citado anteriormente, grande parte dos agentes presentes na cadeia do aço optarão por preservar o capital econômico em detrimento dos possíveis benefícios do uso da sucata.

4.2.1.1 Barreiras e facilitadores por publicação

Pela Figura 26 é possível visualizar as principais barreiras identificadas nos artigos do PB, divididas em 5 categorias: social, econômica, política, técnica e organizacional. Os 23 artigos cujos temas envolvem a análise e estudo das principais

barreiras à implementação da EC na indústria do aço, no setor da construção civil, ou, mais especificamente, ao reuso ou reciclagem de aço estrutural e aço para concreto estão expostos abaixo. Os 4 artigos restantes do PB contribuíram para o presente trabalho em outros aspectos.

A barreira mais citada dentre os 23 artigos, com 13 ocorrências, está no âmbito social, identificada como a ”Percepção de que o aço reutilizado é inferior ao novo". Segundo os autores, tal inferioridade é referente tanto à qualidade quanto à segurança do produto. A segunda barreira de maior destaque foi a ”Falta de incentivo de diferentes iniciativas/instituições à utilização do aço reutilizado/reciclado”, citada 9 vezes e se encontra no pilar político. Os autores se referem, principalmente, à falta de apoio por parte de instituições públicas, bem como a escassez de políticas públicas de incentivo às práticas relacionadas à EC.

Na categoria de barreiras técnicas, a ”Não conformidade das características físicas dos produtos ou componentes reutilizados/falta de especificações” teve maior destaque. O principal motivo para tal fato é, segundo os autores, a falta de padronização das estruturas de aço, além da inexistência da documentação e especificações de cada produto. No aspecto organizacional, a barreira de maior incidência foi ”Falta de disponibilidade/baixa oferta de aço reutilizado ou sucata de aço”. Já no econômico, trata-se do significativo tempo e custo relativo ao processo de desconstrução quando comparado à demolição comum.

Pela Figura 27 pode-se visualizar os 24 facilitadores mais citados nos artigos, divididos em 6 categorias: econômico, social, ambiental, político, organizacional e técnico. Os facilitadores de maior ocorrência são ”Incentivos fiscais”, inserido no âmbito político, e ”Reorganização da cadeia para um modelo mais circular”, no pilar organizacional, com 11 aparições cada. A tabela conta com 23 artigos do PB que estudam os principais fatores que contribuem para a transição para a EC no setor da construção civil com aço. Os quatro artigos restantes contribuem para a presente pesquisa em outros aspectos.

Figura 26 – Barreiras identificadas na literatura

	Pomponi, F., Moncaster A.	Yellishetty, M. et al.	Pauliuk, S. et al.	Rios, F. C., Chong, W. K. and Grau, D.	Tingley, D. D., Cooper, S. and Cullen J.	Oyedele, L. O., Ajayi, S. O. and Kadiri K. O.	Iacovidou, E., Purnell, P.	Galvão, G. D. A. et al.	Wübbeke, J. and Heroth T.	Cooper, D., Allwood, J. M.	Gorgolewski, M. et al.	Dunant, C. et al.	Peng Wang, Wen Li, SamiKara	Hradil, P., Wahlström, M., Talja, A., Huukha, S.	Hopkinson, P. et al.	Bilal, M. et al.	Hossain et al.	Joensuu T., Edelman H., Saari A.	Rakhshan, et al.	Gu, W. et al.	Silva et al.	Izeppi W. C.	van Maastrigt J.
ECONÔMICO																							
Altos custos envolvidos na aquisição utilização de componentes reutilizados de aço		X				X		X	X							X							
Alto tempo e custo para processos de deconstrução		X					X			X		X		X					X				X
Capacidade/custos operacionais da cadeia de suprimentos		X					X			X										X		X	
ORGANIZACIONAL																							
Falta de disponibilidade/baixa oferta de aço reutilizado ou sucata de aço		X				X		X	X			X	X	X	X								
Falta de rastreabilidade do aço reutilizado/reciclado							X					X			X		X						
Falta de integração entre os agentes da cadeia de fornecimento de aço					X										X		X	X			X	X	
Armazenagem de componentes de aço reutilizado		X			X		X								X								
Inércia do setor de construção (necessidade de inovação)					X													X					
POLÍTICO																							
Falta de incentivo de diferentes iniciativas/instituições à utilização do aço reutilizado/reciclado	X	X					X	X								X	X	X	X		X		
Políticas tributárias ou regulatórias						X		X								X	X		X		X		
SOCIAL																							
Percepção de que o aço reutilizado é inferior ao novo			X	X	X	X	X			X	X	X		X			X	X	X			X	
Baixa demanda por projetos que utilizem componentes reutilizados de aço					X	X																	
Prática pouco frequente/falta de estudos/cases de sucesso relevantes												X											
Falta de conhecimento/entendimento com relação aos benefícios da EC						X		X								X	X	X			X		
TÉCNICO																							
Não conformidade das características físicas dos produtos ou componentes reutilizados/falta de especificações		X				X	X	X		X	X	X		X									
Falta de informação/verificação das propriedades do aço reutilizado		X			X		X				X			X	X								
Desconsideração do ciclo de vida dos componentes de aço (desde o design até a desconstrução)												X					X	X					X
Falta de certificações para o aço												X											
Dificuldades técnicas relacionadas à separação entre concreto e aço															X								

Fonte: elaborada pelos autores.

Figura 27 – Facilitadores identificados na literatura

	Pomponi, F., Moncaster A.	Yellishetty, M. et al.	Pauliuk, S. et al.	Rios, F. C., Chong, W. K. and Grau, D.	Tingley, D. D., Cooper, S. and Cullen J.	Oyedele, L. O., Ajayi, S. O. and Kadiri K. O.	Iacovidou, E., Purnell, P.	Galvão, G. D. A., et al.	Wübbeke, J. and Heroth T.	Gorgolewski, M. et al.	Dunant, C. et al.	Wang, P., Li. W., Kara, S.	Hradil, P., Wahlström, M., Talja, A., Huukha, S.	Hopkinson, P. et al.	Bilal, M. et al.	Hossain et al.	Joensuu T., Edelman H., Saari A.	Rakhshan, et al.	Gu, W. et al.	Izeppi W. C.	van Maastrigt J.	Fivet, C., Brütting, J.	Chan, A. P.C., Yang, Y., Gao, R.
ECONÔMICO																							
Baixa oferta de matéria prima ligada à produção primária do aço									X			X											X
Aumento do custo da produção primária devido ao aumento da demanda de produtos de aço		X							X			X											
Modelos de negócios voltados para cooperação	X												X	X									
Baixo custo na utilização da sucata		X										X					X	X	X				
Maior oferta de sucata			X							X		X							X				
ORGANIZACIONAL																							
Reorganização da cadeia para um modelo mais circular	X			X	X				X	X	X			X			X	X		X			X
Maior integração entre os stakeholders da cadeia de suprimentos						X		X		X	X		X			X	X			X			X
Busca por imagem sustentável dentre competidores de mercado								X										X	X				
Adoção de modelos baseados em DfD				X									X	X									
POLÍTICO																							
Incentivos fiscais	X			X	X	X		X					X				X		X	X	X		X
Políticas voltadas para melhoria da eficiência energética do setor	X							X					X			X	X		X	X			
SOCIAL																							
Maior esclarecimento sobre benefícios e aspectos do modelo circular								X		X			X				X	X		X			X
Pressão social por melhores padrões ambientais																		X					
TÉCNICO																							
Avanços tecnológicos	X													X	X		X	X		X			X
Facilidade de desmonte através de componentes reversíveis		X					X			X			X				X					X	
Alta taxa de reciclagem dos materiais de construção civil		X					X									X							
Utilização de materiais mais sustentáveis e duráveis	X						X						X			X	X						
Estudos de caso/comprovações empíricas					X												X						
Projetos baseados em LCA				X						X			X	X				X					
Produção acadêmica acerca da economia circular e aço															X								X
Propriedades físicas e químicas do aço		X					X						X	X									
Database da oferta e demanda de estruturas reutilizadas					X	X							X										
AMBIENTAL																							
Melhores estratégias de gerenciamento de resíduos de construção							X									X	X						X
Grandes benefícios ambientais	X				X				X				X			X	X	X	X				

Fonte: elaborada pelos autores.

5 Conclusão

Viu-se que aço é um metal com capacidade de reaproveitamento quase que infinita, suas propriedades podem ser preservadas ao longo do tempo, mesmo ao fim de sua vida útil teórica. Levando este conceito para o âmbito de construção civil, pode-se extrair, portanto, inúmeros benefícios através da sua aplicação incorporado à uma cadeia mais circular e consciente. Evidencia-se, por meio do presente trabalho, que o aço é um material chave para a transição para um modelo de negócios circular, principalmente no âmbito da construção civil.

Tal estudo somente foi possível, através da aplicação do método *ProKnow-C*, que após construído o PB, permitiu avaliar com maior eficiência o tema de foco deste trabalho, bem como o grau de relevância de cada artigo selecionado.

Como resultado, o *Resources, Conservation and Recycling*, *Journal of Cleaner Production*, *Sustainability*, *Journal of Industrial Ecology* e *Environmental Science and Technology* foram periódicos de destaque dentre artigos selecionados do PB. Estes periódicos veiculam publicações acerca dos temas de sustentabilidade, meio ambiente, tecnologia, economia e desenvolvimento sustentável.

Em paralelo, pôde-se observar vários autores de destaque, tanto no PB quanto na amostra de artigos das referências do PB, nos quais vale destacar: Yong Gang, de origem chinesa, com participação em mais de 250 publicações com foco em ecologia industrial; Julian M. Allwood, da Universidade de Cambridge, Inglaterra, presente na autoria de 43 referência e autor de 4 artigos do PB; Jonathan M. Cullen, também da Universidade de Cambridge, autor de 3 artigos do PB, com destaque na área infraestrutura urbana. Além disso, podemos citar autores como Mark Gorgolewski, Yuliya Kalmykova, Stefan Pauliuk, Danielle D. Tingley, Cyrille F. Dunant, dentre muitos outros que apresentaram menor destaque quando comparados no PB mas que geraram grandes contribuições para as áreas de estudo.

A maior parte dos artigos científicos relacionados ao tema do presente estudo foi publicada a partir do ano de 2017, fato que aponta a atualidade e crescente relevância do assunto nos últimos anos.

Em relação aos países das instituições de ensino dos autores, considerando a amostra de referências, houve destaque para o Reino Unido, com 19 autores, seguido pela Holanda, Itália e Suécia, com 14, 11 e 10 autores respectivamente. Foi possível observar a preponderância da presença europeia, bem como participação relativamente forte da China, nos trabalhos foco desta pesquisa.

Não obstante, através do estudo realizado, pode-se notar que o tema da EC do aço utilizado no setor da construção civil ainda é pouco explorado no Brasil e constitui uma lacuna na literatura nacional.

Quanto aos artigos de destaque, considerando a relevância dos autores, foram identificados os artigos *Circular economy - from review of theories and practices to development of implementation tools*, de Kalmykova, Rosado e Sadagopan; *Circular economy for the built environment: a research framework*, de Moncaster e Pomponi, ambos presentes no quadrante de artigos de destaque do gráfico 24.

Além disso, após a presente revisão da literatura, pode-se afirmar que ainda existem importantes barreiras a serem vencidas e que ainda necessitam de estudo mais aprofundado. Dessa maneira, a presente pesquisa foi capaz de identificar as principais barreiras e facilitadores e categorizá-las em segmentos distintos, como: econômico, social, organizacional, político e técnico. A barreira mais relevante encontrada na literatura está relacionada ao âmbito social, e, mais especificamente, à percepção de inferioridade dos produtos, componentes e estruturas de aço reutilizados. A escassez de políticas de incentivo por parte de instituições públicas também é vista como um impasse para a implementação efetiva da EC no setor da construção civil com aço.

Ao mesmo tempo, os principais facilitadores foram classificados em seis categorias: social, econômico, organizacional, técnico, política e ambiental. Os facilitadores mais pontuados estão nos âmbitos político e organizacional, e se referem a incentivos fiscais e uma maior reestruturação da cadeia de suprimentos do aço com foco em um modelo de negócios mais circular.

As práticas relacionadas à EC na indústria do aço de construção civil ainda são pouco exploradas, embora apresentem vantagens e benefícios de grande relevância. Atualmente, a maior parte do aço utilizado na construção civil é reciclado, ao passo que o número de *cases* de sucesso no que concerne a reutilização de estruturas e

componentes de aço ainda é baixo na comunidade científica.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados deste trabalho trouxeram importantes conceitos e relações entre várias aspectos presentes na transição de um modelo linear para um circular, com ênfase no mercado de aço de construção civil.

Contudo, juntamente com suas conclusões, foram identificados *gaps* na literatura brasileira acerca do tema. Tal oportunidade possui justificativa de um maior aprofundamento posterior devido ao grau de relevância do tema e pelo fato de ser um tema recente e que trará grande benefícios à comunidade científica nacional.

Em paralelo, como sugestão de desdobramentos do presente trabalho, é interessante realizar-se um questionário buscando maiores esclarecimentos com comprovação prática, baseados no sentimento e percepção dos *players* de mercado e agentes inseridos na cadeia do aço de construção civil brasileira.

Uma forma de introduzir novos trabalhos nesta linha é através da análise de estudos de caso, buscando extrair o conhecimento prático envolvido nas atividades pertencentes a este tema e relacioná-lo com a literatura atual.

O atual estado da literatura brasileira acerca deste tema, pode ser beneficiado grandemente pela pletora de trabalhos científicos internacionais, os quais apresentam metodologias já aplicadas a situações reais de mercado e diversas discussões e pontos de vista distintos. Por consequência, o aproveitamento deste arcabouço de conhecimento se vê em condições favoráveis para ser utilizado em pesquisas brasileiras.

Referências

AIChE. *Yong Geng*. 2021. Section: Community. Disponível em: <https://www.aiche.org/community/bio/yong-geng>. Acesso em: 08 maio 2021. Citado na página 45.

ALLWOOD, J. *The State of Sustainability Leadership*. [S.l.], 2012. 5 p. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.592.8907&rep=rep1&type=pdf>. Citado na página 59.

ALLWOOD, J. M.; CULLEN, J. M.; CARRUTH, M. A. *Sustainable materials: with both eyes open ; [future buildings, vehicles, products and equipment - made efficiently and made with less new material]*. Cambridge: UIT Cambridge, 2012. OCLC: 838913283. ISBN 9781906860059 9781906860073. Citado na página 27.

ARAÚJO, C. A. A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. *Em Questão*, v. 12, n. 1, p. 11–32, dez. 2006. ISSN 1808-5245. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/EmQuestao/article/view/16>. Citado na página 37.

Associação Brasileira de Construção Metálica. *ESTATÍSTICAS DA CONSTRUÇÃO METÁLICA*. 2019. Disponível em: <https://www.abcem.org.br/site/arquivos/ABCEM-Estatisticas-setembro-2019-rev.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2020. Citado na página 14.

AZEVEDO, J. Laboissière de. A Economia Circular aplicada no Brasil: uma análise a partir dos instrumentos legais existentes para a logística reversa. In: . LATEC/UFF: [s.n.], 2015. p. 16. Citado na página 22.

BILAL, M. et al. Current state and barriers to the circular economy in the building sector: Towards a mitigation framework. *Journal of Cleaner Production*, v. 276, p. 123250, 2020. ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620332959>. Citado na página 60.

Building Products. *Steel, sustainability and the circular economy*. 2019. Section: Company News. Disponível em: <https://buildingproducts.co.uk/steel-sustainability-circular-economy/>. Acesso em: 18 dez. 2020. Citado na página 28.

Centro Brasileiro da Construção em Aço. *Características do Aço na Construção Civil*. Rio de Janeiro, Brasil: Centro Brasileiro da Construção em Aço, s.d. Citado na página 28.

CHAN, A. P. C.; YANG, Y.; GAO, R. Factors affecting the market development of steel construction. *Engineering, Construction and Architectural Management*, v. 25, n. 9, p. 1146–1169, 2018. ISSN 0969-9988. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ECAM-06-2017-0095/full/html>. Citado na página 63.

Confederação Nacional da Indústria; Instituto Aço Brasil. *A indústria do aço no Brasil*. [S.l.]: CNI, 2017. Citado 5 vezes nas páginas 15, 16, 24, 25 e 27.

COOPER, D. R.; ALLWOOD, J. M. Reusing steel and aluminum components at end of product life. *Environmental Science & Technology*, v. 46, n. 18, p. 10334–10340, 2012. ISSN 0013-936X. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es301093a>. Citado 3 vezes nas páginas 63, 64 e 65.

CULLEN, J. M.; ALLWOOD, J. M.; BAMBACH, M. D. Mapping the global flow of steel: From steelmaking to end-use goods. *Environmental Science & Technology*, v. 46, n. 24, p. 13048–13055, 2012. ISSN 0013-936X. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es302433p>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 26.

DENYER, D.; TRANFIELD, D. *In: Buchanan DA and Bryman A (eds) The SAGE Handbook of Organizational Research Methods.* Producing a systematic review.: London: SAGE Publications, 2009. 671–687 p. Citado na página 58.

DUNANT, C. F. et al. Real and perceived barriers to steel reuse across the uk construction value chain. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 126, p. 118–131, 2017. ISSN 0921-3449. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092134491730229X>. Citado 2 vezes nas páginas 61 e 62.

Ellen MacArthur Foundation. *Towards Circular Economy*. [S.l.], 2013. 98 p. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>. Citado na página 65.

Ellen MacArthur Foundation. *Towards a Circular Economy: business rationale for an accelerated transition*. [S.l.], 2015. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_9-Dec-2015.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.

Ellen MacArthur Foundation. *Economia Circular*. 2020. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/economia-circular/conceito>. Acesso em: 18 dez. 2020. Citado na página 20.

Ellen MacArthur Foundation. *What is the circular economy*. 2021. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/what-is-the-circular-economy>. Acesso em: 10 maio 2021. Citado na página 16.

Ellen MacArthur Foundation; McKinsey Center for Business and Environment. *Growth Within: a Circular Economy Vision fo a Competitive Europe*. [S.l.], 2015. 98 p. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe>. Citado na página 21.

ELSHKAKI, A. et al. Copper demand, supply, and associated energy use to 2050. v. 39, p. 305–315, jun. 2016. Citado na página 16.

ENSSLIN, L. et al. Proknow-c, knowledge development process- constructivist. *Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI. Brasil*, v. 10, p. 2015, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 30, 31, 32 e 34.

European Commission. *Circular economy action plan. The EU's new circular*

action plan paves the way for a cleaner and more competitive Europe. 2021. Section: Environment. Disponível em: <https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan_pt>. Acesso em: 10 maio 2021. Citado na página 17.

European Commission. *First circular economy action plan*. 2021. Section: Environment. Disponível em: <https://ec.europa.eu/environment/topics/circular-economy/first-circular-economy-action-plan_en>. Acesso em: 06 maio 2021. Citado na página 52.

FGV. *FGVDados*. 2021. Disponível em: <http://www14.fgv.br/fgvdados20/Consulta.aspx>. Citado na página 15.

FIVET, C.; BRÜTTING, J. Nothing is lost, nothing is created, everything is reused: structural design for a circular economy. *Structural Engineer*, v. 98, p. 74–81, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 17, 63 e 64.

GALVÃO, G. D. A. et al. Circular economy: Overview of barriers. *Procedia CIRP*, v. 73, p. 79–85, 2018. ISSN 2212-8271. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118305262>. Citado na página 60.

GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas, 2002. OCLC: 422878585. ISBN 9788522431694. Citado na página 30.

GORGOLEWSKI, M. et al. Facilitating greater reuse and recycling of structural steel in the construction and demolition process. *Ryerson University. Can. Inst. Steel Construct*, 2006. Citado 4 vezes nas páginas 23, 27, 62 e 64.

Green Building Council Brasil. *Certificação LEED*. s.d. Disponível em: <https://www.gbcbrasil.org.br/certificacao/certificacao-leed/>. Acesso em: 18 dez. 2020. Citado na página 22.

GU, W. et al. Optimal strategies for reverse logistics network construction: A multi-criteria decision method for chinese iron and steel industry. *Resources Policy*, p. 101353, 2019. ISSN 0301-4207. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301420718303891>. Citado na página 63.

HOPKINSON, P. et al. Recovery and reuse of structural products from end-of-life buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, v. 172, n. 3, p. 119–128, 2018. ISSN 1478-4629. Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/full/10.1680/jensu.18.00007>. Citado 2 vezes nas páginas 65 e 67.

HOSSAIN, M. U. et al. Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 130, p. 109948, 2020. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032120302392>. Citado 3 vezes nas páginas 60, 61 e 64.

HOSSEINI, M. R. et al. Reverse logistics in the construction industry. *Waste Management & Research*, v. 33, p. 499–514, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 62.

HRADIL, P. et al. Re-use of structural elements. *Environmentally efficient recovery of*

building components. VTT Technology, v. 200, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 23, 59, 64 e 65.

IACOVIDOU, E.; PURNELL, P. Mining the physical infrastructure: Opportunities, barriers and interventions in promoting structural components reuse. *Science of The Total Environment*, v. 557-558, p. 791–807, 2016. ISSN 0048-9697. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716305228>. Citado 3 vezes nas páginas 61, 62 e 64.

IZEPPI, W. C. Estímulos e barreiras para a adoção da economia circular: uma pesquisa quantitativa nos setores de agronegócio, construção civil e eletroeletrônico. 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/191266>. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 63.

JOENSUU, T.; EDELMAN, H.; SAARI, A. Circular economy practices in the built environment. *Journal of Cleaner Production*, v. 276, p. 124215, 2020. ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620342608>. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 68.

KALMYKOVA, Y.; SADAGOPAN, M.; ROSADO, L. Circular economy – from review of theories and practices to development of implementation tools. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 135, p. 190–201, 2018. ISSN 0921-3449. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917303701>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

LOPES, S. et al. A Bibliometria e a Avaliação da Produção Científica: indicadores e ferramentas. *Actas do Congresso Nacional de Bibliotecários, Arquivistas e Documentalistas*, v. 0, n. 11, out. 2012. Number: 11. Disponível em: <https://www.bad.pt/publicacoes/index.php/congressosbad/article/view/429>. Citado na página 37.

OCDE. *Relatórios Econômicos OCDE Brasil*. [S.l.], 2018. Citado na página 14.

OYEDELE, L. O.; AJAYI, S. O.; KADIRI, K. O. Use of recycled products in uk construction industry: An empirical investigation into critical impediments and strategies for improvement. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 93, p. 23–31, 2014. ISSN 0921-3449. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344914002018>. Citado na página 62.

PAULIUK, S. et al. The steel scrap age. *Environmental Science & Technology*, v. 47, n. 7, p. 3448–3454, 2013. ISSN 0013-936X. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es303149z>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 62.

POMPONI, F.; MONCASTER, A. Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 710–718, 2017. ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616321102>. Citado na página 60.

RAKHSHAN, K. et al. Components reuse in the building sector – a systematic review. *Waste Management & Research*, v. 38, n. 4, p. 347–370, 2020. ISSN 0734-242X. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X20910463>. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 66.

RIOS, F. C.; CHONG, W. K.; GRAU, D. Design for disassembly and deconstruction - challenges and opportunities. *Procedia Engineering*, v. 118, p. 1296–1304, 2015. ISSN 1877-7058. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815021402>. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 65.

SILVA, V. da et al. Vantagens, barreiras e estratégias para economia circular: uma abordagem teórica. *Exacta*, v. 17, p. 1–18, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 62.

TINGLEY, D. D.; COOPER, S.; CULLEN, J. Understanding and overcoming the barriers to structural steel reuse, a uk perspective. *Journal of Cleaner Production*, v. 148, p. 642–652, 2017. ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261730210X>. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 61.

University of Cambridge. *CUED Division A. Energy, Fluids and Turbomachinery. Dr Jonathan M Cullen*. 2021. Section: Research Directory. Disponível em: <https://www-diva.eng.cam.ac.uk/directory/joncullen>. Acesso em: 04 maio 2021. Citado na página 45.

University of Cambridge. *Energy Transitions Research at the University of Cambridge. Professor Julian M Allwood*. 2021. Section: Research Directory. Disponível em: <https://www.energy.cam.ac.uk/directory/jma42@cam.ac.uk>. Acesso em: 04 maio 2021. Citado na página 45.

van Maastrigt, J. Quantifying life cycle environmental benefits of circular steel building designs: development of an environmental assessment tool for reuse of steel members in building designs for the netherlands. 2019. Citado 4 vezes nas páginas 22, 29, 65 e 68.

VANTI, N. A. P. Da bibliometria à webometria: uma exploração conceitual dos mecanismos utilizados para medir o registro da informação e a difusão do conhecimento. *Ciência da Informação*, v. 31, n. 2, p. 369–379, ago. 2002. ISSN 0100-1965. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-19652002000200016&lng=pt&tlng=pt>. Citado na página 37.

WANG, N. et al. A quantitative investigation of the technological innovation in large construction companies. *Technology in Society*, v. 65, p. 101533, maio 2021. ISSN 0160-791X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160791X21000087>. Citado na página 14.

WANG, P.; LI, W.; KARA, S. Cradle-to-cradle modeling of the future steel flow in china. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 117, p. 45–57, 2017. ISSN 0921-3449. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344915300409>. Citado na página 67.

World Steel Association. *Circular Economy - worldsteel*. 2020. Disponível em: <https://circulareconomy.worldsteel.org/>. Acesso em: 2020-12-19. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.

World Steel Association. *Sustainable steel*. [S.l.], 2020. 4 p. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 17.

WÜBBEKE, J.; HEROTH, T. Challenges and political solutions for steel recycling in china. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 87, p. 1–7, 2014. ISSN 0921-3449. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344914000627>. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24, 67 e 68.

YELLISHETTY, M. et al. Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: sustainability issues, problems and prospects. *Environmental Science & Policy*, v. 14, n. 6, p. 650–663, 2011. ISSN 1462-9011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1462901111000669>. Citado 4 vezes nas páginas 25, 59, 68 e 69.

ZHANG, B. et al. CO2 emission reduction within Chinese iron & steel industry: practices, determinants and performance. *Journal of Cleaner Production*, v. 33, p. 167–178, set. 2012. ISSN 0959-6526. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652612001990>. Citado na página 24.