

## **Economia Circular na Indústria Metalúrgica: Uma Análise Bibliométrica Sobre os Avanços, Desafios e Oportunidades no Processamento de Metais**

**Maria Clara de Oliveira Rodrigues** (UFPI) *m.c.oliveirarodrigues0@gmail.com*

**George Isaac Lopes de Sousa** (UFPI) *georgeisaac02@gmail.com*

**Nicolas Anisteiny Ramos Guimarães** (UFPI) *nicolas.anisteiny@gmail.com*

**Maria do Socorro Ferreira dos Santos** (UFPI) *socorroferreira@ufpi.edu.br*

### **Resumo**

A economia circular visa reduzir impactos ambientais e melhorar a eficiência de recursos na indústria metalúrgica. Contudo, a etapa de processamento de metais, responsável por significativa geração de resíduos, é pouco explorada na literatura. Este estudo revisou 259 artigos das bases Web of Science, Scopus e ScienceDirect, dos quais 14 foram selecionados por abordarem práticas circulares no processamento de metais. Destacaram-se tecnologias como Single Point Incremental Forming (SPIF) e sinterização na fase líquida (SLPS), que reduzem desperdícios e promovem o reaproveitamento de materiais. No entanto, desafios como a purificação de resíduos, ausência de métricas quantitativas sobre emissões de CO<sub>2</sub> e dificuldades de escalabilidade comprometem sua implementação em larga escala. Concluiu-se que o processamento de metais é uma área estratégica para a economia circular, mas requer validações práticas, maior integração tecnológica e políticas públicas que incentivem sua adoção. Este estudo reforça a relevância de práticas circulares para transformar o setor, promovendo sustentabilidade e inovação.

**Palavras-Chaves:** *Economia circular, Indústria Metalúrgica, Transformação de Metal, Resíduo, Análise Bibliométrica.*

### **1. Introdução**

A economia circular surge como uma solução para questões globais ambientais e econômicas, uma vez que opõe uma alternativa ao clássico modelo linear dos processos de produção – da extração ao uso e descarte. Tal abordagem provê-se decisiva para a redução dos impactos ambientais e para a eficiência do uso dos recursos, um fato que se verifica principalmente nos setores intensivos em materiais, como a indústria metalúrgica.

Esta nova visão dos sistemas produtivos procura, de forma prática, estimular a geração mínima de resíduos, aumentar o tempo de vida útil dos materiais ou produtos, e a maximização da eficiência dos recursos, gerando assim sustentabilidade e inovação. Para a Fundação Ellen



MacArthur (2013), a economia circular estabelece valor e reduz impactos ambientais e mostrou-se notável em indústrias como as automobilísticas, de fabricação e civil.

Dentro do contexto das indústrias, a metalurgia tem um papel primordial. Afinal, por meio do processamento de metais é possível produzir peças para diversos setores ou produtos acabados para consumo direto. O aço fundido passa por atividades como corte, dobra, soldagem e pintura até se tornar um produto distinto, como móveis, equipamentos e estruturas metálicas, e peças diversas.

No ano de 2020, o Brasil produziu 31 milhões de toneladas de aço bruto, sendo um dos dez maiores produtores mundiais (Ministério de Minas e Energia, 2021). Tal produção se refere à primeira fase do ciclo de vida do aço. Posteriormente, o aço fundido passa por atividades como corte, dobra, soldagem e pintura, no segmento secundário da indústria metalúrgica. Enfim se transformando em produtos como móveis, equipamentos e estruturas metálicas, e peças diversas

No entanto, a aplicação de práticas circulares nesse setor ainda enfrenta desafios significativos, desde barreiras tecnológicas à resistência cultural até a falta de métricas quantitativas para avaliar impactos ambientais e econômicos.

Para desenvolver uma gestão mais sustentável e enfrentar as barreiras presentes faz-se necessário pesquisas que visem propor técnicas e abordagens mais circulares. Além disso, a carência de estudos específicos que explorem as técnicas aplicáveis à transformação de metais e suas implicações econômicas e ambientais, principalmente em fábricas menores, onde normalmente essas barreiras se intensificam (Al-Alimi et al., 2024).

Contudo, cada empresa deve dar passos conforme a própria maturidade e encontrar um caminho, dentre as diversas técnicas como, reciclagem de resíduos, simbiose industrial, planos de corte inteligentes, otimização de processos entre outros para se adequar as práticas sustentáveis.

Nesse sentido, por meio de uma análise bibliométrica da produção científica acerca da economia circular na metalurgia. Este artigo visa identificar os principais avanços, tendências, autores influentes, redes de colaboração e lacunas na literatura. A análise foi conduzida com base em artigos publicados entre 2014 e 2024, utilizando ferramentas como o software Vosviewer e o Excel para mapear a distribuição geográfica, temporal e temática das publicações. Visando entender o estado atual da pesquisa e direcionar futuros estudos para áreas ainda pouco exploradas.



## 2. Referencial Teórico

As mudanças climáticas e os impactos ambientais impõem desafios à indústria, exigindo a adoção de práticas sustentáveis. A economia circular surge como alternativa ao modelo linear, promovendo a reutilização de materiais, prolongamento do ciclo de vida e eficiência de recursos (Oliveira et al., 2010).

Segundo o Global Footprint Network (2025), a humanidade já ultrapassou a capacidade regenerativa do planeta, exigindo respostas estratégicas. Modelos como leasing e compartilhamento fomentam a eficiência econômica, enquanto tecnologias avançadas contribuem para a descarbonização, alinhando-se ao Acordo de Paris e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (UNFCCC, 2015; United Nations, 2015).

A Finlândia exemplifica como políticas públicas e regulamentações ambientais impulsionam a eficiência energética e o reaproveitamento de materiais na indústria metalúrgica (Finlândia, 2017). A adoção da economia circular fortalece a resiliência econômica e reduz a dependência de commodities (Fundação Ellen MacArthur, 2013).

A indústria metalúrgica transforma metais refinados em produtos finais por meio de corte, dobra, soldagem e pintura, atendendo setores como construção e transporte. No entanto, responde por cerca de 7% das emissões globais de CO<sub>2</sub> (Agência Internacional de Energia, 2022). O uso de energia elétrica e solventes químicos também contribui para a emissão de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs), agravando a poluição atmosférica (Gauto et al., 2011). A economia circular no setor possibilita a reutilização de sucatas e otimização de recursos. A reciclagem de resíduos industriais reduz a necessidade de matéria-prima virgem (Provinsi et al., 2023), enquanto a simbiose industrial integra cadeias produtivas para aproveitamento de insumos (Oliveira et al., 2019). O ecodesign prioriza materiais recicláveis e facilita desmontagem e reutilização de componentes (Silva; Ganga; Godinho Filho, 2023).

A eficiência produtiva pode ser aprimorada por automação e softwares que reduzem desperdícios e consumo energético (Maruyama et al., 2016). A substituição de insumos primários por reciclados minimiza impactos ambientais e custos (Provinsi et al., 2023). Práticas como manutenção preventiva e remanufatura prolongam a vida útil dos produtos e reduzem resíduos (Fleuriault et al., 2021).

A manufatura aditiva (impressão 3D) otimiza o uso de materiais reciclados, enquanto a logística reversa fecha o ciclo produtivo ao recolher e reaproveitar produtos ao fim da vida útil. Políticas públicas e incentivos financeiros são fundamentais para consolidar esses modelos e viabilizar a transição para sistemas produtivos sustentáveis (Silva; Ganga; Godinho Filho, 2023).



A implementação dessas estratégias fortalece a competitividade da indústria metalúrgica e contribui para a sustentabilidade global, alinhando-se às metas de descarbonização e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

### 3. Metodologia

Este estudo consiste em uma análise bibliométrica baseada no método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), garantindo clareza, replicabilidade e rigor metodológico (Page et al., 2021). Como relatado por Page et al. (2021), o método PRISMA compõe-se de etapas organizadas de identificação, triagem e inclusão dos estudos. Apontando para uma abordagem que assegurava qualidade, transparência e rigor no processo.

A pesquisa foi conduzida nas bases Web of Science, Scopus e ScienceDirect. As pesquisas foram realizadas através de combinações de palavras-chave somente circunscritas ao escopo do trabalho, que incluiu "circular economy", "metallurgical industry", "metal forming", "Material reuse", "metal", "waste processing", "metallurgy", "metal recycling" e "metalworking".

As buscas foram refinadas com o operador booleano "AND" fazendo uso de duas a três palavras por vez a fim de afunilar as buscas. Ademais, foram adotados filtros diretamente nas bases de dados, sendo estes referentes ao idioma, e ano de publicação. Para o idioma, foram considerados apenas os artigos escritos em inglês ou português levando em consideração o domínio de fluência dos autores e considerando o período de publicação entre 2014 a 2024.

Foram adotados critérios de inclusão e exclusão para seleção dos artigos. Incluindo estudos sobre práticas de economia circular, como reutilização de materiais, simbiose industrial e gestão de resíduos, focados em indústrias que processam metais refinados ou semiacabados, como chapas, vergalhões e bobinas, submetidos a corte, dobra, usinagem, soldagem e pintura.

Excluíram-se artigos sem relação com economia circular, voltados para mineração, reciclagem pós-consumo ou com abordagem teórica genérica. Estudos sobre resíduos incompatíveis com o processamento de metais, como metais raros, resíduos eletrônicos e subprodutos de mineração, também foram descartados.

O Quadro 1 apresenta as strings de busca utilizadas e o número de resultados encontrados em cada uma das bases.

**Quadro 1** – Resumo das buscas nas bases de dados

Strings	Quantidade de artigos WOS	Quantidade de artigos Scopus	Quantidade de artigos ScienceDirect	Total encontrado por String
String - ts = "circular economy" and ts = "metallurgical industry"	26	27	11	64
String - ts = "circular economy" and ts = "metal forming"	6	4	3	13
String - ts = "circular economy" and ts = "Material reuse" and ts = "metal"	5	11	7	23
String - ts = "circular economy" and ts = "waste processing" and ts = "metallurgy"	3	1	2	6
String - ts = "circular economy" and ts = "metal recycling"	40	49	34	123
String - ts = "circular economy" and ts = "metalworking"	5	7	5	17
String - ts = "circular economy" and ts = "metal processing"	3	6	4	13
Total encontrados por base de dados	88	105	66	259

Fonte: Autores (2024)

Conforme mostra o Quadro 1, foram encontrados 259 artigos durante a etapa da pesquisa, de acordo com as strings utilizadas, com 88 artigos na base WOS, 105 Scopus e 66 Sciencedirect. Após a seleção dos artigos nas bases os dados foram tratados por meio do software Excel, sendo removidos os duplicados e demais artigos analisados quanto ao conteúdo.

O Quadro 2 apresenta o resumo da seleção dos artigos, bem como os que restaram para a análise de conteúdo.

**Quadro 2** – Resumo das etapas de exclusão dos artigos

Fase de exclusão	Quantidades
Total encontrados nas bases de dados após aplicação dos filtros	259
Removidos por duplicidade	116
Removidos após Leitura de Abstract	124
Removidos por Falta de Acesso à Leitura	2
Removidos após Leitura Integral	1
Artigos mantidos na pesquisa	16

Fonte: Autores (2024)

Conforme o Quadro 2, dos 259 artigos encontrados, 116 eram duplicados, restando 143 para a etapa de leitura dos resumos. Destes, 124 foram removidos por não atenderem aos critérios de inclusão ou por se enquadrarem nos critérios de exclusão, resultando em 19 artigos para leitura integral.

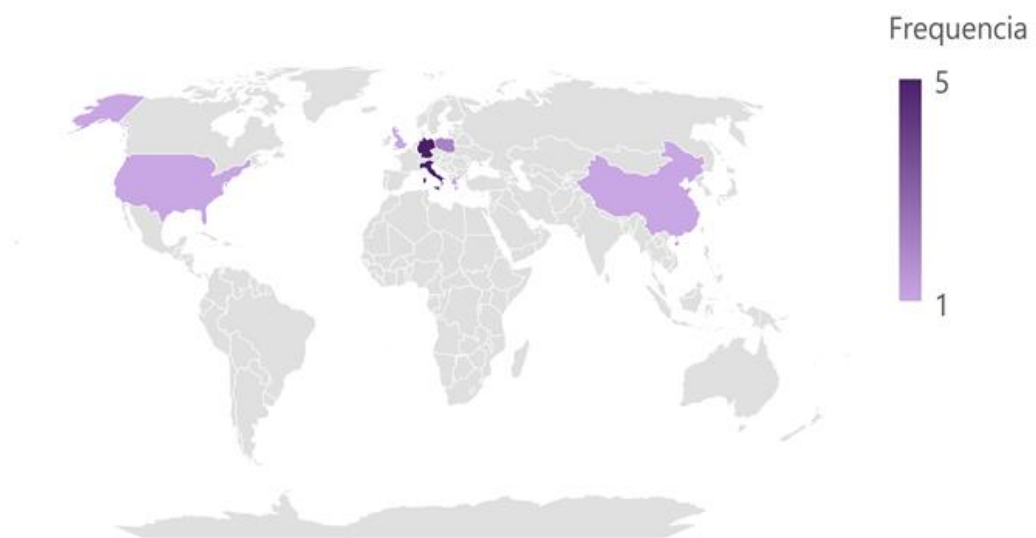
Na análise completa, dois artigos foram excluídos por falta de acesso ao texto e um por não estar alinhado ao escopo da pesquisa, totalizando 16 artigos selecionados. A análise bibliométrica foi conduzida com os softwares Vosviewer e Excel para identificar tendências, autores e periódicos relevantes, além da distribuição temporal e geográfica das publicações.

#### 4. Resultados e Discussão

A revisão bibliométrica realizada destacou aprendizados em como tornar uma indústria mais sustentável. Contudo também existem obstáculos acerca da viabilidade e contexto sociais em que cada fábrica ou indústria pode estar inserida.

A Figura 1 apresenta a distribuição geográfica dos artigos selecionados, destacando os países que mais contribuíram para a literatura sobre economia circular aplicada à indústria metalúrgica.

**Figura 1** – Publicações por países



**Fonte:** Autores (2025)

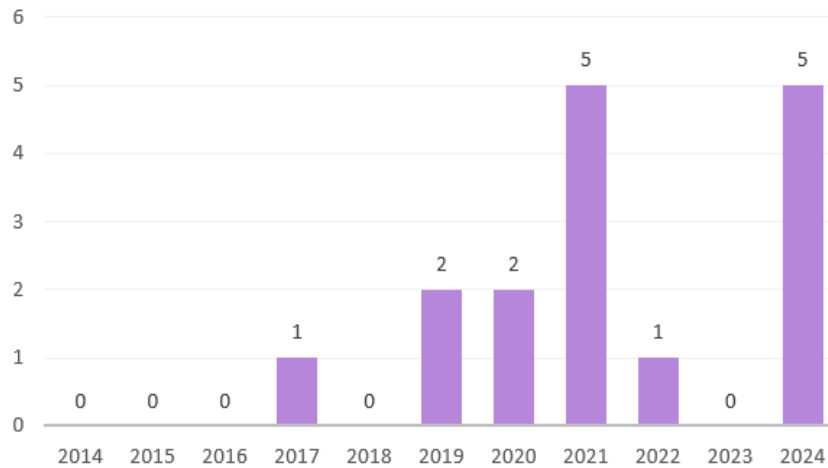
Conforme a Figura 1, Itália e Alemanha lideram as publicações, com cinco artigos cada, seguidas pela Polônia, com dois. Reino Unido, Estados Unidos e Grécia contribuíram com uma publicação cada. A predominância europeia é reflexo de políticas ambientais rigorosas e investimentos em tecnologias sustentáveis.

A ausência de países em desenvolvimento reforça a necessidade de maior colaboração internacional para disseminar práticas circulares. Realçando a importância de políticas e

pesquisas que incentivem a transição para modelos produtivos mais sustentáveis (Mendoza-Rangel; Díaz-Aguilera, 2023).

A Figura 2 apresenta as publicações selecionadas conforme o período pesquisado.

**Figura 2 – Publicações por ano**

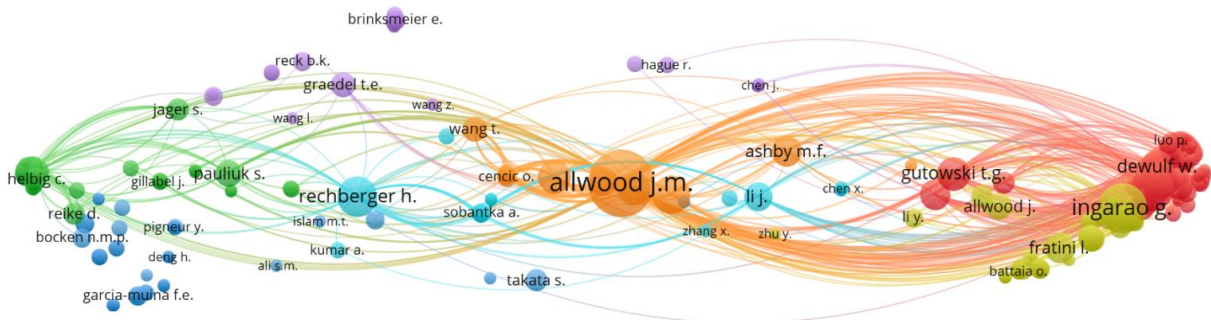


**Fonte:** Autores (2025)

A partir da Figura 2, pode-se notar um aumento na produção científica nos últimos anos, refletindo a crescente relevância do tema na agenda acadêmica e industrial. A análise temporal das publicações evidencia que os anos de 2021 e 2024 foram os mais produtivos, cada um com cinco publicações. Em seguida, 2019 e 2020 contribuíram com dois artigos, enquanto os anos de 2017 e 2022 tiveram apenas uma publicação cada.

A Figura 3 apresenta os autores mais citados nos artigos analisados.

**Figura 3 – Autores mais frequentes**



**Fontes:** Autores (2025)

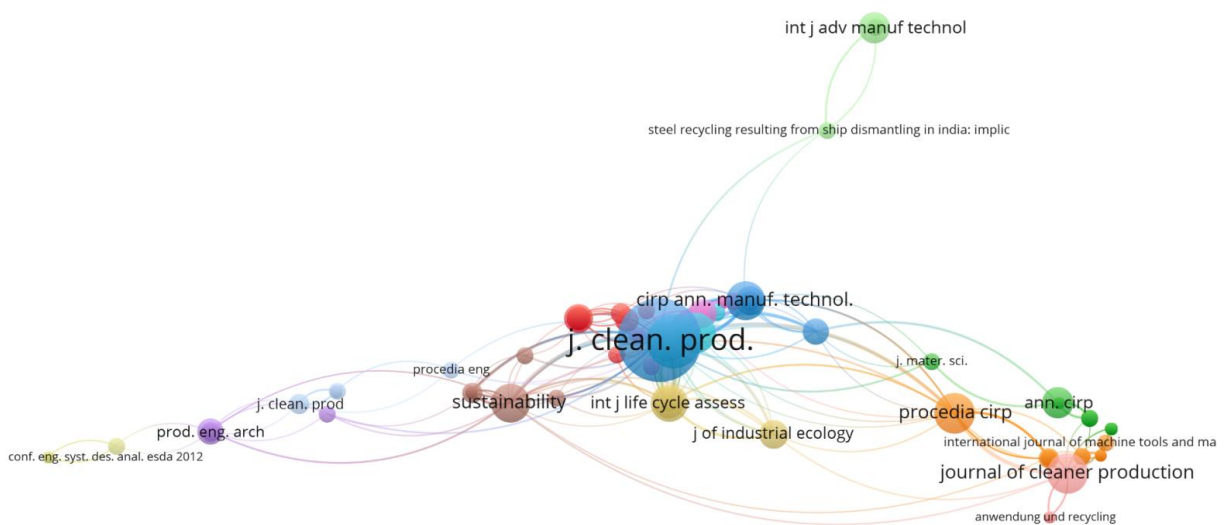
A Figura 3 apresenta a análise de coautoria, apresentando as conexões estabelecidas entre os principais pesquisadores dentro do tema analisado neste artigo, economia circular aplicada à indústria metalúrgica. O Autor Allwood J.M. teve destaque como o autor mais influente, com 33 citações e uma força de conexão total de 3338 formadas. Possui diversos estudos em sustentabilidade, eficiência de recursos e inovação industrial.

Autores como Ingaro et al. (2020, 2017) e Zaheer et al. (2021) aparecem com frequência. Associados a clusters técnicos que abordam práticas inovadoras, como formação incremental e remodelagem de materiais metálicos. Estas conexões reforçam a relevância dos autores no escopo desta revisão, integram tecnologias com práticas sustentáveis, a pesquisa aplicada pode contribuir à economia circular.

Formaram-se clusters de pesquisadores com interesses complementares. Hagedorn et al. (2024) e Kanwal et al. (2021) concentram-se em avaliação ambiental e gestão de resíduos, enquanto Jäger et al. (2021) conecta indicadores de sustentabilidade a estratégias industriais.

A Figura 4 apresenta o resultado das revistas que mais publicaram artigos relacionados ao tema.

**Figura 4 – Revistas mais frequentes**



**Fonte:** Os autores (2025)

A Figura 4 mostra os periódicos mais frequentemente citados em conjunto nos trabalhos analisados, destacando sua influência na pesquisa acadêmica. Quanto maior a conexão entre os periódicos, maior sua relevância na construção do conhecimento sobre economia circular.

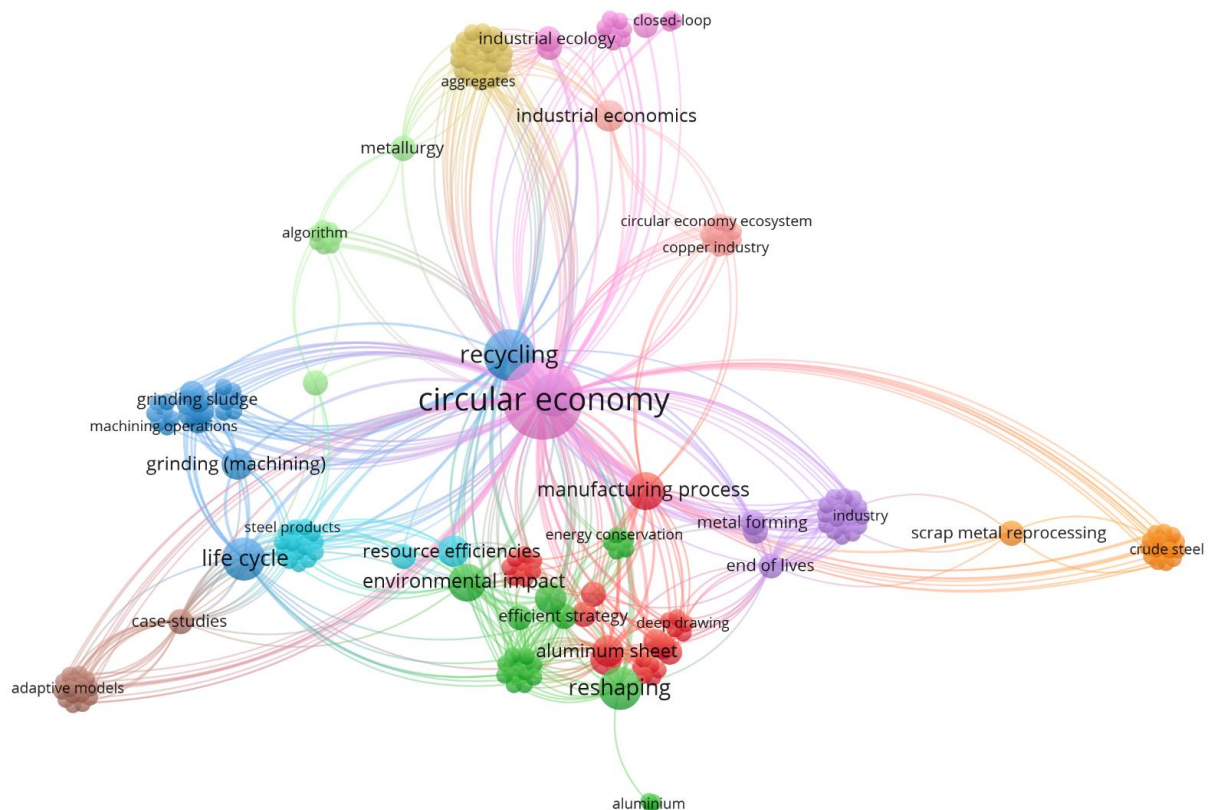
O Journal of Cleaner Production é a principal referência, com 53 citações, devido à sua abordagem interdisciplinar sobre produção mais limpa e sustentabilidade. Apresenta alta co-

citação com Resources, Conservation and Recycling, ambas focadas na disseminação de práticas circulares.

O Procedia CIRP também se destaca, com seis artigos nesta revisão, sendo relevante na literatura técnica sobre inovação em manufatura. Sua conexão com periódicos de sustentabilidade indica a crescente integração entre engenharia de produção e economia circular, abordando tecnologias como formação incremental, modelagem de materiais e reuso de resíduos industriais.

A Figura 5 é o resultado quanto à ocorrência de palavras chaves.

**Figura 5 – Ocorrência de Palavras Chave**



**Fontes:** Autores (2025)

De acordo com a Figura 5 o termo “economia circular” foi o mais recorrente, aparecendo 15 vezes, seguido de “recycling” que apareceu sete vezes e “reshaping”, “life cycle” e “recycling”, ambos mencionados cinco vezes. As demais palavras-chave aparecem entre 3 a duas vezes cada, totalizando 55 termos diferentes.

O mapa de palavras-chave destaca "circular economy" como conceito central na indústria metalúrgica, com 246 conexões, seguido por "recycling" e "resource efficiencies", evidenciando a relação entre reaproveitamento de materiais e otimização de recursos.



Termos como "reshaping" e "single point incremental forming" (65 conexões) indicam o foco em técnicas inovadoras de remodelagem para prolongar o ciclo de vida dos metais. Clusters menores, como "environmental impact" e "industrial economics", mostram a interação entre inovação tecnológica e gestão sustentável.

Tendências emergentes aparecem em "closed-loop" e "digital transformation", destacando a implementação de sistemas produtivos sustentáveis e tecnologias digitais. "Automotive recycling" reforça a aplicação da economia circular em setores estratégicos.

O Quadro 3 apresenta as conexões formadas em cada cluster dentre as palavra-chaves.

**Quadro 3** – Clusters de palavra-chaves identificados

Cluster	Principais Palavras	Quantidade de Conexões
Economia Circular	circular economy, circular economy ecosystem, circular steels	246
Reciclagem e Reaproveitamento	recycling, scrap metal reprocessing, aluminum recycling	132
Eficiência de Recursos	resource efficiencies, efficient strategy, energy efficiency	73
Impacto Ambiental	environmental impact, environmental management, life cycle	92
Avanços Técnicos	reshaping, single point incremental forming, adaptive models	65
Processos de Manufatura	manufacturing process, sheet metal, deep drawing	60
Integração Econômica	industrial economics, sustainable manufacturing, manufacturing innovation	57
Sistemas de Produção Sustentáveis	closed-loop, industrial ecology, industrial waste	42
Tecnologias Digitais	algorithm, integrated analysis, digital transformation	33
Políticas e Governança	policy design, governance, social impact	28
Setores Estratégicos	automotive recycling, construction waste, steel production	40

**Fonte:** Autores (2024)

O Quadro 3 apresenta os clusters identificados, suas principais palavras-chave e conexões. O cluster de economia circular lidera com 246 conexões, seguido por reciclagem e reaproveitamento (132), evidenciando a centralidade da sustentabilidade nas pesquisas. Outros grupos, como eficiência de recursos (73 conexões) e impacto ambiental (92), refletem preocupações com o uso consciente de materiais e seus efeitos ambientais.

Clusters técnicos incluem remodelagem e formação incremental ponto a ponto (65 conexões) e processos de manufatura (60), destacando inovações industriais. O cluster de economia industrial (57) aponta a relação entre viabilidade econômica e inovação. Já a transformação

digital (33) e políticas públicas e governança (28) ressaltam o papel crescente das tecnologias e da regulação na transição para modelos sustentáveis.

O cluster de setores estratégicos (40 conexões) mostra a aplicação da economia circular em áreas como reciclagem automotiva e gestão de resíduos da construção. Esses dados indicam a maturidade do campo, permitindo subdivisões para estudos mais específicos.

O Quadro 4 sintetiza os aspectos metodológicos, ambientais e tecnológicos dos artigos analisados.

**Quadro 04 – Informações Gerais dos Artigos**

Artigo	Ano	Tipo de Estudo	Região Geográfica	Indústria Focada	Tecnologia Principal	Relevância para Economia Circular
MANGERS et al., 2022	2022	Estudo de caso	Luxemburgo e Alemanha	Componentes metálicos	Modelo adaptativo baseado em cadeia de suprimentos	Promove maior resiliência e previsibilidade em cadeias circulares, reduzindo riscos associados a variações de resíduos
INGARAO et al., 2020	2020	Estudo experimental e análise comparativa	Itália	Componentes metálicos	Single Point Incremental Forming (SPIF)	Proporciona economia energética e reutilização de materiais metálicos
HAGEDORN et al., 2024	2024	Estudo metodológico e de caso	Alemanha	Produtos de aço	Análise de Fluxo de Materiais (MFA) e Avaliação do Ciclo de Vida (LCA)	Integra conceitos de economia circular para avaliar eficiência de recursos e sustentabilidade ambiental
INGARAO et al., 2017	2017	Estudo exploratório e modelagem	Itália	Chapas metálicas (alumínio)	Remodelagem de componentes metálicos planos	Proporciona uma alternativa sustentável à reciclagem tradicional, reduzindo perdas materiais e consumo energético
ADEYEMI et al., 2024	2024	Estudo qualitativo e quantitativo	Reino Unido	Metais e setor de transporte	Cadeias de suprimentos circulares e reciclagem de metais	Propõe estratégias para integrar economia circular e reduzir emissões no setor de metais e transportes
BURGGRÄF et al., 2024	2024	Estudo exploratório e revisão	Europa	Reciclagem de metais	Digitalização da cadeia de suprimentos e separação avançada de metais	Integra digitalização para otimizar eficiência de recursos e reduzir emissões de CO <sub>2</sub> na reciclagem de metais
ZAHEER et al., 2021 (a)	2021	Estudo experimental	Itália	Transformação de metais	Incremental Forming (SPIF)	Explora técnicas de remodelagem para reutilização de componentes metálicos no fim de vida



AIVALIOTIS, et al., 2021	2021	Estudo conceitual e exploratório	Grécia	Indústria metalúrgica de cobre	Sistema inteligente de gestão de resíduos (IoT e Digital Twin)	Promove eficiência no reaproveitamento de sucatas e otimização de processos para reduzir desperdícios
PICCININNI et al., 2024	2024	Estudo numérico	Itália	Transformação de metais e alumínio	Hidroconformação com fluidos magnetorreológicos (MRF)	Permite remodelagem de componentes metálicos no fim de vida, otimizando uso de recursos
KANWAL et al., 2021	2021	Estudo experimental e modelagem	China	Reciclagem de resíduos industriais	Análise de entropia estatística e modelagem matemática	Identifica e classifica resíduos industriais para priorizar estratégias de reciclagem
ZHU et al., 2019	2019	Estudo de análise de fluxo	Estados Unidos	Produção e consumo de aço	Análise de fluxo de materiais com otimização estatística	Identifica lacunas em reciclagem e otimização do uso de sucata no setor de aço nos EUA
ALWAEELI et al., 2019	2019	Estudo experimental	Polônia	Construção civil e reciclagem de resíduos metálicos	Substituição parcial de areia e agregados naturais por lodo metalúrgico e concreto reciclado	Reduz uso de recursos naturais e promove reciclagem de resíduos industriais
JÄGER et al., 2021	2021	Estudo experimental	Alemanha	Indústria metalúrgica e manufatura	Processos metalúrgicos de pó (HIP e SLPS)	Promove reutilização de resíduos metálicos com alto valor agregado
INGALDI et al., 2024	2024	Estudo de caso com triangulação de métodos	Polônia	Indústria metalúrgica com galvanoplastia	Modelo de Negócios Canvas adaptado ao contexto da economia circular	Proporciona um modelo para empresas metalúrgicas implementarem economia circular e otimizarem recursos
ZAHEER et al., 2021 (b)	2021	Estudo experimental	Itália	Transformação de metais e reaproveitamento de componentes	Single Point Incremental Forming (SPIF)	Analisa estratégias de remodelagem para reutilização de componentes metálicos no fim de vida
JÄGER et al., 2020	2020	Estudo experimental	Alemanha	Indústria metalúrgica e reciclagem de lodo metálico	Supersolidus Liquid Phase Sintering (SLPS)	Oferece solução para reutilização de resíduos metálicos, promovendo reciclagem sustentável

Fonte: Autores (2025)

O Quadro 4 apresenta as tecnologias mais abordadas e a relevância dos estudos para a economia circular. Remodelagem e reaproveitamento de componentes metálicos foram temas frequentes, com destaque para países europeus, como Alemanha e Itália, líderes na pesquisa.

A revisão mostrou que a maioria dos estudos foca nas etapas iniciais e finais do ciclo de vida do aço, deixando lacunas no processamento intermediário, onde ocorrem desperdícios significativos, como sobras de corte e peças defeituosas. A otimização desses processos reduziria a necessidade de matéria-prima virgem, beneficiando a indústria e o meio ambiente.



Estudos como Ingarao et al. (2017) e Zaheer et al. (2021) destacam o potencial do Single Point Incremental Forming (SPIF) para minimizar desperdícios, mas desafios de escalabilidade e padronização persistem. Burggräf et al. (2024) sugerem blockchain e inteligência artificial para rastrear e separar sucatas, embora altos custos e baixa integração entre stakeholders sejam barreiras.

Em países subdesenvolvidos, a adoção de práticas circulares é limitada por custos tecnológicos, falta de incentivos e baixa capacitação. Pequenas e médias indústrias, operando com equipamentos obsoletos, geram mais resíduos e enfrentam dificuldades financeiras para implementar melhorias. Alternativas como simbiose industrial e otimização de planos de corte são caminhos viáveis.

Adeyemi (2024) aponta a necessidade de infraestrutura para refinar sucatas, enquanto Jäger (2020) destacam a sinterização de lodo metálico como solução para rebarbas e fuligem. Zaheer (2021a) ressalta sistemas avançados de fixação para aprimorar o SPIF. A ausência de métricas quantitativas sobre emissões de CO<sub>2</sub> e economia energética ainda dificulta a avaliação ambiental dessas técnicas.

A integração entre práticas industriais e políticas públicas também é um desafio. Adeyemi et al. (2024) e Ingaldi e Ulewicz (2024) defendem incentivos governamentais para viabilizar a transição para modelos circulares. Estudos como Hagedorn et al. (2024) utilizam Análise de Fluxo de Materiais (MFA) e Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) para mensurar impactos ambientais.

Apesar de avanços como remodelagem com fluidos magnetorreológicos (Piccininni et al., 2024) e reciclagem de resíduos de galvanoplastia (Ingaldi e Ulewicz, 2024), desafios econômicos e técnicos limitam a implementação dessas estratégias. A colaboração entre setores e abordagens integradas são essenciais para consolidar a economia circular na indústria de transformação de metais, reduzindo resíduos e impactos ambientais ao longo do ciclo produtivo.

## **5. Considerações Finais**

O estudo identificou avanços tecnológicos relevantes, mas também evidenciou lacunas que dificultam a aplicação prática das estratégias analisadas. O objetivo de mapear tendências, desafios e oportunidades foi alcançado, fornecendo uma base para futuras pesquisas e aplicações industriais.

Os resultados indicam que a maioria dos estudos foca nas fases extremas do ciclo de vida do aço, extração, e descarte, enquanto o processamento intermediário, de alto impacto ambiental e potencial de otimização, permanece pouco explorado. Tecnologias como o Single Point



Incremental Forming (SPIF) e a sinterização na fase líquida (SLPS) apresentam potencial para reduzir desperdícios, mas a padronização, escalabilidade e purificação de resíduos ainda são desafios.

Observou-se a necessidade de integrar métricas quantitativas mais robustas, como emissões de CO<sub>2</sub> e economia de materiais, para uma avaliação ambiental mais precisa. Estudos como os de Zaheer et al. (2021) e Jäger et al. (2020) exploram tecnologias inovadoras, mas carecem de validação em escala industrial.

Políticas públicas e incentivos econômicos são essenciais para viabilizar a economia circular. Modelos como os propostos por Ingaldi e Ulewicz (2024) demonstram que a adoção dessas práticas exige colaboração entre governos, indústrias e instituições de pesquisa. Sem infraestrutura adequada e suporte regulatório, as estratégias enfrentarão dificuldades para ampla implementação.

Recomenda-se que pesquisas futuras avaliem a eficiência de práticas circulares em diferentes contextos industriais, priorizando integração tecnológica e análise de impacto ambiental e econômico. Estudos experimentais em larga escala são cruciais para validar estratégias, especialmente em setores de processos complexos, como automotivo e construção.

Por fim, a revisão reforça a importância de aprofundar o estudo sobre o processamento de metais, dada sua relevância nas cadeias produtivas e seu potencial para reduzir resíduos e dependência de matéria-prima virgem. A economia circular é um caminho promissor para tornar a indústria metalúrgica mais sustentável, exigindo esforços coordenados para superar as barreiras identificadas.

## REFERÊNCIAS

ADEYEMI, Olabisi I.; SARFRAZ, Shoaib; SALONITIS, Konstantinos. **Enabling Net-Zero GHG Emissions in the UK Metals and Transport Industries through a Circular Supply Chain Framework**. *Procedia CIRP*, v. 130, p. 1063–1069, 2024.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **Global Energy & CO<sub>2</sub> Status Report 2022**. Disponível em: <<https://www.iea.org>> Acesso em: 07 jan. 2025.

AIVALIOTIS, P.; ANAGIANNIS, I.; NIKOLAKIS, N.; ALEXOPOULOS, K.; MAKRIS, S. **Intelligent waste management system for metalwork-copper industry**. *Procedia CIRP*, v. 104, p. 1571–1576, 2021.

AL-ALIMI, Sami; YUSUF, Nur Kamilah; GHALEB, Atef M.; et al. **Recycling aluminium for sustainable development: A review of different processing technologies in green manufacturing**. *Results in Engineering*, 2024.

ALWAEI, Mohamed; GOLASZEWSKI, Jacek; PIZON, Jan et al. **Metallurgical Sludge as Sand Replacement and Constituent of Crushed Concrete Aggregate**. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 603, p. 032087, 2019.



BURGGRAF, Peter et al. **Enhancing Resource Efficiency And Monetization In Metal Recycling Through Supply Chain-Wide Digitalization: An Approach For Single-Variety Metal Stream Optimization And CO2 Reduction**. Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2024), 2024.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the Circular Economy Vol. 2: Opportunities for the Consumer Goods Sector**. Pre-print version. Ellen MacArthur Foundation, 2013. Disponível em:

<<https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy>> Acesso em: 07 jan. 2025.

FINLÂNDIA. Action Plan Circular Economy 2017. Disponível em: <https://examplelink.com>. Acesso em: 7 jan. 2025.

FLEURIAULT, Camille; GOKELMA, Mertol; ANDERSON, Alexandra; OLIVETTI, Elsa A. **REWAS 2022: Developing Tomorrow’s Technical Cycles**. Journal of Sustainable Metallurgy, v. 7, p. 406–411, 2021.

GAUTO, Marcelo Antunes; ROSA, Gilber Ricardo. **Processos e Operações Unitárias da Indústria Química**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2011. ISBN 978-85-399-0016-9.

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. **Earth Overshoot Day**. Disponível em: <<https://www.overshootday.org/>> Acesso em: 5 jan. 2025.

HAGEDORN, Wiebke et al. **An environmental assessment framework for circular steel products**. Sustainable Production and Consumption, v. 49, p. 193–207, 2024.

INGALDI, Manuela; ULEWICZ, Robert. **The Business Model of a Circular Economy in the Innovation and Improvement of Metal Processing**. Sustainability, v. 16, n. 5513, 2024.

INGARAO, Giuseppe et al. **An energy efficiency analysis of Single Point Incremental Forming as an approach for sheet metal based component reuse**. Procedia CIRP, v. 90, p. 540–545, 2020.

INGARAO, Giuseppe; DI LORENZO, Rosa; FRATINI, Livan. **An exploratory study for analyzing the energy savings obtainable by reshaping processes of sheet metal based components**. Procedia Engineering, v. 183, p. 309–315, 2017.

JÄGER, S.; WEBER, S. **Upcycling strategy of grinding swarf by supersolidus liquid phase sintering**. Procedia CIRP, v. 90, p. 546–551, 2020. (b)

JÄGER, Sebastian; WEBER, Sebastian; RÖTTGER, Arne. **Potential of the Recycling of Grinding Sludge by Various Powder Metallurgical Processes**. Procedia CIRP, v. 104, p. 893–899, 2021. (a)

KANWAL, Qudsia; LI, Jinhui; ZENG, Xianlai. **Mapping Recyclability of Industrial Waste for Anthropogenic Circularity: A Circular Economy Approach**. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. 9, p. 11927–11936, 2021.

MANGERS, Jeff et al. **Adaptive model to increase resilience for emerging supply chains within the circular economy – “Zirkelmesser” an innovative case study**. Procedia CIRP, v. 107, p. 788–793, 2022.

MARUYAMA, Úrsula; OLIVEIRA, Sidney Teylor de; MONTOYA, Carolina; MARTINEZ, Paloma; PRADO, Patricia. **Economia circular: lições aprendidas para a engenharia de produção**. João Pessoa: XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2016.

MENDOZA-RANGEL, J. M.; DÍAZ-AGUILERA, J. H. **Economía circular en la industria latinoamericana del cemento y el concreto: una solución sustentable de diseño, durabilidad, materiales y procesos**. Revista ALCONPAT, v. 13, n. 3, p. 328-348, 2023.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário Estatístico 2021: setor metalúrgico – ano base 2020**. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos/anuario-estatitico-2021-setor-metalurgico-ano-base-2020.pdf/view>>. Acesso em: 07 jan. 2025.



OLIVEIRA, F. R.; FRANÇA, S. L. B.; RANGEL, L. A. D. **Princípios de economia circular para o desenvolvimento de produtos em arranjos produtivos locais**. Interações, Campo Grande, MS, v. 20, n. 4, 2019.

OLIVEIRA, Fabíola Negreiros de; RAMOS, Débora Saraiva; OLIVEIRA, Samuel Gondim Lemos de; COLOMBO, Cíliana Regina. **A análise do posicionamento ambiental com vistas à implementação do sistema de gestão ambiental: um estudo de caso em uma metalúrgica**. São Carlos: XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2010.

PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; et al. **The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews**. International Journal of Surgery, v. 88, p. 1-9, 2021.

PICCININNI, Antonio; CUSANNO, Angela; INGARAO, Giuseppe; PALUMBO, Gianfranco; FRATINI, Livan. **Investigation of the reshaping process by hydroforming using magnetorheological fluids**. Materials Research Proceedings, v. 41, p. 2839–2849, 2024.

PROVENSI, T. et al. **Transição para a Economia Circular no Setor Metalúrgico: Proposição de um Framework de Implantação**. Revista Brasileira de Engenharia, v. 12, n. 3, 2023.

SILVA, Elieth Shirley dos Santos; GANGA, Gilberto Miller Devós; FILHO, Moacir Godinho. **Possibilidades de implantação da economia circular nos órgãos da administração pública: uma revisão sistemática da literatura**. Fortaleza: XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2023.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Paris Agreement. 2015**. Disponível em: <<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>> Acesso em: 5 jan. 2025.

UNITED NATIONS. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. New York: UN, 2015. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/goals>>. Acesso em: 5 jan. 2025. Seção relevante: introdução e objetivos globais.

ZAHEER, Omer; INGARAO, Giuseppe; DI LORENZO, Rosa; FRATINI, Livan. **Understanding formability and geometrical accuracy of SPIF process used as reshaping approach**. ESAFORM 2021 Proceedings, v. 15, p. 4315, 2021.

ZAHEER, Omer; INGARAO, Giuseppe; PIRROTTA, Antonina; FRATINI, Livan. **Geometrical deviation of end-of-life parts as a consequence of reshaping by single point incremental forming**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 115, p. 1579–1588, 2021.

ZHU, Yongxian; SYNDERGAARD, Kyle; COOPER, Daniel R. **Mapping the Annual Flow of Steel in the United States**. Environmental Science & Technology, v. 53, p. 11260–11268, 2019.