

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
RIO GRANDE DO SUL – CAMPUS ERECHIM
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

Thaise Barbosa Nonemacher

**Barreiras para Implementação de Modelos de Negócios para
Economia Circular na Indústria Metalmeccânica**

Erechim

2023

Thaise Barbosa Nonemacher

**Barreiras para Implementação de Modelos de Negócios para
Economia Circular na Indústria Metalmeccânica**

Trabalho de Conclusão de Curso realizado no campus Erechim do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Júlio Americo Faitão

Erechim

2023

AGRADECIMENTOS

Ao concluir essa etapa importante da minha jornada acadêmica, reconheço que não teria alcançado esse marco sem o suporte dedicado e às contribuições de diversas pessoas ao longo do caminho.

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Agradeço ao meu marido Rodrigo, que nunca me recusou amor, apoio e incentivo. Obrigada, por compartilhar os inúmeros momentos de ansiedade e estresse, pela dedicação, companheirismo e paciência. Sem você ao meu lado o trabalho não seria concluído.

Grata a minha mãe Luciana e aos meus irmãos, João Victor e Gabriela, pelo apoio, carinho e paciência durante toda esta trajetória. Grata também a minha querida avó Ivone (*in memoriam*) pelo seu amor e incentivo incondicionais. Sinto em não a ter presente nesse momento. Sou muitíssimo grata por tudo que fizeste por mim.

Não posso deixar de mencionar meus colegas de curso e amigos, cujo apoio incondicional e incentivo constante foram fundamentais para minha jornada acadêmica. Agradeço por estarem ao meu lado, compartilhando alegrias e desafios, e me motivando a dar o meu melhor.

Ao meu orientador Julio Faitão, agradeço por topar me orientar neste trabalho, pela disponibilidade e confiança. Sua orientação perspicaz, paciência e incentivo constante foram fundamentais para o desenvolvimento do meu trabalho.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão ao IFRS – Campus Erechim, por fornecer os recursos e a estrutura necessários para a realização deste trabalho.

“A causa de quase todos nossos fracassos,
de quase todos nossos males, é uma só: a
fraqueza da vontade”

(Jules Payot)

RESUMO

A Economia Circular (EC) é posicionada como um novo paradigma de desenvolvimento que busca fechar os ciclos dos produtos e materiais, estendendo a vida útil dos compostos manufaturados. Ela é ativada através do princípio dos 4Rs: reduzir, reutilizar, reciclar e recuperar. Desta forma, indústrias dos mais variados setores tem buscado fazer uma transição de seus modelos de negócios em direção a Modelos de Negócios Circulares (MNCs). Logo, a indústria metalmeccânica, que é muito dependente de matérias primas virgens e não renováveis, tem enfrentado diversos desafios nesta transição. Servindo como um amparo a estes desafios, esta pesquisa identificou as barreiras mais relevantes para a adoção da EC por parte das indústrias metalmeccânicas. Foram identificadas nove relevantes barreiras para a adoção da EC que foram posteriormente analisadas utilizando a metodologia DEMATEL. Esta análise permitiu uma abordagem sistêmica das inter-relações entre cada uma das barreiras. Além disso, os resultados apresentaram “custos elevados para implementar novas tecnologias”, “baixa adoção de tecnologias digitais”, “falta de incentivo e investimento público” e “aversão ao risco por parte da alta administração” como sendo, respectivamente, as quatro barreiras mais relevantes no processo de transição para a EC. Isto fornece importantes implicações sobre prioridades que devem ser dadas pelos tomadores de decisão dentro das indústrias metalmeccânicas bem como pelos formuladores de políticas públicas e legislações.

Palavras-chave: economia circular; indústria metalmeccânica; barreiras; Dematel

ABSTRACT

Circular Economy (CE) is positioned as a new development paradigm that seeks to close the loops of products and materials, extending the lifespan of manufactured compounds. It is activated through the principle of the 4Rs: reduce, reuse, recycle, and recover. Thus, industries in various sectors have been transitioning their business models towards Circular Business Models (CBMs). However, the metal-mechanical industry, which heavily relies on non-renewable virgin raw materials, faces several challenges in this transition. To address these challenges, this research identifies the most relevant barriers to the adoption of CE by metal-mechanical industries. Nine significant barriers to CE adoption were identified and subsequently analyzed using the DEMATEL methodology. This analysis allowed for a systemic approach to understanding the interrelationships between each of the barriers. The results revealed "high costs to implement new technologies," "low adoption of digital technologies," "lack of incentives and public investment," and "risk aversion by top management" as the four most relevant barriers in the transition process to CE. This provides important implications for decision-makers within the metal-mechanical industries, as well as policymakers and legislators, in terms of prioritization.

Keywords: circular economy; metal-mechanical industry; barriers; DEMATEL.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tripé da Sustentabilidade.....	15
Figura 2 – Design de MNCs.	16
Figura 3 - Matriz não preenchida das relações de causa e efeito entre as barreiras.	27
Figura 4 - Mapa de Influência das barreiras para implementação da EC.....	34

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – <i>Design</i> da pesquisa	25
Quadro 2 - As nove barreiras para a implantação da EC.....	25
Quadro 3 - Perfil dos profissionais envolvidos na pesquisa.....	30
Quadro 4 - Ranking das barreiras que mais impactam a implementação da EC.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grau de influência das barreiras influenciadoras e influenciadas	26
Tabela 2 - Matriz média inicial.....	31
Tabela 3 - Matriz de relação direta inicial normalizada X.	32
Tabela 4 - Matriz de relação total T.....	33
Tabela 5 - Proeminência e efeito líquido.	33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo Geral	13
2.2	Objetivos Específicos	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	Economia Circular como um caminho para a sustentabilidade	14
3.2	Transição para a economia circular na indústria metalmeccânica brasileira	17
3.3	Barreiras para a adoção da economia circular na indústria metalmeccânica ...	19
3.3.1	<i>Baixa adoção de tecnologias digitais.....</i>	<i>19</i>
3.3.2	<i>Produção não seriada.....</i>	<i>20</i>
3.3.3	<i>Baixa demanda dos consumidores.....</i>	<i>20</i>
3.3.4	<i>Custos elevados para implementar novas tecnologias.....</i>	<i>20</i>
3.3.5	<i>Cadeias de suprimentos lineares.....</i>	<i>21</i>
3.3.6	<i>Aversão ao risco por parte da alta administração.....</i>	<i>21</i>
3.3.7	<i>Baixa qualificação técnica de colaboradores.....</i>	<i>22</i>
3.3.8	<i>Qualidade variável dos metais reciclados.....</i>	<i>22</i>
3.3.9	<i>Falta de incentivo e investimento público</i>	<i>22</i>
4	METODOLOGIA.....	24
4.1	Identificação das principais barreiras da EC	24
4.2	Definição do Método de Coleta e Análise de Dados	25
4.3	Aplicação do DEMATEL	26
4.4	Perfil dos profissionais envolvidos na coleta de dados	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
5.1	Resultados	31
5.2	Discussões	34
6	CONCLUSÕES	37
7	PROPOSIÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	39
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1 INTRODUÇÃO

Economia Circular (EC) é uma paradigma fundamental para o desenvolvimento sustentável que é ativado através dos princípios de reduzir, reutilizar, reciclar e recuperar, mantendo o valor incorporado aos produtos e materiais (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017). A EC é perseguida através da implementação por parte das empresas de inovadores Modelos de Negócios Circulares (MNCs) que são projetados para criar, transferir e capturar o valor dos produtos e materiais dentro de um sistema fechado que mimetiza a natureza (CENTOBELLI et al., 2020; NUSSHOLZ, 2018; PIERONI; MCALOONE; PIGOSSO, 2019; RANTA; AARIKKA-STENROOS; VÄISÄNEN, 2021; URBINATI; CHIARONI; CHIESA, 2017). Tudo isso precisa ser internalizado nas empresas, baseado na intenção e ação dos gestores que conduzem as práticas produtivas para a minimização de desperdícios, retenção do valor incorporado em produtos e materiais, fomento do uso de energias renováveis e eliminação de produtos químicos tóxicos (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2012).

O foco da EC é aumentar a circularidade de materiais de um sistema, dando tração à prosperidade econômica e mantendo a qualidade ambiental (KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018; KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017). Nessa lógica, a adoção de MNCs pode ser considerada o 'Como' (i.e. o caminho), enquanto o alcance do desenvolvimento sustentável sob a abordagem do tripé da sustentabilidade em suas dimensões ambiental, social e econômica pode ser considerado o 'Porquê' (i.e. o objetivo) a ser perseguido (CORONA et al., 2019; GEISSDOERFER et al., 2017; NOBRE; TAVARES, 2021; SCHROEDER; ANGGRAENI; WEBER, 2019).

A transição para uma economia mais circular está em andamento e apresenta vários desafios, incertezas, barreiras e obstáculos que precisam ser superados com o apoio de facilitadores da EC. Esses facilitadores podem ser definidos como o conjunto das condições e fatores que incentivam a implementação de práticas circulares, sendo postos como a força motriz para realizar a transição em direção à EC (BRESSANELLI et al., 2021; DE JESUS; MENDONÇA, 2018). Eles formam um sistema complexo que

atua em todo o ecossistema de negócios como um fator crítico de sucesso para impulsionar as empresas ao alcance da EC (RIZOS et al., 2016; SINHA, 2022).

Em meio a esse contexto, empresas de base tradicional como é o caso da indústria metalmecânica estão tentando adaptar seus modelos de negócio, incorporando conceitos de circularidade (URBINATI; FRANZÒ; CHIARONI, 2021). Trata-se de um processo de transição demorado e complexo, uma vez que as empresas estão bastante acostumadas ao modelo linear de produção, baseado em 'fazer', 'comercializar' e 'descartar' (GEISSDOERFER et al., 2017). Logo, estas empresas precisam redesenhar seus processos, produtos, canais de distribuição e cadeia de suprimentos para que tudo seja mais circular. De tal maneira, é fundamental que facilitadores da EC sejam ativados, para que haja sucesso na transição ecológica.

A importância dessa transição é indiscutível, dado o consumo intensivista de matérias primas virgens não renováveis, bem como de energia, que é demandado pela indústria de transformação metalmecânica. Sendo, portanto, um setor causador de bastante impactos sob o ambiente e que é alimentado por uma matéria prima não renovável, o minério de ferro. Além disso, em termos regionais, o complexo metalmecânico é um dos setores industriais mais representativos na economia do Rio Grande do Sul, com participação de 37,6% do Produto Interno Bruto (PIB) industrial (SINMETAL, 2023).

Considerando o supracitado, este trabalho se dedica a responder as seguintes Questões de Pesquisa (QPs):

QP1: *'Quais são as principais barreiras para implementação de modelos de negócios para a economia circular na indústria metalmecânica?'*

QP2: *Como estas barreiras se interrelacionam em indústrias metalmecânicas situadas na região Norte do Rio Grande do Sul?*

Para tal, inicialmente são formulados os objetivos da pesquisa e na sequência é desenvolvida a revisão bibliográfica que pretende responder a QP1. Posteriormente é apresentada a metodologia de pesquisa, baseada no método DEMATEL. Mediante os resultados provenientes da aplicação da metodologia junto a profissionais vinculados com a indústrias metalmecânicas da região, se pretende responder a QP2. A pesquisa se encerra com as discussões que levam a implicações gerenciais e governamentais que pautam as conclusões finais.

2 OBJETIVOS

A seguir são apresentados o objetivo geral deste trabalho e os objetivos específicos, respectivamente.

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é identificar as barreiras para implementação de MNCs na indústria metalmeccânica e entender as suas inter-relações com base num estudo na região Norte do Rio Grande do Sul.

2.2 Objetivos Específicos

Para atendimento ao objetivo geral, será necessário o cumprimento dos seguintes objetivos específicos:

- a) Mapear as principais barreiras à implementação da economia circular;
- b) Coletar dados junto a profissionais (preferencialmente engenheiros mecânicos) que trabalham em indústrias metalmeccânicas que operam na região Norte do Rio Grande do Sul;
- c) Analisar as inter-relações entre as barreiras na implementação de modelos de negócios para a economia circular na indústria metalmeccânica da região Norte do Rio Grande do Sul.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo busca caracterizar através da literatura científica existente o estado-da-arte da EC como um caminho para atingir a sustentabilidade bem como apresentar os desafios e realidade enfrentada pelas indústrias metalmeccânicas nesta transição para a circularidade. Com isso, identificar as principais barreiras existentes neste processo. Para tal, utiliza-se uma abordagem de revisão narrativa para procurar, organizar e analisar as fontes de dados selecionadas (HAMMERSLEY, 2001).

3.1 Economia Circular como um caminho para a sustentabilidade

EC é uma área de pesquisa que busca substituir a noção de fim de vida de um produto pela adoção de ciclos de vida de produtos fechados e de restauração. Ela tem como objetivo eliminar o desperdício, manter o valor embutido nos produtos e materiais, promover o uso de energias renováveis e eliminar produtos químicos tóxicos (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2012; KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017; SASSANELLI et al., 2019). A EC é ativada em três principais níveis (MERLI; PREZIOSI; ACAMPORA, 2018; YUAN; BI; MORIGUICHI, 2006):

- i) micro: focado em empresas, consumidores e produtos;
- ii) meso: focado em eco parques industriais e cadeias de fornecimento; e
- iii) macro: focado em cidades, regiões, nações e além.

Já sustentabilidade é um conceito mais amplo e abstrato que é usado de forma diferente em cada área de estudo, mas cujas definições formam um sistema interconectado, criando uma rede entre a proteção ambiental, desempenho econômico e bem-estar social, guiado por uma vontade política e imperativos éticos e ecológicos (GLAVIČ; LUKMAN, 2007). Dentro do campo empresarial, o conceito faz uso do princípio do tripé da sustentabilidade, conforme Figura 1, com seus três pilares: pessoas (ou seja, social), lucro (ou seja, econômico) e planeta (ou seja, ambiental), gerando uma integração equilibrada entre o desempenho econômico, a inclusão social e a resiliência ambiental, para o benefício das gerações atuais e futuras (BRUNDTLAND, 1987; ELKINGTON, 1998; GEISSDOERFER et al., 2017).

Figura 1 – Tripé da Sustentabilidade.



Fonte: adaptado de Lima (2019)

Em termos de objetivo principal, o foco da EC é aumentar a circularidade material de um sistema, impulsionando a prosperidade econômica e mantendo a qualidade ambiental (KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018; KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017). Em vez disso, o foco multidimensional da sustentabilidade permite uma visão mais abrangente que aborda desafios econômicos, de qualidade, ambientais, sociais, de saúde e segurança (NAWAZ; KOÇ, 2018). Portanto, apesar da EC estar em estágios iniciais de desenvolvimento, ela deve ser considerada como uma abordagem sustentável por *design*, e está se posicionando como uma importante via em direção à sustentabilidade (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016).

A implementação da EC, com seus habilitadores, ferramentas, práticas e técnicas pode ser considerada o "Como", enquanto a busca da sustentabilidade pode ser considerada o "Porquê" (NOBRE; TAVARES, 2021), sendo este um caminho importante a ser perseguido pela sociedade. Por essa razão, espera-se que a EC seja o caminho ideal ou uma condição básica para avançar em direção ao desenvolvimento sustentável, melhorando o desempenho ambiental, social e econômico dos níveis micro a macro (CORONA et al., 2019; GEISSDOERFER et al., 2017; SCHROEDER; ANGGRAENI; WEBER, 2019). Dessa forma, no campo empresarial, o debate sobre a

implementação da EC de forma a contribuir para a sustentabilidade é uma tendência irreversível (PIERONI; MCALOONE; PIGOSSO, 2019).

A EC é ativada dentro das companhias e de seus produtos por meio do *design* de MNCs, apresentados na Figura 2, que tem sido amplamente estudados por diversos pesquisadores, com destaques para (BOCKEN; KONIETZKO, 2022; CENTOBELLI et al., 2020; URBINATI; CHIARONI; CHIESA, 2017). Estes MNCs são a forma pela qual a empresa estrutura suas atividades e orienta seus produtos/serviços em direção à circularidade. Ou seja, é como o negócio aumenta a vida útil dos produtos, fecha os ciclos, diminui a entrada de matérias primas, minimiza o consumo de energia e reduz a emissão de resíduos para fora da organização (GEISSDOERFER et al., 2018). Isto ocorre pela adoção de estratégias combinadas para as três dimensões de valor: Criação de Valor, Transferência de Valor e Captura de Valor (CENTOBELLI et al., 2020; FRANZÒ et al., 2021).

Figura 2 – *Design* de MNCs.



Fonte: adaptado de Centobelli et al. (2020)

A Criação de Valor ocorre pela geração ou adaptação de um produto/serviço que, de acordo com os princípios da EC, seja capaz de preservar o valor econômico e ambiental ao longo do tempo. Precisa ter um uso eficiente de recursos e a possibilidade de fechamento dos ciclos (NUSSHOLZ, 2018). Exemplos de Criação de Valor podem ser as práticas de *Design* para circularidade (por exemplo, ecodesign), capacidade de *upgrade* de produtos e a eficiência no consumo de recursos (CENTOBELLI et al., 2020). Já a Transferência de Valor ocorre pelas práticas

gerenciais relacionadas com a segmentação do cliente e ao relacionamento com o consumidor, que são tradicionalmente incluídas na proposta de valor. Práticas relacionadas com divulgação, marketing e políticas de venda fazem parte desta dimensão (CENTOBELLI et al., 2020) que busca fomentar a intenção de compra de produtos mais circulares. Por fim, a Captura de Valor ocorre pela monetização de fontes de receita adicionais e intangíveis, reduzindo custos e alterando a estrutura das empresas para se aumentar a preservação de valor dos produtos e processos (RANTA; AARIKKA-STENROOS; MÄKINEN, 2018; URBINATI; CHIARONI; CHIESA, 2017). Do ponto de vista da EC, a Captura de Valor também deve permitir que as empresas preservem os recursos naturais e o bem-estar da sociedade (GEISSDOERFER et al., 2017). Geralmente este conceito está ligado a sistemas de *Take-Back*, servitização, consignação e logística reversa, ou seja, a práticas que estendam o ciclo de vida dos produtos, permitindo a colheita de receitas adicionais.

Portanto, analisando a perspectiva das empresas, é importante que sejam tomadas iniciativas para cada uma das dimensões de valor de um MNC. Ou seja, é importante que uma empresa use práticas gerenciais para criar, transferir e capturar o valor dos produtos com *design* circular. Especialmente na indústria metalmeccânica brasileira, esta transição para MNCs enfrenta diversas barreiras que serão apresentadas nas próximas seções.

3.2 Transição para a economia circular na indústria metalmeccânica brasileira

Conforme estudos, 76% das indústrias brasileiras têm práticas gerenciais alinhadas a EC, mas 70% não conhecem o conceito e seus benefícios (CNI, 2019). Ou seja, há evidências de que o Brasil já avança rumo a uma economia circular, no entanto que este avanço não ocorre por meio do conhecimento sobre o que é e o que trata a EC. Conforme o estudo, o principal motivador das empresas para adotar práticas de EC é ganhar eficiência operacional. Portanto, as empresas já utilizam algumas boas práticas de EC mas, no entanto, não fazem divulgação comercial e/ou marketing destas boas práticas como um diferencial de seus produtos (até porque nem sabem estar participando da EC). Da mesma forma, por não conhecer o conceito, podem estar deixando de adotar tecnologias e avançar na transição para MNCs amplamente discutidos, debatidos e analisados pela literatura científica bem como já

implementados por indústrias em países desenvolvidos (DE JESUS; MENDONÇA, 2018; SINHA, 2022).

Para a indústria metalmeccânica brasileira, a EC pode ser uma abordagem muito útil para enfrentar os desafios atuais de sustentabilidade e competitividade (CNI, 2018). Uma das principais vantagens da EC para a indústria metalmeccânica é a possibilidade de reduzir os custos de matéria-prima e energia, além de minimizar a geração de resíduos baseadas em práticas mais eficientes e redução nas emissões de gases de efeito estufa (BATISTA et al., 2019). O uso de materiais mais sustentáveis com maior facilidade de reuso e menos toxicidade é outra alternativa. Isso se fomenta no fato que a EC incentiva a reutilização, recuperação e reciclagem de materiais, promovendo a criação de novas oportunidades de negócios e a geração de empregos (BARCELOS et al., 2021).

Além disso, o desenvolvimento de novos MNCs baseados em serviços, como a locação de equipamentos e a venda de peças usadas (GREER; VON WIRTH; LOORBACH, 2020; KJAER et al., 2019) apresenta-se como uma tendência nos países desenvolvidos, podendo ser replicado no Brasil. Isto pode levar a um incremento na colaboração com outras empresas e setores da economia, criando cadeias de valor mais fechadas e integradas. Através da cooperação, as empresas podem compartilhar recursos e conhecimentos, aumentando a eficiência e reduzindo os custos.

Embora ainda distante de ser amplamente difundido, o conceito de EC já é adotado por algumas indústrias metalmeccânicas de grande porte com operações no Brasil. Através de uma busca da palavra “economia circular” nos websites de algumas delas, é possível resgatar informações sobre este processo. É o caso da ArcelorMittal, da WEG e da Gerdau cujas informações principais são apresentadas na sequência.

- As operações da ArcelorMittal no Brasil têm investido em soluções de economia circular para reduzir seus resíduos e minimizar seu impacto ambiental. Um exemplo disso é o seu programa de reciclagem de sucata, que transforma resíduos de aço em novos produtos. Além disso, a empresa tem desenvolvido tecnologias mais sustentáveis em seus processos produtivos, como o uso de energias renováveis e a redução do consumo de água e energia.
- A WEG é uma empresa brasileira que atua na produção de motores elétricos, geradores e transformadores. A empresa tem adotado diversas práticas de economia circular em suas operações, como a reciclagem de resíduos gerados

em seus processos produtivos, a utilização de materiais reciclados em seus produtos e a busca por processos mais eficientes e sustentáveis. Além disso, ela tem um importante programa chamado “plano de troca WEG” que incentiva a substituição de motores usados antigos, danificados ou com baixos níveis de rendimento, de qualquer marca, que garante desconto na compra de um motor WEG novo, de alta eficiência. Estes usados que são recebidos passam por reuso, remanufatura ou reciclagem.

- A Gerdau é uma empresa brasileira, fundada em Porto Alegre, líder na produção de aços longos nas Américas e uma das principais fornecedoras de aços especiais no mundo. A empresa tem investido em soluções de economia circular para reduzir seu impacto ambiental e aumentar sua eficiência operacional. Um exemplo disso é o seu programa de reciclagem de sucata, que recupera e transforma resíduos de aço em novos produtos. Além disso, a empresa tem desenvolvido produtos com maior durabilidade e que possam ser reutilizados ou reciclados no final de sua vida útil.

3.3 Barreiras para a adoção da economia circular na indústria metalmecânica

Considerando este cenário de transição para a EC, com foco nas questões fundamentais enfrentadas por indústrias metalmecânicas, é importante se identificar as principais barreiras deste processo. Derivadas da literatura elas são apresentadas na sequência, respondendo a QP1.

3.3.1 Baixa adoção de tecnologias digitais

A ativação da EC é diretamente conectada com a adoção de tecnologias digitais que auxiliam a inovar os processos de uma empresa. Portanto, conceitos como Indústria 4.0 e *Blockchain* são frequentemente empregados na tentativa de criar MNCs (ROSA et al., 2020). Isto facilita a rastreabilidade dos processos e eficiência produtiva. Portanto, a baixa adoção de tecnologias digitais é uma importante barreira a ser vencida. Especialmente no Brasil, a temática da Indústria 4.0 é completamente desconhecida por 32% das empresas paulistas (FIESP, 2018). Considerando que o Sudeste é a região mais tecnologicamente desenvolvida do país os dados para as

demais regiões devem ser ainda piores. Isto indica que há uma enorme barreira a ser superada no que se refere a adoção de tecnologias digitais para permitir a adoção da EC pelas indústrias.

3.3.2 Produção não seriada

O fato de muitas indústrias metalmeccânicas trabalharem sob demanda, com customização dos produtos e serviços dificulta o processo de adoção da EC. Uma vez que a produção é do tipo não seriada (*tailor made*), soluções em escala ficam mais complexas pois não há padronização em medidas, dimensões e montagens (JAEGER; UPADHYAY, 2020). Logo os projetos para reuso e remanufatura ficam comprometidos. Para este tipo de empresas o incremento da vida útil dos produtos pode ser um importante aliado para superar esta barreira. Isso ocorre por meio de adoção de um projeto que facilite a desmontagem, a manutenção e a *upgradability* dos produtos.

3.3.3 Baixa demanda dos consumidores

Um desafio enfrentado por países emergentes é a aceitabilidade de produtos de segunda mão, remanufaturados ou ainda reciclados. Ocorre um preconceito quanto a estes produtos, sendo muitas vezes associados a produtos de menor qualidade, durabilidade e desempenho (HAZEN; MOLLENKOPF; WANG, 2017; HUNKA; LINDER; HABIBI, 2021). Portanto, esta é uma barreira para a transição para EC, uma vez que atua negativamente no lado da demanda. Logo, com menos consumidores demandando produtos circulares, menos empresas adaptam seus modelos de negócio para MNCs.

3.3.4 Custos elevados para implementar novas tecnologias

Países emergentes possuem um elevado custo do dinheiro, ou seja, as taxas de juros são elevadas. Por exemplo, no mês de junho de 2023 a taxa básica do Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (SELIC) do Brasil está em 13,75% enquanto num país desenvolvido como os Estados Unidos da América está em 5,25%

(INVESTNEWS, 2023). Considerando que a implementação de novas tecnologias é cara e requer na maioria das vezes a importação de novos equipamentos, o Brasil enfrenta dificuldades para a adoção destas novas tecnologias. Devido ao elevado custo, as empresas usualmente contraem financiamentos que em função das elevadas taxas acabam onerando ainda mais os custos finais e dificultando a implantação massiva de tecnologias. No entanto, a adoção da EC é bastante dependente de novas tecnologias (AKBARI; HOPKINS, 2022; CHIARONI et al., 2021) sendo comprometida quando não envolve tecnologia. Desta forma, estes custos elevados representam uma barreira para a transição para a EC.

3.3.5 Cadeias de suprimentos lineares

As principais cadeias de suprimento em ordem nacional e global ainda são lineares (AFSHAR; FAZLI, 2022). Ou seja, costuma haver extratores de matéria prima virgem que as beneficiam e as comercializam, não assumindo responsabilidades pelo reuso, reaproveitamento e reciclagem destes insumos (NASIR et al., 2017). Não há complexos sistemas de logística reversa que permitam facilmente se fechar ciclos (AGRAWAL; SINGH, 2019). Da mesma forma, as indústrias manufactureiras vendem seus produtos sem comprometimento com o fim de vida dos mesmos. Portanto, o fato de as cadeias de suprimento serem lineares acaba se tornando uma barreira para a implementação da EC.

3.3.6 Aversão ao risco por parte da alta administração

Tomadores de decisão que compõem a alta administração das empresas costumam ser naturalmente aversos ao risco. Ou seja, eles não costumam tomar decisões com potenciais disruptivos quando isso envolve elevados custos e dificuldades, como é o caso das decisões relacionadas a adoção de MNCs (TAN; TAN; RAMAKRISHNA, 2022). Portanto, esta aversão ao risco se transforma numa barreira para a transição em direção a EC. Logo, é importante minimizar estes riscos, assegurando que cada vez mais empresas decidam fazer parte da EC.

3.3.7 Baixa qualificação técnica de colaboradores

Uma vez que a EC é fortemente suportada por tecnologias digitais, é importante que os colaboradores das empresas estejam qualificados para permitir a adoção de MNCs. Sabe-se que os trabalhadores brasileiros possuem baixa qualificação técnica, havendo por exemplo uma demanda de que 10,5 milhões de trabalhadores sejam qualificados para lidarem com tecnologia até o final do ano de 2023 (EBC, 2019). É necessário que estes trabalhadores tenham noção de práticas sustentáveis e ao mesmo tempo dominem certos processos digitais (VELEVA; BODKIN; TODOROVA, 2017). Logo, esta baixa qualificação se torna uma importante barreira para a adoção da EC.

3.3.8 Qualidade variável dos metais reciclados

Na indústria metalmeccânica, um importante fator para a circularidade é a utilização de metais reciclados na composição de novos produtos. No entanto, a reciclagem de metais apresenta diversos desafios, principalmente pela qualidade variável que é apresentada nos metais reciclados. A presença de materiais misturados dificulta a reciclagem. Por exemplo, os aços reciclados possuem um teor de cobre normalmente superior ao permitido em normatizações de aços estruturais (DAEHN; CABRERA SERRENHO; ALLWOOD, 2017). Portanto, adquirir um desempenho comparável entre os metais reciclados e aqueles virgens é um importante desafio da EC (RISSMAN et al., 2020). Logo, esta qualidade variável dos metais reciclados é uma barreira para a implantação da EC.

3.3.9 Falta de incentivo e investimento público

Considerando os elevados riscos e custos para a transição em direção a uma EC é importante que ocorra um incentivo estatal para induzir as indústrias a adotar tecnologias que permitam avanços na EC. Considerando os preços as vezes mais elevados de produtos reciclados, a necessidade de investimentos e a formação de um mercado consumidor, o estado tem papel fundamental como um dos alicerces desta transição. Países com sucesso na transição para a EC estão contando com um forte

apoio do estado, como é o caso da Itália (GHISELLINI; ULGIATI, 2020), Finlândia (LÄHDEAHO; HILMOLA, 2020) e Noruega (WIEBE et al., 2023). Os incentivos ocorrem através de subsídios, taxaço ecológica e linhas de créditos especiais para empresas que adotem práticas de EC. No caso do Brasil, não há ainda incentivos e investimento público em EC, sendo, portanto, uma barreira.

4 METODOLOGIA

Inicialmente será apresentado o *design* adotado por esta pesquisa que começa através da identificação e caracterização das principais barreiras para implementação da EC (conforme seção anterior). Posteriormente, é desenvolvido e aplicado um questionário junto a profissionais (preferencialmente engenheiros mecânicos) que atuam em indústrias metal mecânicas e instituições de pesquisa, ensino e consultoria na região Norte do Rio Grande do Sul de forma a colher as relações entre cada uma das barreiras para implantação da EC. Os resultados coletados na aplicação deste questionário são analisados segundo a técnica *Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory* (DEMATEL) conforme (BOUTKHOUM et al., 2021; LIN et al., 2011; ZHU; SARKIS; GENG, 2011). Ao final são apresentadas as discussões e conclusões desta análise. No Quadro 1, este *design* da pesquisa é apresentado com cada etapa e respectivo *output*.

Quadro 1 - *Design* da pesquisa

Etapa	Identificação de critérios	Coleta de dados	Análise de dados	Resultados e Discussões
Output	Caracterização das principais barreiras para EC	Questionário aplicado junto profissionais da indústria metalmeccânica	Aplicação da técnica DEMATEL	Inter-relações e priorizações entre barreiras da EC nas indústrias do Norte do RS

Fonte: a Autora.

4.1 Identificação das principais barreiras da EC

Conforme apresentado previamente, na seção 3.3, foram identificadas nove barreiras relevantes que contribuem para a baixa adoção da EC na indústria metalmeccânica. Elas são apresentadas no Quadro 2 e constituem importantes obstáculos. Cada barreira é acompanhada de um código que será utilizado a partir daqui nesta pesquisa.

Quadro 2 - As nove barreiras para a implantação da EC, conforme literatura.

Código	Barreira	Autor
B1	Baixa adoção de tecnologias digitais	ROSA et al., 2020
B2	Produção não seriada	JAEGER; UPADHYAY, 2020
B3	Baixa demanda dos consumidores	HAZEN et al., 2017
B4	Custos elevados para implementar novas tecnologias	CHIARONI et al., 2021
B5	Cadeias de suprimentos lineares	AGRAWAL; SINGH, 2019
B6	Aversão ao risco por parte da alta administração	TAN; TAN; RAMAKRISHNA, 2022
B7	Baixa qualificação técnica de colaboradores	VELEVA et al., 2017
B8	Qualidade variável dos metais reciclados	RISSMAN et al., 2020
B9	Falta de incentivo e investimento público	GHISELLINI; ULGIATI, 2020

Fonte: a Autora.

4.2 Definição do Método de Coleta e Análise de Dados

Após a identificação das nove barreiras para a EC, foi adotado o método DEMATEL para coleta e análise de dados, devido a sua já comprovada eficácia em estudos semelhantes (KAUR et al., 2018; KHAN; HALEEM; KHAN, 2020). Originalmente desenvolvido pelo *Science and Human Affairs Program* do *Battelle Memorial Institute of Geneva* entre 1972 e 1976, o método DEMATEL é uma abordagem de laboratório para avaliação e julgamento de decisão que visa resolver problemas complexos e interconectados. Diferente dos métodos tradicionais, o DEMATEL é capaz de identificar a interdependência entre os elementos de um sistema por meio de um diagrama causal, que utiliza dígrafos em vez de gráficos sem direção para representar as relações contextuais e os pontos fortes de influência entre os elementos.

O método DEMATEL é destinado à elaboração e avaliação de uma estrutura hierárquica baseada na opinião de profissionais (com experiência na área em estudo), de forma a obter informações sobre o nível de relacionamento que um elemento exerce sobre outro e o nível de relacionamento que um elemento recebe de outro. Portanto, DEMATEL não é uma ferramenta para análise estatística, mas sim para análise multicritério. Neste sentido, diversas pesquisas têm utilizado esta metodologia em diferentes contextos, como seleção de fornecedores, elaboração de mapas

estratégicos, definição de melhores práticas e classificação de facilitadores para atividades produtivas (BOUTKHOUM et al., 2021; KAUR et al., 2018; KHAN; HALEEM, 2020; VISHWAKARMA et al., 2022). Uma das vantagens do método DEMATEL é que ele não requer o uso de um software proprietário, tornando possível obter seus resultados usando uma simples planilha eletrônica, além de auxiliar na estruturação da hierarquia de prioridades para uma tomada de decisões.

4.3 Aplicação do DEMATEL

A aplicação do método DEMATEL foi conduzida por meio de seis etapas. Na primeira etapa, foram definidos os graus de influência a serem considerados na avaliação das relações de influência entre as nove barreiras por meio da comparação par a par, utilizando uma nota que representa a relação de influência entre os elementos analisados, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Grau de influência das barreiras influenciadoras e influenciadas

Grau de influência	Valor numérico
Sem influência	0
Baixa influência	1
Média influência	2
Alta influência	3
Muito alta influência	4

Fonte: a Autora.

Considerando estes graus de influência, os questionários foram preenchidos utilizando uma matriz 9x9, conforme Figura 3, com todas as nove barreiras identificadas na literatura. Este preenchimento foi realizado através de questionários respondidos por profissionais (preferencialmente engenheiros mecânicos) que atuam em indústrias metal mecânicas e instituições de pesquisa, ensino e consultoria na região Norte do Rio Grande do Sul.

Figura 3 - Matriz não preenchida das relações de causa e efeito entre as barreiras.

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
B1	0								
B2		0							
B3			0						
B4				0					
B5					0				
B6						0			
B7							0		
B8								0	
B9									0

Com isso, foi construída uma matriz média inicial ou matriz de relação direta, que é calculada em cima das respostas dos profissionais quanto ao grau de influência direta que cada fator (barreira) i exerce sobre cada fator (barreira) j , que é denotado por a_{ij} , como apresentado na matriz de relação direta A . A matriz $[A]$ é formada conforme a Equação (1).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Na segunda etapa, calculou-se pela Equação (2) a matriz de relação direta inicial normalizada X . Essa normalização é obtida através da matriz média multiplicada pelo fator s (0,1). Chamado de constante de normalização, o fator s é o maior valor do somatório das linhas da matriz $[A]$. Pode ser calculado através da Equação (3), onde os elementos diagonais principais são iguais a zero.

$$X = s \times A \quad (2)$$

$$s = \min \left[\frac{1}{\max_i \sum_{j=1}^n |a_{ij}|}, \frac{1}{\max_j \sum_{i=1}^n |a_{ij}|} \right] \quad (3)$$

Após, na terceira etapa, é feita a matriz inversa da matriz de influência total e encontra-se a matriz $[T]$. A matriz de relação total T é obtida usando a Equação (4), onde I é a matriz de identidade.

$$T = X(I - X)^{-1} \quad (4)$$

Na quarta etapa, foi necessário obter os valores normalizados do relacionamento total. Onde, $T=[t_{ij}]n \times n$, por $i, j=1,2,n$. Sendo D e R vetores $n \times 1$ e $1 \times n$ representando a soma das linhas e soma das colunas da matriz T , nesta ordem, conforme mostra as Equações 5 e 6.

$$D = [D_j]_{1 \times n} = [\sum_{i=1}^n t_{ij}]_{1 \times n} \quad (5)$$

$$R = [R_i]'_{n \times 1} = [\sum_{j=1}^n t_{ij}]'_{n \times 1} \quad (6)$$

Desse modo, a soma da i -ésima linha na matriz T é conhecida como D_i e representa o impacto total, tanto direto quanto indireto, do fator i nos demais fatores. Por outro lado, a soma da j -ésima coluna na matriz T é denominada R_j e representa o impacto total, tanto direto quanto indireto, recebido pelo fator j dos demais fatores. Se $j = i$, a soma $(D_i + R_i)$ resulta em um índice que indica o impacto total, tanto dado quanto recebido, pelo fator i . Ou seja, $(D_i + R_i)$ reflete o nível de importância que o fator i possui no sistema, considerando todos os efeitos gerados. Além disso, a diferença $(D_i - R_i)$ evidencia o efeito líquido que o fator i apresenta no sistema. Quando $(D_i - R_i)$ é positivo, o fator i é um causador líquido, ou seja, está influenciando os demais fatores. Por outro lado, quando $(D_i - R_i)$ é negativo, o fator i é um receptor líquido, ou seja, está sendo influenciado pelos outros fatores (TZENG et al. 2007).

Definiu-se, na quinta etapa, um valor limiar α para obter o Mapa de Influência (MI) através da aplicação da Equação 7. Esse valor limiar α é o ponto de corte para que a influência seja relevante ou não. Com o intuito de manter a complexidade do MI a um nível razoável, define-se um valor limiar α e alguns efeitos menores na matriz T são filtrados.

$$\alpha = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [t_{ij}] \quad (7)$$

Desta forma apenas os efeitos maiores que o valor limiars de α seriam escolhidos e mostrados no MI.

Na sexta e última etapa foi construído o MI, em que se representa um diagrama de relações causa e efeito, sendo o resultado final obtido com o método DEMATEL. As coordenadas são construídas segundo a Equação 8.

$$Fi (Di + Ri; Di - Ri) \quad (8)$$

Em que:

Fi : iésimo fator do sistema em análise;

$(Di + Ri)$: efeitos totais provocados pelo inésimo fator no sistema;

$(D - Ri)$: efeito resultante provocado pelo inésimo fator no sistema.

Este MI divide os elementos em 2 grupos: o grupo de efeitos, que apresenta um limiar α negativo, e o grupo de causa, que apresenta um limiar α positivo. Os elementos no grupo de causa, ou fatores de influência, têm maior impacto sobre os demais elementos do que são afetados por eles. Já os elementos do grupo de efeitos, ou fatores influenciados, sofrem maior influência do que exercem sobre os outros elementos do conjunto.

4.4 Perfil dos profissionais envolvidos na coleta de dados

A análise DEMATEL incorporou as opiniões de um total de dez profissionais com envolvimento no setor metalmeccânico. Os critérios de participação foram baseados na aceitação do convite enviado via e-mail para profissionais cadastrados em uma lista de e-mails de discussões sobre a área de engenharia mecânica, bem como por indicações realizadas por eles. Seus perfis estão descritos no Quadro 3. A disposição desses profissionais em se envolver neste estudo foi um fator importante para haver credibilidade nos dados coletados. Como destacado por (SIMMS; ROGERS, 2006) a seleção de indivíduos comprometidos com o processo enriquece

a qualidade dos dados. Vários estudiosos argumentam que, em pesquisas qualitativas, o tamanho da amostra torna-se menos relevante em comparação com a qualidade dos dados (CHILESHE; RAMEEZDEEN; HOSSEINI, 2016; MASON, 2010; PATTON, 2014). O valor do estudo é determinado principalmente pela capacidade dos profissionais de trazer contribuições relevantes e valiosas, sendo aceito um número reduzido de participantes (CHEN; H.I. LEE; TONG, 2006; LIZARRALDE; GANZARAIN; ZUBIZARRETA, 2022).

Quadro 3 - Perfil dos profissionais envolvidos na pesquisa.

Formação	Setor	Tempo de experiência
Designer Industrial	Universidade	11 anos
Engenheiro Industrial	Universidade	11 anos
Engenheiro Mecânico	Indústria metalmecânica	13 anos
Engenheiro Mecânico	Indústria metalmecânica	5 anos
Engenheiro Mecânico	Indústria metalmecânica	3 anos
Engenheiro Mecânico	Indústria metalmecânica	3 anos
Engenheiro Mecânico	Indústria metalmecânica	2 anos
Engenheiro Mecânico	Indústria metalmecânica	2 anos
Engenheiro Mecânico	Indústria metalmecânica	2 anos
Engenheiro Mecânico	Consultoria	2 anos

Fonte: a Autora.

O requisito mínimo para ser considerado um profissional apto a participar desta pesquisa foi ter pelo menos 2 anos de experiência em áreas correlatas à engenharia mecânica, de forma a haver um entendimento claro sobre as dinâmicas e processos inerentes ao dia a dia de uma indústria metalmecânica. Ao selecionar profissionais com experiência substancial nessas áreas, buscamos garantir que as ideias e perspectivas compartilhadas durante o estudo fossem embasadas em um sólido conhecimento e expertise. Além disso, buscamos incluir especialistas tanto da academia quanto do setor prático para obter visões diversas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados inicialmente os resultados obtidos mediante aplicação do método DEMATEL e na sequência são apresentadas as discussões com a análise dos resultados.

5.1 Resultados

Na etapa 1, com a média das respostas dos especialistas, a matriz de influência 9x9 (Figura 3) foi preenchida para cada barreira que contribui para a baixa adoção da EC em indústrias metalmeccânicas. Para facilitar a descrição, para cada barreira foi atribuído um código de acordo com a ordem apresentada no Quadro 2 (de B1 a B9). Com a média desses resultados formou-se a matriz média inicial *A*, conforme recomendado na etapa 2, e apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Matriz média inicial.

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
B1	0	2,5	2,2	2,7	2,5	2,8	2,7	2,8	2,3
B2	2,4	0	1,4	3,1	2,1	2,2	2,2	1,9	1,8
B3	3,2	1,3	0	3,2	3,5	3,2	2,4	2,3	3
B4	3,9	1,9	3,1	0	3,1	3,6	2,4	2,6	3,5
B5	2	1,5	2,7	2,4	0	2,6	1,4	1,9	2,1
B6	3,1	1,4	2,3	2,5	2,5	0	1,7	1,8	2,4
B7	2,8	2,1	2	2,8	2,2	2,6	0	1,9	1,6
B8	2,5	2,1	2,5	2,5	2,3	2,9	1,6	0	2
B9	3,4	1,8	2,8	3,2	2,8	3,6	2,9	2,4	0

Fonte: a Autora.

Na etapa 2, a matriz de relação direta inicial normalizada *X* foi calculada pela normalização da matriz média inicial *A*. Esta matriz resultante *X* é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 - Matriz de relação direta inicial normalizada X .

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
B1	0	0,1037	0,0912	0,1120	0,1037	0,1161	0,1120	0,1161	0,0954
B2	0,0995	0	0,0580	0,1286	0,0871	0,0912	0,0912	0,0788	0,0746
B3	0,1327	0,0539	0	0,1327	0,1452	0,1327	0,0995	0,0954	0,1244
B4	0,1618	0,0788	0,1286	0	0,1286	0,1493	0,0995	0,1078	0,1452
B5	0,0829	0,0622	0,1120	0,0995	0	0,1078	0,0580	0,0788	0,0871
B6	0,1286	0,0580	0,0954	0,1037	0,1037	0	0,0705	0,0746	0,0995
B7	0,1161	0,0871	0,0829	0,1161	0,0912	0,1078	0	0,0788	0,0663
B8	0,1037	0,0871	0,1037	0,1037	0,0954	0,1203	0,0663	0	0,0829
B9	0,1410	0,0746	0,1161	0,1327	0,1161	0,1493	0,1203	0,0995	0

Fonte: a Autora.

Avançando para a etapa 3, a matriz de relação total T foi calculada e é apresentada na Tabela 4. Em seguida, conforme a etapa 4, a soma das linhas e colunas foi computada para obter os valores R e D , e adicionalmente, a proeminência (R_i+D_i) e o efeito líquido (R_i-D_i) foram calculados, conforme apresentado na Tabela 5.

Na sequência, a etapa 5 foi conduzida e o limiar α foi calculado como 0,5101. Cada elemento da Tabela 4 foi comparado com o valor de referência e aqueles elementos que eram maiores do que o limiar (α) foram destacados em negrito. Esta etapa filtrou os efeitos menores na matriz T , garantindo que apenas os efeitos maiores (maiores que o valor de referência α) fossem selecionados e exibidos no MI.

Na Tabela 5 foi compilado os dados de R_i e D_i e feito as duas operações algébricas, de soma e de subtração para encontrar a proeminência e o efeito líquido, respectivamente.

Tabela 4 - Matriz de relação total T

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
B1	0,5133	0,4266	0,51286	0,5895	0,5608	0,6209	0,4894	0,5020	0,5106
B2	0,5293	0,2843	0,42254	0,5312	0,4785	0,5249	0,4157	0,4131	0,4320
B3	0,6739	0,4112	0,46690	0,6457	0,6347	0,6784	0,5113	0,5182	0,5712
B4	0,7417	0,4613	0,61732	0,5714	0,6614	0,7363	0,5460	0,5633	0,6242
B5	0,5072	0,3355	0,46114	0,4993	0,3923	0,5307	0,3809	0,4061	0,4365
B6	0,5704	0,3503	0,46920	0,5274	0,5095	0,4596	0,4121	0,4238	0,4679
B7	0,5625	0,3770	0,45961	0,5399	0,5005	0,5583	0,3470	0,4285	0,4416
B8	0,5622	0,3824	0,48564	0,5393	0,5136	0,5790	0,4170	0,3628	0,4642
B9	0,6976	0,4399	0,58364	0,6620	0,6257	0,7079	0,5414	0,5345	0,4735

Fonte: a Autora.

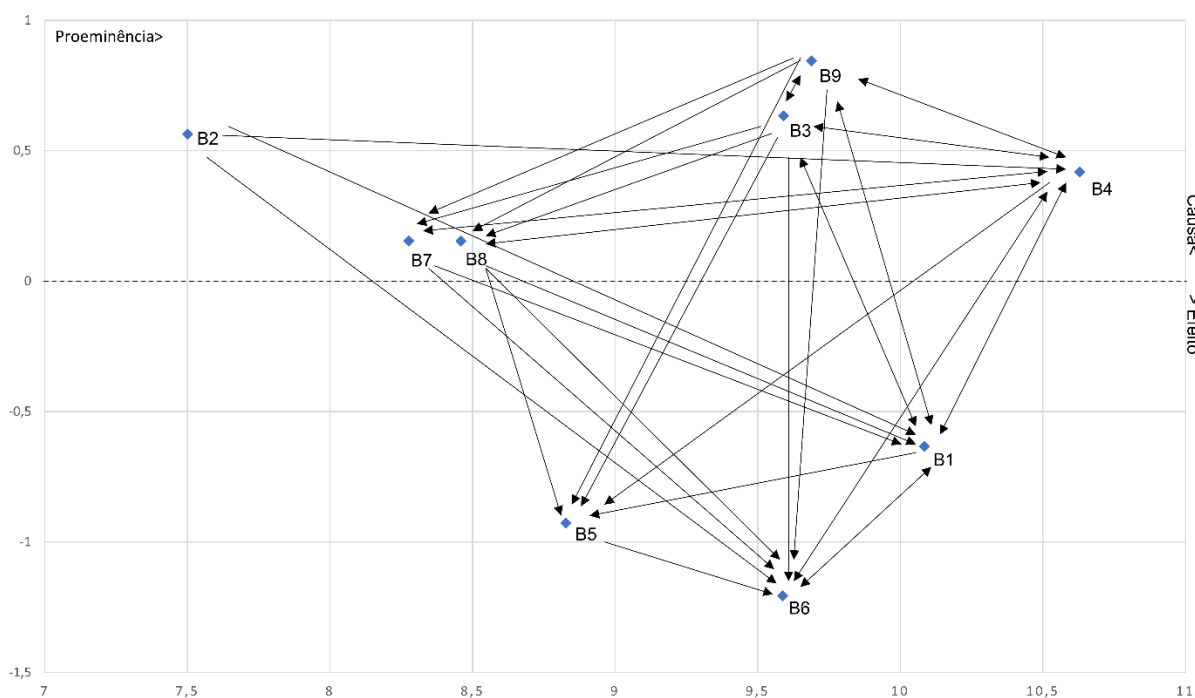
Tabela 5 - Proeminência e efeito líquido.

	Proeminência		Efeito Líquido	Relações	
	Ri	Di	Ri+Di	Ri-Di	
B1	4,726179	5,3586	10,08485	-0,63249	Efeito
B2	4,032051	3,4689	7,500978	0,563124	Causa
B3	5,111905	4,4789	9,590807	0,633003	Causa
B4	5,523544	5,1060	10,62959	0,417499	Causa
B5	3,950119	4,8774	8,827526	-0,92729	Efeito
B6	4,190643	5,3964	9,587054	-1,20577	Efeito
B7	4,215143	4,0612	8,276345	0,153941	Causa
B8	4,3065	4,1528	8,459303	0,153698	Causa
B9	5,266454	4,4221	9,688626	0,844282	Causa

Fonte: a Autora.

A etapa 6 concluiu a aplicação do método, resultando no dígrafo apresentado na Figura 4. As linhas com setas indicam a direção das relações entre as barreiras para implementação da EC em indústrias metalmeccânicas que possuem valores na matriz maiores que o limiar α .

Figura 4 - Mapa de Influência das barreiras para implementação da EC



Fonte: a Autora.

5.2 Discussões

O dígrafo que descreve as relações causais (MI da Figura 2) apresenta uma visão abrangente de diferentes informações que podem ser analisadas a partir de diversas perspectivas. O eixo X representa a proeminência, onde as barreiras localizadas mais à direita são consideradas mais significativas ou relevantes em termos de contribuição para a baixa adoção da EC em indústrias metalmeccânicas. No eixo Y, valores positivos indicam causas (ou seja, barreiras para a adoção de EC que exercem influência), enquanto valores negativos indicam efeitos (ou seja, barreiras para a adoção de EC que são influenciadas). Ou seja, o MI auxilia na obtenção de uma compreensão abrangente das interconexões e dependências entre as barreiras para a adoção de EC em indústrias metalmeccânicas.

Começando a partir da parte inferior do MI, três barreiras para a adoção de EC em indústrias metalmeccânicas são identificadas como efeitos das demais barreiras. Entre essas, B1 e B6 são classificadas como as mais proeminentes. Por outro lado, B5 é a menos proeminente. Ainda, dentre estas três barreiras, a B6 é influenciada pelo maior número de outras barreiras (influenciada por todas as outras oito barreiras),

seguida da B1 que é influenciada por outras sete barreiras. Isto é um indicativo de que B1 e B6 possuem uma importante função como efeitos principais no sistema. Ou seja, são as mais influenciadas e ao mesmo tempo as mais relevantes. Entre estas duas B1 é a mais impactante, uma vez que exerce influência sobre outras cinco barreiras, enquanto B6 exerce influência apenas sobre outras duas barreiras.

Por outro lado, ao focar na parte superior do MI, seis barreiras para a adoção de EC em indústrias metalmeccânicas são identificadas como causas das demais barreiras. Dentre estas, B4, B9 e B3 são classificadas como as mais proeminentes, enquanto B8, B7 e B2 são menos proeminentes. Todas as três barreiras mais proeminentes exercem influência sobre o mesmo número de barreiras, sete cada uma. No entanto a B4 além de ser a mais proeminente é também aquela que mais sofre efeito das demais barreiras, sendo influenciada por outras sete barreiras. Logo, B4 é a mais impactante em todos os critérios de análise seguida com certa distância pela B9 (que sofre influência do mesmo número de barreiras que B3 mas, no entanto, é mais proeminente).

Ao fim, considerando as duas barreiras mais proeminentes de cada um dos lados do eixo do efeito líquido é possível se construir um *ranking* das barreiras - Quadro 4- mais importantes para a adoção de EC. Em primeiro lugar está a B4, seguida da B1, que é seguida da B9, que é seguida da B6. Portanto ambas podem ser consideradas barreiras centrais. Essas barreiras afetam significativamente outras barreiras ou são significativamente afetadas por outras. Portanto, podem ser consideradas as barreiras mais relevantes para serem transpostas em direção a uma transição para a EC.

Quadro 4 - *Ranking* das barreiras que mais impactam a implementação da EC

Posição	Barreira
1º	B4 - Custos elevados para implementar novas tecnologias
2º	B1 - Baixa adoção de tecnologias digitais
3º	B9 - Falta de incentivo e investimento público
4º	B6 - Aversão ao risco por parte da alta gestão

Fonte: a Autora.

Este resultado encontra respaldo na literatura internacional, uma vez que B4 já foi apontado por outros estudos como uma relevante barreira a ser estudada devido ao seu elevado potencial em dificultar o avanço rumo a uma EC (BADHOTIYA et al., 2021; HARTLEY; ROOSENDAAAL; KIRCHHERR, 2022). Da mesma forma, B1 é um efeito causado principalmente por B4 e que prejudica a adoção de MNCs (BAG et al., 2021). Avançando, diversos estudos apontam a importância do governo na promoção da EC, ou seja, com este amparo, alguns riscos diminuem e B9 é transposta. Desta forma, ocorrem incentivos para as empresas adotarem MNCs num ecossistema mais favorável (GANLIN et al., 2021; SANTOLIN et al., 2023). Da mesma forma, a superação de B9 acaba contribuindo para a redução de B6, uma vez que quanto menor a incerteza, maior o subsídio e os incentivos fiscais, menor será a aversão ao risco por parte dos empreendedores (SANTOLIN et al., 2023).

6 CONCLUSÕES

Esta pesquisa apresenta alguns resultados que possuem implicações gerenciais dentro das indústrias metalmeccânicas, bem como com efeito sobre as políticas governamentais. Ou seja, gestores de indústrias que focarem em superar principalmente as quatro barreiras centrais (B4, B1, B9 e B6), certamente estarão mais próximos de uma transição para MNCs e, conseqüentemente, de um desenvolvimento mais sustentável. Da mesma forma, o estudo aponta as prioridades a serem abordadas nos caminhos a serem adotados por formuladores de leis e políticas públicas, no sentido de inserir o Brasil na trajetória de uma transição mais sustentável, alicerçada por uma EC.

As barreiras enfrentadas em países em desenvolvimento são bastante semelhantes às aquelas enfrentadas por países desenvolvidos e, portanto, avanços podem ser feitos ao se considerar aquilo que vem sendo discutido em países protagonistas quanto a transição para a EC. Desta forma, esta pesquisa identificou nove relevantes barreiras para a adoção da EC que foram posteriormente analisadas utilizando a metodologia DEMATEL. Esta análise permitiu uma abordagem sistêmica das inter-relações entre cada uma das barreiras. Além disso, os resultados apresentaram “custos elevados para implementar novas tecnologias”, “baixa adoção de tecnologias digitais”, “falta de incentivo e investimento público” e “aversão ao risco por parte da alta administração” como sendo, respectivamente, as quatro barreiras mais relevantes no processo de transição para a EC junto às indústrias metalmeccânicas. Isto fornece importantes implicações sobre priorizações que devem ser dadas pelos tomadores de decisão dentro das indústrias metalmeccânicas bem como pelos formuladores de políticas públicas e legislações.

Como possíveis limitações deste trabalho, temos que devido ao fato das barreiras para a adoção da EC formarem um sistema complexo, a pesquisa fez certas simplificações para representá-las. Por exemplo, o estudo agrupou diversas carências quanto a adoção de tecnologias digitais (que vão desde a aplicação de conceitos de Indústria 4.0, passando por uso de *blockchain* e incluindo *machine learning*) sob a mesma barreira, “baixa adoção de tecnologias digitais”. Portanto, a categorização das barreiras representa uma simplificação, pois envolve agrupar elementos complexos sob um único rótulo. Isso é uma limitação importante a ser considerada. Além disso,

não é possível descartar o viés dos respondentes, uma vez que eles emitiram seus julgamentos baseado na realidade que vivenciam dentro dos seus ambientes de trabalho. Logo, cada profissional que participou da etapa de coleta de dados se manifestou considerando os seus critérios pessoais.

Com isso, é fundamental salientar que os objetivos específicos deste trabalho foram atendidos. O objetivo "a" foi atingido com a pesquisa na literatura e elencando as principais barreiras para a implementação da EC nas indústrias metalmeccânicas. Já os objetivos "b" e "c" foram atingidos com a coleta e análise dos dados, assim como com as inter-relações feitas entre as barreiras.

7 PROPOSIÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Quanto a trabalhos futuros, é recomendável que seja feito um estudo de caso minucioso, dentro do ambiente laboral de uma ou de múltiplas indústrias metalmeccânicas. Isto irá permitir extrapolar as barreiras, identificando novas, adaptando algumas aqui caracterizadas e trazendo uma visão operacional do dia a dia industrial. Outra possibilidade futura reside em uma pesquisa sobre os facilitadores da EC, se dedicando a um planejamento de como transpor as barreiras, criando um complexo sistema facilitador da transição para a EC. Por fim, estudos futuros mapeando mais claramente cada uma das barreiras da EC enfrentadas por indústrias metalmeccânicas, por exemplo mapeando como a lenta e baixa transição para a Indústria 4.0 leva a uma baixa adoção de tecnologias digitais por parte das indústrias, que leva a uma perda de competitividade e conseqüentemente dificulta e por vezes impossibilita uma transição para a EC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFSHAR, Z. A.; FAZLI, S. The impact of organisational culture on supply chain integration (case study: industrial parks of Qazvin province). **International Journal of Logistics Systems and Management**, v. 42, n. 4, p. 484–500, 2022.

AGRAWAL, S.; SINGH, R. K. Analyzing disposition decisions for sustainable reverse logistics: Triple Bottom Line approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 150, 2019.

AKBARI, M.; HOPKINS, J. L. Digital technologies as enablers of supply chain sustainability in an emerging economy. **Operations Management Research**, 11 maio 2022.

BADHOTIYA, G. K. et al. Analyzing barriers for the adoption of circular economy in the manufacturing sector. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 71, n. 3, p. 912–931, 1 jan. 2021.

BAG, S. et al. Modeling barriers of digital manufacturing in a circular economy for enhancing sustainability. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 71, n. 3, p. 833–869, 1 jan. 2021.

BARCELOS, S. M. B. D. et al. Circularity of Brazilian silk: Promoting a circular bioeconomy in the production of silk cocoons. **Journal of Environmental Management**, v. 296, 2021.

BATISTA, L. et al. Circular supply chains in emerging economies—a comparative study of packaging recovery ecosystems in China and Brazil. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 23, p. 7248–7268, 2019.

BOCKEN, N.; KONIETZKO, J. Circular business model innovation in consumer-facing corporations. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 185, p. 122076, 1 dez. 2022.

BOUTKHOUM, O. et al. Analysis and evaluation of barriers influencing blockchain implementation in moroccan sustainable supply chain management: An integrated IFAHP-DEMATEL framework. **Mathematics**, v. 9, n. 14, 2021.

BRESSANELLI, G. et al. Enablers, levers and benefits of Circular Economy in the Electrical and Electronic Equipment supply chain: a literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 298, p. 126819, 20 maio 2021.

BRUNDTLAND, G. H. **Our common future**. [s.l.] Oxford University Press, Oxford, GB, 1987.

CENTOBELLI, P. et al. Designing business models in circular economy: A systematic literature review and research agenda. **Business Strategy and the Environment**, v. 29, n. 4, p. 1734–1749, 2020.

CHEN, H. H.; H.I. LEE, A.; TONG, Y. Analysis of new product mix selection at TFT-LCD technological conglomerate network under uncertainty. **Technovation**, v. 26, n. 11, p. 1210–1221, 2006.

CHIARONI, D. et al. “Digital technologies in the business model transition towards a circular economy”. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 168, 2021.

CHILESHE, N.; RAMEEZDEEN, R.; HOSSEINI, M. R. Drivers for adopting reverse logistics in the construction industry: a qualitative study. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 23, n. 2, p. 134–157, 1 jan. 2016.

CNI. **Economia circular: oportunidades e desafios para a indústria brasileira**. Brasília - ISBN 978-85-7957-166-4, , 2018.

CNI. **Pesquisa sobre Economia Circular na Indústria Brasileira**. , 2019. Disponível em: <<https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2019/9/pesquisa-sobre-economia-circular-na-industria-brasileira/>>

CORONA, B. et al. Towards sustainable development through the circular economy—A review and critical assessment on current circularity metrics. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 151, p. 104498, 1 dez. 2019.

DAEHN, K. E.; CABRERA SERRENHO, A.; ALLWOOD, J. M. How Will Copper Contamination Constrain Future Global Steel Recycling? **Environmental Science & Technology**, v. 51, n. 11, p. 6599–6606, 6 jun. 2017.

DE JESUS, A.; MENDONÇA, S. Lost in Transition? Drivers and Barriers in the Eco-innovation Road to the Circular Economy. **Ecological Economics**, v. 145, p. 75–89, 1 mar. 2018.

EBC. Brasil precisa capacitar 10,5 milhões de trabalhadores até 2023. 2019.

ELKINGTON, J. Partnerships from cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business. **Environmental Quality Management**, v. 8, n. 1, p. 37–51, 1998.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition**. , 2012. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Elle-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>>

FIESP. Fiesp identifica desafios da Indústria 4.0 no Brasil e apresenta propostas. 2018.

FRANZÒ, S. et al. Unravelling the design process of business models from linear to circular: An empirical investigation. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 6, p. 2758–2772, 2021.

GANLIN, P. et al. Innovative finance, technological adaptation and smes sustainability: The mediating role of government support during covid-19 pandemic. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 16, 2021.

GEISSDOERFER, M. et al. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757–768, 2017.

GEISSDOERFER, M. et al. Business models and supply chains for the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 190, p. 712–721, 2018.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 11–32, 2016.

GHISELLINI, P.; ULGIATI, S. Circular economy transition in Italy. Achievements, perspectives and constraints. **Journal of Cleaner Production**, v. 243, 2020.

GLAVIČ, P.; LUKMAN, R. Review of sustainability terms and their definitions. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 18, p. 1875–1885, 2007.

GREER, R.; VON WIRTH, T.; LOORBACH, D. The diffusion of circular services: Transforming the Dutch catering sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 267, 2020.

HAMMERSLEY, M. On “systematic” reviews of research literatures: A “narrative” response to Evans & Benefield. **British Educational Research Journal**, v. 27, n. 5, p. 543–554, 2001.

HARTLEY, K.; ROOSENDAAL, J.; KIRCHHERR, J. Barriers to the circular economy: The case of the Dutch technical and interior textiles industries. **Journal of Industrial Ecology**, v. 26, n. 2, p. 477–490, 2022.

HAZEN, B. T.; MOLLENKOPF, D. A.; WANG, Y. Remanufacturing for the Circular Economy: An Examination of Consumer Switching Behavior. **Business Strategy and the Environment**, v. 26, n. 4, p. 451–464, 2017.

HUNKA, A. D.; LINDER, M.; HABIBI, S. Determinants of consumer demand for circular economy products. A case for reuse and remanufacturing for sustainable development. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 1, p. 535–550, 2021.

INVESTNEWS. Brasil e EUA têm inflação semelhante, mas taxa de juros bem desigual; entenda. 2023.

JAEGER, B.; UPADHYAY, A. Understanding barriers to circular economy: cases from the manufacturing industry. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 33, n. 4, p. 729–745, 1 jan. 2020.

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.

KAUR, J. et al. A DEMATEL based approach for investigating barriers in green supply chain management in Canadian manufacturing firms. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 1–2, p. 312–332, 2018.

KHAN, S.; HALEEM, A. Strategies to implement circular economy practices: A fuzzy DEMATEL approach. **Journal of Industrial Integration and Management**, v. 5, n. 2, p. 253–269, 2020.

KHAN, S.; HALEEM, A.; KHAN, M. I. Enablers to Implement Circular Initiatives in the Supply Chain: A Grey DEMATEL Method. **Global Business Review**, 2020.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 221–232, 1 dez. 2017.

KJAER, L. L. et al. Product/Service-Systems for a Circular Economy: The Route to Decoupling Economic Growth from Resource Consumption? **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 1, p. 22–35, 2019.

LÄHDEAHO, O.; HILMOLA, O.-P. Business models amid changes in regulation and environment: The case of Finland-Russia. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 8, 2020.

LIN, Y. et al. Positioning strategic competitiveness of green business innovation capabilities using hybrid method. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 3, p. 1839–1849, 1 mar. 2011.

LIZARRALDE, R.; GANZARAIN, J.; ZUBIZARRETA, M. Adaptation of the MIVES method for the strategic selection of new technologies at an R&D centre. Focus on the manufacturing sector. **Technovation**, v. 115, p. 102462, 1 jul. 2022.

MASON, M. Sample Size and Saturation in PhD Studies Using Qualitative Interviews. **Forum Qualitative Sozialforschung / Forum: Qualitative Social Research**, v. 11, n. 3, 24 ago. 2010.

MERLI, R.; PREZIOSI, M.; ACAMPORA, A. How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 703–722, 20 mar. 2018.

NASIR, M. H. A. et al. Comparing linear and circular supply chains: A case study from the construction industry. **International Journal of Production Economics**, v. 183, p. 443–457, 2017.

NAWAZ, W.; KOÇ, M. Development of a systematic framework for sustainability management of organizations. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 1255–1274, 2018.

NOBRE, G. C.; TAVARES, E. The quest for a circular economy final definition: A scientific perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, 2021.

NUSSHOLZ, J. L. K. A circular business model mapping tool for creating value from prolonged product lifetime and closed material loops. **Journal of Cleaner Production**, v. 197, p. 185–194, 2018.

PATTON, M. Q. **Qualitative Research & Evaluation Methods: Integrating Theory and Practice**. [s.l.] SAGE Publications, 2014.

PIERONI, M. P. P.; MCALOONE, T. C.; PIGOSSO, D. C. A. Business model innovation for circular economy and sustainability: A review of approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 198–216, 1 abr. 2019.

RANTA, V.; AARIKKA-STENROOS, L.; MÄKINEN, S. J. Creating value in the circular economy: A structured multiple-case analysis of business models. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 988–1000, 10 nov. 2018.

RANTA, V.; AARIKKA-STENROOS, L.; VÄISÄNEN, J.-M. Digital technologies catalyzing business model innovation for circular economy—Multiple case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 164, p. 105155, 1 jan. 2021.

RISSMAN, J. et al. Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. **Applied Energy**, v. 266, p. 114848, 15 maio 2020.

RIZOS, V. et al. Implementation of circular economy business models by small and medium-sized enterprises (SMEs): Barriers and enablers. **Sustainability (Switzerland)**, v. 8, n. 11, 2016.

ROSA, P. et al. Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 6, p. 1662–1687, 2020.

SANTOLIN, R. B. et al. Exploiting circular economy enablers for SMEs to advance towards a more sustainable development: An empirical study in the post COVID-19 era. **Resources, Conservation & Recycling Advances**, v. 19, p. 200164, 1 nov. 2023.

SASSANELLI, C. et al. Circular economy performance assessment methods: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 229, p. 440–453, 2019.

SCHROEDER, P.; ANGGRAENI, K.; WEBER, U. The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 1, p. 77–95, 2019.

SIMMS, C.; ROGERS, B. The significance of flexibility in improving return on property investment: the UK perspective. **Facilities**, v. 24, n. 3/4, p. 106–119, 1 jan. 2006.

SINHA, E. Identifying enablers and outcomes of circular economy for sustainable development: A systematic literature review. **Business Strategy and Development**, v. 5, n. 3, p. 232–244, 2022.

SINMETAL. **A importância do setor metalmecânico na economia gaúcha.** , 2023. Disponível em:

<http://www.sinmetal.com.br/site/principal/conteudo_nivel3.asp%3FcodConteudo%3D269 acessado em 22/03/2023>

TAN, J.; TAN, F. J.; RAMAKRISHNA, S. Transitioning to a Circular Economy: A Systematic Review of Its Drivers and Barriers. **Sustainability**, v. 14, n. 3, p. 1757, jan. 2022.

URBINATI, A.; CHIARONI, D.; CHIESA, V. Towards a new taxonomy of circular economy business models. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 487–498, 1 dez. 2017.

URBINATI, A.; FRANZÒ, S.; CHIARONI, D. Enablers and Barriers for Circular Business Models: an empirical analysis in the Italian automotive industry. **Sustainable Production and Consumption**, v. 27, p. 551–566, 2021.

VELEVA, V.; BODKIN, G.; TODOROVA, S. The need for better measurement and employee engagement to advance a circular economy: Lessons from Biogen’s “zero waste” journey. **Journal of Cleaner Production**, v. 154, p. 517–529, 2017.

VISHWAKARMA, A. et al. Analysing barriers of sustainable supply chain in apparel & textile sector: A hybrid ISM-MICMAC and DEMATEL approach. **Cleaner Logistics and Supply Chain**, v. 5, p. 100073, 1 dez. 2022.

WIEBE, K. S. et al. Circular Economy and the triple bottom line in Norway. **Circular Economy and Sustainability**, v. 3, n. 1, p. 1–33, 1 mar. 2023.

YUAN, Z.; BI, J.; MORIGUICHI, Y. The circular economy: A new development strategy in China. **Journal of Industrial Ecology**, v. 10, n. 1–2, p. 4–8, 2006.

ZHU, Q.; SARKIS, J.; GENG, Y. Barriers to environmentally-friendly clothing production among Chinese apparel companies. **Asian Business & Management**, v. 10, n. 3, p. 425–452, 1 ago. 2011.