

PRODUÇÃO DE ALUMÍNIO SECUNDÁRIO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

SECONDARY ALUMINUM PRODUCTION: A SYSTEMATIC REVIEW OF THE LITERATURE

PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA

Caio Lage Calegari ¹
Ricardo Luiz Perez Teixeira ²
Priscilla Chantal Duarte Silva ³

Resumo: O objetivo deste estudo sistemático é avaliar a produção literária relacionada ao tema da metalurgia extrativa do alumínio para a produção de alumínio secundário. Para isso, utilizou-se uma pesquisa do tipo estado da arte, sob o protocolo PRISMA. Foram selecionados 8 estudos nas bases de pesquisas *Science Direct*, *IEEE* e *Web of Science*. Destacam-se os seguintes aspectos da produção de alumínio secundário: a reciclagem do alumínio metálico é viável do ponto de vista energético e econômico e, possibilita, a redução dos impactos ambientais.

Palavras-chave: Alumínio secundário. Protocolo PRISMA. Reciclagem do alumínio. Sustentabilidade.

Abstract: The objective of this systematic study is to evaluate the literary production related to the theme of aluminum extractive metallurgy to produce secondary. For this, state-of-the-art research was used, under the PRISMA protocol. Eight studies were selected from Science Direct, IEEE and Web of Science research databases. The following aspects of secondary aluminum production stand out: the recycling of metallic aluminum is feasible from an energy and economic point of view and enables the reduction of environmental impacts.

Keywords: Aluminum recycling. PRISMA Protocol. Secondary aluminum. Sustainability

Resumen: El objetivo de este estudio sistemático es evaluar la producción literaria relacionada con el tema de la metalurgia extractiva de aluminio para la producción de aluminio secundario. Para ello se utilizó una investigación de última generación, bajo el protocolo PRISMA. Se seleccionaron ocho estudios de las bases de datos de investigación Science Direct, IEEE y Web of Science. Destacan los siguientes aspectos de la producción de aluminio secundario: el reciclaje del aluminio metálico es factible desde el punto de vista energético y económico, y permite la reducción de impactos ambientales.

Palabras-clave: Aluminio secundario. Protocolo PRISMA. Reciclaje de aluminio. Sostenibilidad.

Submetido 09/01/2023

Aceito 25/04/2023

Publicado 26/04/2023

¹ Graduando em engenharia de materiais. Instituto de Engenharia Integradas da Universidade Federal de Itajubá, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3967-477X>. E-mail: caiolcalegari@gmail.com

² Doutor em engenharia metalúrgica e de materiais. Instituto de Engenharias Integradas da Universidade Federal de Itajubá, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2641-4036>. E-mail: ricardo.luiz@unifei.edu.br

³ Doutora em linguística e língua portuguesa. Instituto de Ciências Puras e Aplicadas da Universidade Federal de Itajubá, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5148-2423>. E-mail: priscillachantal@unifei.edu.br

Introdução

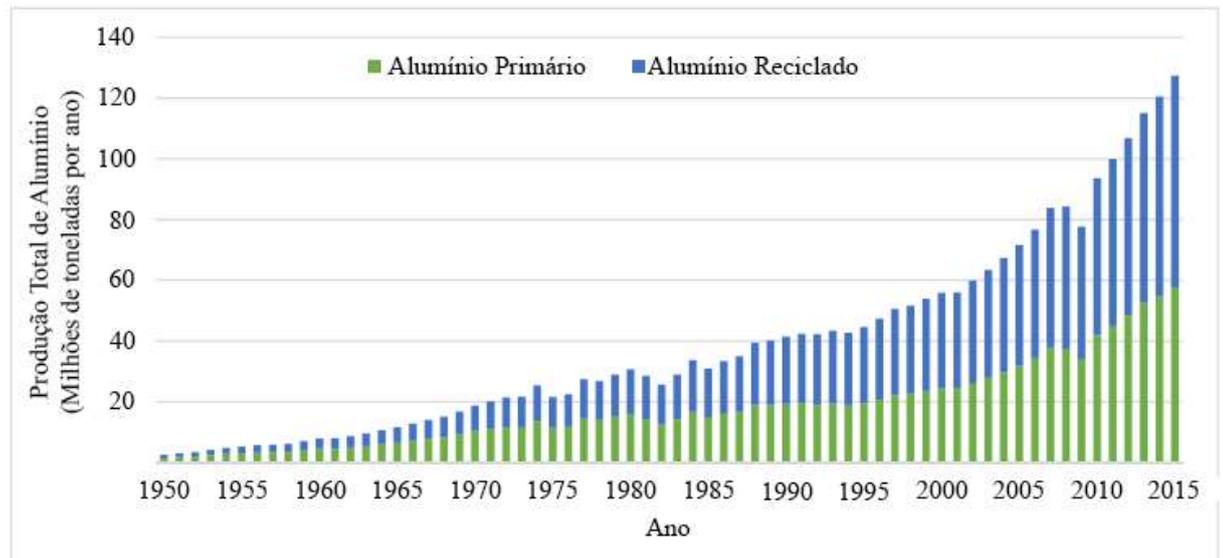
O alumínio primário é produzido pela metalurgia extrativa pelo beneficiamento e redução da bauxita à alumínio metálico. A metalurgia extrativa de alumínio engloba: a extração e concentração do minério de óxido de alumínio hidratado de alumínio (bauxita); a produção de alumina e hidróxido de alumínio a partir da bauxita concentrada, geralmente pelo processo de Bayer; a produção de alumínio fundido por via eletrolítica a partir da alumina pelo processo Hall-Héroult, e o refino do alumínio fundido ao alumínio primário (ou elementar) (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020). Alumínio primário, assim, corresponde ao metal alumínio (alumínio elementar) que é produzido do minério de alumínio extraído, refinado e reduzido eletroliticamente (US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1995).

O processo de reciclagem do alumínio está presente na metalurgia extrativa do alumínio e na fusão dos resíduos sólidos de produtos diversos de alumínio, quer novos ou velhos (SHACKELFORD, 2008). O alumínio secundário (ou alumínio reciclado) é obtido, assim, pelo processo de reciclagem da sucata de alumínio com origem em diversos locais, como as sobras de produção de peças novas, aparas das máquinas e produtos de alumínio em fim de vida. O alumínio secundário representa cerca de 1/3 do total de alumínio consumido mundialmente, uma vez que para a sua produção requer apenas 5% da energia necessária para a produção do alumínio primário, verificando-se assim elevadas poupanças energéticas (WALLACE, 2011). Estima-se que a energia necessária para a produção deste material se encontre entre os 6 e os 10 MJ/kg, com uma eficiência média do processo de 60-80%, isto é, da totalidade de resíduo de alumínio colocado no forno, a conversão em lingotes de alumínio secundário corresponde a 60-80% (GRIMES; DONALDSON; GOMEZ, 2008).

O alumínio secundário é produzido a partir da refusão do alumínio metálico, que derivam de duas fontes principais: (i) o alumínio de origem industrial, que é formado por retalhos gerados no processo de produção de fábricas e reprocessadores de alumínio; (ii) o alumínio pós-consumo, que são materiais que chegaram ao fim de sua vida útil, tal como as latas de bebidas (PADAMATA, 2021).

Segundo Soo *et al.* (2018), a quantidade de alumínio usada mundialmente vem crescendo desde 1950, como mostrado na Figura 1, com tendência de aumento, inclusive da reciclagem de alumínio por meio da refusão.

Figura 1. Produção total de alumínio primário e reciclado mundialmente.



Fonte: Adaptado de Soo *et al.* (2018).

Esse crescente uso do alumínio, deve-se ao fato da grande aplicabilidade e de suas diversas propriedades, como baixa densidade, condutividade elétrica, resistência à corrosão, baixo ponto de fusão, entre outros, se comparada ao aço (KOLBEINSEN, 2020). Segundo dados globais de consumo do alumínio do ano de 2020, a indústria de construção é um dos principais consumidores de alumínio, (cerca de 25%), seguida da indústria de transportes (23%), do setor elétrico (12%), de maquinários e equipamentos (11%), de laminados (9%), de embalagens (8%) e de bens duráveis diversos etc. (STATISTA, 2023). Na indústria de transportes o alumínio e suas ligas estão os materiais mais adequados para a fabricação de carrocerias multimateriais para aplicações automotivas, como *Body-in-White* (BIW), componentes de chassi, fechamento de portas e painéis externos (SOO *et al.*, 2018).

A reciclagem do alumínio também cresce, mas com médias globais de apenas 28,5%. O Brasil apresenta uma taxa de 53,9% de reciclagem total de sucata de alumínio no ano de 2019, e com índice de reciclagem para latas de alumínio de 98,7%, a maior do mundo (ABAL, 2021).

Separação, cominuição e compactação

As sucatas de alumínio que passarão pelo processo de refusão primeiramente devem ser classificadas, separadas e beneficiadas. Isso devido à grande variedade de ligas de alumínio existentes, e a restrições do processo de fusão das sucatas (M I, 2019). A afirmação de que o

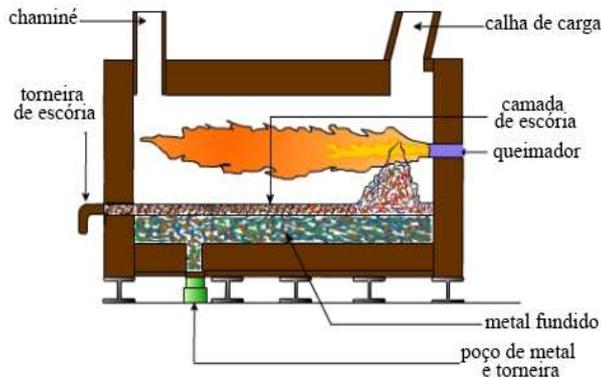
alumínio pode ser reciclado sem perda de qualidade refere-se às ligas específicas, uma vez que os componentes de ligas não podem ser removidos, uma vez que diferentes tipos de materiais requerem processamentos diferentes, portanto uma triagem do tipo de material é essencial (SCHMITZ, 2014).

Para que seja possível separar outros materiais que possam estar com o alumínio, a sucata deve passar por um processo de cominuição, onde devem ter um tamanho menor que 100-150mm. Para isso, são aplicados trituradores e esmagadores, e logo em seguida a sucata passa por separador magnético, onde são removidos materiais ferrosos. Esse processo ocorre repetidas vezes, até que passam em uma tela vibratória onde partes menores que 10mm são removidas. Materiais como aço inoxidável - que são não magnéticos - por meio de estresse mecânico, se tornam levemente magnéticos, e podem ser removidos por ímãs com campos magnéticos muito fortes. Já os materiais não metálicos são removidos por um processo, utilizando o princípio de que um campo magnético rotativo e rápido induz uma corrente elétrica em partículas metálicas, o que as transforma em pequenos ímãs temporários, e quando os polos dos ímãs e do campo magnético estão alinhados ocorre uma repulsão, que projeta os materiais metálicos em uma curva balística que é diferente dos não metálicos (SCHMITZ, 2014).

Fornos de fusão e espera

Os tipos de fornos mais utilizados para a refusão da sucata de alumínio são o reverbatório e os rotativos. Os fornos reverbatórios (Figura 2), apresentam esse nome porque sua carga é aquecida por radiação de chama pela parte superior e laterais do forno “reverberando” sobre o seu conteúdo sendo amplamente utilizados na fusão de materiais não ferrosos e de alumínio (MI, 2019).

Figura 2. Forno reverberatório para refusão de alumínio metálico.

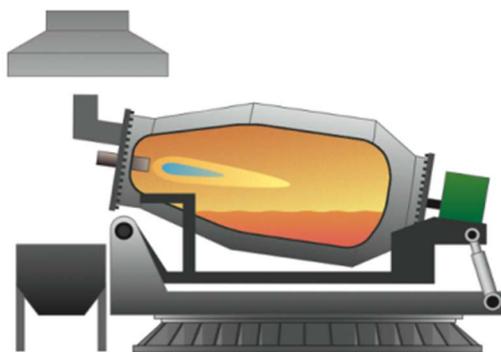


Fonte: Adaptado de Metalurgista Industrial (2019).

Os fornos reverberatórios (Figura 2) apresentam diversas configurações, podendo ser fixos, basculantes, cilíndricos ou retangulares e comportam de 15 ton a 120 ton, utilizando como combustível óleo ou gás natural, além de serem de baixo custo de investimento e operação simples (MI, 2019).

Já os fornos rotativos (Figura 3), se comparados aos de reverberação, apresentam maior eficiência energética e maior produtividade em quantidades menores de ciclos de produção (MI, 2019).

Figura 3. Forno rotativo para refusão do alumínio metálico.



Fonte: Adaptado de Metalurgista Industrial (2019).

A rotação dos fornos rotativos (Figura 3) possibilita que o alumínio receba o calor de forma uniforme. Essa uniformidade pode ser diferenciada dentro da câmara de acordo com os ângulos e o fluxo de ar no forno (METALURGISTA INDUSTRIAL, 2019).

Requisitos energéticos

A produção do alumínio primário é muito intensiva em consumo de energia, sendo que somente o consumo das células eletrolíticas possuem média mundial de 14,2 kWh/Kg de alumínio produzido. De acordo com Schmitz (2014), apenas de 6 a 8% da energia para produção de alumínio primário é necessária para a refusão e refino do alumínio, tornando o processo de reciclagem muito compensador.

A Tabela 1, sintetiza os requisitos energéticos médios para a produção de alumínio primário, utilizando um fator de conversão para a eletricidade de 7600 kJ/kWh, que inclui também a eficiência da usina e a conversão de corrente alternada para corrente contínua (necessário para o processo eletrolítico). O consumo de energia elétrica em MJ/ton de alumínio primário é cerca de 118.563, o que equivale a cerca 70% do total de energia necessária. E utilizando o fator conversão em kWh, o valor de consumo energético é de aproximadamente 15,6 kWh/ton de alumínio primário produzido.

Tabela 1. Energia necessária para a produção de 1 tonelada de alumínio primário.

(MJ/ton da produção do alumínio primário)						
Fonte de Energia	Refino da alumina	Produção de Coque	Produção de Piche	Produção do Anodo	Fundição	Fundição de lingotes
Eletricidade	462	35	0	826	115330	1910
Gás Natural	23336	763	20	696	752	2417
Óleo Destilado		327	8	149	20	698
Óleo Residual	243				5	698
GLP				149	8	465
(Continua)						
Carvão	729					
Gasolina					5	372
Anodos de carbono					17325	
Subtotal	24770	1125	28	1820	133445	6560
Total						167748

Fonte: Adaptado de Schmitz (2014).

A energia total média para a produção do alumínio secundário (Tabela 2), é de 11.160

MJ/ton e equivale a cerca de 6,65% em relação à produção do alumínio primário. Utilizando o mesmo fator de conversão de 7600 kJ/kWh temos que a energia tem um valor de 0,721 kWh/ton de alumínio secundário produzido.

Tabela 2. Energia necessária para produzir 1 tonelada de alumínio secundário.

(MJ/ton da produção do alumínio primário)			
Fonte de Energia	Preparação da Sucata	Refusão / Refino	Tratamento de escória
Eletricidade	2100	2580	800
Gás Natural	900	3960	410
Óleo leve		40	
Óleo denso		40	
GLP		70	
Diesel	200	30	30
Subtotal	3200	6720	1240
Total			11160

Fonte: Adaptado de Schmitz (2014).

Comparando-se os dados de alumínio produzido apresentados na Tabela 1 com o da Tabela 2, tem-se que o consumo energético de 0,721 kWh/ton de alumínio secundário é bem inferior ao do alumínio primário, que é de aproximadamente 15,6 kWh por tonelada de alumínio primário (SCHMITZ, 2014). Esta economia de energia é um item especialmente importante, sendo um dos principais atrativos para a produção do alumínio secundário.

Metodologia

Uma metodologia pode ser entendida como uma sequência de regras básicas, que são realizadas na formação de um conhecimento acerca de um determinado assunto (ALMEIDA, 2006).

No presente trabalho, adota-se o método de revisão sistemática da literatura, seguindo protocolos específicos, com base em sínteses científicas em que toda a pesquisa se dá a partir de uma questão norteadora (GALVÃO, RICARTE, 2019). A recomendação PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) tem como objetivo

auxiliar os autores a aprimorar o relato de revisões sistemáticas, tendo como base um checklist com 27 itens e um fluxograma de quatro etapas (PRISMA GROUP, 2015).

Para a realização deste trabalho foram seguidas as etapas seguintes: (i) definição do tema e da pergunta norteadora; (ii) elaboração dos critérios de inclusão e exclusão dos estudos; (iii) análise e interpretação dos resultados; (iv) apresentação dos resultados.

A pergunta de pesquisa foi elaborada com base na estratégia PI(E)CO, acrônimo para P: Problema, I ou (E): Intervenção, Interesse ou Exposição, C: Comparação, O: *Outcome* (Desfechos/resultados esperados).

Revisão Sistemática da Literatura

A revisão sistemática da literatura é uma modalidade de pesquisa, que segue regras específicas, que procuram dar lógica e entendimento a uma grande quantidade de estudos, principalmente, analisando o que funciona ou não em um determinado contexto. Com foco em reprodutibilidade, apresenta de forma clara os meios e os procedimentos que o estudo se deu, como por exemplo: as bases de dados consultadas, as estratégias de buscas, os critérios de seleção, inclusão e exclusão dos artigos (FRAGELLI, 2020; GALVÃO, RICARTE, 2019).

As revisões sistemáticas devem ser abrangentes e não possuir viés em sua preparação, e diferem das revisões narrativas ou tradicionais, que são amplas e expõe informações de forma geral sobre um determinado tema. Além disso, também se diferem das revisões integrativas, que utiliza diferentes delineamentos na mesma investigação, podendo também expressar a opinião do autor (SILVA *et al.*, 2022). Segundo Galvão e Pereira (2014), as revisões sistemáticas da literatura preveem alguns pontos importantes, estando entre eles: (i) a elaboração de uma pergunta norteadora; (ii) busca na literatura; (iii) seleção dos artigos encontrados nas bases de dados; (iv) extração dos dados; (v) síntese dos dados encontrados, entre outros.

Sendo assim, para a elaboração da pergunta norteadora, foi utilizada a estratégia PI(E)CO (acrônimo para P: Problema, I ou (E): Intervenção, Interesse ou Exposição, C: Comparação, O: Outcome, do inglês (Desfechos/resultados esperados)). Dessa forma, neste trabalho, o Problema consiste em: a metalurgia extrativa de alumínio é um processo que demanda muitos recursos energéticos e naturais; Interesse: verificar se a reciclagem do alumínio metálico é econômico energeticamente e sustentável; Comparação: comparação dos

custos de produção por metalurgia extrativa de alumínio com a reciclagem do alumínio; Desfecho: qual dos dois processos de produção de alumínio metálico apresenta maior viabilidade econômico-energética e sustentabilidade;

Portanto, seguindo essa estratégia foi elaborada a seguinte pergunta de pesquisa: A metalurgia extrativa do alumínio é um processo que demanda elevados recursos energéticos e naturais. Portanto, a reciclagem do alumínio metálico é um caminho que apresenta maior viabilidade econômico-energética e sustentável em comparação com a metalurgia extrativa do alumínio para produção de alumínio primário?

Recomendação ou protocolo Prisma

A recomendação PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), tem a função de ajudar - de maneira sistêmica - os autores a aprimorar o relato de revisões sistemáticas, tendo como base um checklist com 27 itens e um fluxograma de quatro etapas (a íntegra do checklist e do fluxograma podem ser obtidas no site: <https://prismastatement.org>) (PRISMA GROUP, 2015).

Em suma, o checklist está estruturado da seguinte forma: (i) Título; (ii) Resumo; (iii) Introdução; (iv) Métodos; (v) Resultados; (vi) Discussão e (vii) Financiamento; o último item não sendo aplicado neste presente estudo. E o fluxograma com as quatro etapas seguintes: (i) Identificação; (ii) Seleção; (iii) Elegibilidade; (iv) Inclusão.

Parâmetros utilizados

Neste tópico do estudo são esclarecidos os parâmetros utilizados para a busca dos artigos. Foram consultadas três bases de dados: *IEEE Xplore*, *Science Direct* e *Web of Science*. Essas bases foram escolhidas pela ampla variedade e quantidade de artigos, além de terem conteúdos voltados para a área de Engenharia. As buscas nessas bases de dados foram realizadas por meio de palavras-chave utilizando operadores booleanos, AND (E) que resulta em uma adição de termos, onde todas as palavras-chave são incluídas na pesquisa. Os artigos selecionados estão entre um período dos últimos 5 anos, de 2017 a 2022. A relação das palavras-chave e operadores booleanos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Relação das bases de dados, palavras-chave e operadores booleanos.

Restrição de datas	do início do ano 2017 a abril de 2022	
Palavras-Chave	<i>Aluminum; Recycling; Economy</i>	
Base de dados	<i>IEEE Xplore</i>	("All Metadata": <i>recycling</i>) AND ("All Metadata": <i>aluminum</i>) AND ("All Metadata": <i>economy</i>);
	<i>Science Direct</i>	<i>recycling</i> AND <i>aluminum</i> AND <i>economy</i> ;
	<i>Web of Science</i>	(TS=(<i>recycling</i>)) AND TS=(<i>aluminum</i>);

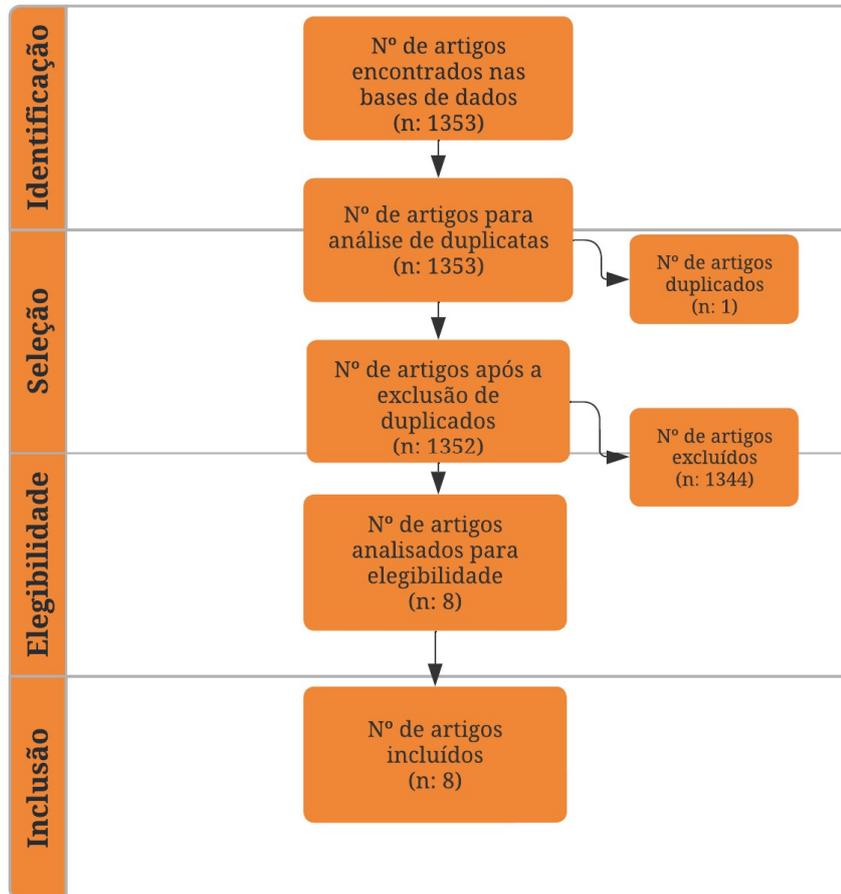
Fonte: dados dos autores (2022)

Com as buscas feitas por meio da combinação das palavras-chave com os operadores booleanos, procedeu-se uma primeira análise pelos títulos dos artigos e resumos, a fim de verificar quais artigos poderiam contribuir com o presente estudo, com base nos critérios de elegibilidade, e a posteriori, da leitura completa dos artigos. Os critérios para seleção dos artigos foram os seguintes: (i) artigos com data de publicação entre os anos de 2017 e 2022; (ii) artigos que contém no título ou resumo os termos das palavras-chaves; (iii) artigos que respondessem de forma total ou parcial a pergunta norteadora; (iv) artigos que discutem a reciclagem do alumínio metálico; (v) artigos que discutem a reciclagem de latas alumínio. Para a exclusão dos artigos, os critérios são: (i) artigos que não respondessem à pergunta norteadora; (ii) artigos que não abordavam o assunto de reciclagem de alumínio metálico; (iii) artigos duplicados.

Resultados e Discussões

As buscas nas bases de dados resultaram em um total de 1353 artigos que, de alguma forma, continham as palavras-chave. Deste total, apenas 8 atenderam aos critérios de inclusão, e que foram importantes para a execução deste trabalho. Apenas um entre o total de artigos estava duplicado, como apresentado na Figura 3 abaixo.

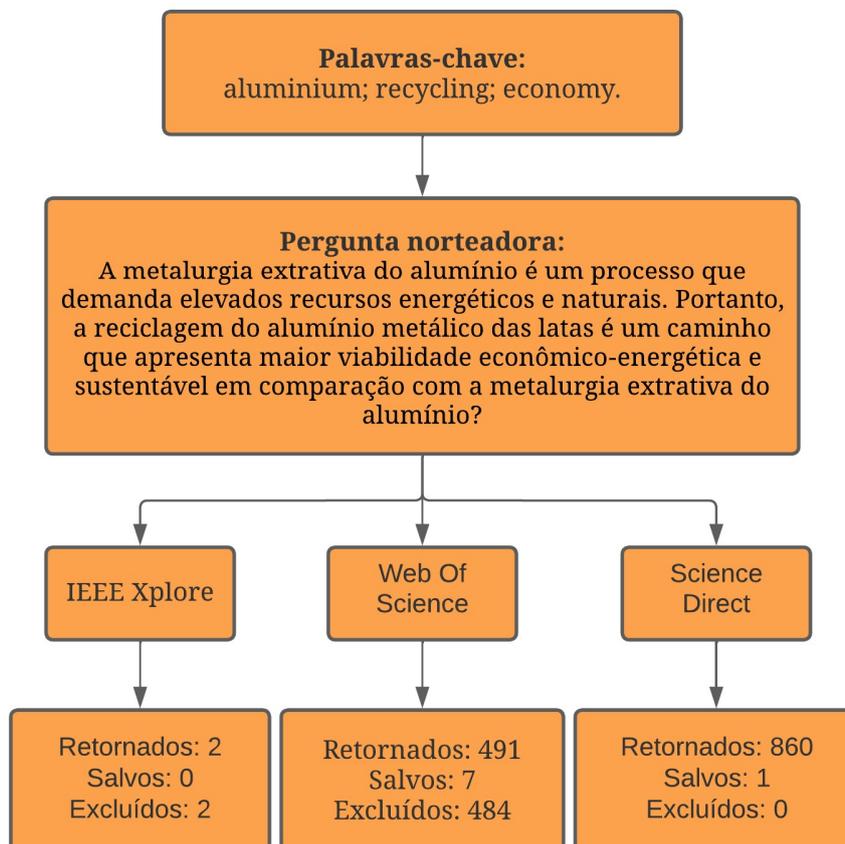
Figura 3. Fluxograma da metodologia Prisma.



Fonte: dados dos autores (2022)

A Figura 3 mostra que o assunto da temática desse trabalho não foi tão pesquisado nos últimos 5 anos, sendo incluídos através dos critérios apenas 8 estudos. Na Figura 8 abaixo, destacou-se quantos artigos foram encontrados em cada base de dados, e quantos de cada base foram incluídos na realização do presente trabalho.

Figura 4. Relação entre bases de dados e artigos encontrados.



Fonte: dados dos autores (2022)

A base de dados que houve mais resultado em relação a inclusão de artigos foi a *Web of Science*, com 7 artigos incluídos de um total de 491, a segunda foi a *Science Direct*, com apenas 1 artigo incluído de um montante de 860 artigos. A base de dados *IEEE Xplore* retornou apenas 2 resultados, destes não sendo incluído nenhum.

Para que o risco de viés na coleta dos dados fosse reduzido e os estudos selecionados tivessem maior qualidade, foram feitos vários testes com combinações de palavras-chave, e leitura na íntegra dos artigos. Dessa maneira, a escolha e verificação das bases de dados, auxiliada pelos orientadores, seguiu essas determinações citadas anteriormente.

A Tabela 4, mostra a relação dos artigos incluídos em cada base, com título, autores e ano, respectivamente.

Tabela 4. Artigos incluídos por meio dos critérios adotados seguindo a recomendação PRISMA.

Base	Título	Autor	Ano
Science Direct	<i>Economic and Environmental Evaluation of Aluminum Recycling based on a Belgian Case Study</i>	Vi Kie Soo, Jef R. Peeters, Paul Compston, Matthew Doolan, Joost R. Duflou	2019
Web of Science	<i>Review of measures for improved energy efficiency in production-related processes in the aluminum industry – From electrolysis to recycling</i>	Joakim Haraldsson, Maria T. Johansson	2018
Web of Science	<i>How to increase recycling rates. The case of aluminum packaging in Austria</i>	Rainer Warrings, Johann Fellner	2020
Web of Science	<i>A-242 Aluminum Alloy Foams Manufacture from the Recycling of Beverage Cans</i>	Nallely Montserrat Trejo Rivera, Jesús Torres, Alfredo Flores Valdés	2019
Web of Science	<i>Life cycle assessment of beverage packaging</i>	Alice Brock, Ian Williams	2020
Web of Science	<i>Recycling of aluminum from mixed household waste</i>	Sigvart Eggen, Kurt Sandaunet, Leiv Kolbeinsen, Anne Kvithyld	2019
Web of Science	<i>The beginning and the end of the aluminum value chain</i>	Leiv Kolbeinsen	2020
Web of Science	<i>Sustainable aluminum recycling of end-of-life products: A joining techniques perspective</i>	Vi Kie Soo, Jef Peeters, Dimos Paraskevas, Paul Compston, Matthew Doolan, Joost R. Duflou	2017

Fonte: Dados do autor.

O artigo *Economic and Environmental Evaluation of Aluminum Recycling based on a Belgian Case Study* (2019) apresenta um estudo relacionado à crescente busca pelo Alumínio, sendo um fator para ocasionar a reciclagem, considerando a própria necessidade do produto e a diminuição dos impactos negativos, sendo eles ambientais e econômicos. No entanto, por normalmente as ligas terem em sua composição impurezas, como ferro, silício e cobre, existem adversidades que devem ser analisadas, tanto no processo de produção primária do alumínio, quanto na secundária que é o reaproveitamento dos materiais compostos pelo metal. Para a diminuição destes impactos, analisa-se a carga ambiental, como por exemplo, para a reciclagem das ligas. Evidencia-se que as políticas afetam diretamente na busca e compra do produto e que a lucratividade impulsiona as produções.

No artigo de Haraldsson e Johansson (2018), são evidenciados os impactos ambientais e as medidas para solucionar o problema das emissões de gás do efeito estufa na indústria do

alumínio até o ano de 2050. No entanto, também é mostrada a crescente procura pelo Alumínio até este mesmo ano. Com isso, objetiva-se mostrar as medidas que podem ser tomadas no processo produtivo do “Alumínio primário” e do “Alumínio secundário” para se obter maior eficiência energética. Cita-se a importância da eletrólise dentro do processo do alumínio primário, considerando a sua intensidade energética e, a partir desta explicação, entende-se a necessidade de estudos com esses embasamentos para analisar as medidas aplicáveis dentro do processo de reciclagem do Alumínio. Um fator determinante é assimilar que o Alumínio tem a capacidade de ser reciclado ou passar pela eletrólise. A eletrólise é um processamento com medidas em evolução, que oferecem elevadas cargas energéticas. Já na reciclagem, as altas cargas energéticas podem ser adquiridas, mas considerando o material reciclado.

Haraldsson e Johansson (2018) ainda ressaltam que o Alumínio secundário é um método capaz de suprir as demandas, pois a utilização de energia é muito inferior comparada a do Alumínio primário. A produção de alumínio secundário requer apenas 5% da energia em comparação ao alumínio primário. Isso será importante no que diz respeito às preocupações ambientais e econômicas, bem como o fortalecimento da competitividade. O foco no aumento da produção secundária e nos rendimentos de recuperação, bem como na redução do uso de energia na produção secundária, será fundamental. O processamento de alumínio com extrusão, laminação, fundição (conformação e fundição de lingotes, placas e tarugos), tratamento térmico e anodização também serão beneficiados com a eficiência energética. Esses processos apresentaram menor número de medidas, o que pode ser explicado pelo fato de que, em certa medida, esses processos não demandam tanta energia quando comparados, por exemplo, à eletrólise.

Para Warrings e Fellner (2020) para o reaproveitamento do Alumínio proveniente de embalagens devem ser analisados pontos referentes aos custos e aos processos necessários para alcançar proporções adequadas na reciclagem. Com isso, estuda-se tratamento e recuperação de materiais, bem como na organização para o recolhimento de resíduos. Entende-se que o método que apresenta melhorias significativas é o de recuperação de materiais. Um importante aliado para alcançar o desenvolvimento do processo são as coletas, mas esse meio não minimiza a importância da recuperação dos materiais. Dessa maneira, percebe-se que a associação de medidas pode auxiliar nos objetivos locais, desde a melhoria na reciclagem até a aplicação de métodos economicamente viáveis, com novos materiais ou variados processos.

Como complemento, no artigo *Aluminum Alloy Foams Manufacture from the Recycling of Beverage Cans* (2019) é apresentado sobre a reciclagem do Alumínio, sendo um material obtido através de latas. É mostrado o método por trás deste processo e todos os componentes, bem como as frações, propriedades e características. A partir dessa análise, é possível constatar que a reciclagem de latas é um processo com viabilidade, porque as espumas compostas por ligas de Alumínio são obtidas e apresentam qualidades similares aos produtos obtidos através dos metais puros.

Brock e William (2020) expõem uma comparação a respeito da utilização dos materiais em embalagens e qual apresenta maior viabilidade, seja para efetivar a diminuição dos impactos ambientais ou para utilizar métodos economicamente mais viáveis. Nota-se que o plástico e o vidro são insumos muito utilizados para a fabricação de embalagens, e são bastante agressivos ao meio ambiente, considerando o tempo de decomposição. Enquanto as embalagens compostas por Alumínio possuem maior capacidade de minimizar os impactos no meio ambiente, devido a possibilidade maior de reciclagem e reaproveitamento. Dessa forma, o trabalho mostra uma análise em um software sobre o ciclo de vida dos materiais. E, percebe-se que para cada tipo de conteúdo líquido, existem embalagens com menores impactos e um dos destaques é para as bebidas pressurizadas. A lata de Alumínio pode ser 100% reciclada e apresenta menor impacto ao meio ambiente em relação aos outros materiais estudados.

Kvithyld *et al* (2019) ressaltam a aplicabilidade do Alumínio em embalagens, devido às suas propriedades e possibilidade de reciclagem. Com isso, são apresentados os métodos para realização da reciclagem de resíduos que são compostos por Alumínio, todo processo aplicado, a qualidade e rendimento do produto. Nesta pesquisa, são analisados três materiais originados de resíduos compostos pelo Alumínio e qual a perspectiva quanto à reciclagem. A observação de um dos materiais, sendo latas proveniente de resíduos domésticos, comprova que estas são recicláveis e apresentam grandes quantidades de rendimento. Os processos aplicados na reciclagem das latas têm a capacidade de demonstrar a qualidade e as proporções do material obtido.

Matthew *et al.* (2017) confirma que a busca pelo Alumínio está em crescente em escala global e as medidas sustentáveis para gerenciar esta produção são de grande relevância, considerando desde a extração até o descarte. A partir dessa gestão são aplicados métodos de reciclagem, nos quais consistem em reaproveitar materiais compostos por alumínio e os

subprodutos, que seriam descartados. Comparando os processos para a obtenção do “Alumínio primário” com o “Alumínio secundário”, os impactos são reduzidos, considerando o menor consumo de energia e menores taxas de resíduos.

O autor Kolbeinsen (2020) apresenta a cronologia histórica do Alumínio, falando até a produção atual deste metal. Sendo assim, o refinamento da alumina, na maioria das indústrias, é realizado através do processo Bayer. Existem especificações que influenciam diretamente na qualidade do produto, como a bauxita e a quantidade de aditivos. Evidencia-se que o processo Bayer, provoca resíduos conhecidos como resíduos de Bauxita ou *Red Mud*, considerando as características e a composição da escória. O *International Institute of Aluminum* avalia, contando a partir do ano de 1986, que cerca de um milhão de toneladas de Alumínio foi produzido e 75% desta produção ainda é utilizada em edifícios, estruturas, cabos e equipamentos elétricos e transportes. Os resíduos são coletados periodicamente, como é visto com os materiais recicláveis descartados das nossas casas. Essa ação influencia diretamente nas questões econômicas e ambientais, pois a partir de uma tonelada de latas de bebidas descartadas, pode-se economizar oito toneladas de bauxita, quatro quilos de fluoretos e 14 kWh de eletricidade.

É muito importante existir estudos que comprovem a necessidade da reciclagem, pois é uma ação que pode ter um aproveitamento aproximado dos 100%. São sequências específicas que geram ganhos gerais para a obtenção de materiais de qualidade com menores taxas de contaminações. Essa reciclagem deve contemplar a variação de matéria-prima que seja composta por Alumínio e também a produção de subprodutos que podem ser reaproveitados.

Percebe-se assim, que o tema deste trabalho é de suma importância para a engenharia, uma vez que a procura e o uso do alumínio metálico vem crescendo cada vez mais, como já evidenciado na Figura 4 e nos estudos analisados nesta revisão sistemática da literatura. Entretanto, observa-se que é baixo o número de estudos atuais (últimos 5 anos) que abordam essa temática, sendo que neste trabalho apenas 8 artigos foram incluídos respeitando-se os critérios de seleção.

Considerações finais

Com base na revisão sistemática apresentada neste trabalho, são evidenciados os fatores determinantes para a produção do alumínio secundário em alinhamento com a produção

primária.

Pelos artigos selecionados obteve-se a resposta ao objetivo e a pergunta principal. O panorama atual da temática sobre a produção de alumínio secundário apresenta que ele é viável, e bem econômico em relação à produção de alumínio primário, bem como se alinha aos denominados processos de produção sustentáveis. Os resultados foram embasados na literatura científica internacional sobre a produção de alumínio secundário para o período entre os anos de 2017 e 2022. Os artigos 7 artigos incluídos, com suas publicações dentro do período de 2017 a 2022, oriundos da conceituada base de dados científica internacional *Web of Science*, destacam que a produção de alumínio secundário é viável e atrativa ambiental, econômica e energeticamente em comparação com a metalurgia extrativa para produção de alumínio primário. Outro ponto de destaque, no conteúdo trazido pelos artigos incluídos, é que a reciclagem do alumínio metálico auxilia na minimização dos impactos ambientais, visto que o alto consumo de energia não renovável na produção do alumínio primário e a grande devastação das áreas nas quais ocorrem a extração da bauxita e descarte de grandes volumes de rejeitos (lama vermelha) são grandes causadores de impactos ambientais negativos. Isto provoca um alto custo de produção desde a extração até o alumínio metálico já produzido. Assim, a reciclagem do alumínio metálico, mostra-se viável do ponto de vista energético e econômico. Conseqüentemente, os impactos ambientais são reduzidos.

Os resultados obtidos são muito importantes, pois trazem informações e estudos que comprovam a necessidade e atestam a viabilidade da reciclagem na produção de alumínio secundário. Isso leva às questões como sustentabilidade e gestão sustentável, quando se tem o alumínio metálico que pode ter, assim, um aproveitamento aproximado dos 100%. A produção de alumínio secundário se torna sustentável ao consumir as matérias-primas recicladas e reduzir, eliminar ou reaproveitar os resíduos sólidos gerados. Os processos e gestões sustentáveis oriundos da produção de alumínio secundário envolvem, assim, a reciclagem de materiais pós-consumo e de pós-venda, com qualidade e preços competitivos, aliado a iniciativas de prevenção ao meio ambiente e em conformidade com a legislação ambiental. São conseqüências específicas da gestão de processos sustentáveis, que geram ganhos financeiros reais, a obtenção de materiais de qualidade com menores taxas de contaminações e a melhoria contínua dos processos produtivos de reciclagem. Essa reciclagem deve contemplar a variação de matéria-prima que seja composta por alumínio e também a produção de subprodutos que

podem ser reaproveitados.

Percebe-se assim, que o tema deste trabalho é de suma importância para a engenharia, uma vez que a procura e o uso do alumínio metálico vem crescendo cada vez mais, como já evidenciado na Figura 4 e nos estudos analisados nesta revisão sistemática da literatura. Entretanto, observa-se que é baixo o número de estudos atuais (últimos 5 anos) que abordam essa temática, sendo que neste trabalho apenas 8 artigos foram incluídos respeitando-se os critérios de seleção. Os termos mais utilizados nas palavras-chave dos artigos selecionados foram: *Recycling*, *Aluminium*, *Economy*, *Energy*, *Cycle* e *Efficiency*. Assim, observa-se comparando os termos que foram usados nas bases de dados para a triagem dos artigos (*Aluminium*, *Recycling* e *Economy*), com as palavras-chave que mais se destacaram nos estudos, que todos os termos supracitados foram os que mais se repetiram.

Como proposta de continuidade da temática apresentada, propõe-se um estudo *in loco* das tecnologias aplicadas em separação e reciclagem para a produção de “Alumínio Secundário” do Brasil. Complementando esta proposta, sugere-se também uma comparação das tecnologias implementadas de reciclagem de alumínio no Brasil com as das principais economias mundiais produtoras de “Alumínio secundário”.

Referências

ALMEIDA, Maurício B. Noções básicas sobre metodologia de pesquisa científica. **DTGI ECI/UFMG**, 2006. Disponível em: <<https://mba.eci.ufmg.br/downloads/metodologia.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2023.

BARBOSA, Mariana Oliveira; SILVA, Priscilla Chantal Duarte; TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez. Aço verde e a sustentabilidade na produção de ferro-gusa. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, v. 9, p. e022018-e022018, 2022. Disponível em: <<https://periodicoscientificos.itp.ifsp.edu.br/index.php/rbic/article/view/720>>. Acesso em: 07 jun. 2022.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT. **Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Estudo da Competitividade da Indústria Brasileira**. Campinas, 1993. 129p. Disponível em: <<http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/ci000121.pdf>>. Acesso em: 07 jun. 2022.

CARVALHO, Raquel Aparecida e SHIGUNOV NETO, Alexandre. Uma visão da pesquisa sobre formação de professores no Brasil presente em periódicos da área de educação: análise da produção acadêmica entre os anos de 2000 e 2017. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, v. 5, n. 3, 2018. Disponível em: <<https://periodicos.itp.ifsp.edu.br/index.php/IC/article/view/1254/0>>. Acesso em 11 de out. 2022.

CALLISTER JR, William D.; RETHWISCH, David G. **Callister's materials science and engineering**. John Wiley & Sons, 2020. Disponível em: <<https://www.wiley.com/en-gb/Callister%27s+Materials+Science+and+Engineering%2C+10th+Edition%2C+Global+Edition-p-9781119453918>>. Acesso em 14 de fev. 2023.

FRAGELLI, Thaís Branquinho Oliveira. Honório HM, Santiago JF. **Fundamentos das Revisões Sistemáticas em Odontologia**. São Paulo: Quintessence Editora; 2018. 2020. Disponível em: <<https://www.scielo.org/article/csc/2020.v25n3/1167-1168/pt/>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

GALVÃO, Taís Freire; PEREIRA, Mauricio Gomes. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 183- 184, mar. 2014. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5123/s1679-49742014000100018>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

GALVÃO, Maria Cristiane Barbosa; RICARTE, Ivan Luiz Marques. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA: conceituação, produção e publicação. **Logeion: Filosofia da Informação**, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 57-73, 15 set. 2019. Logeion Filosofia da Informacao. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.21728/logeion.2019v6n1.p57-73>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

GALVÃO, Taís Freire; PEREIRA, Mauricio Gomes. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 183-184, mar. 2014. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5123/s1679-49742014000100018>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

GRIMES, Sue; DONALDSON, John; GOMEZ, Gabriel Cebrian. Report on the environmental benefits of recycling. **Commissioned by the Bureau of International Recycling**, p. 23-24, 2008. Disponível em: <https://www.mgg-recycling.com/wp-content/uploads/2013/06/BIR_CO2_report.pdf>. Acesso em 14 de fev. 2023.

HARALDSSON, Joakim; JOHANSSON, Maria T. Review of measures for improved energy efficiency in production-related processes in the aluminium industry – From electrolysis to recycling. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 93, p. 525-548, out. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.043>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

KOLBEINSEN, Leiv. The beginning and the end of the aluminium value chain. **Matériaux & Techniques**, [S.L.], v. 108, n. 5-6, p. 506, 2020. EDP Sciences. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1051/mattech/2021008>>. Acesso em 20 de jul. 2022.

METALURGISTA INDUSTRIAL. **A produção de alumínio secundário: parte i reciclagem e fusão. parte i reciclagem e fusão.** 2019. Disponível em: <<http://www.metalurgistaindustrial.com.br/adm/upload/TecProc/2019620222248o.pdf>>. Acesso em: 17 jun. 2022.

PADAMATA, Sai Krishna; YASINSKIY, Andrey; POLYAKOV, Peter. A review of secondary aluminum production and its byproducts. **JOM**, v. 73, n. 9, p. 2603-2614, 2021. Disponível em: <<https://periodicos.itp.ifsp.edu.br/index.php/IC/article/view/1254/0>>. Acesso em 11 de out. 2022.

PRISMA GROUP. Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises: A recomendação PRISMA. **Epidemiol. Serv. Saúde, Brasília**, v. 24, n. 2, p. 335-342, jun. 2015. Disponível em <http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-49742015000200017&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 28 jul. 2022.

SCHMITZ, Christoph. **Handbook of Aluminium Recycling: mechanical preparation | metallurgical processing | heat treatment.** 2. ed. Huysenallee: Vulkan Verlag, 2014. 560 p. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=WvT2Oef8DskC&oi=fnd&pg=PR4&dq=SCHMITZ,+Christoph.+Handbook+of+Aluminium+Recycling&ots=fUw-L2zb88&sig=qSTz9Rp0aSxStDgVnSh3iBkOd0U>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

SHACKELFORD, James F. **Ciência dos materiais.** 6 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. Disponível em: <https://www.estantevirtual.com.br/livros/james-f-shackelford/ciencia-dos-materiais-6%C2%AA-edicao/3930861810?show_suggestion=0>. Acesso em 14 de fev. 2023.

SILVA, Priscilla Chantal Duarte et al. The Approach to Fire Safety in the Curriculum Map-Matrix of Engineering Courses at a Federal University According to The Parameters of law 13.425: a Systematic Review. **Revista de Gestão Social e Ambiental-RGSA**, v. 16, n. 2, p. e02959-e02959, 2022. Disponível em: <<https://openaccesspublications.org/index.php/rgsa/article/view/2959>>. Acesso em 14 de fev. 2023.

SOO, VI Kie; PEETERS, Jef; PARASKEVAS, Dimos; COMPSTON, Paul; DOOLAN, Matthew; DUFLOU, Joost R. Sustainable aluminium recycling of end-of-life products: a joining techniques perspective. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 178, p. 119-132, mar. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.235>> Acesso em: 28 jul. 2022.

STATISTA. Metals & Electronics-Metals: **Global end use of primary aluminum by sector 2020**, Published by Statista Research Department, Jan 5, 2023. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/280983/share-of-aluminum-consumption-by-sector/>> Acesso em: 14 FEV. 2023.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Compilation of air pollutant emission factors: Volume I: Stationary point and area sources, 1995. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/oldeditions/5th_edition/ap42_5thed_orig.pdf> Acesso em: 14 fev. 2023.

WALLACE, G. Production of secondary aluminium. **In:** LUMLEY, Roger (Ed.). Fundamentals of aluminium metallurgy: production, processing and applications. Elsevier, 2010. Disponível em: <<https://shop.elsevier.com/books/fundamentals-of-aluminium-metallurgy/lumley/978-1-84569-654-2>> Acesso em: 14 fev. 2023.

ZORZELA, Liliane; LOKE, Yoon K; IOANNIDIS, John P; GOLDBER, Su; SANTAGUIDA, Pasqualina; ALTMAN, Douglas G; MOHER, David; VOHRA, Sunita. **PRISMA harms checklist: improving harms reporting in systematic reviews.** Bmj, [S.L.], p. 157, 1 fev. 2016. BMJ. <http://dx.doi.org/10.1136/bmj.i157>. Disponível em: <<https://www.bmj.com/content/352/bmj.i157>>. Acesso em: 20 jul. 2022.