





Desafios e oportunidades na reutilização de terra diatomácea na indústria do alumínio

Daiany Cristiny Moreira Lemes ¹, Igor Yannick das Neves Vasconcellos Brandão ², Raquel Aparecida Domingues ³, Danielle Maass ^{4*}

¹Mestre em Inovação Tecnológica, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, Brasil.

²Mestre em Biotecnologia, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, Brasil.

³Doutora em Físico-Química, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, Brasil.

⁴Doutora em Engenharia Química, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, Brasil. (*Autor correspondente: danielle.maass@unifesp.br)

Histórico do Artigo: Submetido em: 02/07/2024 – Revisado em: 15/08/2024 – Aceito em: 28/12/2024

RESUMO

A crescente preocupação com a sustentabilidade industrial impulsiona o desenvolvimento de novas metodologias para o reaproveitamento e a revalorização de resíduos. A simples disposição em aterros sanitários gera custos e impactos ambientais, tornando urgente a busca por soluções alternativas. A terra diatomácea, resíduo comum na indústria do alumínio, apresenta potencial para reutilização na etapa de laminação a frio, com benefícios socioeconômicos e ambientais. Nesse sentido, este estudo buscou realizar uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para identificar, avaliar e sintetizar as metodologias disponíveis para a reutilização da terra diatomácea na laminação a frio do alumínio. Foram selecionados artigos, publicados entre 2010 e 2021, em quatro das principais bases de dados. A seleção final resultou em 20 artigos, após a aplicação de critérios de relevância. As metodologias descritas nos artigos foram avaliadas e discutidas criticamente. A análise dos artigos revelou que a reutilização da terra diatomácea na laminação a frio do alumínio ainda é um tema incipiente, com grande potencial para desenvolvimento. As metodologias existentes demonstram a viabilidade técnica da reutilização, com resultados promissores em termos de qualidade do produto final, redução de custos e minimização de impactos ambientais. Embora a pesquisa esteja em estágio inicial, os resultados indicam que a reutilização da terra diatomácea na indústria do alumínio pode ser uma alternativa sustentável e economicamente viável. São necessários mais estudos para otimizar as metodologias existentes e explorar novas aplicações, tornando o investimento em pesquisa e desenvolvimento crucial para seu aprimoramento e viabilização em larga escala.

Palavras-Chaves: Alumínio, Laminação a frio, Sustentabilidade, Reutilização de resíduos, Terra Diatomácea.

Challenges and opportunities in the reuse of diatomaceous earth in the aluminum industry

ABSTRACT

The increasing focus on industrial sustainability has driven the development of novel methodologies for waste reuse and valorization. Traditional waste disposal methods, such as landfilling, pose significant economic and environmental burdens, necessitating the exploration of alternative solutions. Diatomaceous earth, a common waste product in the aluminum industry, holds promising potential for reuse in the cold rolling stage, offering both socioeconomic and environmental benefits. To address this, a Systematic Literature Review (SLR) was conducted to identify, evaluate, and synthesize the methodologies available for diatomaceous earth reuse in aluminum cold rolling. Articles published between 2010 and 2021 were retrieved from four major databases. Following the application of relevance criteria, 20 articles were selected for in-depth analysis. The methodologies described in these articles were critically evaluated and discussed. The analysis revealed that diatomaceous earth reuse in aluminum cold rolling is still an emerging field with immense development potential. Existing methodologies demonstrate the technical feasibility of reuse, with promising results in terms of final product quality, cost reduction, and environmental impact minimization. While research is in its early stages, the findings indicate that diatomaceous earth reuse in the aluminum industry can be a sustainable and economically viable alternative. Further studies are warranted to optimize existing methodologies and explore new applications. The reuse of this waste product in the aluminum

Lemes, D.C.M. et al. (2024). Desafios e oportunidades na reutilização de terra diatomácea na indústria do alumínio. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.12, n.3, p.36-50.



industry presents a promising opportunity, making investment in research and development crucial for refining existing methodologies and enabling large-scale implementation of this practice.

Keywords: Aluminum, Cold roll mill, Sustainability, Reuse of waste, Diatomaceous Earth.

Retos y oportunidades en la reutilización de la tierra de diatomeas en la industria del aluminio

RESUMEN

El creciente enfoque en la sostenibilidad industrial ha impulsado el desarrollo de nuevas metodologías para la reutilización y valorización de residuos. Los métodos tradicionales de eliminación de residuos, como el depósito en vertederos, suponen una importante carga económica y ambiental, lo que hace necesario explorar soluciones alternativas. La tierra diatomácea, un producto residual común en la industria del aluminio, tiene un potencial prometedor para su reutilización en la etapa de laminación en frío, ofreciendo beneficios tanto socioeconómicos como ambientales. Para abordar esto, se realizó una Revisión Sistemática de Literatura (SLR) para identificar y evaluar las metodologías disponibles para la reutilización de tierra diatomácea en la laminación en frío de aluminio. Se recuperaron artículos publicados entre 2010 y 2021 de cuatro bases de datos principales. Siguiendo la aplicación de criterios de relevancia, se seleccionaron 20 artículos para un análisis profundo. Las metodologías descritas en estos artículos fueron evaluadas y discutidas críticamente. El análisis reveló que la reutilización de tierra diatomácea en la laminación en frío de aluminio es todavía un campo emergente con un inmenso potencial de desarrollo. Las metodologías existentes demuestran la viabilidad técnica de la reutilización, con resultados prometedores en términos de calidad del producto final, reducción de costos y minimización del impacto ambiental. Si bien la investigación se encuentra en sus primeras etapas, los hallazgos indican que la reutilización de tierra diatomácea en la industria del aluminio puede ser una alternativa sostenible y económicamente viable. Se justifican estudios adicionales para optimizar las metodologías existentes y explorar nuevas aplicaciones.

Palabras clave: Aluminio, Laminador en frío, Sostenibilidad, Reutilización de residuos, Tierra de diatomeas.

1. Introdução

Quando o alumínio era pouco conhecido e tinha um custo elevado de produção, suas primeiras aplicações foram limitadas a trabalhos luxuosos, como em estatuetas e placas comemorativas. Com o desenvolvimento dos processos industriais, o metal passou a estar disponível em maiores quantidades (embora ainda medido em quilos ao invés de toneladas), e começou a ser usado tanto na decoração Vitoriana como em bandejas e escovas de cabelo ornamentais (ABAL, 2004). No final do século XIX, com o aumento da produção e preços menores, foi sendo gradualmente utilizado em utensílios de cozinha e em alguns dos primeiros automóveis que já possuíam painéis revestidos de alumínio. Já no início do século XX, as indústrias de alumínio começaram a trabalhar na produção de ligas de alumínio com propriedades mecânicas mais elevadas (ABAL, 1994).

Os dados disponíveis de produção do alumínio em amplitude global trazem a China (3.280.000 t), África (135.000 t), América do Norte (338.000 t), América do Sul (93.000 t), Ásia (sem a China) (363.000 t), Europa Ocidental (281.000 t) como sendo os continentes com maior fabricação do metal, com um aumento no mercado em comparação aos anos anteriores (Prosser, 2021). Mesmo estando em sexto lugar no ranking global, o cenário no Brasil está crescente, conforme dados da Associação Brasileira do Alumínio. Em 2022, a produção de alumínio atingiu 810,9 Mt, já em 2023 foram produzidas 1021,7 Mt, o que representa um crescimento de 26% (ABAL, 2023).

Para a produção de lâminas de alumínio é necessário submeter a liga de alumínio a um processo de transformação mecânica (laminagens a quente e a frio), que consiste na redução da seção transversal por compressão do metal por meio da passagem entre dois cilindros de aço ou ferro fundido com eixos paralelos que giram em torno de si mesmos. Especificamente na laminação a frio, há a geração de calor durante o processo de redução de espessura devido ao contato entre os cilindros metálicos e a lâmina de alumínio. Assim, para dirimir os efeitos do calor e atrito, o óleo de laminação é utilizado. Após seu uso, o óleo de laminação contém, entre outras coisas, resíduos de alumínio, conhecidos como “finos de alumínio”, e, para que possa ser

reutilizado no processo de laminação a frio, precisa ser filtrado (ABAL, 2006).

A filtração do óleo lubrificante advindo do processo de laminação a frio é realizada utilizando terra diatomácea como meio filtrante. A terra diatomácea é um material leve e de baixa massa específica aparente, cuja coloração varia do branco ao cinza escuro, sendo constituída, principalmente, por sílica opalina (58 a 91% m/m) e impurezas, tais como, argilominerais, matéria orgânica, hidróxidos, areia quartzosa e carbonatos de cálcio e de magnésio (Souza et al., 2003). O que torna esse material interessante como meio filtrante é sua capacidade absorviva, uma vez que é capaz de absorver uma quantidade de água igual ao seu peso (Braga et al., 2017). Todavia, como consequência da exposição contínua ao processo filtrante, as terras diatomáceas vão perdendo sua eficiência e acabam tendo que ser destinadas diretamente a aterros sanitários adequados (Goulart et al., 2011; ABAL, 2006), pois, segundo a norma NBR 10.004/04, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), esse resíduo é classificado como Classe I (perigoso), devido às suas características de inflamabilidade, uma vez que a terra diatomácea absorve óleo de laminação durante o processo de filtração.

Os resíduos de terra diatomácea demonstram forte implicação ambiental e necessitam de uma extensa área para seu armazenamento. Especificamente na indústria do alumínio, as terras diatomáceas representam diretamente uma das maiores dificuldades nesse sentido, pois são utilizadas continuamente em grandes quantidades na filtração residual (Almeida et al., 2008). Por exemplo, em pesquisa interna na empresa Novelis do Brasil, localizada em Pindamonhangaba, São Paulo, no ano de 2021, foi constatado que o consumo das terras diatomáceas, na etapa de filtração do laminador a frio, era de 1.601 tonelada/mês (Lemes, 2023). A quantidade representou um custo anual de, aproximadamente, R\$ 70.000,00, sendo o dispêndio referente ao descarte final de, aproximadamente, R\$ 4.400,00/ton. Assim sendo, processos de tratamento e/ou recuperação de terras diatomáceas se encaixam diretamente nas questões abordadas no conceito de governança ambiental, social e corporativa, mais conhecido por sua nomenclatura em inglês *Environmental, Social, and corporate Governance* (ESG). No Brasil, somente nas últimas décadas é que as adversidades sobre o mote de poluição ambiental, cuja uma das causas principais é a geração dos resíduos de origem industrial, têm estimulado forte relevância. A aprovação da lei 12.305/2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos) trouxe a responsabilidade distribuída aos geradores de resíduos no intuito de se fazer a logística reversa dos pós-consumo. Além disso, esta lei destaca o reconhecimento dos resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis, como materiais que proporcionam um valor socioeconômico (Szigeth e Antenor, 2020).

Geralmente, as metodologias de recuperação e/ou reutilização de resíduos industriais, como as terras diatomáceas, apresentam baixos custos, o que favorece e estimula a economia nas bases de recursos naturais e mitigam a produção deste tipo de detrito (Horsth et al., 2020) Por outro lado, o dispêndio financeiro, na forma de descarte dos rejeitos industriais, na estrutura ambientalmente amigável ainda são muito altos (Goulart et al., 2011). Segundo Martins (2010), se faz necessário a implementação e estudos de novas tecnologias para diminuir a quantidade de produção residual nas indústrias, bem como tornar esse tipo de ação primordial para que se possa ter evoluções e resultados significantes ajustados ao conceito de sustentabilidade.

Nesse sentido, realizou-se uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) acerca das metodologias que visem a reutilização de terras diatomáceas na etapa de laminação a frio, discutindo a confiabilidade e segurança de cada processo, bem como os ganhos ambientais e socioeconômicos.

2. Material e Métodos

A fim de se obter artigos científicos relacionados à recuperação e/ou reutilização de terras diatomáceas na indústria do alumínio, foram realizadas buscas nas plataformas dados Science Direct, Scopus, Scielo e Springerlink. A elaboração da RSL seguiu a metodologia descrita por (Scannavino et al., 2017), conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Elaboração da RSL.
Table 1 – Elaboration of SLR.

Etapa	Descrição
Planejamento	Descrição do protocolo da revisão; elaboração das questões a serem respondidas; determinar os critérios de inclusão e exclusão dos artigos encontrados, bem como os termos de busca apropriados.
Condução	Aplicação dos termos de busca nas plataformas de dados e os seleção dos artigos por meio dos critérios de inclusão/exclusão.
Relatório	Extração dos conceitos e discussão dos artigos científicos selecionados por meio das etapas anteriores.

2.1 Fase de planejamento

Na fase de planejamento da RSL, verificaram-se quais são os procedimentos, metodologias e técnicas mais eficientes para reutilização das terras diatomáceas. Para tal, foram criadas as questões da pesquisa que facilitam a direcionamento da RSL. Para atingirmos o propósito descrito na seção anterior as perguntas da pesquisa estão descritas no Quadro 2. Para a definição das terminologias de pesquisa, realizaram-se vários testes de associação de palavras nas bases de busca descritas anteriormente, sendo definidos os termos apresentados na Quadro 3.

Quadro 2 – Questões de pesquisa e motivações utilizadas nesta RSL.
Table 2 – Research questions used in this SLR.

Questão de pesquisa	Motivação
QP1: Terras diatomáceas podem ser reutilizadas em processos industriais?	Explorar as mais diversas formas e possibilidades de se reutilizar as terras diatomáceas dentro da indústria.
QP2: É possível tratar terras diatomáceas em processos de laminação a frio?	Verificar a aplicabilidade em demais processos de laminação do uso da terra, visando o ganho da sustentabilidade na indústria.
QP3: A reutilização de terras diatomáceas pode prejudicar a qualidade das lâminas de alumínio produzidas?	Estudar as propriedades físico-químicas do óleo lubrificante, que é filtrado através das terras diatomáceas, e verificar se existe alguma variação em sua composição que possa comprometer a integridade das lâminas.
QP4: Existem metodologias aplicadas na reutilização de terras diatomáceas na indústria do alumínio?	Mapear a existência de metodologias, testes e ensaios em escala industrial da reutilização das terras, aspirando o benefício sustentável do processo.

Quadro 3 - Termos de busca utilizados em cada base de dados.

Table 3 - Search terms used in each database

Base de dados	Termos de busca
Scielo e Portal Capes	"Industria do Alumínio" AND "Laminação a Frio" AND "Terra Diatomácea" OR "Resíduo de terra diatomácea" OR "Recuperação de terra diatomácea" OR "Reutilização de terra de diatomácea"; "Aluminium Industry" AND "Cold Rolling" AND "Diatomaceous Earth" OR "Diatomaceous Earth Waste" OR "Diatomaceous Earth Recovery" OR "Diatomaceous Earth Reuse"
Springerlink, Science Direct e Scopus	"Aluminium Industry" AND "Cold Rolling Mill" AND "Diatomaceous Earth" OR "Diatomaceous Earth Waste" OR "Diatomaceous Earth Recovery" OR "Diatomaceous Earth Reuse"

O software Parsifal foi utilizado como uma ferramenta de auxílio para a RSL, a fim de se organizar e direcionar os dados em divisões de base de forma sistêmica. A revisão dos artigos foi baseada no sistema PICOC (*Population, Intervention, Comparison, Outcome, Context*), conforme descrito no Quadro 4.

Quadro 4 – Metodologia para revisão dos artigos.

Table 4 – Methodology for reviewing articles.

Etapa	Descrição
<i>Population</i>	Artigos que estão correlacionados à indústria do alumínio e engenharia de processo.
<i>Intervention</i>	Coleta de artigos que descrevam metodologias, métodos, testes laboratoriais e industriais.
<i>Comparison</i>	Comparar as formas de processo do alumínio e técnicas na recuperação das terras diatomáceas.
<i>Outcome</i>	O resultado de revisão de um panorama das diversas práticas do processo de laminação a frio na indústria do alumínio.
<i>Context</i>	Selecionar pesquisas de engenharia de processos na indústria do alumínio.

2.1.1 Critérios de seleção e avaliação dos artigos

Os artigos obtidos nas bases de dados escolhidas foram submetidos a dois testes de relevância. No teste de relevância I, foram aplicadas as perguntas de caráter excludente apresentadas no Quadro 5. Foram excluídos os artigos com pontuação $\geq 2,0$. Em seguida, os artigos selecionados foram submetidos à Avaliação de Qualidade, ou *Quality Assessment*, a partir da qual foram selecionados os artigos que apresentaram pontuação $\geq 1,0$ (Tenório et al., 2016).

Quadro 5 – Testes de relevância I e II e respectivas pontuações.
Table 5 - Relevance tests I and II and its respective scores.

Teste de relevância I	
Pergunta de caráter excludente	Respostas possíveis e pontuação
O ano de publicação do artigo é anterior à 2010?	Sim = 1,0; Não = 0
Há duplicidade no artigo obtido?	Sim = 1,0; Não = 0
O artigo está escrito em português ou inglês?	Sim = 1,0; Não = 0
Trata-se de um artigo científico publicado em revista científica indexada?	Sim = 1,0; Não = 0
Teste de relevância II	
Pergunta de caráter inclusivo e/ou excludente	Respostas possíveis e pontuação
Há elementos teóricos e/ou práticos nos quais se demonstram a aplicação de terra diatomáceas na indústria do alumínio?	Sim = 1,0; Parcialmente = 0,5; Não = 0
Apresenta características de reaproveitamento de terras diatomáceas de forma a permitir a compreensão da tecnologia por um pesquisador fora da área de engenharia?	Sim = 1,0; Parcialmente = 0,5; Não = 0
Traz exemplos ou elementos de como se dá a aplicação de reaproveitamento de terras diatomáceas em laminação a frio do alumínio?	Sim = 1,0; Parcialmente = 0,5; Não = 0
Há informações sobre as metodologias de reaproveitamento de terras diatomáceas no processo de filtração da laminação a frio do alumínio?	Sim = 1,0; Parcialmente = 0,5; Não = 0
Avalia os problemas que podem ocorrer na indústria do alumínio ao se reaproveitar a terra diatomácea?	Sim = 1,0; Parcialmente = 0,5; Não = 0
Apresenta metodologias para inovação na indústria do alumínio com terras diatomáceas?	Sim = 1,0; Parcialmente = 0,5; Não = 0

2.2 Fase de condução

Após a realização da etapa planejamento, os termos de busca foram aplicados nas respectivas bases de dados. Os artigos pré-selecionados foram importados para o gerenciador de referências “Mendeley”, capaz de detectar duplicatas dos arquivos advindos das cinco bases de dados, e submetidos ao teste de relevância I, através do qual foram selecionados 30 artigos dos 40 previamente obtidos. Esses artigos foram submetidos a uma avaliação mais detalhada com a condução do teste de relevância II, sendo selecionados com base no título,

excluindo-se os estudos que não eram relacionados com o tema da pesquisa. Em seguida, os artigos restantes foram novamente avaliados e selecionados segundo seus resumos e, por fim, de acordo com sua introdução e conclusão. Os artigos restantes, passaram à etapa de relatório, i.e., de extração de dados (Tenório et al., 2016).

2.3 Fase de relatório

Os artigos selecionados na fase de condução foram cuidadosamente lidos a fim de realizar a extração dos dados, obter uma análise crítica a respeito dos conceitos e resultados apresentados bem como tecer conclusões sobre a condução e contribuição dos estudos selecionados (Sampaio; Mancini, 2007).

2.4 Termos de busca aplicados às bases de dados

De acordo com o protocolo estabelecido, foram realizadas buscas nas bases de dados utilizando as ferramentas de busca fornecidas por cada uma delas. O número de artigos obtidos utilizando os termos de busca em cada uma das bases se encontram descritos no Quadro 6, totalizando apenas 40 artigos. Tal resultado já indica a escassez de literatura acerca do tema pesquisado.

Nota-se, portanto, uma negligência quanto às inovações incrementais na indústria do alumínio, em especial, no que tange o gerenciamento dos resíduos gerados durante a etapa de laminação a frio. Conforme destacado por Guimarães et al. (2015), o desenvolvimento de inovações incrementais na indústria do alumínio é essencial para a manutenção da competitividade do setor, sendo fundamental para a redução de custos, melhoria da qualidade do produto e minimização do tempo de entrega. Além disso, as quatro prioridades competitivas primárias enfatizadas na literatura (custo, qualidade, flexibilidade e entrega) são catalisadas pelo desenvolvimento de inovações incrementais.

Quadro 6 – Número de artigos obtidos a partir de cada base de dados, de acordo com os termos de pesquisa utilizados.

Table 6 - Number of articles obtained from each database, according to the search terms used.

Termos de Busca	Base de Dados					
	Scielo	Portal Capes	Springerlink	Science Direct	Scopus	
"Industria do Alumínio" AND "Laminação a Frio" AND "Terra Diatomácea" OR "Resíduo de terra diatomácea" OR "Recuperação de terra diatomácea" OR "Reutilização de terra diatomácea"	3	3	---	---	---	
"Aluminium Industry" AND "Cold Rolling Mill" AND "Diatomaceous Earth" OR "Diatomaceous Earth Waste" OR "Diatomaceous Earth Recovery" OR "Diatomaceous Earth Reuse"	6	4	4	19	1	
Total geral	9	7	4	19	1	40

2.5 Seleção dos artigos

Como já exposto no Quadro 5, os artigos científicos resultantes da pesquisa realizada nas bases de dados foram inseridos na ferramenta Mendeley e submetidos aos Testes de Relevância I e II (Pereira e Bachion, 2008). A pontuação, e a porcentagem de significância de cada artigo, conforme a avaliação de qualidade, são apresentados na Tabela 1. Dentre os artigos 20 descartados, 5 não atenderam os critérios do Teste de Relevância I, e outros 15 foram eliminados pelos critérios do Teste de Relevância II (Tabela 1).

Tabela 1 - Critérios de avaliação da qualidade- pontuação dos artigos.
Table 1 - Criteria for the quality and scoring of articles.

Pontuação	Quantidade de artigos	% em relação aos artigos restantes após o Teste de Relevância I
0,0	15	42,9
0,5	0	0
1,0	3	8,5
1,5	2	5,7
2,0	5	14,3
2,5	3	8,5
3,0	2	5,7
3,5	2	5,7
4,0	1	2,9
4,5	1	2,9
5,0	1	2,9

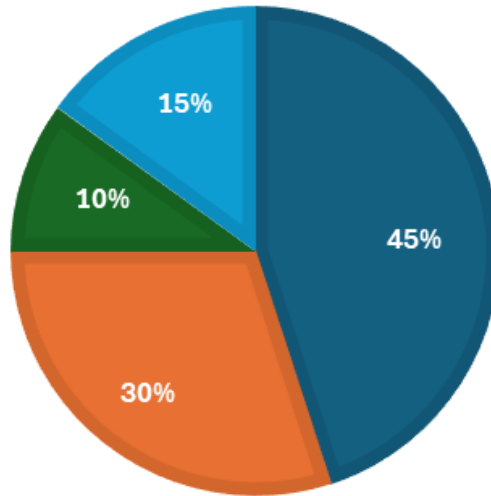
3. Resultados e discussão

3.1 Características gerais dos artigos selecionados

Embora a indústria de alumínio já esteja bem estabelecida, a busca pela diminuição ou valorização dos resíduos gerados ainda é escassa, especialmente, com relação ao resíduo do material filtrante (terra diatomácea) utilizado durante a etapa de laminação a frio. Nesse sentido, uma RSL foi realizada a fim de se observar as metodologias de recuperação do resíduo de terra diatomácea desenvolvidas e publicadas desde 2010.

A partir da RSL desenvolvida, foi possível estabelecer um panorama da maturidade tecnológica a cerca desse tema utilizando os 20 artigos selecionados. Os 20 artigos científicos selecionados após a aplicação dos Testes de Relevância foram divididos quanto aos temas abordados, conforme ilustrado na Figura 1.

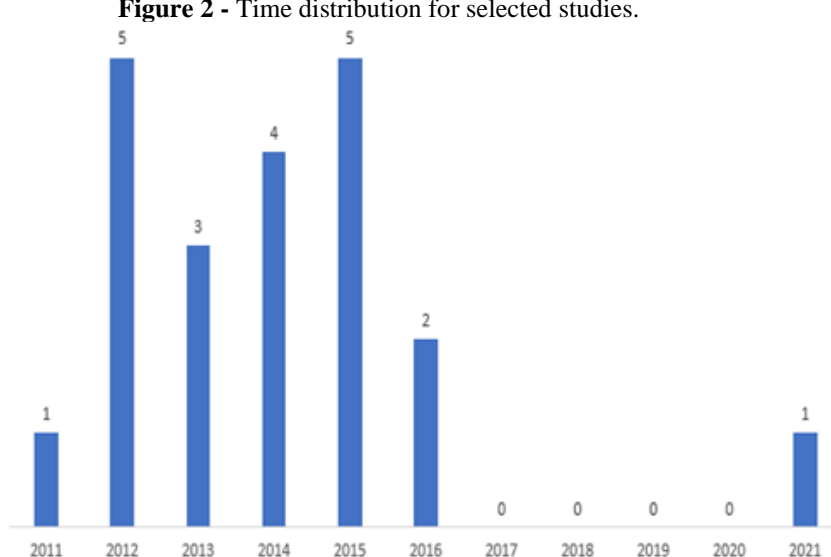
Figura 1 - Percentuais de artigos selecionados por temática segundo os critérios estabelecidos nesta RLS. Terra Diatomácea (■); Indústria do Alumínio (■); Laminação à Frio (■); Reaproveitamento de Terra Diatomácea (■).
Figure 1 - Percentages of articles selected by theme according to the criteria established in this SRL. Diatomaceous Earth (■); Aluminum Industry (■); Aluminum Cold Rolling (■); Diatomaceous Earth Reuse (■).



O tema que pareceu com mais frequência entre os artigos selecionados foi o relacionado à “terra diatomácea”, que apareceu em 9 artigos (45%), seguido por artigos contemplando a indústria do alumínio, com 6 artigos (30%), artigos sobre laminação a frio, 3 artigos (15%), e artigos sobre reaproveitamento de terra diatomácea (10%).

Um dos fatores que pode ter contribuído é que a palavra-chave “terra diatomácea” abrange aplicações em outras áreas, como agricultura, cervejaria e indústria têxtil (Dotto et al., 2011; Freo et al., 2011; Huanca e Nunes, 2016). Outra característica observada foi a variação na distribuição do número de artigos publicados ao longo dos anos, principalmente, entre 2012 e 2015 (Figura 2).

Figura 2 - Distribuição temporal das publicações selecionadas.
Figure 2 - Time distribution for selected studies.



Como 18 dos 20 artigos selecionados, i.e., 90%, são de Universidades e/ou Instituições brasileiras, esse aumento de interesse no tema, após 2011, pode estar ligado à aprovação Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em 2010, e sua repercussão no meio industrial e acadêmico, uma vez que a PNRS traz nos incisos de IV a VII, do Art. 7º, os objetivos de adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais; redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos; incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados; e gestão integrada de resíduos sólidos; respectivamente (BRASIL, 2024).

Nota-se ainda, uma diminuição na quantidade de artigos publicados no tema entre 2016 e 2021 (Figura 3), sendo que entre 2017 e 2020, não se encontrou nenhum artigo. Essa diminuição de interesse no tema pode estar relacionada ao não cumprimento da legislação proposta na PNRS. Tal constatação é destacada no artigo publicado pelo IPEA em 2020 onde se atribuiu como motivos para esse comportamento os entraves econômicos, como custos intrínsecos, e a falta de uma maior integração na gestão de resíduos (Szigeth e Antenor, 2020). Além disso, destaca-se que nem mesmo os ganhos financeiros previstos na PNRS, como incentivos fiscais, financeiros e creditícios, têm atraído a atenção do setor industrial.

3.2 Terras diatomáceas podem ser reutilizadas em processos industriais?

Dentre os artigos selecionados, foram encontrados 5 estudos que propuseram a reutilização de terra diatomácea, dos quais, apenas 3 eram em processos industriais (Quadro 7). Contudo, nenhum deles era relacionado à indústria do alumínio, demonstrando a carência de estudos nesse tema.

Quadro 7 – Artigos sobre reutilização de terra diatomácea.

Table 7 – Articles about diatomaceous earth reuse

Título	Área de aplicação	Resumo	Referência
Acúmulo de cádmio, silício e nutrientes por plantas de milho cultivadas em solo contaminado e adubado com fertilizante terra diatomáceas	Agricultura	Avaliação do acúmulo de nutrientes em cultivar de milho (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e Zn), bem como os efeitos de silício (Si) aplicado como fertilizante a base de terra diatomácea na amenização da toxicidade do Cd presente em solo contaminado.	Silva et al. (2021)
Metodologias para reutilização do resíduo de terra diatomácea, proveniente da filtração e clarificação da cerveja	Alimentícia	Estudo da reutilização de resíduo de terra diatomácea, proveniente da indústria cervejeira, no processo de filtração e clarificação de cerveja por meio de tratamento térmico (105 °C por 4 h, seguido de 700 °C por 6h)	Goulart et al. (2011)
Obtenção de espumas cerâmicas a partir de resíduo da terra diatomácea e ignimbrita pelo método de réplica	Cerâmica	Atenuação dos poluentes emitidos pela queima de tijolos e telhas, provenientes da indústria da cerâmica vermelha, por meio do desenvolvimento de um suporte cerâmico poroso a partir de resíduo da terra diatomácea	Huanca e Nunes (2016)

(resíduo da indústria cervejeira), ignimbrita (rocha vulcânica) e bentonita. pelo método de réplica

Reutilização de terra diatomácea residual proveniente da produção de soros antiofídicos e antitóxicos	Farmacêutica	Estudo da reutilização de terra diatomácea na etapa de filtração do processo produtivo de soros antiofídicos e antitóxicos, por meio de um tratamento térmico (700 °C)	Faria et al. (2018)
Terra de diatomácea como método alternativo para a purificação do biodiesel	Biocombustível	Estudo da purificação de biodiesel através da adsorção com uso de terra de diatomácea, propondo uma alternativa à tradicional lavagem aquosa	Temóteo, Galvarro e Silva (2017)

Os estudos publicados por Faria et al. (2018), Goulart et al. (2011) e Temóteo, Galvarro e Silva (2017) demonstraram a possibilidade da reutilização da terra diatomácea em processos industriais, uma vez que os resultados obtidos utilizando resíduo de terra diatomácea se aproximaram muito dos encontrados com a utilização da terra diatomácea nova.

Isso está alinhado ao trabalho de Faria et al. (2018), que afirma que as terras diatomáceas podem ser reutilizadas em escala industrial, desde que se mantenham a sua composição e propriedades físico-químicas. Já para Ediz, Bentli e Tatar (2010), a reutilização das terras diatomáceas na indústria é aplicável desde que se mantenha a temperatura do processo, intencionando não comprometer sua composição e nem as tornar ineficientes.

3.3 É possível reutilizar terras diatomáceas em processos de laminação a frio?

O processo de laminação a frio se trata da deformação de espessura que a lâmina de alumínio sofre em sua estrutura. Na laminação a frio, a alteração na forma do alumínio ocorre por sua passagem através de cilindros que, quando tocam na lâmina, reduzem sua espessura, garantindo as especificações determinadas pelos clientes. Assim, para garantir a qualidade das lâminas de alumínio, é preciso que o líquido refrigerante, neste caso, o óleo de laminação, lubrifique corretamente a lâmina e os cilindros metálicos para reduzir o atrito entre eles.

Dessa forma, o óleo de laminação não pode conter impurezas que possam comprometer a qualidade da lâmina, para isso, o óleo é filtrado através das terras diatomáceas. Nesse sentido, as metodologias de reutilização de terras diatomáceas na laminação a frio precisam garantir a manutenção da qualidade de filtração para evitar falhas/defeitos nas lâminas de alumínio.

Segundo Jacobi e Besen (2011), fazem-se necessárias a gestão de resíduos e a aplicação de novas metodologias, para que a reutilização de terras diatomáceas seja uma prática recorrente e culmine no fortalecimento da sustentabilidade nos processos industriais. Contudo, nenhum dos artigos selecionados estudaram e/ou desenvolveram metodologias especificamente para a laminação a frio na indústria de alumínio, e, até onde sabemos, este tema ainda não foi abordado na literatura.

No entanto, há na literatura estudos acerca do tratamento de terras diatomáceas residuais para recuperação de suas características iniciais. Um dos tratamentos mais utilizados é a incineração ou processos térmicos, pois, segundo Conceição et al. (2012), esses métodos auxiliam na remoção das impurezas presentes na terra diatomácea, em especial, resíduos orgânicos, permitindo sua reutilização. Contudo, esse processo não

é aplicável à produção de alumínio, pois o óleo lubrificante é inflamável e os finos de alumínio presentes no resíduo não seriam removidos.

3.4 As terras diatomáceas prejudicam a qualidade das lâminas de alumínio?

No momento da produção das lâminas de alumínio, o líquido refrigerante (óleo de laminação) passa pelo processo de filtração utilizando das terras diatomáceas. Isso favorece a limpeza do óleo, o qual pode carregar impurezas conhecidas como “finos de alumínio”, que são pequenos pedaços de alumínio que se desprendem das lâminas (Pires et al., 2018). Portanto, é primordial garantir a qualidade da filtração para que todas as lâminas se mantenham padronizadas e dentro da especificação de produção.

A etapa de filtração é processo que visa a remoção das impurezas presentes no óleo de laminação, visando obter um líquido refrigerante limpo, isento ou com baixa concentração de sólidos em suspensão - finos metálicos gerados na laminação, sílica, metais advindos de alguma parte do sistema. Quando depositada no laminador, a terra é disseminada no filtro, espalhando-se rapidamente, formando as chamadas “tortas filtrantes”, pelas quais o óleo lubrificante atravessa, sendo clarificado e purificado, com suas impurezas ficando retidas quase na sua totalidade. Na Figura 3, é possível observar o filtro em operação em conjunção aos papéis filtro, que servem para dar suporte à camada de terra diatomácea e complementar o processo de filtração.

Figura 3 - Papel filtro com as terras diatomáceas.

Figure 3 – Filter paper with diatomaceous earth.



Durante a filtração, o óleo de laminação é transportado através das gavetas do filtro e retorna para o processo já em estado purificado. Os papéis filtros são descartados e classificados como resíduos perigosos (classe I). Já a terra diatomácea é processada e depositada diretamente em uma caixa de contenção para que, posteriormente, possa ser coletada e descartada em aterro sanitário apropriado, uma vez que também é classificada como resíduo perigoso (classe I). Portanto, pesquisas norteadas ao reaproveitamento dos papéis filtro também pode ser de grande interesse, principalmente, para adequar os processos indústria de alumínio à

PNRS e à Agenda 2030 e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU, 2024).

Na ausência do procedimento correto de filtração, toda a integridade do óleo é comprometida, podendo culminar em defeitos na lâmina de alumínio. Este contexto resulta em retrabalhos e, dependendo da intensidade do defeito, até mesmo, o descarte do produto, havendo necessidade em retornar ao processo de fundição. Além disso, o filtro sofre manutenções frequentes que garantem a sua performance. Quanto mais limpo o óleo de laminação estiver, maior será a vida útil do filtro. A estabilidade e bom funcionamento são práticas metodológicas necessárias, principalmente, dentro indústria do alumínio que tem por premissa a produção contínua.

Embora não se tenha encontrado na literatura nenhum estudo que abordasse especificamente esse tema, o trabalho de Yalçin et al. (2010) aborda uma metodologia capaz de monitorar eficientemente a qualidade do óleo lubrificante utilizado na laminação a frio. A metodologia proposta foi o uso de espectroscopia de infravermelho acoplada à calibração multivariada baseada em algoritmo genético. Com isso, os autores demonstraram que a metodologia proposta pode ser utilizada para monitoramento contínuo de aditivos e contaminantes em óleo de laminação de alumínio. Desta forma, o tempo de análise foi significativamente reduzido e a determinação simultânea de todos os componentes pôde ser realizada.

4. Conclusão

A minimização do impacto ambiental e social da indústria do alumínio exige medidas eficazes na gestão de seus resíduos. Nesse cenário, a reutilização e o reaproveitamento de materiais surgem como alternativas promissoras, mas ainda pouco exploradas. Este estudo aprofunda a análise da literatura sobre a reutilização da terra diatomácea na indústria do alumínio, destacando os desafios e as perspectivas para o desenvolvimento dessa tecnologia no Brasil. A revisão sistemática realizada revelou a carência de estudos direcionados à reutilização da terra diatomácea na etapa de filtração e laminação a frio do alumínio. A maioria dos artigos encontrados se concentra em aplicações em outras áreas industriais, demonstrando a incipiência dessa tecnologia na indústria do alumínio. Os estudos analisados não apresentam métodos de aplicação direta da terra diatomácea na indústria do alumínio, exigindo adaptações e pesquisas aprofundadas para viabilizar seu uso em larga escala.

A reutilização da terra diatomácea pode gerar economia de recursos, diminuir a geração de resíduos e minimizar impactos ambientais, como a disposição em aterros sanitários. Assim, o investimento em pesquisa e desenvolvimento é crucial para o aprimoramento de métodos de reutilização da terra diatomácea, adaptando-a às necessidades específicas da indústria do alumínio. Portanto, a adoção de práticas de reutilização de resíduos pode fortalecer a imagem sustentável da indústria do alumínio, agregando valor à marca e atraindo consumidores conscientes.

Agradecimentos

Danielle Maass é grata à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo fomento por meio do processo nº #2019/07659-4. Igor Y. N. V. Brandão agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de mestrado (projeto nº #2019/19144-9).

5. Referências

- ABAL. (1994). **Guia Técnico do Alumínio: Laminação**. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio.
- ABAL. (2004). **Fundamentos do Alumínio e suas aplicações**. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio.

ABAL. (2006). **Guia Técnico do Alumínio: Características físico-químicas**. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio.

ABAL. (2023). Estatísticas Nacionais - Alumínio Primário. **Produção Mensal**. Associação Brasileira do Alumínio. <https://abal.org.br/estatisticas/nacionais/aluminio-primario/producao-mensal/>

Almeida, H. C., Ernani, P. R., Albuquerque, J. A., Mecabô Junior, J., & Almeida, D. (2008). Influência da adição de um resíduo alcalino da indústria de papel e celulose na lixiviação de cátions em um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32(4), 1775-1784.

Braga, F. M., Cardoso, P. H. S., Barbosa, M. H. C., Rodrigues, M. N., Sampaio, R. A. & Fernandes, L. A. (2017). Chemical characterization of vermicompost of sewage sludge with different proportions of diatomaceous material. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 21(8), 519-523.

BRASIL. Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União. 02 de ago. Disponível em <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm> . Acessado em maio/2024. 2024.

Conceição, P., Faroni, L., Sousa, A., Pimentel, M., & Freitas, R. (2012). Diatomaceous earth effects on weevils with different susceptibility standard to phosphine. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 16(3), 309-313.

Dotto, G. L., Vieira, M. L. G., Gonçalves, J. O., & Pinto, L. A. de A. (2011). Remoção dos corantes azul brilhante, amarelo crepúsculo e amarelo tartrazina de soluções aquosas utilizando carvão ativado, terra ativada, terra diatomácea, quitina e quitosana: estudos de equilíbrio e termodinâmica. **Química Nova**, 34(7), 1193-1199.

Ediz, N., Bentli, I., & Tatar, I. (2010). Improvement in filtration characteristics of diatomite by calcination. **International Journal of Mineral Processing**, 94(3-4), 129-134.

Faria, R. A. D. de, Silva, T. G. G. P., Soares, R. B., & Rodrigues, C. G. (2018). Reuse of residual diatomaceous earth from manufacturing of antiphidic and antitoxic sera. **Revista Materia**, 23(4).

Freo, J. D., Moraes, L. B. D. de, Colussi, R., Mossmann, J., Elias, M. C., & Gutkoski, L. C. (2011). Propriedades físicas e tecnológicas de farinha de trigo tratada com terra diatomácea. **Ciência Rural**, 41(6), 1076-1081.

Goulart, M. R., Berto Da Silveira, C., Campos, M. L., Antonio De Almeida, J., Manfredi-Coimbra, S., & Fernandes De Oliveira, A. (2011). Metodologias para reutilização do resíduo de terras diatomáceas provenientes da filtração e clarificação da cerveja. **Quim. Nova**, 34(4).

Guimarães, M. R. N., De Lara, F. F., & Trindade, R. O. P. (2015). The relationship between production strategy and technological innovation practice: A study in an aluminum manufacturing company. **Revista de Administracao Mackenzie**, 16(3), 109-135.

Horsth, D. F. L., Dalpasquale, M., & Anaissi, F. J. (2020). Transformação de alumínio metálico em hidróxido de alumínio (Al(OH)₃): Uma ação para o desenvolvimento sustentável. **Brazilian Journal of Development**, 6(6), 34178-34190.

Huanca, K. Z., & Nunes, A. B. D. A. (2016). Obtenção de espumas cerâmicas a partir de resíduo da terra diatomácea e ignimbrita pelo método de réplica. **Cerâmica**, 62(362), 110-114.

Jacobi, P. R., & Besen, G. R. (2011). Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estudos Avançados**, 25(71), 135-158.

Lemes, D. C. M. (2023). **Estudo de reaproveitamento de terra diatomácea no processo de filtração do laminador a frio na indústria do alumínio**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Paulo. São José dos Campos, SP, Brasil

Martins, B. P. (2010). **Estudo de alternativas para reaproveitamento de resíduos sólidos das indústrias metal-mecânicas em processos siderúrgicos**. Monografia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil

ONU – Organização das Nações Unidas (2024). Objetivos do Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 24/06/2024.

Pereira, Â. L., & Bachion, M. M. (2008). Atualidades em revisão sistemática de literatura, critérios de força e grau de recomendação de evidência. **Revista Gaúcha De Enfermagem**, 27(4), 493.

Pires, J. P., Cota, B. S., Bracarense, A. Q., & Campolina, B. A. (2018). Temperature distribution prediction in 5052 H34 aluminum alloy joints welded by friction stir welding process. **Soldagem e Inspecao**, 23(2), 247-263.

Sampaio, R., & Mancini, E. (2007). Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, 11(1), 83-89.

Scannavino, K. R. F., Nakagawa, E. Y., Fabbri, S. C. P. F. et Ferrari, F. C. (2017). **Revisão Sistemática da Literatura em Engenharia de Software: teoria e prática**. São Paulo: Elsevier.

Silva, J. R., Veloso, V. de L., Silva, F. B. V. da., & Nascimento, C. W. A. do. (2021). Cadmium, silicon and nutrient accumulation by maize plants grown on a contaminated soil amended with a diatomaceous Earth fertilizer. **Ciência Rural**, 51(2).

Souza, G. P., Filgueira, M., Rosenthal, R., & Holanda, J. N. F. (2003). Caracterização de material compósito diatomáceo natural. **Cerâmica**, 49(309), 40-43.

Szigeth, L., & Antenor, S. (2020). Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos. IPEA - Centro de Pesquisa em Ciência, Tecnologia e Sociedade. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>>

Temóteo, R., Galvarro, S. & Silva, D. Terra diatomácea como método alternativo para purificação de biodiesel. In: Martins, E.(Org.), **Métodos de separação como auxiliares para alguns processos industriais e para o tratamento ou aproveitamento de resíduos e coprodutos gerados pela indústria** São Paulo: Atena Editora. 2017

Tenório, T., Bittencourt, I. I., Isotani, S., & Silva, A. P. da. (2016). Does peer assessment in on-line learning environments work?: A systematic review of the literature. **Computers in human behavior**, 64, 94-107.

Yalçın, A., Ergün, D., Uçar, Ö. I. et Özdemir, D. (2010). Determination of aluminum rolling oil additives and contaminants using infrared spectroscopy coupled with genetic algorithm based multivariate calibration. **Vibrational Spectroscopy**, 54(1), 10-20.