

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

JAMILA DO CARMO ALVES

**TRATAMENTO DE LODOS INDUSTRIAIS PELO PROCESSO DE
SOLIDIFICAÇÃO/ ESTABILIZAÇÃO EM MATRIZ CIMENTÍCIA: uma
revisão sistemática**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2022

JAMILA DO CARMO ALVES

**TRATAMENTO DE LODOS INDUSTRIAIS PELO PROCESSO DE
SOLIDIFICAÇÃO/ ESTABILIZAÇÃO EM MATRIZ CIMENTÍCIA: uma revisão
sistemática**

**Treatment of Industrial sludge by the solidification/ stabilization process in
cement matrix: a systematic review**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Profa. Dra. Lidiane Fernanda Jochem.

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JAMILA DO CARMO ALVES

**TRATAMENTO DE LODOS INDUSTRIAIS PELO PROCESSO DE
SOLIDIFICAÇÃO/ ESTABILIZAÇÃO EM MATRIZ CIMENTÍCIA: uma revisão
sistemática**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 15/junho/2022

Lidiane Fernanda Jochem
Doutora em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luis Urbano Tambara
Doutor em Engenharia Civil
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

César Augusto Casagrande
Doutor em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2022

Dedico este trabalho à minha querida filha, por ser essa criança maravilhosa e compreender minha ausência. À minha mãe, por me apoiar em todos os momentos da minha vida e à minha irmã, por estar presente e me fazer rir, mesmo em momentos tão difíceis.

RESUMO

O descarte inadequado de efluente causa degradação do meio ambiente principalmente se o efluente contiver metais pesados, causando danos aos solos, recursos hídricos e aos seres humanos. Em cada processo de produção das indústrias são gerados resíduos, na indústria de galvanoplastia seus processos geram resíduos contendo metais pesados que necessitam de tratamento para poderem ser dispostos no meio ambiente sem que sejam lixiviados. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é avaliar o potencial de retenção dos efluentes pelo processo de solidificação/estabilização (S/E) por meio de revisão bibliográfica sistemática, analisando as propriedades dos produtos gerados no processo de S/E e a potencialidade de retenção dos efluentes pela matriz cimentícia. O método de análise escolhido foi a revisão sistemática da literatura, que utiliza como fonte de dados a literatura sobre o tema estudado. Dentre os 30 artigos analisados, verificou-se a eficácia do processo de S/E no tratamento de resíduos com metais pesados em sua composição, podendo ser utilizado como tratamento. Podem ser realizadas substituições de até 9%, analisando a resistência à compressão. Os metais não estão lixiviando, podendo ser enquadrados nas Classes IIA e IIB (inertes e não inertes) da NBR 10.004. Assim, o descarte pode ser realizado em aterros sanitários, com resistências maiores que 3,5MPa, e sem ocorrer a contaminação do solo. Outra aplicação que pode ser dada a da matriz cimentícia é a utilização em pavimentação, para porcentagens de substituição de até 9%, evitando o desperdício e realizando a reciclagem do material.

Palavras-chave: Resíduos sólidos industriais. Solidificação/ estabilização. Matriz cimentícia. Lodo galvânico. Metal pesado.

ABSTRACT

Inadequate effluent disposal causes environmental degradation, especially if the effluent contains heavy metals, causing damage to soils, water resources and human beings. In each production process of the industries waste is generated, in the electroplating industry its processes generate waste containing heavy metals that need treatment to be able to be disposed of in the environment without being leached. In view of the above, the objective of this work is to evaluate the retention potential of effluents by the solidification/stabilization process (S/E) through a systematic literature review, analyzing the properties of the products generated in the S/E process and the potential of effluents' retention by the cement matrix. The method of analysis chosen was the systematic review of the literature, which uses the literature on the subject studied as a data source. From the 30 articles analyzed, it was verified the effectiveness of the S/E process in the treatment of waste with heavy metals in its composition, which can be used as a treatment. Replacements of up to 9% can be performed, analyzing the compressive strength. The metals are not leaching and can be classified in Classes IIA and IIB (inert and non-inert) of NBR 10.004. Thus, the disposal can be carried out in sanitary landfills, with resistances greater than 3.5MPa, and without soil contamination. Another application that can be given to the cement matrix is the use in paving, for replacement percentages of up to 9%, avoiding waste and recycling the material.

Keywords: Industrial solid waste. Solidification/ stabilization. Cement matrix. Galvanic sludge. Heavy metal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas do processo de galvanização.....	14
Figura 2: Representação esquemática da liberação de calor e ilustração dos diferentes estágios durante a hidratação do cimento Portland comum.....	17
Figura 3: Metodologia aplicada nesse programa experimental	24
Figura 4: Países das publicações.....	26
Figura 5: Ano da publicação.....	27
Figura 6: Revistas de publicação dos artigos	28
Figura 7: Tipo de matriz cimentícia utilizada e quantidade de artigos	28
Figura 8: Tipo de lodo industrial em cada artigo.....	29
Figura 9: Relação água/cimento.....	30
Figura 10: Porcentagem de substituição dos componentes da matriz por resíduo ...	31
Figura 11: Resistência à compressão das amostras. (a) versus a porcentagem de substituição; (b) em relação à referência	32
Figura 12: Resistência à tração das amostras. (a) versus a porcentagem de substituição. (b) em relação à referência	34
Figura 13: Potencial de retenção das amostras. (a) versus a porcentagem de substituição; (b) em relação à referência	35
Figura 14: Resultado dos ensaios de Slump/ Flow das amostras. (a) versus a porcentagem de substituição; (b) em relação à referência.....	36
Figura 15: Concentração de cromo nas amostras. (a) versus a porcentagem de substituição. (b) em relação à referência	37
Figura 16: Concentração de cobre nas amostras. (a) versus a porcentagem de substituição; (b) em relação à referência	38
Figura 17: Concentração de chumbo nas amostras. (a) versus a porcentagem de substituição; (b) em relação à referência	40
Figura 18: Concentração de níquel nas amostras. (a) versus a porcentagem de substituição; (b) Concentração de níquel em relação à referência.....	41
Figura 19: Concentração de zinco nas amostras. (a) versus a porcentagem de substituição; (b) em relação à referência	42
Figura 20: pH das amostras versus a porcentagem de substituição	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Limites máximos estabelecidos para lixiviação	22
Tabela 2: Limites máximos estabelecidos para solubilização	23

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	11
1.1.1 Geral.....	11
1.1.2 Objetivos Específicos	11
1.2 JUSTIFICATIVA	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS.....	13
2.2 RESÍDUOS DE GALVANOPLASTIA.....	13
2.3 PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO/ ESTABILIZAÇÃO.....	15
2.4 AGLOMERANTE.....	16
2.5.1 Resistência mecânica.....	19
2.5.2 Absorção de água	19
2.5.3 Umidificação e secagem	20
2.5.4 Ensaio de imobilização dos contaminantes.....	20
2.5.4.1 Lixiviação.....	20
2.5.4.2 Solubilização	22
3 METODOLOGIA.....	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERÊNCIAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

O tratamento de efluentes e suas consequências para o meio ambiente é um tema de relevância internacional, que cada vez mais está sendo estudado pela necessidade de conscientização da sociedade para que haja boas práticas e constante desenvolvimento urbano sustentável.

Prova disso é a aprovação da nova Política Global da Organização das Nações Unidas, com Agenda para 2030, contendo os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável que incluem a melhoria da qualidade da água diminuindo o despejo de produtos químicos perigosos, melhorando a porcentagem de efluentes não tratados ou ainda com potencial de contaminação garantindo uma reciclagem segura dos efluentes.

De acordo com a resolução nº 430 de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), efluente pode ser definido como despejos líquidos provenientes dos diversos processos e atividades. A parcela de efluente industrial integra os despejos de todas as etapas dos processos de produção de cada indústria, a água utilizada durante a operação e a limpeza acaba sendo contaminada pelos produtos utilizados ou fabricados, com isso, é necessário o descarte final do efluente seguindo os padrões de lançamento no meio ambiente descritos no artigo 16 da mesma resolução, cujos valores máximos exigidos para zinco, chumbo, níquel e cromo trivalente são 5mg/L, 0,5mg/L, 2,0mg/L e 1,0mg/L, respectivamente.

Em torno de 70% dos resíduos dos efluentes da indústria são despejados em aterros sanitários, representando assim inúmeros riscos para o meio ambiente e para as pessoas, pois, em sua composição há agentes contaminantes (FGV, 2014; ANA, 2020). A norma NBR 10.004 classifica os resíduos químicos perigosos em Classe I destinando sua disposição em aterros específicos para essa classe, abrangendo os efluentes de borras de retífica, de tintas, das cinzas dos incineradores, dos lodos de estação de tratamento galvanicos, entre outros (ABNT, 2004a).

Atualmente, no tratamento de efluentes industriais galvanicos, o processo de solidificação/ estabilização (S/E) consiste em um dos procedimentos estudados e aplicado nesse contexto. Essa tecnologia tem como objetivo alterar o estado físico e químico do resíduo, diminuindo líquidos livres em excesso e, com isso, minimizar a contaminação causada pelos principais agentes contaminantes, restando dentro de uma matriz cimentícia.

Assim, com a realização desse trabalho espera-se verificar o potencial de retenção dos efluentes pelo processo de S/E em matriz cimentícia por meio de uma revisão sistemática da literatura, para isso serão pesquisados trabalhos que tratem desse tema e os dados serão compilados para posterior análise.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Avaliar o potencial de retenção dos efluentes pelo processo de solidificação/ estabilização por meio de revisão bibliográfica sistemática.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar as propriedades dos produtos gerados no processo de S/E.
- Avaliar a potencialidade da retenção dos efluentes pela matriz cimentícia.
- Verificar o perfil de utilização do processo de solidificação/ estabilização.

1.2 Justificativa

Estudos realizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) em 2020 e pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) em 2014, revelaram que a quantidade de água de retorno no Brasil em 2017 foi de 22,1 trilhões de litros, com 28,9% através dos sistemas de esgoto, o restante sendo descartado diretamente no meio ambiente, e quase 10 milhões de litros de efluente industrial descartado irregularmente na região metropolitana de São Paulo, respectivamente.

O descarte inadequado pode causar a degradação dos recursos hídricos, solos e aos seres humanos (Gabriel *et al.*, 2016). Nos seres humanos, os efeitos do cromo podem ser desde lesões na pele, bronquite e câncer, se expostos a altos níveis (Sprada, 2013).

Sendo a água um dos principais insumos utilizados na indústria de galvanoplastia, o resultado é uma maior geração de efluentes e, conseqüentemente, maior geração de lodo. Baseando-se na resolução CONAMA nº430 de 2011 e na Lei 12.305 de 2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, espera-se, com

esse trabalho, verificar a potencialidade da utilização do processo de solidificação/estabilização na matriz cimentícia, para propiciar um descarte seguro do lodo gerado, baseado em trabalhos publicados nos anos de 2011 a 2021.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos sólidos

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instaurada pela Lei nº 12.305 de agosto de 2010, define resíduo sólido como descartes resultantes da atividade humana, no estado sólido ou semissólido, gases em recipientes e líquidos inviáveis de lançamento em esgoto da rede pública, havendo procedência, necessidade ou obrigatoriedade de destinação final.

Dentro dessa classificação a NBR 10.004 (ABNT, 2004a) separa em duas classes os resíduos sólidos, classe I (resíduos perigosos) e classe II (inertes e não inertes). Os resíduos da classe I, podem apresentar risco à saúde pública e ao meio ambiente pelas características das suas propriedades físico-químicas e infectocontagiosas, tais como toxicidade, inflamabilidade, reatividade, patogenicidade e corrosividade.

Já, os resíduos que não se encaixam na classe I, são denominados classe II não inertes e inertes, A e B respectivamente, apresentando propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Resíduos da classe II-A, não inertes, não apresentam alta periculosidade, mas reagem quimicamente em alguns meios, enquanto os resíduos da classe II-B, denominados inertes, possuem baixa capacidade de reação, não sofrendo alterações em sua composição, sendo reciclados ou enviados para aterros sanitários (ABNT, 2004a).

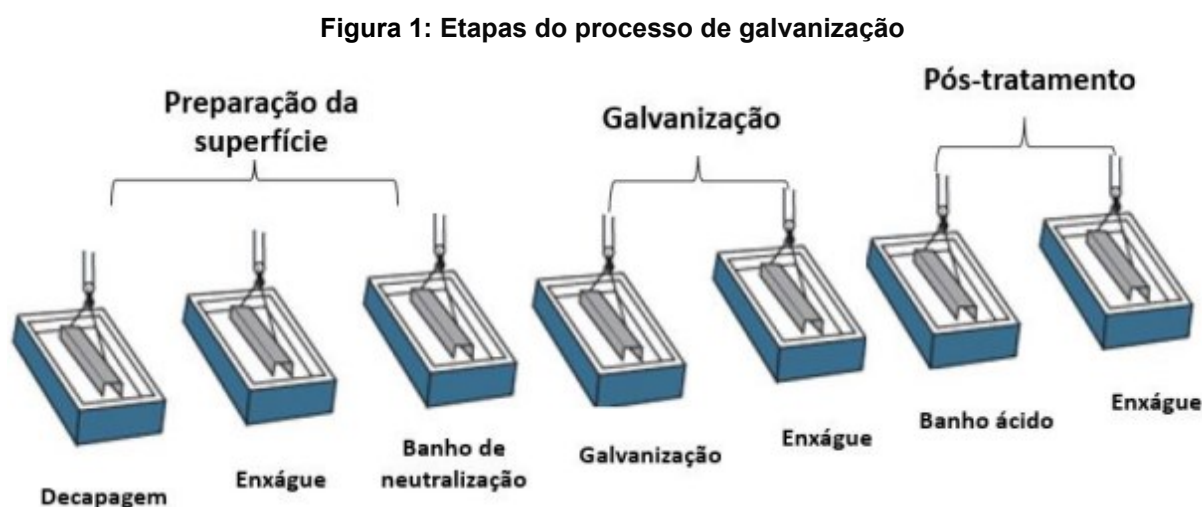
2.2 Resíduos de galvanoplastia

A galvanoplastia é um tipo de eletrólise, que transforma energia elétrica em química, depositando em cima da superfície um material metálico por meio de um sal metálico, que agrega as partículas na forma de íons impulsionados por uma corrente elétrica constante (INEA, 2014). Nesse processo há a necessidade do sistema conter reações catódicas e anódicas onde um dos compostos recebe elétrons, ligado ao polo negativo, enquanto o metal que vai fornecer o revestimento, perde elétrons, e é ligado ao polo positivo (Oliveira, 2012).

Assim sendo, o processo de galvanização é um tratamento em que os materiais são revestidos para melhorar suas propriedades superficiais e aumentar a

sua durabilidade, adquirindo proteção contra intempéries, com o objetivo de prevenir a corrosão galvânica (Varela *et al.*, 2015). Descrito por Wiercinski (2015) em três etapas principais, que são: pré-tratamento, revestimento e a passivação. No pré-tratamento acontece o desengraxe e decapagem da peça, para posterior aplicação das camadas de metais por processo químico ou eletroquímico, que é considerado o tratamento propriamente dito (Favero, 2018).

O revestimento é a etapa de galvanização da peça, chamada de deposição eletrolítica. Nessa etapa são realizados banhos, onde as peças são submersas e ligadas ao polo negativo de uma fonte com corrente contínua tornando-se cátodo, ocorrendo assim a deposição do metal. As peças passam por mais um enxágue para iniciar a próxima etapa, denominada passivação, que consiste na realização de um banho com ácido cítrico, com a finalidade de fixar a camada de metal aplicada e dar o acabamento à peça (Wiercinski, 2015; CRQ4, 2021). Na Figura 1 está a representação das etapas do processo de galvanização.



Dentre os resíduos sólidos gerados na indústria galvânica são os produtos rejeitados, restando apenas a disposição final como opção, o pó de polimento e o lodo de tratamento com sais metálicos em sua composição, acarretando numa classificação de acordo com NBR 10.004 (ABNT, 2004a) em classe I – resíduo perigoso, exigindo uma destinação controlada (Casagrande, 2009).

O lodo galvânico resultante do tratamento do efluente, dentre os resíduos sólidos, torna-se um dos principais problemas na atividade de galvanoplastia, por conter metais pesados que não são destruídos no sistema de tratamento por

precipitação, decantação, sedimentação e filtração, permanecendo no lodo resultante. Atualmente, a alternativa mais usada é a disposição em aterros especiais para a classe do resíduo possuindo custos elevados (Alves *et al.*, 2014; INEA, 2014).

Segundo INEA (2014), os metais mais usados para o revestimento das peças na galvanoplastia que, conseqüentemente, estão presentes na composição do resíduo resultante são: cromo, níquel, chumbo, cobre, prata, zinco e alumínio.

2.3 Processo de solidificação/ estabilização

O processo de solidificação/ estabilização (S/E) é um método de tratamento que realiza uma imobilização físico-química dentro do sólido monolítico, postergando ou diminuindo a liberação dos resíduos contaminados. Assim na estabilização do processo, são aplicadas técnicas que transformam os contaminantes em outras formas menos solúveis em água, móveis ou tóxicas, reduzindo o potencial de risco, podendo envolver sistema químico, que altera, nos constituintes do resíduo, seus estados químicos, físicos ou ambos (Brito; Soares, 2009; Jochem, 2017).

A técnica de solidificação, também chamada de encapsulação ou estabilização física, altera a forma física, sem ocorrer alteração química, encapsulando os resíduos, transformando-os em um novo material (Spence; Shi, 2004). O encapsulamento tem como objetivo imobilizar os constituintes perigosos, melhorar as características de manuseio, revestir com materiais com baixa permeabilidade, diminuir a área superficial exposta a lixiviação e a transferência de elementos para o meio limitando a solubilidade do constituinte do resíduo (Spence; Shi, 2004; Borgo, 2005).

A utilização do processo de solidificação/ estabilização como tratamento de lodo facilita o descarte final adequado de resíduos sólidos abrangendo os resíduos com metais pesados em sua composição, impedindo que agentes contaminantes sejam liberados no meio ambiente (Silva, 2007; Chen *et al.*, 2009). Isso torna possível a utilização de resíduos industriais como subproduto na construção civil (Melchert, 2012).

No processo de S/E realizado com cimento Portland, são misturados resíduos ou meios contaminados, como solo, sedimentos ou lodo podendo ser usado no tratamento de diversos contaminantes, incluindo os inorgânicos, como metais pesados (Hunce *et al.*, 2012).

Em pesquisa realizada por Favero (2017), a utilização de resíduo de lodo galvânico incorporado a matriz de cimento Portland mostrou-se possível e viável economicamente, deixando de enviar esse resíduo a aterros, evitando a contaminação do solo. Diversificando-se as composições do cimento, pode-se melhorar o desempenho do processo de S/E, monitorando alguns fatores como, dimensão das partículas, temperatura, relação água/cimento e fatores que afetam a resistência mecânica e a durabilidade (Chen *et al.*, 2009).

No Brasil, para avaliar os resultados do processo de S/E, são utilizadas as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 10.004 para classificação, NBR 10.005 para ensaio de lixiviação e NBR 10.006 para ensaios de solubilização (Melchert 2012).

Favero (2017) analisou, por ensaios de lixiviação, a quantificação do cromo hexavalente e trivalente, a eficiência de retenção e estabilização do cimento Portland, em relação ao cromo, principal contaminante do lodo galvânico em ambos os estados de valência, apresentando valores acima de 99% de eficiência de retenção e estabilização. Indicando a eficiência do processo.

2.4 Aglomerante

Dentre os fatores que influenciam o processo, estão os tipos de aglomerantes químicos. A agência de proteção ambiental dos Estados Unidos, EPA, em 1999, verificou que os principais tipos utilizados de 1989 a 1999 eram materiais cimentícios, tais como cinza volante, cal, escória de alto forno e cimentos (Chrysochoou; Dermatas, 2006).

Desde então, o cimento continua sendo utilizado em larga escala, como indicaram os dados do CEMBUREAU (2020), em que os Estados Unidos produziram 87,8 milhões de toneladas e o Brasil 53,5 milhões de toneladas de cimento em 2018.

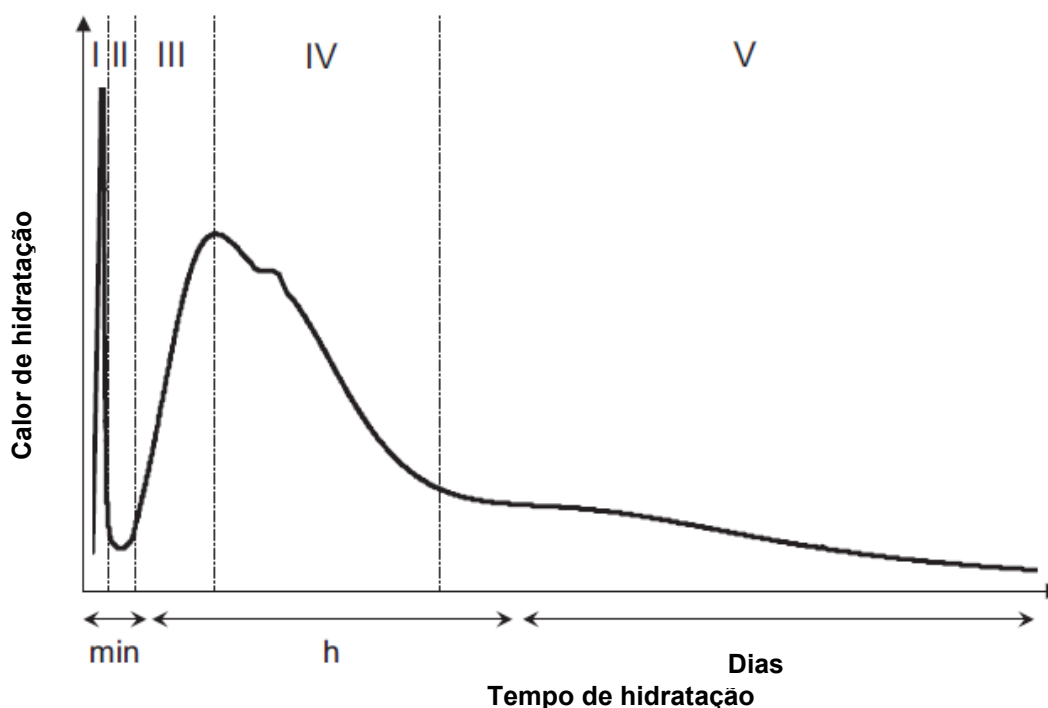
No processo de S/E o aglomerante mais utilizado é o cimento Portland, estabilizando os metais pesados através de fenômenos físicos e/ou químicos, na matriz cimentícia, tendo a mobilidade e a solubilidade dos contaminantes reduzida, e fornecendo uma alternativa viável para o tratamento ou disposição dos resíduos (Hunce *et al.*, 2012; Jochem, 2017).

A S/E baseia-se na hidratação do cimento Portland, que possui uma mistura heterogênea composta principalmente de silicatos e aluminatos, sendo os quatro

principais: silicato tricálcico, abreviado por C_3S (alita); aluminato tricálcico, C_3A (celita); silicato bicálcico abreviado por C_2S (belita) e C_4AF , Aluminoferrato Tetracálcico (Ferrita) (Guimarães, 2017).

Na Figura 2, no eixo das abcissas do gráfico, estão representados: o tempo de hidratação em minutos no estágio I e II, horas no estágio III e IV e parte do V, e dias no estágio V, com o fluxo de calor no eixo das ordenadas.

Figura 2: Representação esquemática da liberação de calor e ilustração dos diferentes estágios durante a hidratação do cimento Portland comum



Fonte: Adaptado de Marchon e Flatt (2016)

Os cinco estágios de hidratação, são predominantemente relacionados à hidratação do C_3S . No estágio I, o primeiro pico exotérmico é devido à hidratação do C_3A e à dissolução rápida das fases anidras, a etringita precipita pela alta reatividade dos aluminatos e alta quantidade de sulfato de cálcio, ocorrendo uma desaceleração repentina no estágio II. Já na fase III, acontece o segundo pico, onde os produtos da hidratação dos silicatos precipitam-se devido ao aumento do calor de hidratação resultante da dissolução de C_3S , seguido da desaceleração no estágio IV e um pico relacionado à rápida precipitação da etringita e maior dissolução do C_3A , com um período de baixa atividade no estágio V (Marchon; Flatt, 2016).

Ao ocorrer a hidratação do cimento são gerados produtos dessa reação, sendo os principais, o hidróxido de cálcio (CH), silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e sulfoaluminatos de cálcio hidratados gerados na fase III. Os cristais de portlandita tem formato prismáticos hexagonais, com morfologia variável e área superficial menor em comparação aos compostos de C-S-H que são os principais responsáveis na contribuição da resistência mecânica do material (Mehta; Monteiro, 2014; Marchon; Flatt, 2016; Maciel, 2017).

Na hidratação do cimento com adição de lodo com metais pesados, os produtos da hidratação sofrem interações com o metal alterando-os ou formando novos compostos, dependendo do tipo de metal (Jovelino, 2018).

No processo de S/E em matrizes cimentícias, segundo Barros *et al.* (2020), é possível explicar o controle da lixiviação dos metais pesados pela reação química do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) juntamente com o dióxido de carbono e da portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) que formam a calcita (CaCO_3), resultando na imobilização dos metais pesados pela alteração da solubilidade dos componentes e podendo ocorrer a calcita por adsorção ou pelas interações químicas do contaminante com a matriz cimentícia.

Muitos dos metais pesados presentes no lodo galvânico diminuem a velocidade de hidratação do cimento Portland, aumentando a solubilidade e a lixiviação dos metais e diminuindo a resistência à compressão (Varela *et al.*, 2015). Na avaliação do processo de S/E são utilizados alguns procedimentos e métodos de ensaios que avaliam as propriedades físicas, por meio da resistência mecânica, e físico-químicas pelo ensaio de lixiviação (Paixão, 2019).

2.5 Ensaio de integridade

Dentre os ensaios de integridade utilizados para a avaliação da aplicação do processo de S/E estão: resistência à compressão (Soares, 2009), ensaios de capacidade de absorção de água (Brito, 2007) e umidificação/ secagem (Brito; Soares, 2009).

2.5.1 Resistência mecânica

Na solidificação ocorrem as mudanças das propriedades físicas, sendo uma delas a resistência à compressão resultante das reações de hidratação, necessária para delimitar o uso ou destinação do material (Jovelino, 2018). Segundo Andrade *et al.* (2016), a alteração da resistência mecânica está relacionada com a porcentagem de utilização de contaminante na amostra, sendo possível então com o ensaio a determinação das relações utilizadas na matriz.

O ensaio de resistência à compressão é utilizado para avaliar a integridade do material final do processo de S/E e verificar a resistência as cargas de compressão mecânica, mantendo-se resistente para impedir a lixiviação na utilização ou disposição final do material tratado. São moldados corpos de prova cilíndricos colocados centrados em relação ao eixo na prensa, transmitindo uma carga de compressão ao corpo de prova equivalente a $0,25 \pm 0,05$ MPa/s, conforme a NBR 7.215 (ABNT, 2019).

2.5.2 Absorção de água

O ensaio de absorção de água, segundo Spence e Shi (2004), é utilizado para quantificar a água presente no sólido, em seus poros permeáveis. Consequentemente está relacionado à porosidade que, quanto maior, mais afeta a resistência à compressão e aumenta a lixiviação. De acordo com Andrade *et al.* (2016), quanto maior o percentual de resíduos adicionados, maior é a absorção de água, influenciando negativamente nos materiais solidificados/ estabilizados.

Para avaliar os produtos resultantes da estabilização por solidificação, no Brasil emprega-se o ensaio de absorção de água conforme a NBR 9.778 (ABNT, 2005), com os corpos de prova condicionados em estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ e com uma relação líquido/ sólido (L/S) 10:1, utilizando água desmineralizada com resistividade maior que $0,2 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$.

Após verificar a massa das amostras, elas são colocadas na estufa a 105°C por 24 horas. Com posterior imersão em água a 23°C por períodos de 24, 48 e 72 horas. O resultado é expresso em %, conhecendo-se a massa do corpo de prova após saturação em água e a massa do corpo de prova seco em estufa.

2.5.3 Umidificação e secagem

No ensaio de umidificação/ secagem baseado no procedimento recomendado pelo Wastewater Technology Center (1991), são submetidas amostras a seis ciclos de umidificação com água a $22 \pm 2^\circ\text{C}$ com posterior secagem em estufa em temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ e umidificação por 24 horas.

Sua importância ocorre ao verificar a durabilidade da matriz cimentícia ao ser submetida a mudanças de temperatura, podendo simular condições às quais a matriz será exposta. Assim, quanto menor for a capacidade de umidificação/ secagem, capacidade de absorção de água e maior a resistência à compressão melhor será a avaliação do material S/E (Rocha, 2010).

2.5.4 Ensaio de imobilização dos contaminantes

Para verificar a imobilização dos contaminantes são realizados ensaios de lixiviação e solubilização propostos, respectivamente, pela NBR 10.005 (ABNT, 2004b) e 10.006 (ABNT, 2004c), para correta classificação e avaliação do impacto no meio ambiente.

2.5.4.1 Lixiviação

O processo de lixiviação, refere-se, a taxa de transferência de substâncias contaminantes presentes no resíduo sólido, para o meio. Os ensaios são usados para indicar a concentração dos metais que estão não foram imobilizados na matriz cimentícia (Cauduro, 2003; ABNT, 2004b).

O procedimento utilizado para o ensaio de lixiviação é padronizado pela NBR 10.005 (ABNT, 2004b), que é baseado na norma americana, US EPA *Method* 1311 (2001) TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*), usada para determinar a mobilidade das substâncias, orgânicas ou inorgânicas, presentes nos resíduos. Sendo as variações possíveis na realização do procedimento as: de natureza da solução lixiviante, de proporção entre resíduo e solução, tempo de contato entre resíduo e solução, número de eluições da solução lixiviante, área superficial do resíduo, tempo de contato entre solução lixiviante e resíduo e tipo de agitação utilizada (Silva, 2007).

Para a realização do ensaio, são utilizados fragmentos granulares, com dimensão inferior a 9,5 mm, das argamassas no estado endurecido aos 28 dias. Na primeira etapa, determina-se a solução de extração utilizada conforme detalhado na norma NBR 10.005 (ABNT, 2004b), com 5,7 ml de ácido acético glacial e completa o volume com água deionizada até a marca de 1 litro.

O próximo passo pós a definição da solução de extração, tem-se a separação de 25 gramas da amostra, para colocação dentro do recipiente cilíndrico do ensaio com 500 ml da solução (relação L/S = 20). Sendo necessário a utilização de agitador mecânico e rotatório dos frascos, com capacidade de garantir a agitação homogênea de 30 ± 2 rpm, durante um período 18 ± 2 horas a 25°C , para evitar estratificação e submeter todas as partículas ao contato com o líquido extrator (ABNT, 2004b).

Passado o tempo de ensaio, com o auxílio da bomba de vácuo, a solução deve ser filtrada com papel filtro de padrão analítico e aferido o seu pH, condutividade elétrica e análise química pela Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDX) que é utilizada para identificar os elementos químicos presentes no líquido lixiviado (Jochem, 2017).

Com as informações coletadas dos ensaios dos materiais por lixiviação juntamente com o ensaio de solubilização, pelas normas NBR 10.005 (ABNT, 2004b) NBR 10.006 (ABNT, 2004c), torna-se possível classificar os resíduos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a) e seu potencial contaminante antes da aplicação do método de solidificação/ estabilização e, posteriormente, no produto obtido (Salado; Sichieri, 2016).

Com o ensaio de lixiviação é possível analisar a quantidade de cada contaminante, comparando com a prévia situação para revelar se o resíduo atende aos padrões estabelecidos para disposição. Alguns desses padrões estão identificados na Tabela 1, adaptada da NBR 10.004 (ABNT, 2004a).

Tabela 1: Limites máximos estabelecidos para lixiviação

Parâmetro	Lixiviação	
	(mg/L)	(mg/Kg)
Arsênio	1,0	20,0
Cádmio	0,5	10,0
Chumbo	1,0	20,0
Cobre	2,0	40,0
Cromo total	5,0	100,0
Mercúrio	0,1	2,0
Níquel	2,0	0,4
Zinco	1,0	100,0

Fonte: Adaptado de NBR 10.004 (ABNT, 2004a)

2.5.4.2 Solubilização

O ensaio de solubilidade é aplicado para avaliar o comportamento dos metais presentes no resíduo sólido, que tem tendência de solubilização, com o objetivo de diluir as substâncias contidas com a aplicação de lavagem em meio aquoso (Cauduro, 2003). Deve ser realizado nos fragmentos que tem dimensões inferiores a 9,5 mm, das amostras monolíticas aos 28 dias de acordo com a NBR 10.006 (ABNT, 2004c), permitindo analisar os teores de metais pesados solubilizados da amostra.

O ensaio consiste em colocar a amostra triturada em contato com a água destilada e deionizada em um béquer (com relação L/S igual a 4), agitando em baixa rotação por um período de 5 minutos, em sequência o recipiente deve ficar em repouso por 7 dias a $25 \pm 1^\circ\text{C}$, temperatura ambiente, e tampado. Após o período em repouso, afere-se o pH da amostra e realiza-se a filtragem da solução com auxílio da bomba de vácuo e um funil de porcelana com papel com porosidade de $0,45 \mu\text{m}$ (ABNT, 2004b).

Os limites estabelecidos pela NBR 10.006 (ABNT, 2004c) para solubilização de alguns metais pesados estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Limites máximos estabelecidos para solubilização

Parâmetro	Solubilização	
	(mg/L)	(mg/Kg)
Arsênio	0,01	0,04
Cádmio	0,005	0,03
Chumbo	0,01	0,02
Cobre	2,0	8,0
Cromo total	0,05	0,004
Mercurio	0,001	0,08
Níquel	0,02	0,4
Zinco	5,0	20,0

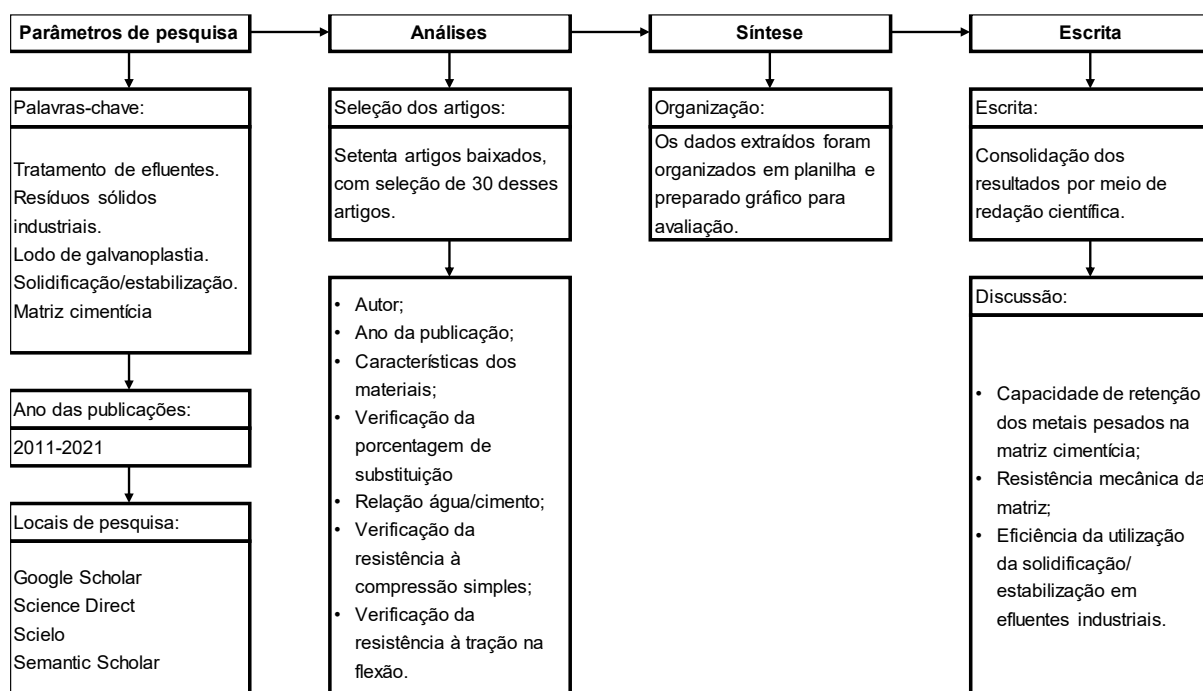
Fonte: Adaptado de NBR 10.006 (ABNT, 2004c)

3 METODOLOGIA

O método de análise escolhido para esse estudo foi a revisão sistemática da literatura, que consiste em um método de pesquisa científica investigativo utilizando como fonte de dados a literatura sobre o tema estudado, com o processo de identificar dados, selecionar, avaliar metodicamente, desenvolver estudo e descrever as contribuições do tema em questão com possível reprodução, com o objetivo de responder a uma pergunta de pesquisa formulada com clareza no início do processo (Rother, 2007; Sampaio, 2007; UNESP, 2015).

Na Figura 3 tem-se o fluxograma da metodologia aplicada para o desenvolvimento da revisão sistemática deste trabalho, estão detalhados em fluxo as etapas do método de revisão sistemática de tratamento de efluente pelo processo de solidificação/ estabilização em matriz cimentícia, definindo palavras-chave para pesquisa de artigos e restringida a busca para publicações entre 2011 e 2021.

Figura 3: Metodologia aplicada nesse programa experimental



Fonte: Autoria própria (2022)

O fluxo da pesquisa sistemática descrito na Figura 3, contempla as seguintes etapas: definição do protocolo de pesquisa, parâmetros de pesquisa, pesquisa em

bancos de dados de artigos e gerenciamento dos dados encontrados, etapa de análise, síntese e redação.

O primeiro passo após escolher o tema e objetivos de pesquisa foi a definição dos parâmetros de pesquisa, como escolha das palavras chaves, que vão guiar a busca pelos artigos publicados. As palavras escolhidas para esse item estão relacionadas com o tema de pesquisa e são: tratamento de lodo de galvanoplastia, resíduos sólidos industriais, solidificação/ estabilização e matriz cimentícia.

A pesquisa foi realizada nos seguintes sites: Google Scholar, Science Direct, Scielo e Scemantic Scholar, que são locais de busca de artigos científicos, juntamente com um período de publicação escolhido de 2011 a 2021.

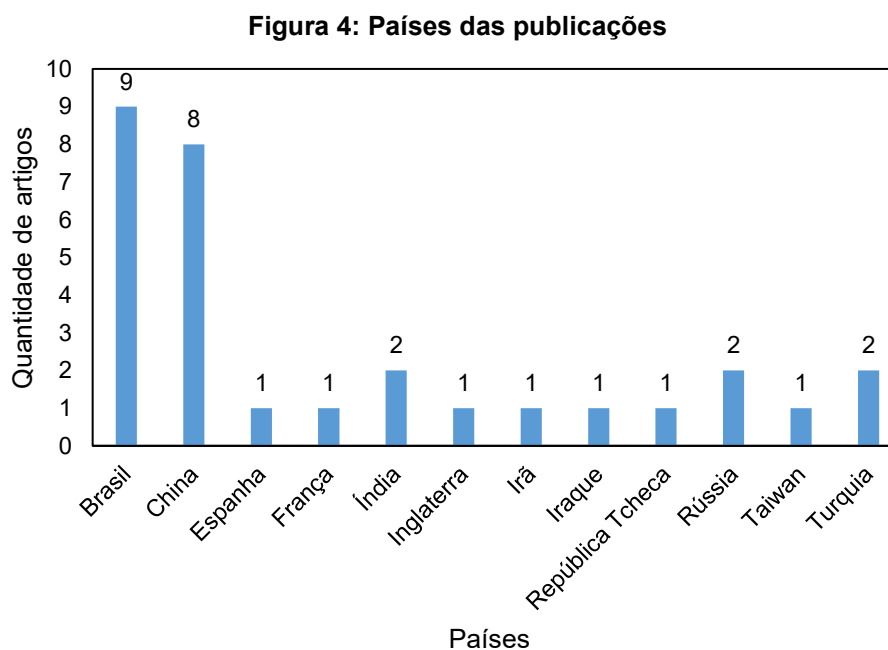
Com esses parâmetros definidos, foram encontrados 70 artigos que se enquadravam. Desses 70 artigos foram selecionados 30 com pertinência ao tema, com os quais realizou-se a segunda etapa (extração das informações). Na terceira etapa foi realizada a síntese das informações, consistindo em tabelar os dados relevantes dos artigos em uma planilha de Excel, para então preparar os gráficos para avaliação e análises.

Já, na quarta etapa foi realizada a análise dos resultados baseado nos gráficos. Por fim, foi descrita a contribuição do estudo, informando as evidências verificadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizando a metodologia descrita no capítulo 3, com os dados encontrados nos artigos foi possível extrair alguns dados quantitativos compilando-os em gráficos apresentados a seguir.

Com base nos artigos utilizados depois da pesquisa de relevância, verificou-se que os autores que realizaram estudos relacionados ao tema, o fizeram em 12 países: Brasil, China, Espanha, França, Índia, Inglaterra, Irã, Iraque, República Tcheca, Rússia, Taiwan e Turquia, os quais estão representados na Figura 4. Dentre os 30 estudos escolhidos, que se encaixavam nos critérios definidos, 9 foram realizados no Brasil e 8 na China.

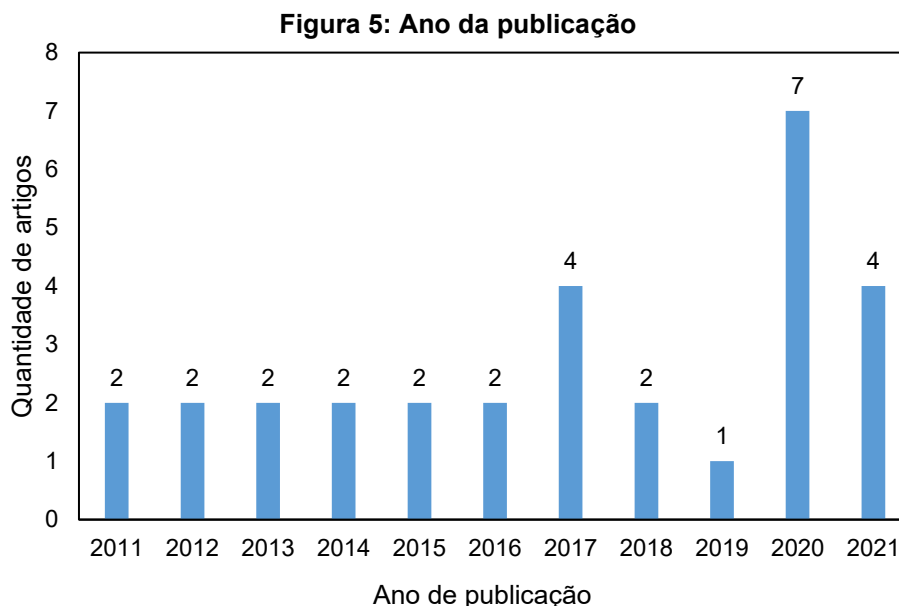


Fonte: Autoria própria (2022)

Esse interesse pelo assunto, entre os autores selecionados para esta revisão, pode demonstrar a necessidade de encontrar uma maneira de tratamento e disposição dos resíduos que seja eficaz, não poluindo o meio ambiente com os metais pesados dos processos industriais.

O período de publicação dos artigos foi escolhido entre 2011 e 2021, para elucidar a pesquisa sobre o tema na última década, sendo possível verificar na Figura 5 a quantidade de publicações no período dos artigos, verifica-se uma estabilização

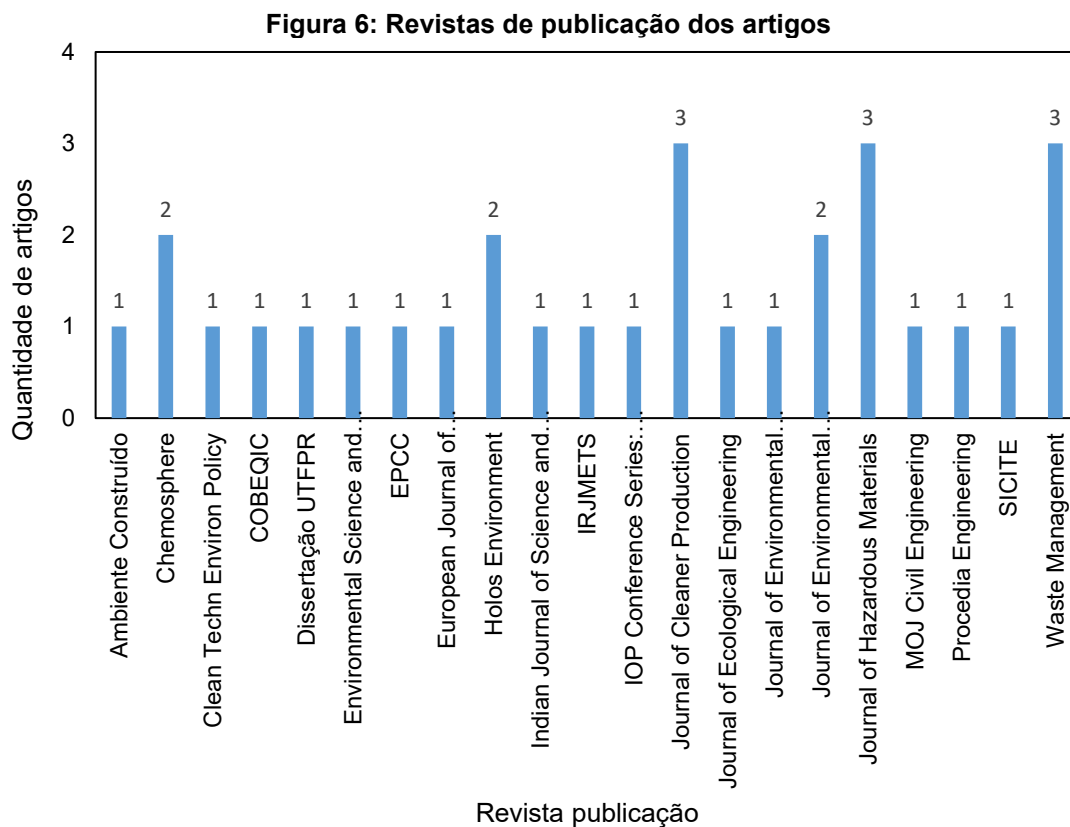
entre os anos de 2011 e 2016, com um aumento significativo em 2020 com 7 artigos, somando 36% do total nos dois últimos anos.



Fonte: Autoria própria (2022)

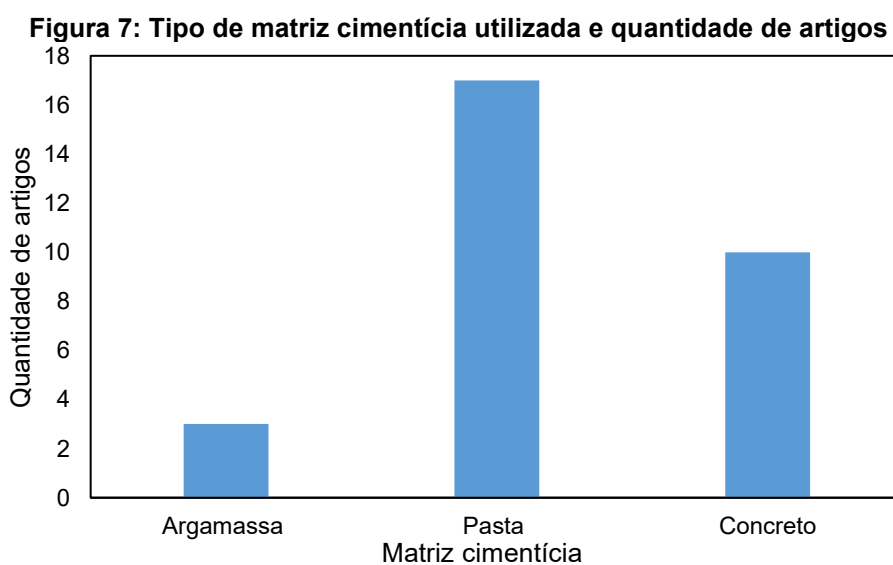
Ilustrando, assim, a crescente preocupação com o tema, nos últimos anos, com o aumento nas pesquisas sobre tratamento, disposição e reciclagem dos resíduos sólidos perigosos que, além de prejudicar o meio ambiente, também têm efeito prejudicial à saúde das pessoas. Esse aumento, pode ser justificado pela preocupação em alinhar-se aos objetivos de desenvolvimento sustentável, da nova política de ação global da ONU, cuja implementação deve ser realizada até 2030.

Na Figura 6, estão as revistas que foram publicadas os artigos utilizados. Das 30 publicações, 7 delas foram realizadas em revistas, congressos e seminários no Brasil. Em relação as revistas internacionais que mais foram encontrados artigos desse trabalho, 3 delas tiveram 3 publicações: Journal of Cleaner Production, Journal of Hazardous Materials e Waste Management, que também tem em seu escopo publicações sobre caracterização, minimização, tratamento e disposição de resíduos sólidos e redução do impacto ambiental de materiais perigosos.



Fonte: Autoria própria (2022)

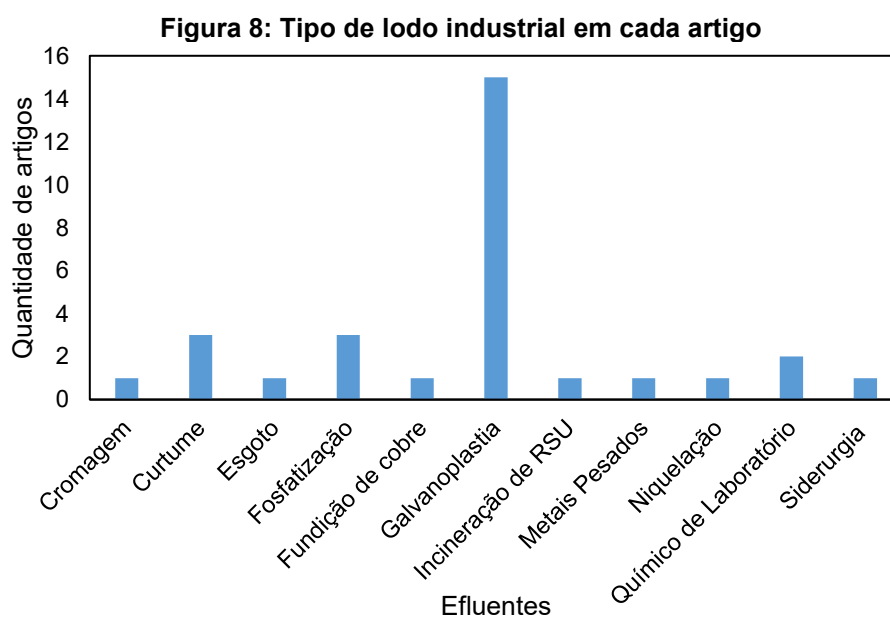
Nessas pesquisas foram utilizados 3 tipos de misturas (pasta, argamassa e concreto) dependendo de cada metodologia aplicada. Na Figura 7, estão identificadas quais matrizes de cimentos foram utilizadas em cada artigo. Dos 30 artigos a mais utilizada foi a pasta de cimento, com mais de 56% do total, seguida pelo concreto com 33,3 %.



Fonte: Autoria própria (2022)

Alguns autores, utilizaram 2 tipos de misturas para a comparação, assim como Belebchouche *et al.* (2015) que, em sua metodologia, avaliou as propriedades da argamassa e pasta de cimento. A maior quantidade de pasta de cimento como escolha da matriz de estudo pode estar relacionada a menor variedade de adições na mistura, maior facilidade na identificação dos resultados e no tipo de tratamento objetivado.

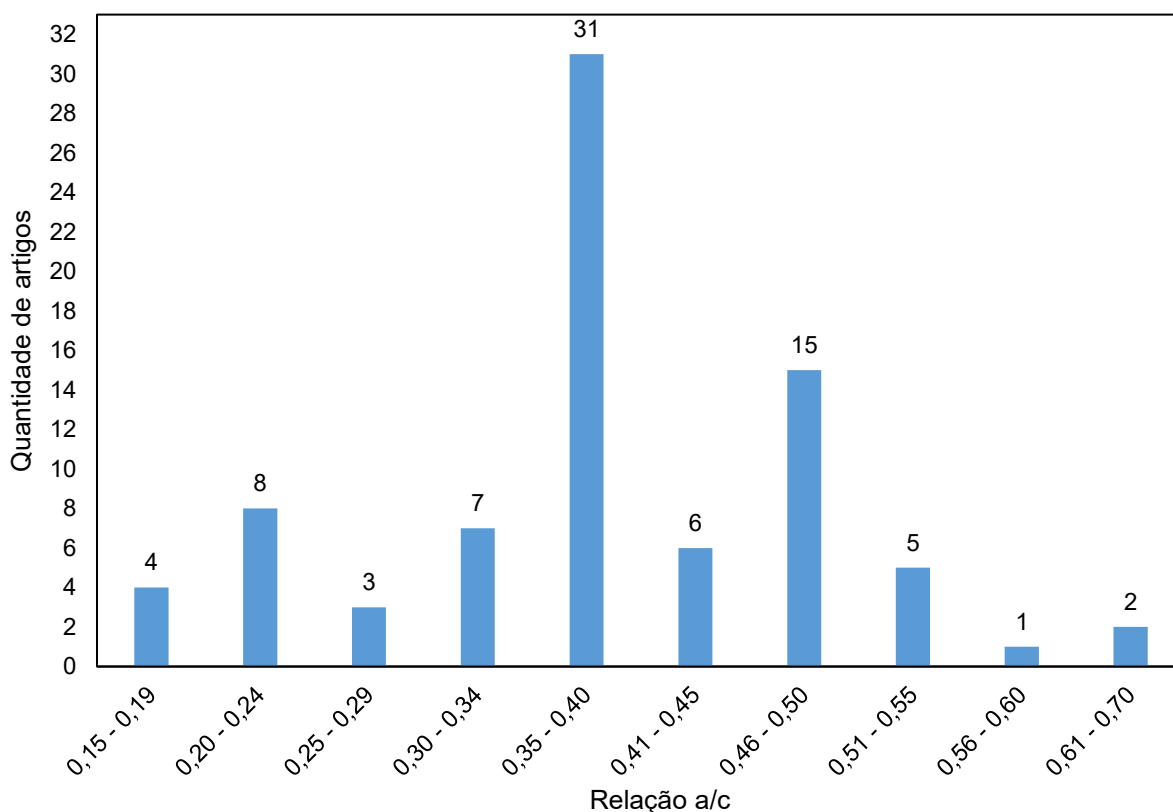
Na Figura 8, estão os tipos de efluentes constados nos artigos incluídos nesse estudo que, inicialmente, estava focado apenas no tratamento por S/E de resíduo sólido de galvanoplastia. No decorrer da aplicação da metodologia, na análise mais detalhada, foram selecionados artigos de outros efluentes industriais que possuem metais pesados em sua composição sendo analisados juntamente ao lodo de galvanoplastia, incluindo cromagem, niquelagem e fosfatização, totalizando um número maior desse segmento em relação aos demais.



Autoria própria (2022)

Em relação ao processo de S/E, um dos fatores importantes é a relação água/cimento (a/c). A utilização de baixas proporções para esse fator é devido a uma matriz solidificada com menor porosidade, podendo, assim, proporcionar uma melhor imobilização física. Enquanto, valores relativamente altos permitem uma melhor trabalhabilidade e consistência de moldagem em materiais cimentícios (Al-Kindi, 2019). Proporções diferentes foram testadas pelos autores dessa revisão e estão na Figura 9, que identifica as relações a/c que foram utilizadas nas preparações das matrizes cimentícias.

Figura 9: Relação água/cimento



Fonte: Autoria própria (2022)

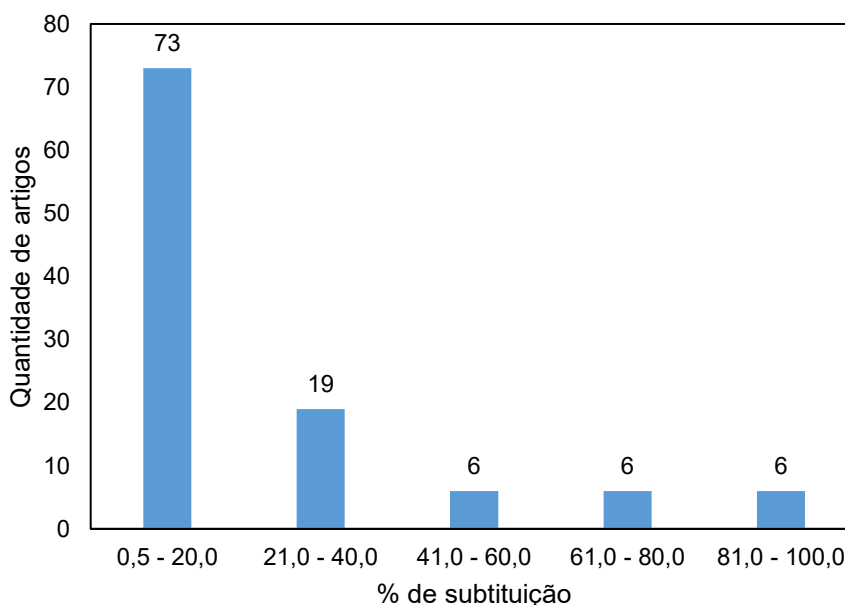
A NBR 7215 (ABNT, 2019) recomenda utilização de 0,48 como fator a/c para o teste de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. A variação dos fatores citados nos artigos estava entre 0,15 e 0,7. Das 79 proporções utilizadas, 52 estavam na faixa entre 0,35 e 0,5, abrangendo 66% das amostras. Apenas pastas cimentícias foram utilizadas com fator a/c entre 0,15 e 0,24, argamassas entre 0,41 e 0,55 e concreto entre 0,39 e 0,7.

É possível analisar a eficácia do processo na retenção de cromo e sua toxicidade, verificando a relevância nas alterações dos seguintes parâmetros experimentais: quantidades de lodo, água e cimento, por possuírem elevada influência. Com o aumento da quantidade relativa de água, a eficácia do processo de S/E relacionado a retenção de cromo diminui levemente, fato que, pode estar relacionado ao aumento da porosidade. Em relação a quantidade de cimento adicionada, com menor quantidade de lodo, pode influenciar significativamente, alterando a quantidade de cromo lixiviado (Montañés *et al.* 2014).

Outro item importante na preparação da matriz cimentícia é a porcentagem de substituição dos componentes pelo resíduo a ser tratado. Cada autor analisou porcentagens de substituição diversas para obter resultados mais conclusivos em

relação a incorporação de resíduos na mistura. Na Figura 10, estão demonstradas as quantidades de incorporação do resíduo na matriz.

Figura 10: Porcentagem de substituição dos componentes da matriz por resíduo



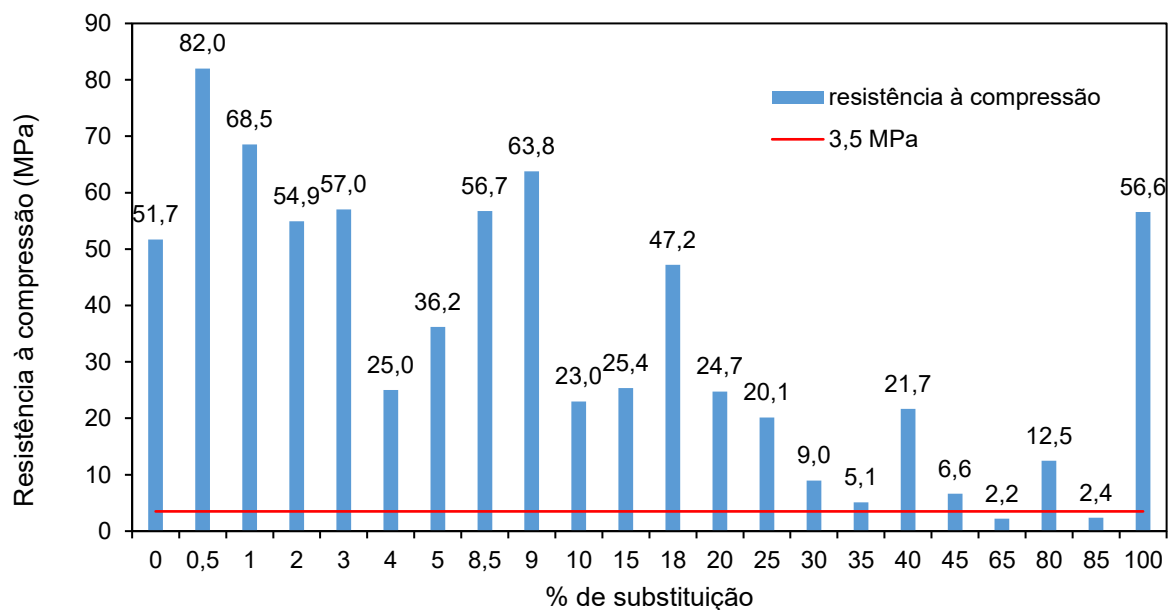
Fonte: Autoria própria (2022)

A faixa entre 0,5 e 20%, corresponde a mais de 60% do total de porcentagens de substituição de resíduos. O aumento da porcentagem de substituição pode afetar o processo de hidratação (Ucaroglu, 2012).

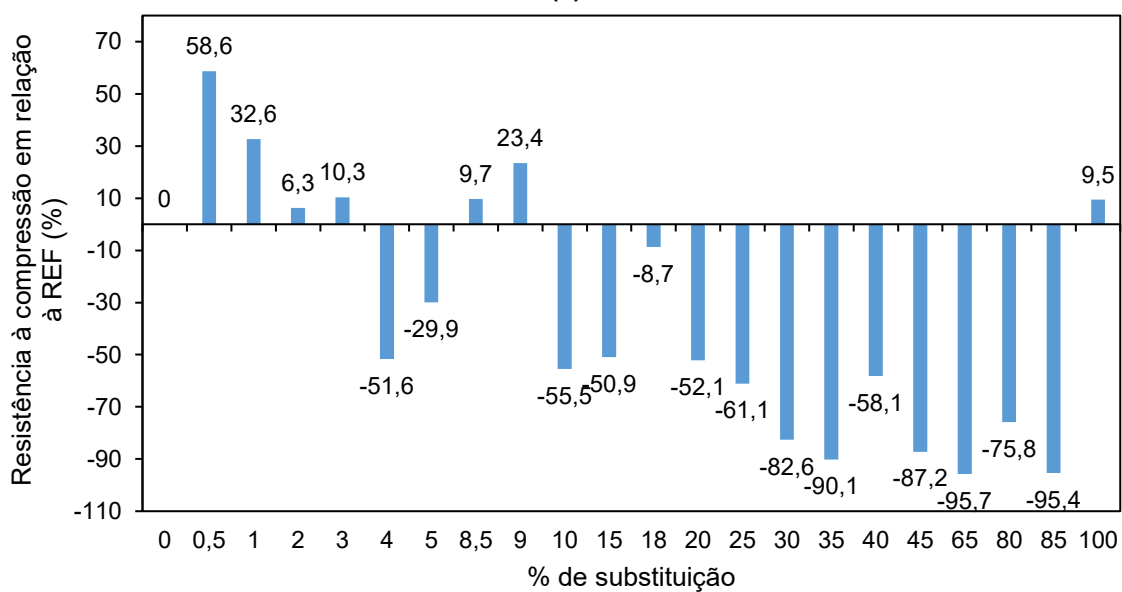
A adição de lodo teve influência negativa na integridade do material cimentício solidificado, que pode interferir na formação dos silicatos de cálcio hidratados e portlandita, que influenciam nas propriedades mecânicas e físicas desses materiais (Andrade, 2016).

Na Figura 11, está representado a resistência à compressão para as porcentagens de substituição, sendo possível verificar uma tendência de queda nas resistências com o aumento da incorporação de resíduo na Figura 11 (a) e na Figura 11 (b), onde estão os valores de resistência à compressão em relação à referência, é possível identificar uma redução da resistência em grande parte dos experimentos.

Figura 11: Resistência à compressão das amostras. (a) versus a porcentagem de substituição; (b) em relação à referência



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2022)

O aumento da porcentagem de incorporação de lodo pode estar relacionado a tendência de queda na resistência à compressão encontrada do produto solidificado, em comparação ao produto sem adição de resíduo, pela diminuição na quantidade de cimento adicionada (Ucaroglu, 2012; Belebchouche, 2015; Varider, 2017).

Mesmo com diminuições relevantes da resistência à compressão, é possível a utilização com finalidades que não exijam altas resistências, como é o caso do descarte em aterro sanitário, onde não é um fator crucial, precisa-se manter a

integridade do material tratado, suportando cargas de até 3,5 MPa, limite mínimo para que sua disposição não cause danos (Stegemann; Côté, 1996 *apud* Jochem, 2017).

O valor de resistência à compressão exigido pela NBR 9.781 (ABNT, 2013) para peças de concreto com aplicação em pavimentação, precisa ser maior que 35MPa, os valores até 9% de substituição da Figura 11 (b) estão dentro do exigido, com exceção para o valor de 4% de substituição.

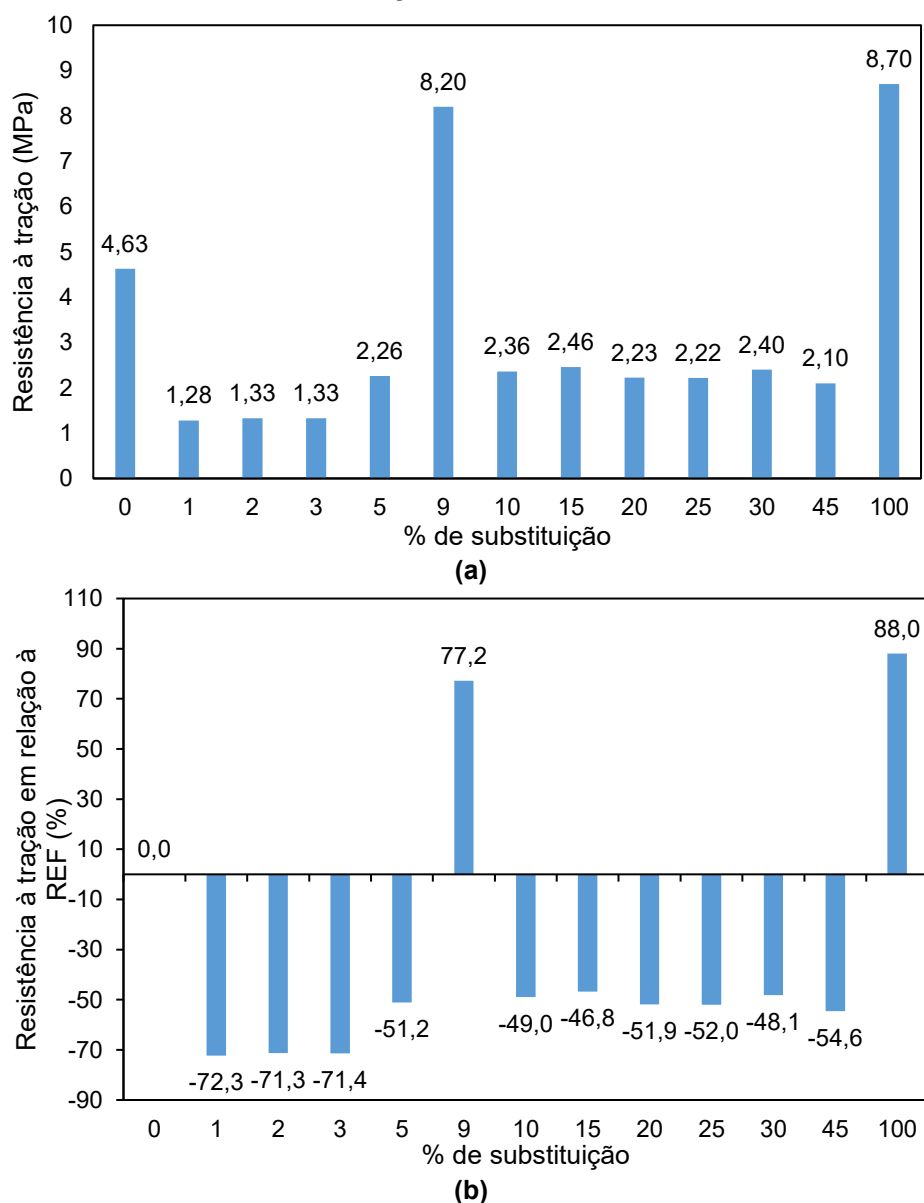
Na Figura 12, estão representadas as resistências à tração das amostras. Pode-se identificar uma queda, mas sem ter uma tendência igual a verificada na resistência à compressão, com duas exceções (9 e 100 % de substituição), em que os valores foram relativamente maiores do que a mistura sem adição do resíduo, fato esse que pode estar relacionado a forma de adição do resíduo realizado na água de amassamento.

A redução dos valores de resistência à tração pode estar relacionada ao aumento da adição de resíduos na mistura, sendo a resistência à tração um dos fatores de controle de abertura de fissuras no concreto e seu acompanhamento possui relevância significativa (Sharma; Thakur, 2021).

Muitos fatores podem interferir no processo de S/E alterando a durabilidade e resistência mecânica, como os já citados anteriormente: % de substituição, tipo de resíduo, relação a/c, e tempo de cura, temperatura e proporção da mistura (Bayar, 2012).

O potencial de retenção é a quantidade retida de contaminantes dentro da matriz solidificada, em relação a concentração inicial dos poluentes antes da aplicação do tratamento de S/E. O ensaio de lixiviação foi aplicado para avaliar essa imobilização de contaminantes, quantificando essa imobilização dos metais ou se eles ainda estão sendo liberados no meio ambiente (Jovelino, 2020).

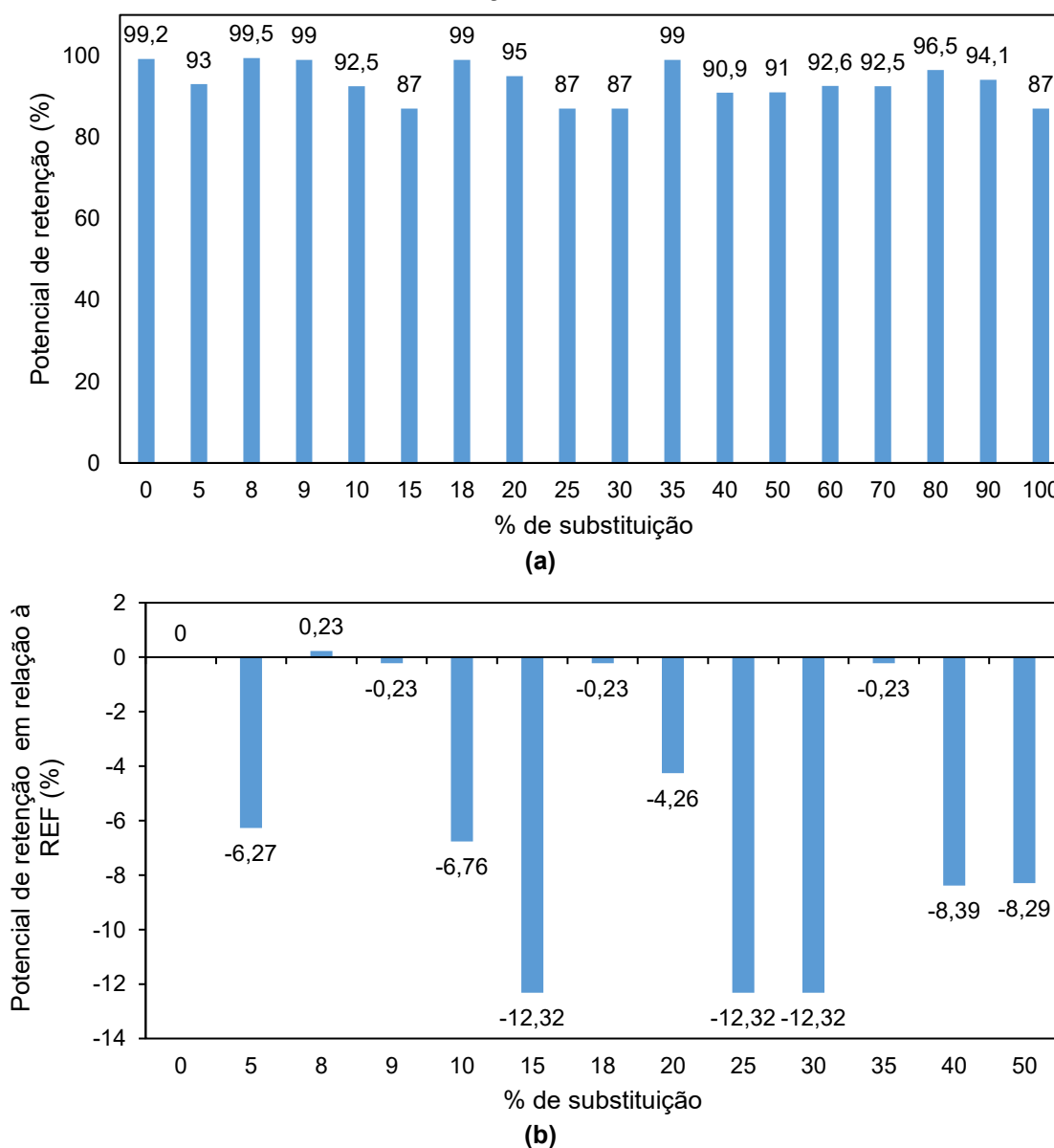
Figura 12: Resistência à tração das amostras. (a) versus a porcentagem de substituição. (b) em relação à referência



Fonte: Autoria própria (2022)

Analisando o potencial de retenção das misturas pode-se ter um indicativo da eficácia da S/E para sua aplicação no tratamento de resíduos sólidos contaminados com metais pesados (Al-Kindi, 2019). Na Figura 13 estão os potenciais de retenção para cada percentual de substituição na mistura pelo lodo contaminado. Na Figura 13 (a), nota-se o alto percentual de retenção, entre 86 e 99% com reduções de até 12% de retenção em relação a referência visíveis na Figura 13 (b).

Figura 13: Potencial de retenção das amostras. (a) versus a porcentagem de substituição; (b) em relação à referência



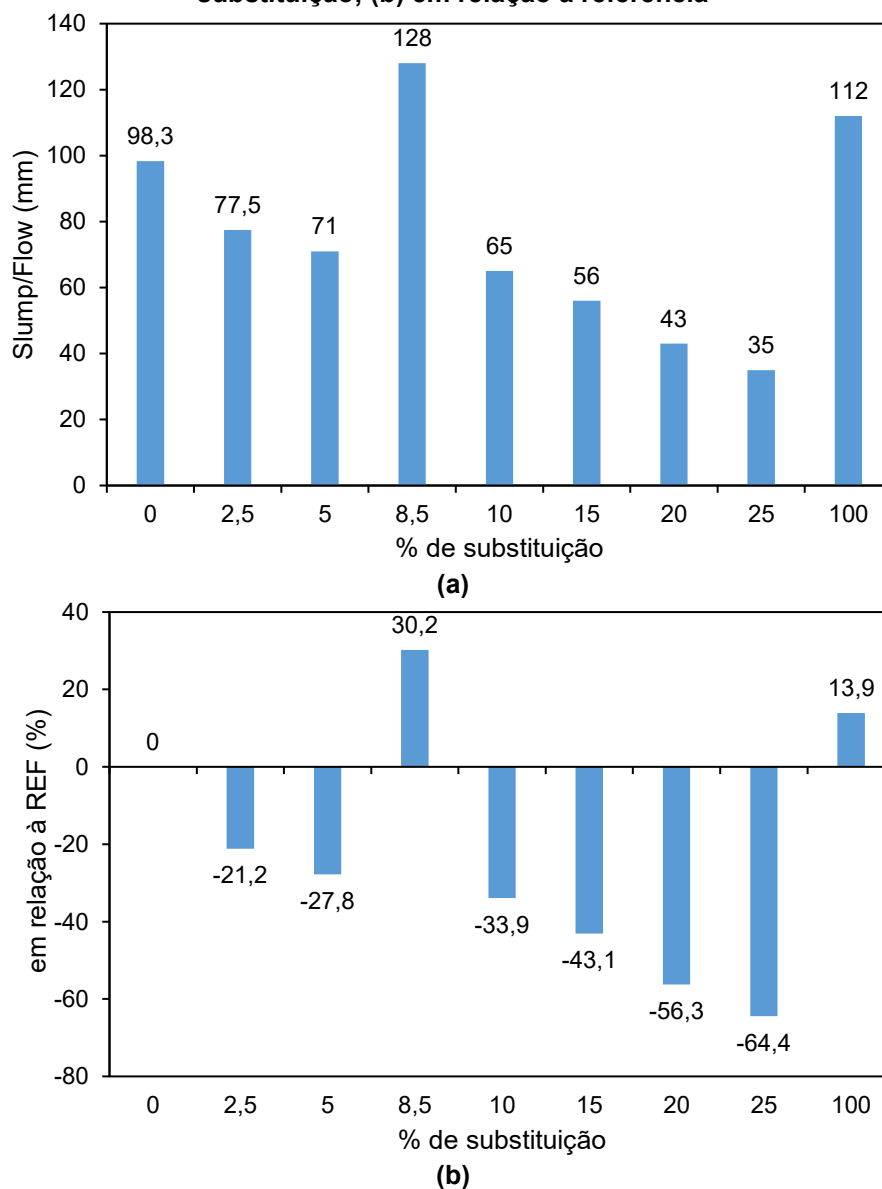
Fonte: Autoria própria (2022)

A maior quantidade relativa de cimentos e maiores partículas na matriz solidificada leva a eficiência do tratamento embora, em alguns casos, o menor percentual de cimento na mistura tenha apresentado menores percentuais de retenção e tenha produzido valores aceitáveis em termos de legislação (Al-Kindi, 2019).

Para garantir que pastas, argamassas e concretos, sejam produzidos com boa trabalhabilidade, são necessários métodos de ensaios *Slump* ou *Flow test*, dependendo do tipo de mistura.

Na Figura 14 estão os resultados dos ensaios de Slump/Flow, dos artigos que continham esses dados de estudo. Na Figura 14 (a), estão os resultados dos ensaios pelas porcentagens de substituição e na Figura 14 (b) estão os dados em relação à referência.

Figura 14: Resultado dos ensaios de Slump/ Flow das amostras. (a) versus a porcentagem de substituição; (b) em relação à referência



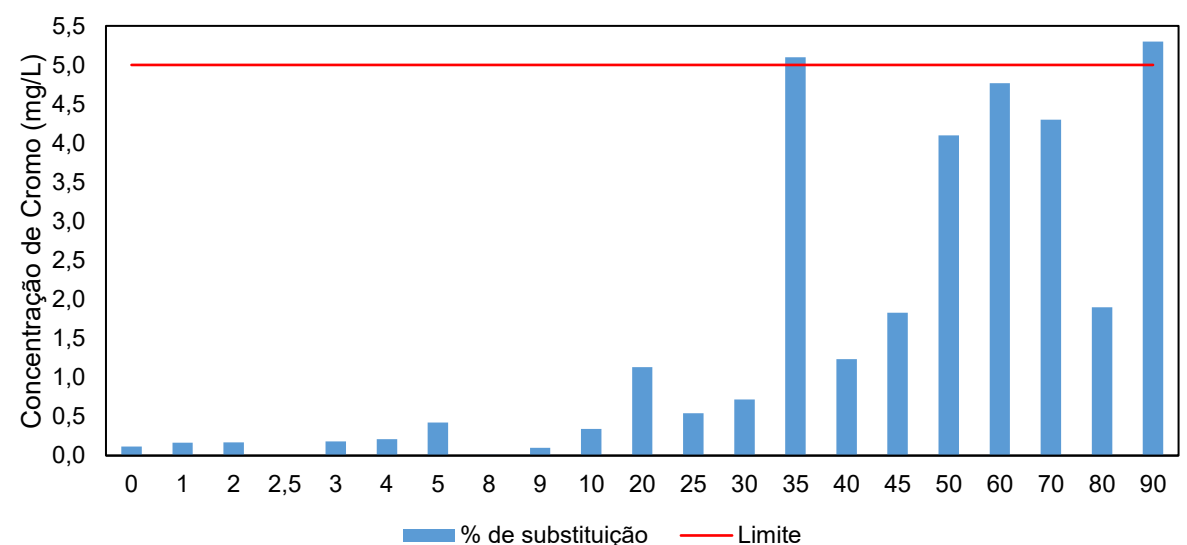
Fonte: Autoria própria (2022)

É possível notar uma descendência nos valores, com duas exceções, na substituição de 8,5 e 100% (128 mm e 112 mm de *Slump/Flow*) por resíduo. O índice de consistência foi afetado pela substituição de 100% na água de amassamento por

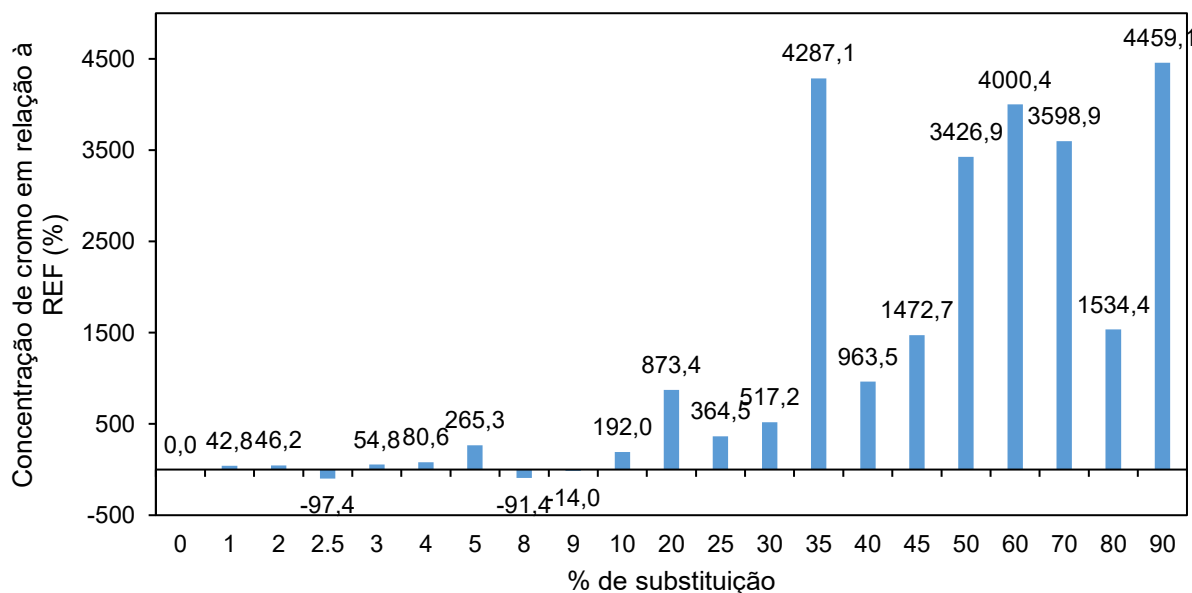
lodo da galvanoplastia, ao contrário do que geralmente acontece, os finos presentes no resíduo podem ter auxiliado no aumento da trabalhabilidade (Jochem *et al.*, 2021).

Referente as concentrações de poluentes, os metais cromo, chumbo, níquel e cobre foram analisados e seus resultados estão descritos a seguir. Na Figura 15, estão representadas as concentrações de cromo após o processo de S/E.

Figura 15: Concentração de cromo nas amostras. (a) versus a porcentagem de substituição. (b) em relação à referência



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2022)

Na Figura 15 (a), estão representados os valores de concentração de cromo diretamente proporcionais aos valores de substituição por resíduo contaminado, com

exceção de alguns valores (2,5, 8, 9 e 20 % de substituição) que, destoam da tendência inicial de menores concentrações para menores substituições. Na Figura 15 (b), está representado a concentração de cromo em relação ao valor de referência.

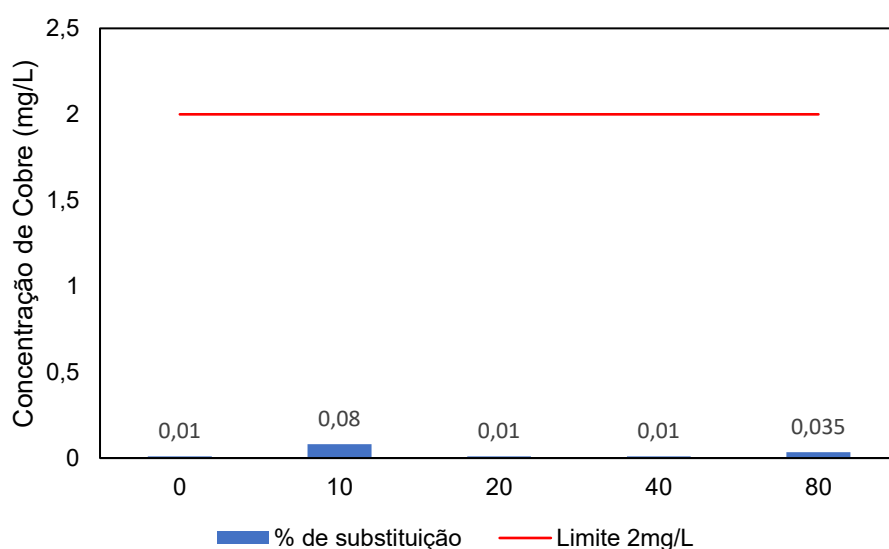
Para porcentagens de substituição de até 35%, verifica-se resultados nos testes de lixiviação para mobilização de cromo dentro de limite máximo de 5,0mg/L, com retenção do metal na matriz, à medida em que a porcentagem de substituição aumenta, diminui a capacidade de retenção do metal. Mesmo assim as porcentagens de retenção mantiveram média acima de 92,5 (Silva *et al.*, 2020).

Na aplicação do tratamento do lodo de galvanoplastia pelo processo de solidificação/ estabilização, na fabricação de blocos de concreto, a incorporação de até 10% de resíduo não afetou a lixiviabilidade e a solubilidade dos metais contaminantes (Bertoli *et al.*, 2015), classificando o resíduo como Classe II-A, não perigoso e não inerte (ABNT, 2004a).

O cromo é um metal altamente solúvel em água e tem grande mobilidade o que dificulta sua retenção em matrizes de cimento Portland em relação a outros metais também presentes nos resíduos de galvanoplastia (Chen *et al.*, 2020).

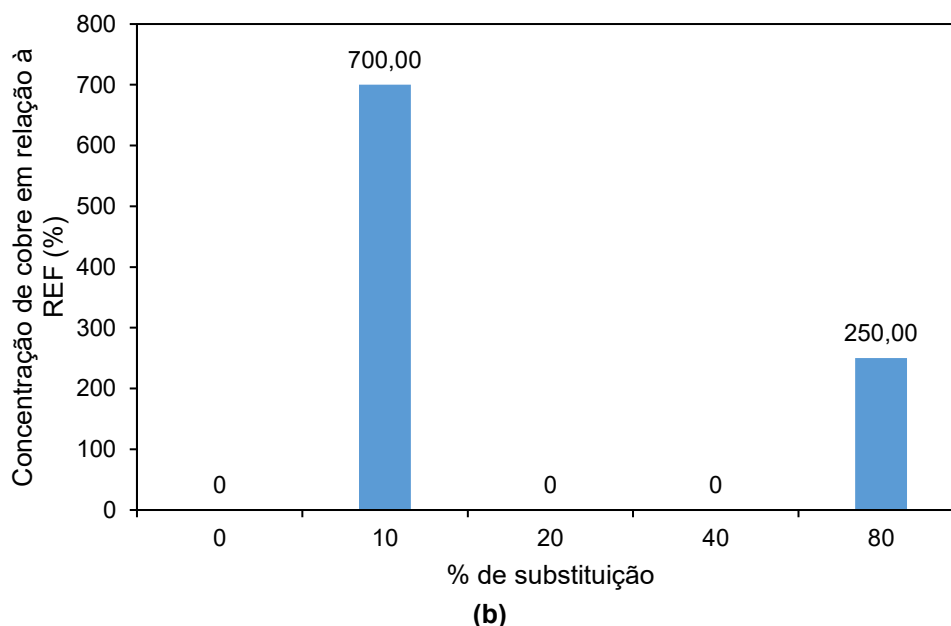
Outro desses metais avaliados foi o cobre. Os valores de sua concentração estão na Figura 16, que demonstra a concentração de cobre nas amostras.

Figura 16: Concentração de cobre nas amostras. (a) versus a porcentagem de substituição; (b) em relação à referência (CONTINUA)



(a)

Figura 16: Concentração de cobre nas amostras. (a) versus a porcentagem de substituição; (b) em relação à referência (CONTINUAÇÃO)



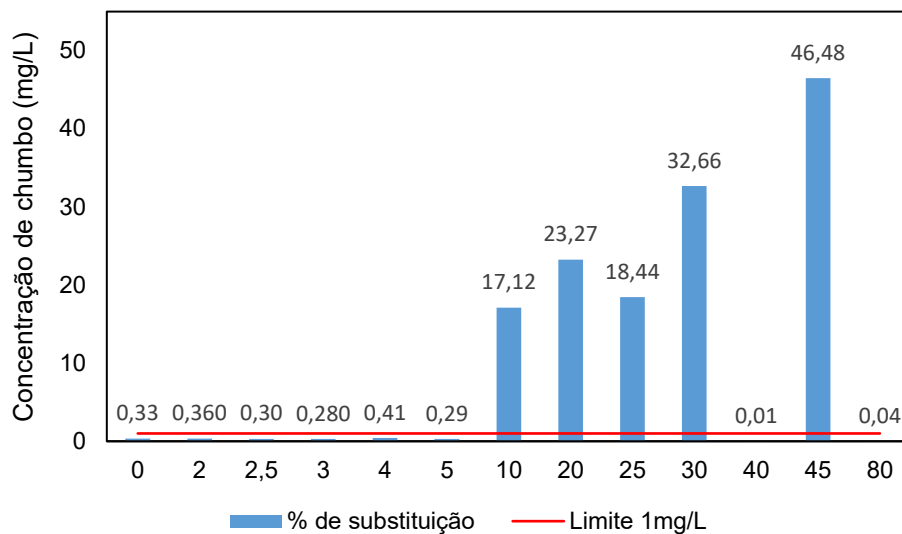
(b)
Fonte: Autoria própria (2022)

Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004a), o máximo valor admissível é 2,0 mg/L, na Figura 16 (a), todos os valores referentes as substituições estão dentro do permitido, mesmo tendo valores altos em relação à referência, com retenção do metal na matriz.

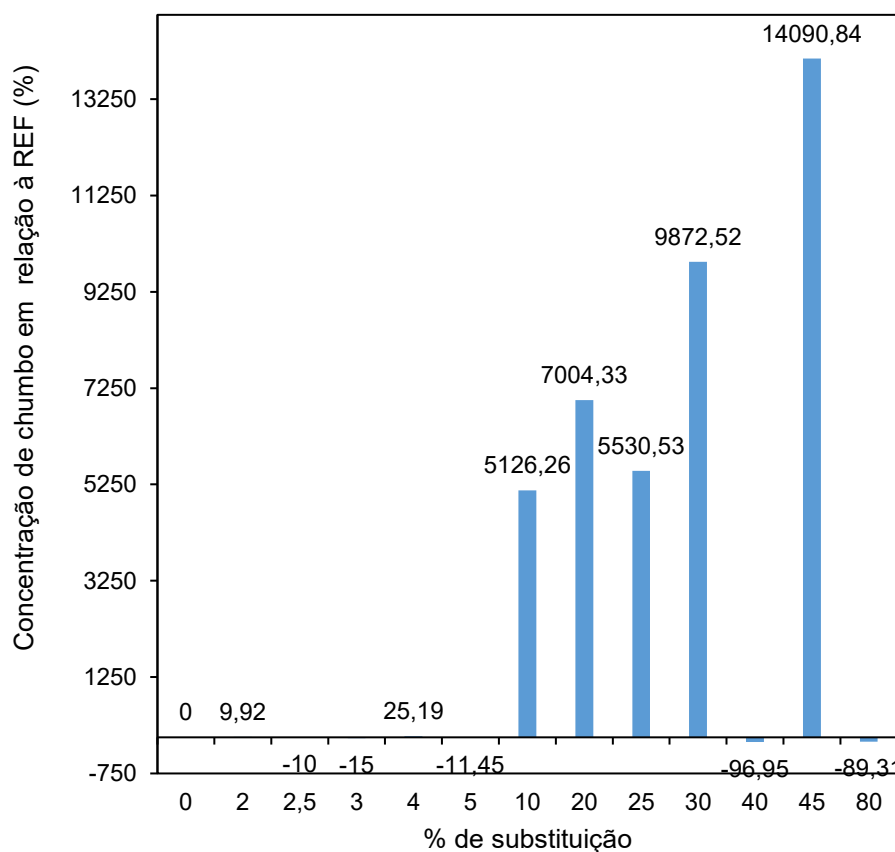
Na Figura 17, estão representadas as concentrações de chumbo, mostrando um aumento relativo da contaminação a partir de 10% de substituição.

O máximo valor aceitável para a concentração de chumbo pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a) é 1,0 mg/L, sendo viável a utilização de substituições máximas de 5% apenas, Figura 17 (a). Nas amostras com substituição a partir de 10% das misturas estudadas, os valores estão acima de 1,0 mg/L, com exceção das amostras de 40 e 80 que tiveram valores próximos de zero.

Figura 17: Concentração de chumbo nas amostras. (a) versus a porcentagem de substituição; (b) em relação à referência



(a)

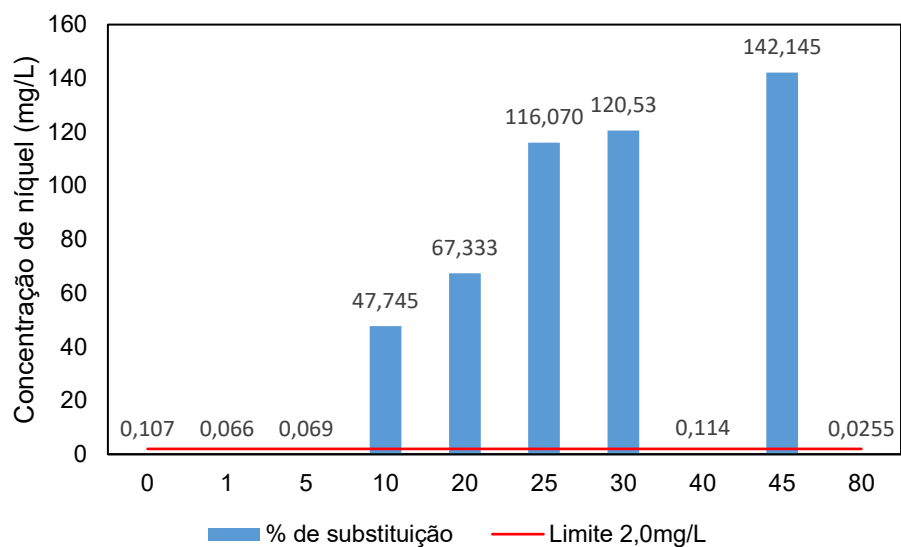


(b)

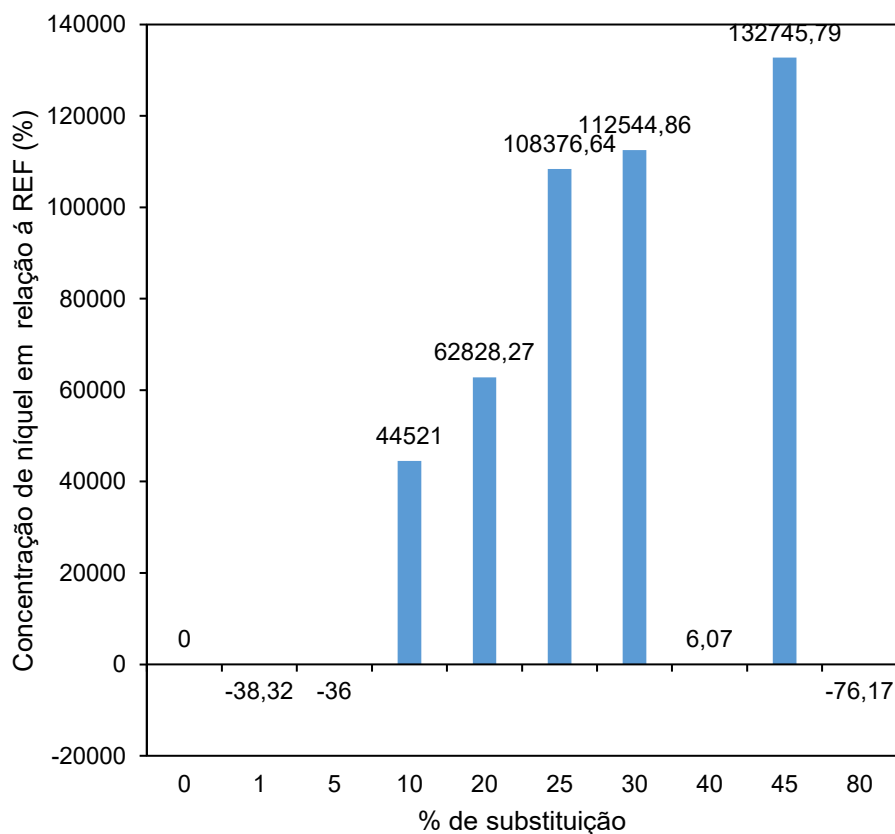
Fonte: Autoria própria (2022)

Em relação aos metais pesados que também foram verificados, níquel e zinco, seus resultados estão indicados nas Figuras 18 e 19.

Figura 18: Concentração de níquel nas amostras. (a) versus a porcentagem de substituição; (b) Concentração de níquel em relação à referência.



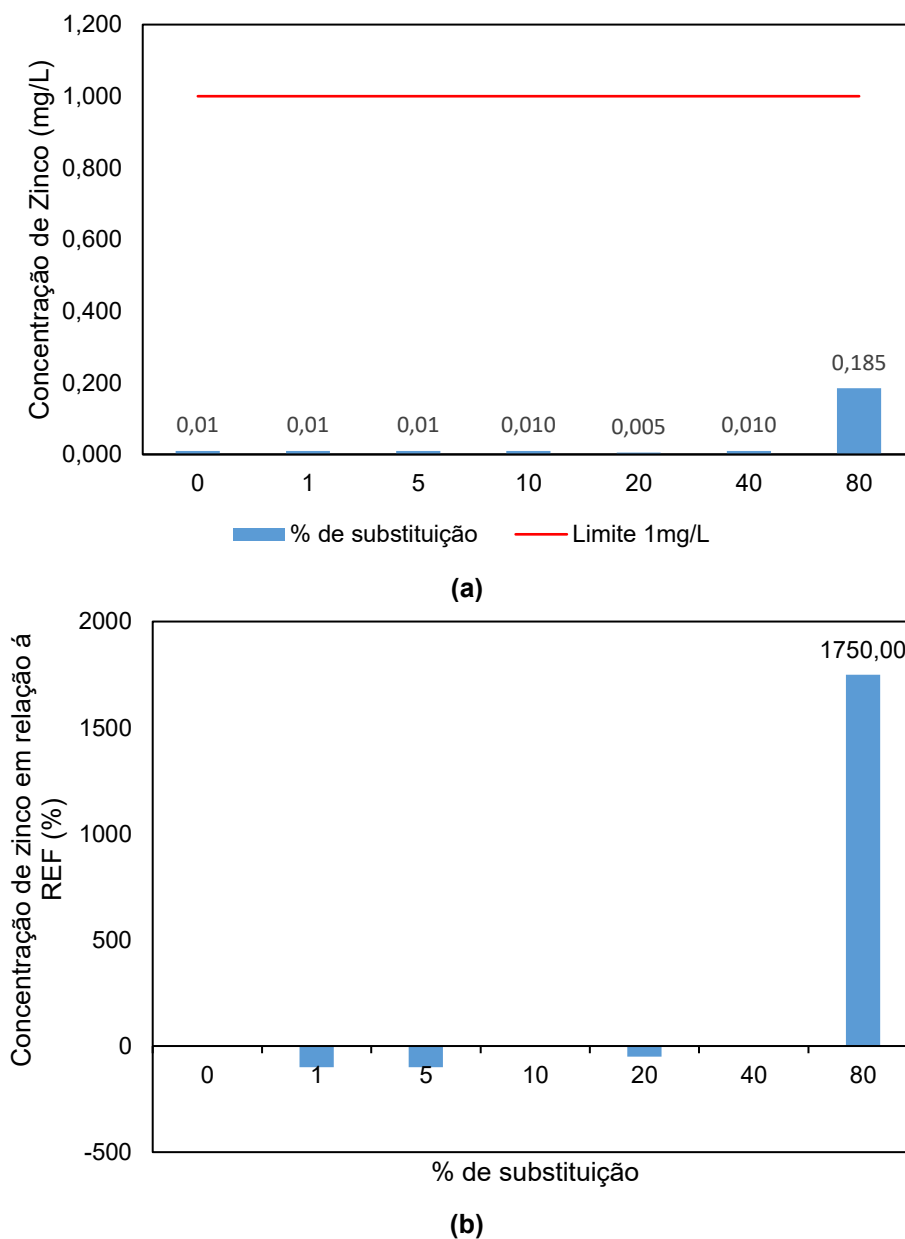
(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 19: Concentração de zinco nas amostras. (a) versus a porcentagem de substituição; (b) em relação à referência



Fonte: Autoria própria (2022)

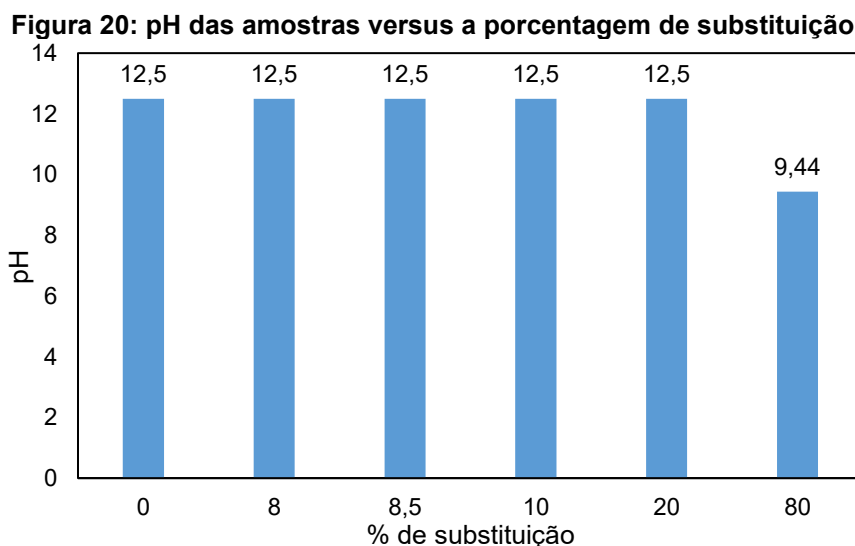
A concentração lixiviada de zinco, teve aumento gradual, durante a cura, mas os valores encontrados após a S/E estavam abaixo de 0,01 mg/l, com exceção para 80% de substituição, sendo quase totalmente encapsulado na matriz (Chen *et al.*, 2011).

Os valores de concentração de níquel das Figuras 18 (a) e (b), aumentaram à medida que a porcentagem de substituição por resíduo aumentou. A concentração de zinco, Figura 19 (a) e (b), ficou constante próximo de 0,01mg/L, sendo esse o valor de detecção do aparelho, até a porcentagem de substituição de 40. Esses metais são

mais facilmente incorporados no processo de S/E, com liberação muito inferior aos outros metais, no caso do níquel que teve valores elevados em substituições de 10%, pode estar relacionado com a alta concentração inicial desse metal.

Para níquel e zinco, os valores relativamente elevados, estão relacionados a alta concentração inicial dos poluentes, à medida que a quantidade poluente aumentou, diminuiu a quantidade de cimento, diminuindo a resistência mecânica se assemelhando ao resultado encontrado nessa revisão sistemática (Ucaroglu; Talinli 2012).

Na Figura 20 tem-se o pH das amostras pela porcentagem de substituição.



Fonte: Autoria própria (2022)

Um pH ácido solubiliza os metais realizando a sua lixiviação, necessitando, portanto, de monitoramento (Vacenovska *et al.*, 2013). A S/E impede a solubilização dos contaminante controlando o pH, deixando-o alcalino, realizando a encapsulação pela menor permeabilidade na matriz sólida (Silva, 2018).

Os valores de pH na Figura 20 estão acima de 8, sendo então, alcalinos, necessário para a S/E dos metais na matriz cimentícia, para evitar a lixiviação.

Na avaliação do panorama geral dos dados, algumas variações podem decorrer da diversidade de metodologias utilizadas pelos autores na realização de sua pesquisa. Tais como: utilização de aditivos e inserção de outros materiais nas misturas cimentícias, não realização de alguns ensaios e falta de divulgação de dados. Tais interferências foram descartadas na medida do possível.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou por revisão sistemática da literatura a trabalhabilidade, pH, proporções da mistura, resistências à compressão e tração, concentração de poluentes, entre outras propriedades. Sendo possível, com os resultados verificados elucidar algumas considerações a respeito do uso do processo de solidificação/estabilização como tratamento para resíduos com metais pesados.

Foi possível constatar a eficácia do processo de solidificação/estabilização para a retenção dos metais pesados, podendo assim ser considerada sua utilização para o tratamento dos efluentes de lodo com metais pesados.

Por ocorrerem mudanças das propriedades físicas do material, em relação à resistência à compressão com os valores aferidos foi possível delinear uma faixa de porcentagem de substituição que não interferiram significativamente nas resistências mecânica. Assim as porcentagens de substituição do lodo com metais pesados podem ser de até 9% na matriz cimentícia em relação à compressão, ficando acima de 3,5MPa, pelas constatações nesse estudo.

Na resistência à tração, aconteceram quedas significativas em relação à referência, sendo necessários mais verificações para determinar valores seguros de substituição de lodo para que não ocorrerem fissuras no produto cimentício e, conseqüentemente, lixiviação dos metais. Poucos autores realizaram ensaios de resistência à tração, dificultando a conclusão sobre os dados.

Os metais presentes na matriz em determinadas porcentagens de substituição não estão lixiviando, ou seja, estão dentro dos padrões admissíveis estabelecidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a) e podem ser enquadrados entre as classes II-A e II-B (inertes e não inertes).

Dessa forma é possível descartar os resíduos em aterro sem contaminação do solo, pois foi verificado o potencial de retenção dos contaminantes, estando eles dentro dos limites impostos pela legislação.

Outras aplicações podem ser utilizadas além dos descartes em aterro, evitando o desperdício de materiais da construção civil e realizando sua reciclagem. Uma dessas aplicações são os blocos para pavimentação, desde que atinjam as resistências exigidas, mantendo uma matriz sólida, com baixa porosidade.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para a continuidade desse tema de pesquisa, sugere-se:

1. Analisar em laboratório substituições de resíduos acima de 10%, para comparar com os valores encontrados nessa revisão.
2. Realizar análise para verificar influência do tempo de cura e temperatura na retenção dos metais na matriz.
3. Verificar com o uso de aditivos a quantidade máxima de substituição de lodo.
4. Avaliar as mesmas porcentagens de substituição que foram estudadas nesse trabalho, utilizando além do lodo, outro agregado reciclado, por exemplo areia.
5. Utilização de outros tipos de cimento para realização da matriz.

REFERÊNCIAS

ALVES, L.C.; SEO, E.S.M. **Caracterização do resíduo sólido proveniente do processo galvânico para valoração econômica ambiental.** Eng. Sanitária Ambiental, São Paulo v.19, n.4, p.423-434, 2014.

AL-KINDI, G. **Evaluation the Solidification/Stabilization of Heavy Metals by Portland Cement.** Journal of Ecological Engineering, v. 20, n. 3, p. 91–100, 1 mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.12911/22998993/99739>. Acesso em: 29 abr. 2021.

ANDRADE, M.R.D.; CUNHA, M.C.M.; BRITO, A.L.F.D.; MUNIZ, A.C.S.; SOUZA, B.V.D. **Estudo da integridade e durabilidade de materiais estabilizados por solidificação contendo lodo de curtume.** 2016.

AGÊNCIA IBGE NOTÍCIAS. **Em 2017, o Brasil consumia 6,3 litros d'água para cada R\$ 1 gerado pela economia.** Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/27607-em-2017-o-brasil-consumia-6-3-litros-d-agua-para-cada-r-1-gerado-pela-economia>. Acesso em: 01 ago. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004: Resíduos Sólidos – Classificação.** 71, Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.005: Lixiviação de Resíduos,** 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos,** 2004c.

BARRETO, L. S. S.; GHISI, E.; GODOI, C.; OLIVEIRA, F. J. S. **Reuse of ornamental rock solid waste for stabilization and solidification of galvanic solid waste: Optimization for sustainable waste management strategy.** Journal of Cleaner Production, v. 275, p. 122996, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122996>. Acesso em: 20 abr. 2021.

BARROS, S.V. A.; DANTAS, G.C.B.; NEVES, G.A.; MENEZES, R.R. **Imobilização de metais pesados presentes nos resíduos de quartzito por meio da incorporação em argamassas com substituição total do agregado natural.** Engenharia Sanitária e Ambiental. 2020, v. 25, n.6 Acessado em: 15 ago. 2021, pp. 833-845. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180063>. Epub 14 Dez. 2020. ISSN 1809-4457.

BARROS, S. S. **Galvanoplastia: controle ambiental no Brasil e na Alemanha, suas bases legais e tecnológicas.** Curitiba, 2016.

BAYAR, S.; TALINLI, I. **Solidification/stabilization of hazardous waste sludge obtained from a chemical industry.** Clean Technologies and Environmental Policy,

v. 15, n. 1, p. 157-165, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10098-012-0494-1>. Acesso em: 20 abr. 2021.

BELEBCHOUCHE, C.; MOUSSACEB, K.; AÏT-MOKHTAR, A. **Evaluation of the encapsulation of nickel, chromium and lead-rich wastes in cement matrices by TCLP test**. European Journal of Environmental and Civil Engineering, v. 20, n. 7, p. 711–724, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1061458>. Acesso em: 03 ago. 2021

BERTOLI, R. F.; CAPUTO, N.; SGORLON, J. G.; GOMES, M. C. S.; MENEZES, M. L. **Estudo da solidificação/estabilização de um resíduo industrial em matrizes de cimento: avaliação da lixiviabilidade e solubilidade de contaminantes**, Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Blucher Chemical Engineering Proceedings, Volume 1, p. 222-227, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/chemeng-cobeqic2015-318-33914-265881>. Acesso em: 07 ago. 2021.

BORGO, S. C. **Minimização e Reciclagem de Lodo Galvânico e Poeira de Jateamento. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental)**. Setor de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 01 ago. 2021.

BREHM, F. A.; KULAKOWSKI, M. P.; EVALDT, D. C.; MORAES, C. A. M.; PAMPANELLI, A. B. **Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil**. Ambiente Construído, v. 13, n. 2, p. 15–27, jun. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212013000200003>. Acesso em: 09 abr. 2022.

BRITO, A. L. F. **Protocolo de Avaliação de Materiais Resultantes da Estabilização por Solidificação**. Tese de Doutorado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis - SC, 2007.

BRITO, A. L. F.; SOARES, S. R. **Avaliação da integridade e da retenção de metais pesados em materiais estabilizados por solidificação**. Revista Engenharia Sanitária Ambiental v.14 n.1, 2009 p.39-48.

CAO, X.; MA, R.; ZHANG, Q.; WANG, W.; LIAO, Q.; SUN, S.; LIU, X. **The factors influencing sludge incineration residue (SIR)-based magnesium potassium phosphate cement and the solidification/stabilization characteristics and mechanisms of heavy metals**. Chemosphere, v. 261, p. 127789, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127789>. Acesso em: 26 abr. 2022.

CASAGRANDE, D. F. M. **Minimização de impactos ambientais da indústria galvânica através do uso de soluções livres de cianeto**. 2009.

CAUDURO, F. **Avaliação Experimental de procedimentos de lixiviação de resíduos**. Florianópolis, 2003.

CEMBUREAU. **World Cement Directory**. The European Cement Association, Cambridge, UK (1996). Disponível em: <https://www.cembureau.eu/media/m2ugw54y/cembureau-2020-activity-report.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2021.

CHEN, Q.Y.; TYRER, M.; HILLS, C.D.; YANG, X.M.; CAREY, P. **Immobilization of heavy metal in cement-based solidification/ stabilization: A review**. Waste Management, v.29, n.1, p.390-403, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.01.019>. Acesso em: 03 ago. 2021.

CHEN, Y.L.; KO, M.S.; LAI, Y, C.; CHANG, J.E. **Hydratation and leaching characteristics of cement pastes made from electroplating sludge**. Waste Management, v.31, n.6, p.1357-1363, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.12.018>. Acesso em: 27 mar. 2022.

CHEN, H.; YUAN, H.; HASHMI, M.Z.; XU, F.; TANG, X. **Stabilization/solidification of chromium-bearing electroplating sludge with alkali-activated slag binders**. Chemosphere, v. 240, p. 124885, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124885>. Acesso em: 27 mar. 2022.

CHRYSOCHOOU, M.; DERMATAS D. **Evaluation of ettringite and hydrocalumite formation for heavy metal immobilization: Literature review and experimental study**, Journal of Hazardous Materials, 2006.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução Conama nº430**, de 13 de maio de 2011. Dispões sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a resolução nº357, de 17 de março de 2005 do Conselho.

CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA – IV REGIÃO. **Tratamento de superfícies**. Disponível em: https://www.crq4.org.br/default.php?P=texto.php&c=quimicavivatratamento_de_superficies. Acesso em: 13 set. 2021.

FAVERO, B. **Incorporação do lodo galvânico em pasta de cimento Portland V**. Trabalho de conclusão de curso.65p. Pato Branco, 2017. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/15355>. Acesso em: 14 ago. 2021.

FAVERO, B.M. **Tratamento de efluente galvânico de através de eletrocoagulação e reuso do lodo como pigmento inorgânico**. Canoas, 2018. Disponível em: <https://anais.unilasalle.edu.br/index.php/sefic2018/article/view/906>. Acesso em: 13 set. 2021.

FRANCO, J. M.; ALMEIDA, P.; SGORLON, J.; & TAVARES, C. **Reutilização de lodo proveniente de atividade galvanotécnica industrial na fabricação de blocos de concreto para pavimentação (pavers)**. CBECIMAT: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Cuiabá, 2014. Disponível em:

https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/48/050/48050340.pdf. Acesso em: 07 ago. 2021.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Descarte ilegal de efluentes na região metropolitana de São Paulo**. 2014 Disponível em: <https://pt.slideshare.net/deavasconc/descarte-ilegal-de-efluentes-industriais>. Acesso em: 27 jul.2021

GABRIEL, F.A.; GONÇALVES, E.M.L.; BEZERRA, A.P.X.G; SANTOS, Í.G.S.; MORAES, A.S.; NETO, F.C.R. **Pollution by Heavy Metals: Environmental Implications and Key Strategies for Remediation**. Revista Geama, v.2, n.4, 2016. Disponível em: <http://journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/970/1400>. Acesso em: 12 set. 2021.

GUIMARÃES, A.V.A. **Cinética dos contaminantes e otimização da estabilização por solidificação de lodo de curtime**. Tese de Doutorado, 186p. Campina Grande, 2017. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1476>. Acesso em: 06 out. 2021.

GUO, B.; TAN, Y.; WANG, L.; CHEN, L.; WU, Z.; SASAKI, K.; TSANG, D. C. **High-efficiency and low-carbon remediation of zinc contaminated sludge by magnesium oxysulfate cement**. Journal of Hazardous Materials, v. 408, p. 124486, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124486>. Acesso em: 12 abr. 2022.

HILSENDEGER, L. R. **Utilização de resíduo líquido de galvanoplastia no tratamento de efluentes através de processo Fenton**. Florianópolis, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/211990>. Acesso em: 13 set. 2021.

HUNCE, S.Y.; AKGUL, D.; DEMIR, G.; MERTOGLU, B. **Solidification/stabilization of landfill leachate concentrate using different aggregate materials**. Waste Management, Turquia, v.32, n.7, p.1394-1400, jul. /2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.03.010>. Acesso em: 28 jul. 2021.

Instituto Estadual do Ambiente. **Galvanoplastia: orientações para o controle ambiental/ Instituto Estadual do Ambiente**. Rio de Janeiro: INEA, 2014, 2. ed.

JOCHEM, L.F. **Efeito do agregado reciclado dos resíduos de construção e demolição na retenção dos metais pesados em processos de solidificação e estabilização**. Tese de doutorado.299p. Florianópolis, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/186519>. Acesso em:10 jul. 2021.

LIU, D. G.; MIN, X. B.; KE, Y.; CHAI, L. Y.; LIANG, Y. J.; LI, Y. C.; WANG, Z. B. **Co-treatment of flotation waste, neutralization sludge, and arsenic-containing gypsum sludge from copper smelting: solidification/stabilization of arsenic and heavy metals with minimal cement clinker**. Environmental Science and Pollution Research, v. 25, n. 8, p. 7600-7607, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1084-x>. Acesso em:22 mai. 2022.

MACIEL, M. H. **Influência do ligante pré-hidratado nas propriedades de suspensão de cimento Portland**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2017.142p. Disponível em: doi: 10.11606/D.3.2017.tde-20102017-113435. Acesso em: 28 set. 2021.

MAO, L.; TANG, R; WANG, Y.; GUO, Y.; SU, P.; WENYI, Z. **Stabilization of electroplating sludge with iron sludge by thermal treatment via incorporating heavy metals into spinel phase**. Journal of Cleaner Production, v. 187, p. 616–624, 2018. Disponível em: doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.235. Acesso em: 23 abr. 2022.

MARCHON, D.; FLATT, R.J. **Mechanisms of cement hydration**. Science and Technology of Concrete Admixtures, Woodhead Publishing. Editor(s): Pierre-Claude Aitcin, Robert J Flatt. Zurich, p.129 –145, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00008-4>. Acesso em: 28 set. 2021.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 4th, New York: McGraw-Hill Education, 2014. Disponível em: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071797870/chapter/cha-pter1#c9780071797870ch01lev1sec05>. Acesso em: 05 mar. 2022.

MELCHERT, M.B. M. **Solidificação e estabilização de resíduos de catalisadores contendo níquel e alumínio em cimento Portland**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Acesso em: 10 jul. 2021.

MONTAÑÉS, M. T.; SÁNCHEZ-TOVAR, R.; ROUX, M. S. **The effectiveness of the stabilization/solidification process on the leachability and toxicity of the tannery sludge chromium**. Journal of Environmental Management, v. 143, p. 71-79, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.04.026>. Acesso em: 05 abr. 2022.

OLIVEIRA, A. R. D. **Corrosão e tratamento de superfície**. Belém, IFPA; Santa Maria: UFSM, 2012. 104p.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Acompanhando a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**: subsídios iniciais do Sistema das Nações Unidas no Brasil sobre a identificação de indicadores nacionais referentes aos objetivos de desenvolvimento sustentável/Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. PNUD. Brasília, 2015. 250p. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/resources/publications>. Acesso em: 01 ago. 2021.

PAIXÃO, J.F.F. **Modelagem do processo de difusão de metais pesados presentes em resíduos após o tratamento de estabilização por solidificação (E/S)**. 2019. 89p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2019. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/8884>. Acesso em: 27 set. 2021.

ROCHA, C.O.D.; GADELHA, A.J.F. **Estudo da tecnologia de estabilização por solidificação (E/S) através de ensaios de integridade e durabilidade**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

ROCHA, J.D.V.D. **Remoção de metais pesados de efluentes da indústria de galvanoplastia: modelagem dos dados de equilíbrio da adsorção isotérmica de zinco por zeólita 4A**. Criciúma, 2017. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/handle/1/6768>. Acesso em: 13 set. 2021.

ROTHER, E. T. **Systematic Literature Review X Narrative Review**. Acta Paul Enferm, v.20, p.2, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/apel/a/z7zZ4Z4GwYV6FR7S9FHTByr/?lang=en&format=pdf>. Acesso em: 08 ago. 2021.

ROY, A.; STEGEMANN, J. A. **Nickel speciation in cement-stabilized/solidified metal treatment filtercakes**. Journal of Hazardous Materials, v. 321, p. 353–361, jan. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.09.027>. Acesso em: 07 abr. 2022.

SALADO, G.; SICHIERI, E.P. **Metodologias para Avaliação da Estabilização/Solidificação (Encapsulação) de Resíduos Industriais para uso em Matrizes Cimentícias, Poliméricas e Cerâmicas e para Desenvolvimento de Produtos para a Construção Civil**, 2016.

SAMPAIO, R.F.; MANCINI, M. C. **Estudo de revisão sistemática: Um guia para síntese criteriosa da evidência científica**. Rev. Bras. Fisioter. São Carlos, vol.11, n.1, p.83-89, jan. /2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbfis/a/79nG9Vk3syHhnSgY7VsB6jG/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 01 out. 2021.

SILVA, P. P.; BRITO, A. L. F. DE; JOVELINO, J. R. **Immobilization of chromium in cement matrices after treatment by stabilization/solidification of solid chemical residues**. Holos Environment, v. 21, n. 1, p. 67–82, 24, 2021. Disponível em: DOI:10.14295/holos.v21i1.12420. Acesso em: 09 out. 2021.

SPENCE, R.D., SHI C. **Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes**. 2004 1st ed. CRC Press. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781420032789>. Acesso em: 03 de setembro de 2021.

SPRADA, E. **Toxicology**. Curitiba: Instituto Federal do Paraná. **Efficiency of Use of Galvanic Sludge in Cement Systems**. Procedia Engineering, p.1112-1117, 2016. Disponível em: 10.1016/j.proeng.2016.11.827. Acesso em: 04 set. 2021.

STEGEMANN, J. A.; CÔTÉ, P. L. **A proposed protocol for evaluation of solidified wastes**. Science of The Total Environment, v. 178, n. 1-3, p.103–110, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04802-2](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04802-2). Acesso em: 31 mai. 2022.

STEPANOV, S.; MOROZOV, N.; MOROZOVA, N.; AYUPOV, D.; MAKAROV, D.; BAISHEV, D. **Efficiency of Use of Galvanic Sludge in Cement Systems**. *Procedia Engineering*, v. 165, p. 1112–1117, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.827>. Acesso em: 28 ago. 2021.

STEPANOV, S.; KRASINIKOVA, N.; MAKAROV, D. **Cement stone, modified by galvanic sludge**. *IOP Conference Series: Materials*. Science and Engineering, v. 890, n. 1, p. 012086, 1. 2020. Disponível em: [doi:10.1088/1757-899X/890/1/012086](https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012086). Acesso em: 28 out. 2022.

THAKUR, M.; SHARMA, S. **Potentiality of exercising the electroplating sludge as a partial substitute for sand in cement concrete**. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, v3, n.1, 2021. Disponível em: https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper/volume3/issue_1_january_2021/5862/1628083240.pdf. Acesso em: 03 mai. 2022.

UCAROGLU, S.; TALINLI, I. **Recovery and safer disposal of phosphate coating sludge by solidification/stabilization**. *Journal of Environmental Management*, v. 105, p. 131–137, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.029>. Acesso em: 20 abr. 2022.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Tipos de revisão de literatura**. Botucatu, 2015. Disponível em: <https://www.fca.unesp.br/Home/Biblioteca/tipos-de-evisao-de-literatura.pdf>. Acesso em: 02 out. 2021.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). **Solidification/Stabilization Resource Guide**. EPA 549-B-99-002, 1999.

VACENOVSKA, B.; CERNY, V.; DROCHYTKA, R.; URBANEK, B.; VODICKOVA, E.; PAVLIKOVA, J.; VALKO, V. **Verification of the Possibility of Solidification Product Made of Neutralization Sludge use in the Building Industry**. *Procedia Engineering*, v. 57, p. 1192–1197, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.150>. Acesso em: 25 abr. 2022.

VARELA, R. S.; LUZ, A.D.; FILHO, P. **A study of different cements and waste ceramic (CDW) on the process of Solidification/Stabilization (S/S) of galvanic sludge (GS)**. 2015.

VARINDER, K. **Use of Electroplating Industry Sludge as a Construction Material**. *MOJ Civil Engineering*, v. 2, n. 1, P. 28-34, 2017. Disponível em: DOI: [10.15406/mojce.2017.02.00024](https://doi.org/10.15406/mojce.2017.02.00024). Acesso em: 25 abr. 2022.

XIA, Y., MENG, F.; LV, Z.; ZHANG, J.; TANG, Y.; SHIH, K. **Develop spinel structure and quantify phase transformation for nickel stabilization in electroplating sludge**. *Waste Management*, v. 131, p. 286–293, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.06.019>. Acesso em: 25 mar. 2022.

WIERCINSKI, A. **Galvanoplastia: Melhorias no processo de zincagem eletrolítica**. p. 1–71. Panambi, 2015. Disponível em:

<http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/handle/123456789/3109>. Acesso em: 13 set. 2021.

ZHANG, M. YANG, C.; ZHAO, M.; YANG, K.; SHEN, R.; ZHENG, Y. **Immobilization potential of Cr(VI) in sodium hydroxide activated slag pastes**. *Journal of Hazardous Materials*, v. 321, p. 281–289, jan. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.06.019>. Acesso em: 26 mar. 2022.

ZOQI, M. J.; GANJIDOUST, H.; MOKHTARANI, N.; AYATI, B. **Solidification optimisation of electroplating sludge**. *Journal of Environmental Engineering and Science*, v. 11, n. 2, p. 33-43, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/jenes.16.00005>. Acesso em: 02 mai. 2022