



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CARINA LESSA SILVA

INCORPORAÇÃO DE LODO TÊXTIL EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL:
uma revisão

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Érika Pinto Marinho

Caruaru
2023

CARINA LESSA SILVA

INCORPORAÇÃO DE LODO TÊXTIL EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL:

uma revisão

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo científico, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil. Defesa realizada por videoconferência.

Área de concentração: Construção civil.

Orientador(a): Prof^a. Dr^a. Érika Pinto Marinho

Caruaru

2023

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu forças para seguir em frente e colocou seres humanos tão especiais em minha caminhada terrena.

À minha mãe, Neide, que se fez presente e foi suporte desde o instante em que decidi que meus planos acadêmicos se fariam longe de casa.

Ao meu pai, José Maria, que sempre acreditou em mim e nunca mediu esforços para me apoiar.

À minha avó, Gerolina, nossa matriarca, que me ensinou sobre cuidado, cozinha, costura e tantos outros valores.

À Ni (Antonieta), Zé (José Fernando), minha madrinha (Rejane), meu padrinho (Rogério) e Rute, que representaram família, em todos seus significados, independente da distância geográfica.

Aos meus tios, tias, primos e primas, que tanto me dão orgulho e me inspiram diariamente, nossos momentos reunidos são minha recarga anual de motivação.

Aos meus amigos e amigas, que, estando perto ou longe, me apoiaram, de todas as formas possíveis, sem eles, com certeza, eu não estaria aqui hoje.

A Lyneker Moura, que me ensinou tanto sobre a pesquisa e a academia, dividimos muitas conversas e momentos de aprendizado, pelos quais sou muito grata.

À professora Érika Marinho, que gentilmente aceitou me orientar e com quem tanto aprendo diariamente, ela esteve presente em toda minha jornada acadêmica e me apresentou a pesquisa, o que transformou minha vida.

À professora Ana Cecília Nóbrega, que sempre acreditou e confiou no meu trabalho, com ela aprendi que às vezes só precisamos de uma vaga.

À professora Jocilene Costa, enquanto Coordenadora do Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste da UFPE, por todo apoio e empenho durante meu processo de Aceleração de Estudos.

Aos professores Flávio Diniz e Maria Victória Leal, que prontamente aceitaram compor a banca de avaliação.

Aos meus professores e professoras, em especial da UFPE - Centro Acadêmico do Agreste e do IFBA - Campus Vitória da Conquista, que me ensinaram não somente sobre tecnicismos, mas sobre a vida.

A cada um que fez parte dessa jornada e contribuiu para que eu construísse o ser humano que sou hoje.

Incorporação de lodo têxtil em materiais de construção civil: uma revisão

Incorporation of textile sludge in civil construction materials: a review

Carina Lessa Silva¹

RESUMO

Em países emergentes, como Brasil, China e Índia, observa-se que o tratamento físico-químico é o método adotado para o tratamento do efluente têxtil, gerando o lodo têxtil. Este material residual semissólido, apesar de classificado como não perigoso, ao ser depositado em aterros ou descartado de forma irregular ocasiona danos ambientais. A construção civil tem buscado soluções sustentáveis que compensem e reduzam seus impactos, como o desenvolvimento de materiais alternativos com incorporação de resíduos diversos. Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão sistemática da literatura produzida acerca da incorporação de lodo têxtil em materiais de construção civil, compreendendo a análise da composição do material residual e de formas de inserção, a fim de apresentar as matrizes mais promissoras para imobilização do lodo têxtil. Foram analisados artigos e monografias produzidos entre 2002 e 2022, em inglês e português, disponíveis no Portal de Periódicos da CAPES e no Google Acadêmico, sendo excluídos os que não descreveram a metodologia de inserção ou não realizaram ensaios para avaliação do material produzido. Após a leitura completa destes, foram extraídos dados catalográficos e informações acerca da forma de incorporação, na metodologia, e propriedades do resíduo, do material e seu desempenho, nos resultados. De forma geral, os autores observaram efeitos deletérios da presença do resíduo em argamassas, concretos, tijolos cerâmicos e tijolos solo-cimento, justificados pelo teor de matéria orgânica no resíduo e aumento da porosidade. Nos materiais com cimento Portland, foi observado o aumento na demanda de água e a baixa interação do lodo têxtil com os produtos de hidratação do aglomerante. Na maioria dos trabalhos, não foi realizado estudo sobre a segurança do resíduo, apenas em tijolos cerâmicos, argamassas, concretos e concretos asfálticos. Nestes materiais, não foram observados teores expressivos de metais lixiviados ou solubilizados. De acordo com a análise dos artigos, os blocos intertravados de concreto e o concreto asfáltico são os materiais de construção menos afetados e mais estáveis para incorporação do lodo têxtil.

Palavras-chave: lodo industrial; materiais alternativos; construção sustentável.

¹Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: carina.lessa@ufpe.br

ABSTRACT

In emerging countries, such as Brazil, China and India, it is observed that physical-chemical treatment is the method adopted for the treatment of textile effluent, generating textile sludge. This semi-solid waste material, although classified as non-hazardous, when deposited in landfills or disposed of irregularly causes environmental damage. Civil construction has sought sustainable solutions that offset and reduce its impacts, such as the development of alternative materials with the incorporation of various wastes. Thus, the objective of this work was to carry out a systematic review of the literature produced about the incorporation of textile sludge in civil construction materials, comprising the analysis of the composition of the residual material and insertion forms, in order to present the most promising matrices for immobilization of textile sludge. Articles and monographs produced between 2002 and 2022, in English and Portuguese, available on the CAPES Portal de Periódicos and Google Scholar were analyzed, excluding those that did not describe the insertion methodology or did not carry out tests to evaluate the material produced. After the complete reading of these, catalog data and information about the form of incorporation, in the methodology, and properties of the residue, of the material and its performance, in the results, were extracted. In general, the authors observed deleterious effects of the presence of residue in mortars, concrete, ceramic bricks and soil-cement bricks, justified by the content of organic matter in the residue and increased porosity. In materials with Portland cement, an increase in water demand and low interaction of the textile sludge with the hydration products of the binder were observed. In most works, no study was carried out on the safety of the residue, only in ceramic bricks, mortars, concrete and asphaltic concrete. In these materials, no significant levels of leached or solubilized metals were observed. According to the analysis of the articles, interlocking concrete blocks and asphalt concrete are the least affected and most stable construction materials for the incorporation of textile sludge.

Keywords: industrial sludge; alternative materials; sustainable construction.

DATA DE APROVAÇÃO: 13 de fevereiro de 2023.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é responsável por ocasionar significativos impactos ambientais, desde o processo de produção das matérias primas, que envolve grandes volumes de extração mineral à intensa geração de resíduos durante os processos de construção, operação e demolição (CONCEIÇÃO et al., 2021; SILVA; CORREIA, 2021). Assim, é de extrema importância buscar tecnologias e novos materiais que possam tornar o setor mais sustentável, a fim de mitigar ou compensar ambientalmente os danos gerados. A utilização de escória de alto forno para fabricação de cimento Portland e a produção de concreto com incorporação de cinzas volantes, provenientes de termelétricas, diminuem a extração de matérias-primas por resíduos de outras atividades industriais, e são formas de diminuir os gastos energéticos, as emissões gasosas e o extrativismo mineral (SILVA; CORREIA, 2021).

A indústria têxtil também é responsável pela geração de diversos resíduos, que, por vezes, são descartados de forma irregular na natureza, principalmente no solo. Chen e Wu (2018), que definiram tal atividade industrial como uma das mais antigas e um dos pilares econômicos da China, apontam a problemática do efluente gerado, que, além da coloração, é tóxico e possui potencial mutagênico à vida.

No Brasil, a Companhia Pernambucana do Meio Ambiente do estado de Pernambuco (CPRH) mapeou os impactos ambientais da produção têxtil: geração de efluentes líquidos industriais; geração de resíduos sólidos não perigosos; geração de resíduos sólidos perigosos; geração de gases e fuligem; consumo significativo de água; contribuição para o desmatamento, devido ao consumo de lenha (CPRH, 2018).

Os principais resíduos sólidos gerados nessa atividade industrial, lodo têxtil e cinzas de biomassa, são provenientes das lavanderias, responsáveis pelos processos de lavagem, amaciamento, tingimento, descoloração e outros procedimentos de modificação dos produtos têxteis (MOURA, 2021; PATIL et al., 2021). O efluente gerado por essas indústrias possui alta carga poluidora, tendo em vista que carrega 90% dos produtos químicos envolvidos em todo processo produtivo (SOUTO, 2017). Em decorrência dos impactos ambientais ocasionados nos principais corpos hídricos da região Agreste Pernambucano, Rio Capibaribe e Rio Ipojuca, a partir de 2004, a CPRH e o Ministério Público Estadual uniram esforços para adotar programas de controle ambiental, tornando obrigatório o tratamento dos efluentes antes do lançamento (CPRH, 2018; MOURA, 2021).

No Arranjo Produtivo Local de Confecções do Agreste Pernambucano, o tratamento realizado ainda se restringe a simples processo físico-químico, contendo as seguintes etapas:

gradeamento, para remoção das porções de maiores dimensões, como retalhos de tecido; equalização, na qual o líquido é submetido a tanques onde a mistura é homogeneizada; coagulação/floculação/decantação, sendo adicionados ao efluente alguns agentes coagulantes, como o policloreto de alumínio ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$) e o sulfato de alumínio (Al_2SO_4); filtração, sendo a porção líquida reutilizada ou lançada nos corpos hídricos e a porção sólida, o lodo têxtil, encaminhada para aterros sanitários ou descartada de forma irregular no solo (CPRH, 2018; MOURA, 2021).

O lodo têxtil é um resíduo semissólido, classificado como não perigoso (Classe II), pela CPRH, de acordo com a norma ABNT 10004:2004 (CPRH, 2018). Em uma lavanderia industrial têxtil de médio porte do Agreste Pernambucano, na qual são processadas em torno de 100 mil peças de vestuários no decorrer de um ano, podem ser geradas cerca de 6 toneladas de lodo têxtil seco, no mesmo período (SOUTO, 2017). No cenário chinês, Chen e Wu (2018) apontaram que, em 2012, foram descartadas 5,93 milhões de toneladas do material residual. Devido ao grande volume gerado, apesar de ser compreendido como não perigoso, é necessário que sejam traçadas alternativas para destinação segura do material, para além dos aterros sanitários, que já possuem alta demanda e ocupação.

Na construção civil, principalmente nas últimas décadas, há um esforço em tornar o setor mais sustentável e uma das soluções é o desenvolvimento de materiais alternativos, contendo incorporações de resíduos dos mais diversos segmentos. Entretanto, o desenvolvimento de materiais de construção incorporando resíduos industriais requer muita atenção em relação ao beneficiamento de matérias-primas, métodos e formas de mistura de componentes e percentual de material residual a ser incorporado sem gerar prejuízos no desempenho final das peças a serem produzidas. Além disso, também é necessário avaliar a imobilização adequada desses resíduos, para garantir que os componentes potencialmente perigosos ao meio ambiente não sejam arrastados, contaminando os meios ao longo de sua vida útil (MOURA, 2021).

A problemática envolvendo o lodo têxtil é mundial e, na literatura, são encontrados trabalhos inserindo resíduo nos variados materiais de construção civil: argamassa (ANJOS, 2017; BARBOZA, 2011; BEG *et al.*, 2022; GOYAL *et al.*, 2019; GUEDES, 2012; LELOUP, 2013; PIETROBON *et al.*, 2002; SILVEIRA, 2020; ZHAN *et al.*, 2020); bloco intertravado de concreto (ANDRADE, 2020; ARULPANDIAN *et al.*, 2020; CASAGRANDE *et al.*, 2020; SANTOS, 2019; VEIGA, 2019; VELUMANI; SENTHILKUMAR, 2018); concreto (ALTIDIS *et al.*, 2014; BEG *et al.*, 2022; JAHAGIRDAR *et al.*, 2021; LOGANAYAGAN *et al.*, 2020); concreto asfáltico (MOURA, 2021); tijolo cerâmico (CHEN; WU, 2018; HEREK *et al.*, 2005;

HOSSAIN *et al.*, 2018; LUCHTENBERG, 2022; SAHA *et al.*, 2022); tijolo solo-cimento (PREMKUMAR *et al.*, 2021).

Dessa forma, este trabalho apresenta o estado da arte da discussão científica de como os lodos provenientes de lavanderias industriais têxteis têm sido incorporados em materiais de construção civil a fim de entender quais deles podem se configurar como uma matriz para destinação adequada, compreendendo, para tal, as condições de fabricação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Apresentar o estado da arte sobre o uso de materiais de construção civil como forma de destinação final para os lodos de tratamento de efluentes de lavanderias industriais têxteis.

1.1.2 Objetivos Específicos

A fim de realizar as avaliações necessárias, são objetivos específicos deste trabalho:

- Avaliar e comparar as diferentes propriedades físico-químicas de lodo têxtil estudados para produção de materiais de construção;
- Identificar que componentes de construção já foram investigados como forma de incorporar lodos têxteis e quais foram mais promissores;
- Analisar que proporção máxima de lodo têxtil pode ser incorporada de forma segura, sem perda de componentes perigosos, segundo estudos de imobilização de contaminantes.

2 METODOLOGIA

Neste estudo, a questão de pesquisa desenvolvida visa analisar o comportamento de materiais de construção civil ao receberem adição de lodo têxtil, técnica ainda não aplicada de forma comercial, porém com resultados promissores na literatura. É possível visualizar os principais conceitos da pesquisa a partir dos critérios PICO (População Intervenção Comparação Resultado) (Tabela 1).

Tabela 1 - Critérios PICO

Critérios PICO	Descrição
População	Materiais de construção civil
Intervenção	Adição de lodo têxtil
Comparação	Materiais convencionais
Resultado (<i>Outcome</i>)	Verificar as melhores matrizes para incorporação

Fonte: Autora (2023).

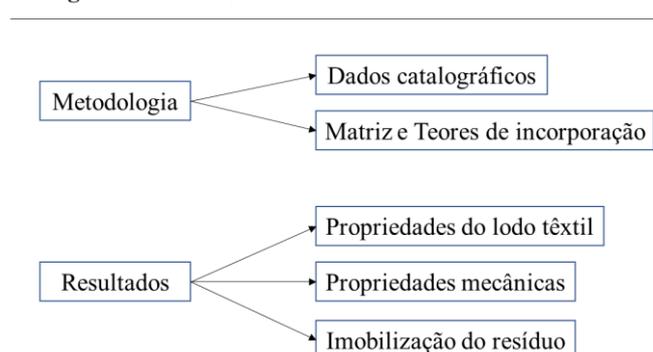
Tendo por base a relevância do tema no âmbito desta área de pesquisa, foram selecionadas duas bases de dados eletrônicas de literatura: Portal de Periódicos da CAPES e Google Acadêmico. Foram associados à temática duas palavras-chave: Lodo têxtil (*Textile sludge*) e Material de construção (*Building material*). As palavras-chave foram combinadas pela *string* de busca: “*textile sludge*” E “*building material*”, para trabalhos dos últimos vinte anos, sendo catalogados artigos científicos e monografias de 2002 a 2022, em inglês e português. Com base na Tabela 1, foram definidos os critérios de inclusão e exclusão (Quadro 1).

Quadro 1 - Critérios de inclusão e exclusão

Base de dados	Portal de Periódicos da CAPES e Google Acadêmico
Tipo de documento	Artigos e monografias
Área de concentração	Ciência e engenharia dos materiais, Construção civil e Tecnologia ambiental
Período	2002 – 2022
Idioma	Inglês e Português
Critérios de inclusão	Trabalhos que realizaram a inserção do lodo têxtil para desenvolvimento de materiais alternativos, descrevendo a metodologia de inserção e realizando ensaios para avaliação do material desenvolvido.
Critérios de exclusão	Trabalhos que não descrevam a metodologia de inserção ou não realizem ensaios para avaliação do material, bem como em idiomas diferentes de inglês e português.

Fonte: Autora (2023).

Foram analisados, nos trabalhos selecionados, os dados de interesse: dados catalográficos, propriedades do lodo têxtil, matriz e teores de incorporação, propriedades mecânicas e imobilização do resíduo. Após a leitura completa de cada trabalho, estes foram extraídos na metodologia e nos resultados (Figura 1).

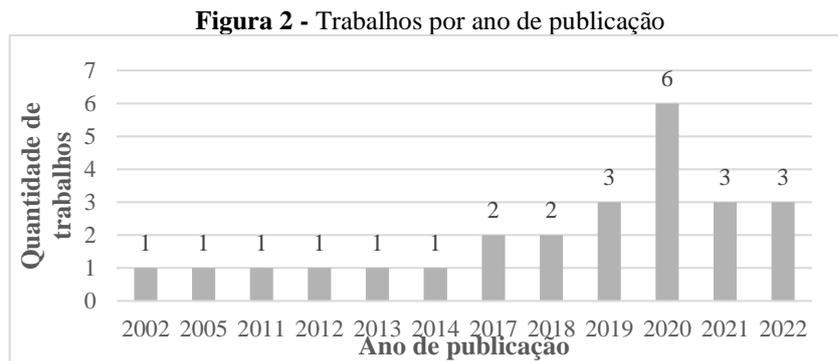
Figura 1 - Fluxograma de análise dos trabalhos

Fonte: Autora (2023).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Dados catalográficos

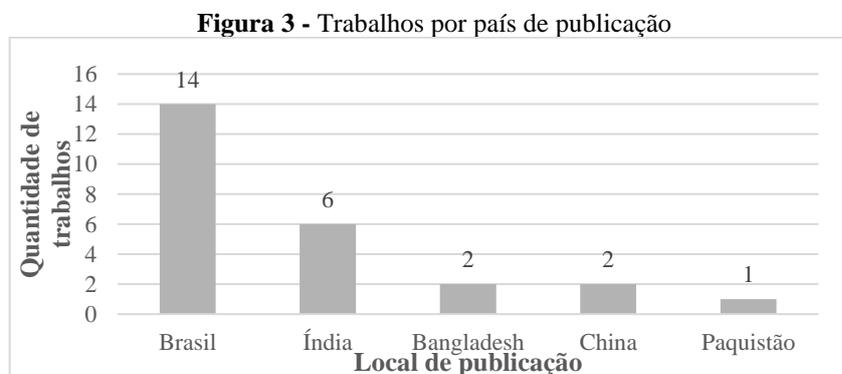
A fim de compreender a distribuição cronológica dos trabalhos analisados, na Figura 2, são apresentadas as quantidades destes por ano de publicação.



Fonte: Autora (2023).

É possível observar que há um maior número de publicações referentes ao ano de 2020, sendo seis das vinte e cinco analisadas, seguido dos anos de 2019, 2021 e 2022, apresentando três trabalhos cada. A partir do gráfico exposto, fica evidente que a distribuição temporal possibilita uma percepção significativa da temática no período entre 2002 e 2022. O aspecto de existirem mais produções nos últimos quatro anos analisados indica a atualidade do tema e a necessidade de discuti-lo amplamente.

De modo a compreender os países de origem da bibliografia estudada, foram avaliados seus locais de publicação (Figura 3).



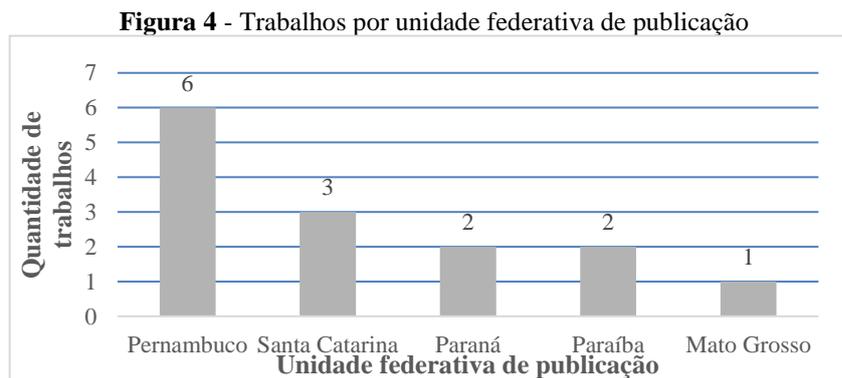
Fonte: Autora (2023).

Entre os países indicados, são observados três dos dez maiores produtores mundiais, conforme dados da UNIDO (*United Nations Industrial Development Organization*) de 2018,

sendo a China, primeira colocada, a Índia, segunda, e o Brasil, figurando em décimo (MENDES JUNIOR, 2021). Outro fator importante a ser observado é que essas três nações são emergentes, que ainda não possuem tecnologias ambientais tão bem estabelecidas quanto outros desenvolvidos que apresentam também grandes produções, como Japão e Alemanha.

Gähr, Hermanutz e Oppermann (1994) apresentam a ozonização como técnica para auxiliar as indústrias têxteis alemãs a cumprirem os rigorosos critérios exigidos por lei para os efluentes industriais. Os autores apontam, ainda, a problemática relacionada aos tratamentos simplificados, que ocasionam geração de grandes volumes de lodo têxtil, o que também foi levantado por Watari *et al.* (2021). Esses países focam em tratamentos que não geram o resíduo sólido, reduzindo os impactos ambientais e os custos com sua disposição (GÄHR; HERMANUTZ; OPPERMANN, 1994; WATARI *et al.*, 2021).

Para visualizar as unidades federativas brasileiras das quais são oriundas as produções, estas foram elencadas (Figura 4).



Fonte: Autora (2023).

De forma semelhante aos dados globais, dois dos três estados brasileiros apresentados estão entre os maiores produtores têxteis do país, estando Santa Catarina na segunda colocação e Pernambuco, na nona, conforme dados do IBGE em termos do valor bruto da produção no ano de 2018. Conforme o Ministério da Economia, no ano de 2020 o estado do Mato Grosso foi o maior exportador de produtos têxteis, superando a Bahia e São Paulo (MENDES JUNIOR, 2021).

3.2 Propriedades do lodo têxtil

Conforme supracitado no item 1, as propriedades do lodo têxtil estão intrinsecamente relacionadas ao processo produtivo das peças e ao posterior tratamento realizado no efluente

gerado. Dessa forma, se faz relevante compreender essas características que irão influenciar diretamente na interação do resíduo com a matriz de incorporação. A Tabela 2 apresenta a massa específica e o pH referentes aos trabalhos nos quais essas informações foram indicadas. É importante que sejam conhecidas essas propriedades do material para compreender como as misturas serão afetadas com sua presença, o volume, por exemplo, devido à variação de massa específica.

Tabela 2 – Massa específica e pH das amostras de lodo têxtil

Autores	Origem	Propriedades	
		Massa específica (g/cm ³)	pH
Andrade (2020)	SC – Brasil	1,2	-
Anjos (2017)	SC – Brasil	1,9	6,5
Arulpandian <i>et al.</i> (2020)	Índia	3,2	-
Barboza (2011)	PE – Brasil	-	5,9
Beg <i>et al.</i> (2022)	Paquistão	-	8,0
Casagrande <i>et al.</i> (2020)	PE – Brasil	2,7	-
Chen & Wu (2017)	China	-	6,0
Goyal <i>et al.</i> (2019)	Índia	2,3	-
Herek <i>et al.</i> (2005)	PR – Brasil	-	7,3
Hossain <i>et al.</i> (2018)	Bangladesh	1,2 - 1,5	6,4 - 6,7
Jahagirdar <i>et al.</i> (2021)	Índia	1,2 - 1,5	-
Leloup (2013)	PE – Brasil	1,8	7,4
Loganayagan <i>et al.</i> (2020)	Índia	-	7,6
Luchtenberg (2022)	MT – Brasil	1,9	6,6
Moura (2021)	PE – Brasil	2,2	8,4
Pietrobon <i>et al.</i> (2002)	PR – Brasil	-	5,1
Premkumar <i>et al.</i> (2021)	Índia	2,3	9,2
Saha <i>et al.</i> (2022)	Bangladesh	1,4	6,5
Silveira (2020)	SC – Brasil	1,9	-

Fonte: Autora (2023).

Em relação à massa específica, é possível observar que o menor valor observado foi de 1,2 g/cm³ e o maior, 3,2 g/cm³. Conforme Moura (2021), essa variação está interligada às diferentes composições químicas do material. Arulpandian *et al.* (2020) indicam que por possuir uma menor granulometria e ter uma maior massa específica que o cimento, as misturas com lodo têxtil requerem um maior volume de água de amassamento.

Acerca do pH das amostras elencadas, o menor valor foi 5,1, indicando caráter ácido e, o maior, 9,2, atestando caráter básico. Moura (2021) indica que a basicidade das amostras de lodo está relacionada à presença de minerais como cálcio, magnésio e silício, o que pode ser visualizado na Tabela 3, sendo os três principais componentes da amostra avaliada pelo autor.

Outra característica importante a ser compreendida nos materiais residuais é sua composição química e como esta pode variar, tendo em vista que, mesmo sendo incorporado enquanto agregado, estes podem ocasionar danos à matriz. Na Tabela 3, são apresentadas as diferentes composições químicas explicitadas pelos autores. Em sublinhado espesso são destacados os componentes em maior teor nas amostras; com sublinhado duplo, o segundo maior; por fim, em sublinhado pontilhado, o terceiro.

Tabela 3 - Composição química do lodo têxtil

Origem	Autores												
	Altidis <i>et al.</i> (2014)	Andrade (2020)	Anjos (2017)	Barboza (2011)	Chen & Wu (2017)	Goyal <i>et al.</i> (2019)	Guedes (2012)	Jahagirdar <i>et al.</i> (2021)	Leloup (2013)	Moura (2021)	Saha <i>et al.</i> (2022)	Silveira (2020)	Zhan <i>et al.</i> (2020)
	PB - BR	SC - BR	SC - BR	PE - BR	China	Índia	PB - BR	Índia	PE - BR	PE - BR	Bangladesh	SC - BR	China
CaO	1,7%	<u>63,1%</u>	<u>63,1%</u>	1,3%	0,3%	<u>33,5%</u>	2,7%	<u>23,0%</u>	8,9%	<u>28,2%</u>	17,4%	<u>63,1%</u>	0,9%
Al₂O₃	<u>3,2%</u>	<u>17,0%</u>	<u>17,0%</u>	<u>29,7%</u>	<u>50,8%</u>	0,3%	2,0%	3,6%	<u>22,1%</u>	3,6%	0,3%	<u>17,0%</u>	<u>4,6%</u>
SrO	-	0,1%	0,1%	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1%	-
MgO	<u>1,8%</u>	<u>6,3%</u>	<u>6,3%</u>	-	-	1,0%	<u>2,9%</u>	9,5%	-	<u>21,0%</u>	1,1%	<u>6,3%</u>	-
SiO₂	<u>47,9%</u>	5,1%	5,1%	<u>52,4%</u>	<u>41,7%</u>	<u>3,8%</u>	<u>86,6%</u>	<u>15,2%</u>	<u>36,8%</u>	<u>14,8%</u>	<u>29,3%</u>	5,1%	2,5%
SO ₃	-	4,1%	4,1%	<u>7,8%</u>	<u>4,0%</u>	0,4%	<u>3,4%</u>	1,6%	<u>11,1%</u>	4,3%	<u>37,4%</u>	4,1%	<u>18,2%</u>
P ₂ O ₅	-	2,2%	2,2%	1,8%	-	-	1,7%	3,5%	7,2%	-	5,3%	2,2%	2,1%
Na ₂ O	0,7%	1,2%	1,2%	-	-	0,1%	-	-	-	-	2,7%	1,2%	-
K ₂ O	0,1%	0,4%	0,4%	4,6%	0,3%	-	0,2%	-	3,5%	-	2,3%	0,4%	-
Fe₂O₃	0,2%	0,3%	0,3%	1,7%	0,7%	<u>18,9%</u>	0,4%	<u>26,9%</u>	8,2%	1,4%	2,6%	0,3%	<u>44,5%</u>
Cl	-	0,2%	0,2%	-	-	-	-	-	-	2,2%	-	0,2%	-
TiO ₂	-	-	-	-	2,3%	-	-	1,3%	-	-	0,2%	-	-
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	0,1%	-	-	0,1%	-	-
MnO	-	-	-	0,2%	-	-	-	0,6%	1,6%	1,6%	0,1%	-	0,6%
OUTROS	44,6%	0,0%	0,0%	0,5%	0,0%	42,0%	0,1%	14,8%	0,6%	22,8%	1,2%	0,0%	26,6%

Fonte: Autora (2023).

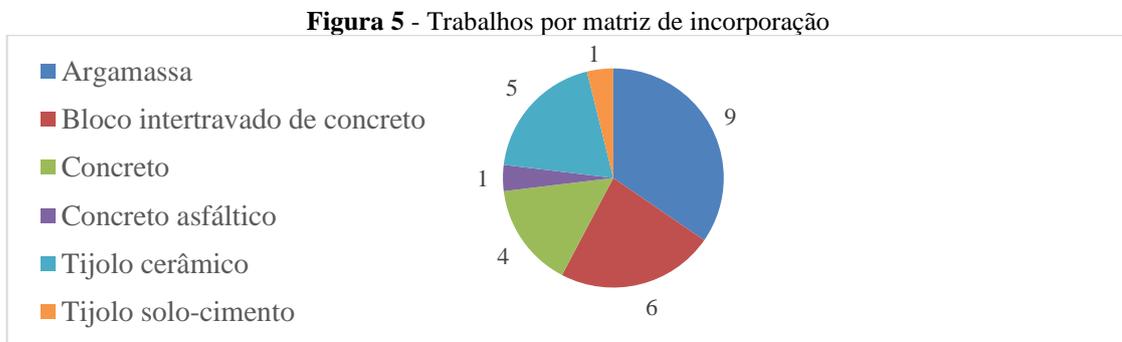
É importante destacar que os resultados apresentados são referentes a ensaios de Fluorescência de Raios X (FRX) e, portanto, contém apenas os componentes inorgânicos. Alguns autores, como Andrade (2020), Anjos (2017), Chen e Wu (2017), entre outros, não consideraram o teor de matéria orgânica na apresentação dos resultados, o que traz uma percepção errônea acerca do resíduo, tendo em vista que essa porção é degradável e pode influenciar na durabilidade do material. Como já apresentado, as amostras de lodo têxtil possuem uma grande variabilidade em sua composição química, porém, dentre as apresentadas, é possível que sejam observados cinco componentes principais: óxido de cálcio, em maior proporção em cinco dos treze trabalhos e segundo e terceiro maiores em outros dois; óxido de

alumínio, um dos três principais componentes em oito amostras; óxido de magnésio, em seis; óxido de silício, em nove; por fim, óxido de ferro, em três.

A presença da sílica pode estar ligada à utilização de argila expandida na estonagem das roupas, procedimento responsável por desgaste estético no tecido, também necessário para preparação para recebimento de alvejantes e corantes. Quanto aos demais metais, cálcio, alumínio, magnésio e ferro, todos estão presentes em soluções utilizadas nos processos de tratamento físico-químico de efluentes, sendo o sulfato ou policloreto de alumínio empregado na etapa de floculação. Um aspecto interessante é que, em substituição destes últimos podem ser utilizadas soluções férricas, notório nos materiais estudados por Goyal *et al.* (2019), Jahagirdar *et al.* (2021) e Zhan *et al.* (2020), que possuem altos teores de óxido de ferro e baixos de óxido de alumínio.

3.3 Matriz de incorporação

Os trabalhos analisados utilizaram diferentes matrizes de incorporação para o lodo têxtil, sendo estas apresentadas na Figura 5.



Fonte: Autora (2023).

Os principais materiais utilizados foram: argamassa, sendo nove trabalhos; bloco intertravado de concreto, com seis produções; tijolo cerâmico, com cinco; finalmente, concreto, possuindo quatro. Por possuir granulometria de fíler, é coerente a utilização de tal resíduo em argamassas e concretos, matrizes que, essencialmente, possuem agregados miúdos na composição.

Os estudos foram organizados de acordo com a matriz, de modo a compreender a metodologia de incorporação para cada uma delas, identificando os teores de incorporação, os resultados obtidos e o teor ótimo.

3.3.1 Argamassa

Na Tabela 4, são apresentadas informações acerca da incorporação do lodo têxtil nas argamassas.

Tabela 4 - Incorporação de lodo têxtil em argamassa

Autores	% incorporado	Informações gerais
Anjos (2017)	5% a 20% (em massa total)	Argamassa de cimento Cimento CP II – F – 32 Traço – 1:3
Barboza (2011)	5% (em massa de areia)	Argamassa de cal e cimento Cimento CP II – F – 32 Traço – 1:2:9
Beg <i>et al.</i> (2022)	5% e 10% (em massa de cimento)	Argamassa de cimento Cimento 53-Grade OPC Traço – 1:2,75
Goyal <i>et al.</i> (2019)	5% a 20% (em massa de cimento)	Argamassa de cimento Cimento 53-Grade OPC Traço – 1:3
Guedes (2012)	5% a 20% (em massa de cimento)	Argamassa de cal e cimento Cimento CP II – F – 32 Traço – 1:2:9
Leloup (2013)	1% a 3% (em massa de areia)	Argamassa de cimento Cimento CP II – Z – 32 Traço – 1:4
Pietrobon <i>et al.</i> (2002)	10% a 30% (em massa de cimento)	Argamassa de cimento Cimento CP II – Z Traço – 1:3
Silveira (2020)	1% a 2% (em massa total)	Argamassa de cimento Cimento CP II Traço – 1:3
Zhan <i>et al.</i> (2020)	5% a 20% (em massa de cimento)	Argamassa de cimento Cimento OPC Type I Traço – 1:3

Fonte: Autora (2023).

Em cinco das nove produções, foram considerados teores de lodo têxtil em relação à massa de cimento Portland, em valores variando entre 5% e 30%. A substituição desse material é positiva, tendo em vista que sua produção é responsável por uma série de impactos ambientais, relacionados à extração mineral, emissão de gases do efeito estufa, além de ruídos sonoros e geração de poeira (RIBEIRO; DELGADO, 2018). Na maioria dos trabalhos foram estudadas argamassas de cimento Portland, sendo realizada a adição de cal por dois destes, em traço de 1:2:9 (cimento : cal : areia). Para os estudos desenvolvidos no Brasil, foi unânime a utilização

de cimento Portland composto (CP II), com adições de fíler ou pozolana, sendo 1:3 (cimento : areia) o traço mais utilizado.

Compreendida a relevância ambiental da substituição parcial da matéria-prima natural pelo lodo têxtil, é preciso verificar a influência de tal resíduo no desempenho mecânico dos materiais. Na Tabela 5, são apresentados o teor ótimo incorporado e são apresentados os principais resultados dos ensaios analisados com as argamassas. As setas apontando para cima, “↑”, indicam que ocorreu aumento quando comparado o resultado do material com incorporação do teor ótimo de resíduo e a referência; de forma análoga, as setas apontando para baixo, “↓”, denotam que houve uma redução.

Tabela 5 – Desempenho das argamassas com incorporação de lodo têxtil

Autores	% ótimo	Principais resultados
Anjos (2017)	10%	↓resistência à compressão (-89,1% 3,7 MPa) ↑absorção de água (+100%)
Barboza (2011)	5%	↓densidade de massa (-5,2%) ↓resistência à compressão (-34,6% 0,5 MPa) ↓absorção por capilaridade (-92,2%)
Beg <i>et al.</i> (2022)	5%	↓resistência à compressão (-35,6% 11,0 MPa) ↑absorção de água
Goyal <i>et al.</i> (2019)	5%	↓resistência à compressão (-3% 44,0 MPa) ↓absorção de água (-6,9%)
Guedes (2012)	15%	↑resistência à compressão (+100% 2,4 MPa)
Leloup (2013)	3%	↓resistência à compressão (-35,3% 7,5 MPa) ↓absorção de água (-29,2%)
Pietrobon <i>et al.</i> (2002)	10%	↓resistência à compressão (-34,9% 17,2 MPa)
Silveira (2020)	1%	↓densidade aparente (-19,8%) ↓resistência à compressão (-63,6% 7,3 MPa) ↑absorção de água (+9%)
Zhan <i>et al.</i> (2020)	5%	↓resistência à compressão (-42,9% 43,0 MPa)

Fonte: Autora (2023).

A presença do lodo impactou negativamente no desempenho mecânico das argamassas, conforme oito dos nove trabalhos analisados. O teor ótimo de incorporação variou de 5% a 10%, em massa de cimento, para o lodo não calcinado. Foram observadas reduções entre 3% e 89,1% nos valores obtidos para resistência à compressão, tendo os valores uma grande variação, de 0,5 MPa a 43,0 MPa; já, para a absorção de água, os incrementos variaram de 9% a 100%. Apenas Guedes (2012) relatou a ocorrência de aumento na resistência à compressão, porém, realizada a incorporação do lodo calcinado em temperaturas de até 600 °C. Nesse sentido, corrobora com Anjos (2017) e Pietrobon *et al.* (2002), que alegaram que a diminuição da

resistência à compressão ocorreu devido ao teor de matéria orgânica presente no resíduo. Já Barboza (2011), Goyal *et al.* (2019) e Silveira (2020) relacionam tal efeito deletério ao aumento na demanda de água com a adição do material, em decorrência do incremento na quantidade de finos, já que o lodo possui uma maior área superficial que o cimento.

Leloup (2013) reiterou a ausência de atividade pozolânica no material residual, o que impossibilita, na visão da autora, utilizá-lo como substituto do cimento. Em relação à redução dos valores de absorção de água por capilaridade, verificado por Barboza (2011), o autor indica que a morfologia em placa do lodo têxtil promove um “efeito labirinto”, o que dificulta a percolação do líquido

Zhan *et al.* (2020) indicam aumento de macroporos e redução de microporos com a incorporação do material residual na matriz, sendo observada, por meio de resultados de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a introdução de interfaces entre o lodo têxtil e os produtos de hidratação do cimento Portland. Analisando a microestrutura de maneira mais detalhada, Goyal *et al.* (2019), além de observarem também o aumento nos poros, visualizaram uma composição majoritária de etringita e redução de Silicatos de Cálcio Hidratados (CSH).

3.3.2 Bloco intertravado de concreto

Na Tabela 6, são apresentados teores de incorporação do resíduo em blocos intertravados de concreto, bem como informações gerais de tais procedimentos.

Tabela 6 - Incorporação de lodo têxtil em bloco intertravado de concreto

Autores	% incorporado	Informações gerais
Andrade (2020)	5% a 30% (em massa de areia)	Cimento CP II – F – 40 Traço – 1:1,3:0,7
Arulpandian <i>et al.</i> (2020)	10% a 30% (em massa de cimento)	Cimento 53-Grade OPC Traço – 1:2,3:1,8
Casagrande <i>et al.</i> (2020)	5% a 30% (em massa de cimento)	Cimento CP V ARI Traço – 1:2,3:1,8
Santos (2019)	5% a 20% (em massa de cimento)	Cimento CP V ARI Traço – 1:2,3:1,9 +Resíduo de cerâmica vermelha
Veiga (2019)	5% a 20% (em massa de cimento)	Cimento CP V ARI Traço não informado
Velumani & Senthilkumar (2018)	5% a 35% (em massa de cimento)	Cimento Pozolânico Traços – 1:2,1:2,2

Fonte: Autora (2023).

Nos trabalhos analisados, o teor de lodo têxtil incorporado variou entre 5% e 35%, tendo sido utilizado o cimento CP V ARI em três dos quatro dos desenvolvidos no Brasil. Em relação ao traço adotado, este teve variações significativas, sendo semelhantes os adotados por Arulpandian *et al.* (2020), Casagrande *et al.* (2020) e Santos (2019).

Na Tabela 7, é evidenciada a relação do resíduo incorporado com desempenho dos blocos intertravados de concreto avaliados na literatura.

Tabela 7 - Desempenho dos blocos intertravados de concreto com incorporação de lodo têxtil

Autores	% ótimo	Principais resultados
Andrade (2020)	7,5%	↓resistência à compressão (-1,0% 31,2 MPa) ↓absorção de água (-8,6%)
Arulpandian <i>et al.</i> (2020)	15%	↓resistência à compressão (-30,2% 30,6 MPa) ↑absorção de água (+35,6%)
Casagrande <i>et al.</i> (2020)	10%	↓resistência à compressão (-56,8% 35,0 MPa) ↑cavidade (abrasão) (+8,9%)
Santos (2019)	5%	↓resistência à compressão (-52,0% 39,0 MPa) ↑cavidade (abrasão) (+3,2%)
Veiga (2019)	10%	↓resistência à compressão (-44,1% 45,0 MPa) ↑cavidade (abrasão) (+8,1%)
Velumani & Senthilkumar (2018)	35%	↓resistência à compressão (-17,1% 40,1 MPa) ↑absorção de água (+42,7%)

Fonte: Autora (2023).

Foi possível observar a influência deletéria da incorporação de lodo têxtil na resistência à compressão em todos os trabalhos analisados, variando a redução de 1,0% a 56,8%. Os maiores resultados foram obtidos por Veiga (2019), porém, foi realizada a adição de aditivo superplastificante, reduzindo a quantidade de água necessária. Em relação à absorção de água, Arulpandian *et al.* (2020) e Velumani e Senthilkumar (2018) relataram impactos negativos ocasionados pela presença do resíduo, sendo os incrementos de 35,6% e 42,7%, respectivamente. No que diz respeito ao ensaio de abrasão, Casagrande *et al.* (2020), Santos (2019) e Veiga (2019) verificaram aumento da cavidade gerada nos blocos contendo o material residual. É importante destacar que Santos (2019) também realizou a incorporação concomitante de resíduo de cerâmica vermelha.

Acerca de tais resultados, Andrade (2020) aponta relação direta com o teor de matéria orgânica presente no lodo têxtil, também seu alto potencial de absorção de água, o que reduz a disponibilidade de água de hidratação para o cimento e, a nível microscópico, a baixa coesão entre o lodo e a pasta de cimento. Santos (2019) reitera o aumento da demanda por água com a incorporação do resíduo, devido a sua granulometria de fíler, o que eleva o teor de finos da mistura.

Apesar da queda no desempenho mecânico, Casagrande *et al.* (2020), Santos (2019), Veiga (2019) e Velumani e Senthilkumar (2018) obtiveram blocos intertravados que atendem aos pré-requisitos da norma ABNT NBR 9781:2013 para peças utilizadas em locais que sofram solicitações mais leves, tais como tráfego de pedestres e veículos leves.

3.3.3 Concreto

Na Tabela 8, é possível visualizar as informações acerca da incorporação de lodo têxtil em concreto.

Tabela 8 - Incorporação de lodo têxtil em concreto

Autores	% incorporado	Informações gerais
Altidis <i>et al.</i> (2014)	3% a 5% (em massa total)	Cimento CP II – F – 32 Traços – 1:3 e 1:4
Beg <i>et al.</i> (2022)	5% e 10% (em massa de cimento)	Cimento 53-Grade OPC Traço – 1:2,4:2,5
Jahagirdar <i>et al.</i> (2021)	4% a 36% (em massa de areia)	Cimento 43-Grade OPC Traço – 1:2,2:3,5
Loganayagan <i>et al.</i> (2020)	5% a 20% (em massa de areia)	Cimento 53-Grade OPC Traço – 1:2,2:3,5

Fonte: Autora (2023).

Foram realizadas incorporações de lodo variando de 3%, em massa total, a 36%, em massa de areia, para as quais foram utilizados três diferentes tipos de cimento Portland e traços distintos. Em relação aos tipos de cimento, o CP – II – F – 32 e o Cimento 53-Grade OPC já tinham sido utilizados em outros trabalhos.

Na Tabela 9, são apresentados os principais resultados da incorporação do lodo têxtil em concreto.

Tabela 9 – Desempenho de concretos com incorporação de lodo têxtil

Autores	% ótimo	Principais resultados
Altidis <i>et al.</i> (2014)	-	↑porosidade
Beg <i>et al.</i> (2022)	5%	↓resistência à compressão (-14,0% 16,8 MPa) ↑absorção de água
Jahagirdar <i>et al.</i> (2021)	16%	↓resistência à compressão (-25,0% 27,0 MPa) ↓densidade (-2,3%)
Loganayagan <i>et al.</i> (2020)	5%	↓resistência à compressão (-12,9% 19,6 MPa)

Fonte: Autora (2023).

Foram verificados efeitos negativos no desempenho do material produzido com o resíduo incorporado por todos os autores. Em relação à resistência à compressão, ocorreram decrementos de 12,9% a 25%, variando os valores obtidos de 16,8 MPa a 27,0 MPa. Assim como observado pelos demais autores que trabalharam com matrizes cimentícias, Altidis *et al.* (2014) indicaram que a incorporação do material residual têxtil leva ao aumento do índice de vazios, conforme os mesmos, foi possível observar, por meio da microscopia eletrônica de varredura, tal comportamento descrito e a estrutura heterogênea do material. Esse aumento na porosidade está relacionado com o incremento na absorção de água, constatado por Beg *et al.* (2019), e a redução da densidade, verificada por Jahagirdar *et al.* (2021).

Jahagirdar *et al.* (2021) reiteraram o potencial do lodo têxtil de ser utilizado como fíler em misturas contendo cimento Portland, tendo em vista sua granulometria e a ausência de atividade pozolânica. De outra parte, Loganayagan *et al.* (2020) consideraram não ser possível realizar a substituição do agregado miúdo por lodo têxtil no concreto, já que, como observado também por Jahagirdar *et al.* (2021), há um aumento da demanda de água na mistura, ocasionando perdas no desempenho do material. Apesar de tais observações, Beg *et al.* (2022) indicam que as peças produzidas atendem às especificações da norma americana acerca de materiais não estruturais, podendo ser utilizado em blocos de pavimento, por exemplo.

3.3.4 Concreto asfáltico

Na Tabela 10, são evidenciadas as informações gerais acerca da incorporação do lodo têxtil em concreto asfáltico.

Tabela 10 - Incorporação de lodo têxtil em concreto asfáltico

Autor	% incorporado	Informações gerais
Moura (2021)	2% a 5% (em massa total)	Inserção seca e úmida Ligante asfáltico – CAP 50/70 Teor de ligante asfáltico – 5,5%

Fonte: Autora (2023).

O autor realizou a incorporação do resíduo em duas metodologias, inserindo-o diretamente aos agregados, atuando este enquanto fíler, a qual se denomina seca; também como modificador do ligante, sendo previamente incorporado a este, denominada úmida. O ligante asfáltico utilizado foi o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70, em teor de 5,5% para todas as misturas.

Na Tabela 11, é possível observar a influência do lodo têxtil no desempenho do concreto asfáltico.

Tabela 11 - Desempenho de concreto asfáltico com incorporação de lodo têxtil

Autor	Teor ótimo	Principais resultados
Moura (2021)	3% (ligante) e 2% (fíler)	Manutenção da: resistência à tração, módulo de resiliência, resistência à fadiga, deformação permanente e desgaste Cântabro

Fonte: Autora (2023).

Nas misturas com incorporação do lodo têxtil enquanto agregado, não foi possível respeitar às especificações normativas acerca do volume de vazios para teores do resíduo acima de 2%. Outro fator limitante foi a presença de finos que, até certo ponto, proporcionam maior rigidez à matriz, devido ao empacotamento das partículas, porém, em excesso, levam ao deslizamento das partículas (MOURA, 2021).

Em relação às misturas com incorporação diretamente ao ligante, foi possível adicionar até 3% sem levar a prejuízos na matriz asfáltica, tendo em vista que, conforme Moura (2021), o lodo se uniu ao ligante, não ocupando espaços no esqueleto mineral. O fator limitante para o incremento na inserção do resíduo foi a viscosidade do ligante, já que, para teores acima de 3% são necessárias temperaturas de aquecimento acima da referência, tendendo a atingir a temperatura de degradação do ligante.

Um aspecto interessante dessa metodologia de incorporação é que possibilita a interação direta do ligante com constituintes orgânicos presentes no lodo, como a imidazolina, utilizada em agentes rejuvenescedores de misturas asfálticas (MOURA, 2021). O autor relata, ainda, que a escolha pela técnica de incorporação irá depender das condições da usina, facilidade de operação e possibilidades de adaptação desta.

3.3.5 Tijolo cerâmico

Na Tabela 12, são apresentadas informações relacionadas à incorporação do lodo têxtil nos tijolos cerâmicos.

Tabela 12 - Incorporação de lodo têxtil em tijolo cerâmico

Autores	% incorporado	Informações gerais
Chen e Wu (2017)	5% a 50% (em massa total)	Secagem a 200 °C Sinterização a 1150 °C
Herek <i>et al.</i> (2005)	10% e 20% (em massa total)	Secagem a 100 °C Sinterização a 800 °C
Hossain <i>et al.</i> (2018)	10% a 50% (em massa total)	Secagem ao sol Sinterização a 450 °C
Luchtenberg (2022)	15% (em massa total)	Secagem lenta (7 dias) Sinterização a 200 °C
Saha <i>et al.</i> (2022)	5% a 50% (em massa total)	Secagem ao sol Sinterização a 1150 °C

Fonte: Autora (2023).

O teor de resíduo incorporado variou de 5% a 50%, em massa total da mistura. Acerca da metodologia de fabricação dos tijolos, houve variações significativas entre os trabalhos, Chen e Wu (2017) e Herek *et al.* (2005) optaram por secagem com temperatura controlada, Hossain *et al.* (2018) e Saha *et al.* (2022) procederam a secagem ao sol, e Luchtenberg (2022), secagem lenta. A temperatura de sinterização adotada também foi bastante variada, estando os valores num intervalo entre 200 °C e 1150 °C.

Na Tabela 13, são expressos os impactos da incorporação do material residual têxtil no desempenho tijolos cerâmicos.

Tabela 13 - Desempenho de tijolos cerâmicos com incorporação de lodo têxtil

Autores	% ótimo	Principais resultados
Chen e Wu (2017)	20%	↓resistência à compressão (-32,1% 19,0 MPa) ↓densidade aparente (-10,2%)
Herek <i>et al.</i> (2005)	10%	↑resistência à compressão (+4,2% 5,0 MPa) ↑absorção de água (+11,1%)
Hossain <i>et al.</i> (2018)	25%	↓resistência ao impacto (-30,2% 4,70 kJ/m ²) ↑perda de massa (+60,1%)
Luchtenberg (2022)	-	↓resistência à compressão (-39,0% 10,5 MPa) ↑absorção de água (+59,4%)
Saha <i>et al.</i> (2022)	15%	↓resistência à compressão (-50,0% 3,5 MPa) ↑absorção de água (+10,5%)

Fonte: Autora (2023).

A maioria dos autores relatou efeitos negativos nas propriedades analisadas, com redução na resistência à compressão de 50,0% a 32,1%, com variação de 3,5 MPa a 19,0 MPa. Foram observados incrementos de 10,5% a 59,4% na absorção de água dos tijolos com lodo têxtil. Hossain *et al.* (2018) verificaram perda de massa em torno de 60% superior para os tijolos contendo 25% de lodo têxtil. Herek *et al.* observaram aumento da resistência à compressão, o

qual relacionam à presença de fibras no material residual. Hossain *et al.* (2018) e Saha *et al.* (2022) indicam que o desempenho obtido pelos tijolos foi afetado pela presença de matéria orgânica no lodo têxtil, que se degradou no processo de sinterização. Moura (2021) constatou, em análise termogravimétrica, uma perda de massa em torno de 20% em amostra do resíduo para a temperatura aproximada de 350 °C, temperatura superada por quatro dos cinco estudos descritos.

Apesar de Chen e Wu (2017) alegarem que a incorporação do lodo têxtil nos tijolos cerâmicos possibilita a produção de materiais mais leves, é preciso ter atenção à transferência de poluição ocasionada pela perda de matéria orgânica durante a sinterização. As fábricas que realizarem a produção de tais peças devem possuir filtros adequados para evitar a proliferação das substâncias liberadas.

3.3.6 Tijolo solo-cimento

Na Tabela 14, são apresentadas as informações gerais acerca da incorporação do material residual têxtil em tijolos solo-cimento.

Tabela 14 - Incorporação de lodo têxtil em tijolo solo-cimento

Autor	% incorporado	Informações gerais
Premkumar <i>et al.</i> (2021)	5% a 25% (em massa total)	Cimento Pozolânico 33-Grade +Cinzas volantes

Fonte: Autora (2023).

Os autores realizaram a incorporação de lodo têxtil variando de 5% a 25%, em massa total. Também foram utilizadas na fabricação cinzas volantes, que possuem atividade pozolânica e já são amplamente incorporadas juntamente ao cimento Portland. Um aspecto interessante é que o resíduo têxtil foi inserido como substituinte das cinzas.

Na Tabela 15, é apresentada a influência do lodo no desempenho dos tijolos fabricados.

Tabela 15 - Desempenho de tijolo solo-cimento com incorporação de lodo têxtil

Autor	% ótimo	Principais resultados
Premkumar <i>et al.</i> (2021)	20%	↑resistência à compressão (+48,0% 11,1 MPa) ↑absorção de água (+62,5%)

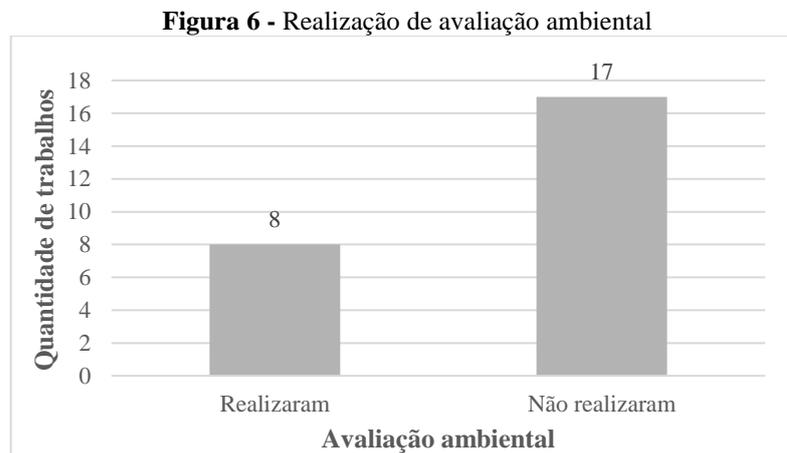
Fonte: Autora (2023).

A incorporação do lodo têxtil promoveu aumento em 48,0% na resistência a compressão, que atingiu 11,1 MPa, e aumento de 62,5% na absorção de água. A melhoria no desempenho em relação à resistência à compressão se deu pela boa interação entre o resíduo têxtil e as cinzas volantes. Os efeitos deletérios estão relacionados à presença de matéria orgânica no resíduo,

bem como sua baixa interação com os produtos de hidratação do cimento Portland. Premkumar *et al.* (2021) verificaram, ainda, a redução da densidade aparente, o que proporciona a fabricação de um material mais leve, reduzindo custos de transporte e mão de obra.

3.4 Imobilização do resíduo

Tão importante quanto realizar a avaliação do desempenho mecânico do material, é compreender sua viabilidade ambiental, de modo a analisar a imobilização do material residual na matriz de incorporação. Na Figura 6, é apresentado o quantitativo de trabalhos que realizaram estudos sobre a segurança ambiental da incorporação de lodo têxtil em materiais de construção civil.



Fonte: Autora (2023).

Apesar de sua importância, apenas oito dos vinte e cinco trabalhos realizaram a avaliação de risco ambiental. Foram realizados estudos de imobilização dos contaminantes do lodo têxtil em: tijolos cerâmicos (3); argamassas (3); concretos (1); e concretos asfálticos (1). Daqueles que realizaram, sete efetuaram apenas o ensaio da lixiviação, inserindo o material em meio ácido. Conforme a ABNT NBR 10005:2004, que é baseada na US EPA 1311, a exposição ocorre por cerca de 18 horas, em agitador rotatório, numa solução contendo ácido acético e hidróxido de sódio ou apenas o primeiro. Nesse tipo de análise, é gerado um extrato a partir da filtragem do meio contendo os materiais, o líquido tem, então, sua composição analisada, para observar se houve desprendimento do resíduo.

Os resultados foram promissores para todos os estudos realizados, sendo atestadas concentrações insignificantes de metais lixiviados por Altidis *et al.* (2014), Chen e Wu (2017), Herek *et al.* (2005), Leloup (2013), Moura (2021), Pietrobon *et al.* (2002), Saha *et al.* (2022),

Zhan *et al.* (2020). Moura (2021) realizou, além da lixiviação, o ensaio de solubilização, submetendo o material em água, pelo qual observou imobilização de até 100% de alguns constituintes, apesar de terem sido observados pequenos aumentos na alcalinidade em CaCO_3 e nas proporções de magnésio, sódio, potássio e nitrato, com o aumento do percentual de lodo.

A partir dos estudos avaliados, é possível constatar que tijolos cerâmicos, argamassas, concretos, e concretos asfálticos são matrizes promissoras para imobilização do lodo têxtil, tendo em vista que, pelo exposto, ocorre uma destinação segura do resíduo, com apreensão efetiva deste.

4 CONCLUSÕES

Por meio da análise dos trabalhos, foi possível avaliar as diferentes propriedades físico-químicas de lodo têxtil, de modo a compreender sua variabilidade e correlacioná-la aos diferentes métodos produtivos têxteis e de tratamento do efluente.

Foram estudados os diversos componentes de construção investigados como forma de imobilizar lodos têxteis, sendo possível compreender como o resíduo foi incorporado e interagiu com tal matriz e, dessa forma, compreender os materiais mais promissores para tal aplicação. Para cada matriz, foi observado o teor ótimo a ser adicionado, de modo a obter o melhor desempenho, sem que exista desprendimento do resíduo.

Foi possível observar também que, apesar de ser possível realizar uma incorporação ambientalmente segura em tijolos cerâmicos, argamassas, concretos, e concretos asfálticos, o lodo têxtil ocasiona alguns impactos negativos no desempenho de argamassas, concretos, tijolos cerâmicos e tijolos solo-cimento, nomeadamente redução da resistência à compressão e aumento da absorção de água. Para o concreto asfáltico, foi possível manter inalteradas as principais propriedades mecânicas. Além deste, os blocos intertravados de concreto destinados a vias com tráfego leve também são matrizes promissoras para incorporação do material residual.

É recomendado para trabalhos futuros que seja realizada uma análise mais aprofundada das metodologias de incorporação para cada matriz utilizada, pois, estas podem levar a variações no aprisionamento do resíduo e no desempenho das peças produzidas.

REFERÊNCIAS

- ALTIDIS, M. E. D.; MORAIS, C. R. S.; RODRIGUES, P. A.; SILVA, M. S.; MARQUES, K. L. L. Caracterização estrutural, morfológica e química de concretos com incorporação de lodo têxtil. **58º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, 2014.
- ANDRADE, G. O. **Influência do uso de lodo de tratamento de efluentes de lavanderia industrial como agregado miúdo em concreto para pavimento intertravado**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.
- ANJOS, D. C. **Estudo sobre a influência do lodo têxtil gerado por uma lavanderia industrial, aplicado em argamassa de cimento Portland composto de fíler**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.
- ARULPANDIAN, V.; JAGADHEESWARI, R.; DANIELRAJ, S.; MUTHURAMAN, S.; SAKTHIVEL, A. **Feasibility study on paver blocks blended with textile effluent sludge and m-sand**. *Materials Science and Engineering*, 24 dez. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- BARBOZA, A. A. S. **Desenvolvimento de argamassas de revestimento com adição concomitante de cinzas de lenha e lodo têxtil gerados no APL de confecções pernambucano**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2011.
- BEG, T.; SIDDIQUI, M. O. R.; BUTTO, M. A.; IQBAL, K.; SUN, D. Utilization of textile denim sludge waste in high load-bearing structural applications. **Polimery/Polymers**, v. 67, n. 7–8, p. 298–307, 2022.
- CASAGRANDE, C. A.; SANTOS, V. V.; ALCANTARA, P. S. X.; JOCHEM, L. F.; NÓBREGA, A. C. V. Avaliação das propriedades físicas de blocos intertravados de concreto com substituição do agregado miúdo por resíduo de cerâmica vermelha e lodo têxtil gerado no Agreste pernambucano. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, n. 24, p. 1–18, ago. 2020.
- CHEN, C.; WU, H. Lightweight bricks manufactured from ground soil, textile sludge, and coal ash. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 39, n. 11, p. 1359–1367, 3 jun. 2018.
- CONCEIÇÃO, M. M. M.; BARROSO, L. L.; FONSECA, D. P.; FREITAS JUNIOR, W. F.; ABDULMASSIH, M. F.; BARRETO, O. F.; BORGES, H. R.; AIRES, I. M.; CARNEIRO, C.

C. A.; NAZERÉ, G. A. S.; JACQUES, J. M. M. L.; MATHEWS, J. C.; MENEZES, A. B. F.; LIMA JÚNIOR, J. A. P.; SOUZA, A. G. M. Diagnóstico dos resíduos de demolição e construção no Brasil/ Diagnosis of demolition and construction waste in Brazil. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 9, p. 87466–87481, 7 set. 2021.

CPRH. **Lavando Limpo**. Recife: Agência Estadual do Meio Ambiente, 2018.

GÄHR, F.; HERMANUTZ, F.; OPPERMANN, W. Ozonation - An important technique to comply with new German laws for textile wastewater treatment. **Water Science & Technology**, v. 30, n. 3, p. 255–263, 1994.

GOYAL, S. SIDDIQUE, R.; JHA, SUJANT; SHARMA, D. Utilization of textile sludge in cement mortar and paste. **Construction and Building Materials**, v. 214, p. 169–177, 30 jul. 2019.

GUEDES, B. F. R. **Desenvolvimento de argamassa com incorporação de lodo de indústria têxtil visando a aplicação sustentável na construção civil**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

HEREK, L. C. S.; BERGAMASCO, R.; TAVARES, C. R. G.; UEMURA, V. O.; PANCOTTE, L. P. Estudo da solidificação/estabilização do lodo da indústria têxtil em material cerâmico. **Cerâmica Industrial**, jul. 2005.

HOSSAIN, M. S.; DAS, S. C.; ISLAM, J. M. M.; MAMUM, M. A. A.; KHAN, M. A. Reuse of textile mill ETP sludge in environmental friendly bricks – effect of gamma radiation. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 151, p. 77–83, 1 out. 2018.

JAHAGIRDAR, S. S.; PATKI, V.; KARALE, R.; PATIL, Y.; KULKARNI, G. Recycle of textile mill sludge in different grades of concrete. **Materials Today: Proceedings**, abr. 2021.

LELOUP, W. DE A. **Efeito da adição de lodo têxtil e cinzas de lenha gerados no APL de Confeções Pernambucano em argamassas de cimento Portland**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2013.

LOGANAYAGAN, S.; RAJKUMAR, G.; PAVTHRA, A.; POONKUNDRAN, M. **Experimental study on concrete by partial replacement of fine aggregate by textile effluent treatment plant sludge**. Materials Science and Engineering. Institute of Physics Publishing, 6 mar. 2020.

LUCHTENBERG, A. C. O. **Reaproveitamento de resíduos da indústria têxtil em massa cerâmica: Estudo de caso**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2022.

MENDES JUNIOR, B. O. Setor têxtil – Produção, comércio internacional e perspectivas para Brasil, Nordeste, Ceará e Pernambuco em 2021. **Caderno Setorial ETENE**, n. 185, 2021.

MOURA, L. S. **Utilização de lodo de tratamento têxtil em revestimentos asfálticos: Uma análise mecânica, microscópica e ambiental**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

- PATIL, U.; RAUT, S. P.; RALEGAONKAR, R.; MADURWAR, M. V. Sustainable building materials using textile effluent treatment plant sludge: A review. **Green Materials**, 17 jun. 2021.
- PIETROBON, C. L. R.; BITENCOURT, M. P.; GIMENES, M. L.; BERGAMASCO, R.; COLANZI, J.; PIETROBON, C. E. Estudos preliminares sobre estabilização/solidificação - e/s - de lodo de tratamento de lavanderia têxtil para reutilização como argamassa de construção: exame de caso para Maringá, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum**, v. 24, n. 6, p. 1659–1664, 2002.
- PREMKUMAR, R.; KHAJA MOHIDEEN, J.; MATHAN KUMAR, M.; SUNDARA MOORTHY, T.; CELESTIN, X. **Properties and environmental features of bricks made from textile waste sludge**. Journal of Physics: Conference Series, 17 nov. 2021.
- RIBEIRO, T. R.; DELGADO, R. C. O. B. **Processo produtivo do cimento Portland e seus impactos socioambientais na cidade de Mossoró**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2018.
- SAHA, G. C.; HASANATH, M. A.; UDDIN, M. N. HASAN, M. Sustainable utilization of textile dyeing sludge and coal fly ash by brick production through traditional kilns. **Nature Environment and Pollution Technology**, v. 21, n. 3, p. 971–980, 1 set. 2022.
- SANTOS, V. V. **Desenvolvimento de blocos intertravados de concreto com incorporação de lodo têxtil em substituição da areia e resíduo de cerâmica vermelha em substituição do cimento Portland**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019.
- SILVA, J. M. DA; CORREIA, L. S. Impactos ambientais ocasionados pela construção civil: Uma análise das propostas de sustentabilidade no âmbito construtivo. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia –CONTECC**, set. 2021.
- SILVEIRA, E. C. A. **Avaliação da resistência mecânica de argamassa de assentamento com substituição de agregado miúdo por lodo têxtil**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.
- SOUTO, T. J. M. P. **Estudo do comportamento químico e ambiental de efluentes industriais e resíduos sólidos oriundos de lavanderias do polo têxtil no Agreste pernambucano**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2017.
- VEIGA, K. R. S. **Desenvolvimento de blocos intertravados de concreto com incorporação de lodo têxtil como adição e resíduo de cerâmica vermelha em substituição do cimento Portland**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019.
- VELUMANI, P.; SENTHILKUMAR, S. Production of sludge-incorporated paver blocks for efficient waste management. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 68, n. 6, p. 626–636, 3 jun. 2018.

WATARI, T.; HATA, T.; HIRAKATA, Y.; NGUYET, P. N.; NGUYEN, T. H.; MAKI, S.; HATAMOTO, M.; SUTANI, D.; SETIA, T.; YAMAGUCHI, T. Performance evaluation of down-flow hanging sponge reactor for direct treatment of actual textile wastewater; Effect of effluent recirculation to performance and microbial community. **Journal of Water Process Engineering**, v. 39, 1 fev. 2021.

ZHAN, B. J.; LI, J. S.; XING, X. D.; SUN, P. C. Recycling hazardous textile effluent sludge in cement-based construction materials: Physicochemical interactions between sludge and cement. **Journal of Hazardous Materials**, v. 381, 5 jan. 2020.

CARINA LESSA SILVA

INCORPORAÇÃO DE LODO TÊXTIL EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL:
uma revisão

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo científico, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil. Defesa realizada por videoconferência.

Área de concentração: Construção civil.

Aprovado em 13 de fevereiro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Érika Pinto Marinho (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Flávio Eduardo Gomes Diniz (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^ª. Dr^ª. Maria Victória Leal de Almeida Nascimento (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco