

Incorporação de lodo têxtil em materiais de construção civil: uma busca sistemática

Incorporation of textile sludge in civil construction materials: a systematic search

Carina Lessa Silva 
Érika Pinto Marinho 
Ana Cecília Vieira de Nóbrega 
Arnaldo Manoel Pereira Carneiro 

Resumo

O lodo têxtil é um resíduo do tratamento do efluente das lavanderias têxteis e sua incorporação em materiais alternativos tem sido proposta como possibilidade para sua destinação. Foi realizada uma busca sistemática na literatura nesta perspectiva, visando observar as concentrações de material residual e seu preparo, as matrizes utilizadas, o desempenho tecnológico e imobilização do resíduo têxtil. As matrizes empregadas foram argamassas, concretos e tijolos cerâmicos, sendo observados, de maneira geral, efeitos deletérios nas características mecânicas dos materiais produzidos. Em concretos e argamassas, a finura impactou no aumento da demanda de água, o que elevou a porosidade das misturas; e a matéria orgânica e metais pesados, na hidratação do cimento. Estudos recentes propuseram, então, o pré-tratamento do material residual como uma alternativa favorável. Incrementos na porosidade também ocorreram nos tijolos cerâmicos, porém, devido ao elevado teor de matéria orgânica. Quanto a imobilização do resíduo, os materiais cimentícios apresentaram desempenho satisfatório; já os tijolos cerâmicos, obtiveram alguns resultados fora dos limites normativos. Portanto, é necessário ampliar as discussões quanto ao pré-tratamento realizado no lodo têxtil, bem como seus impactos no desempenho mecânico e ambiental.

Palavras-chave: Materiais alternativos. Resíduo têxtil. Pré-tratamento. Imobilização.

Abstract

Textile sludge is a waste from the effluent treatment of textile laundries and its incorporation into alternative materials has been proposed as a possibility for its disposal. A systematic search was carried out in literature from this perspective, aiming to observe concentrations of waste material and its preparation, matrices used, technological performance and immobilization of textile waste. The matrices used were mortars, concretes and ceramic bricks, in general, deleterious effects were observed on mechanical characteristics of the materials produced. In concrete and mortars, the fineness had an impact on increase in water demand, which increased mixtures porosity; and organic matter and heavy metals, in cement hydration. Recent studies therefore proposed waste material pre-treatment as a favorable alternative. Increases in porosity also occurred in ceramic bricks, however, due to high organic matter content. Regarding waste immobilization, cementitious materials showed satisfactory performance; ceramic bricks, on the other hand, obtained some results outside the normative limits. Therefore, it is necessary to expand discussions regarding the pre-treatment carried out on textile sludge, as well as its impacts on mechanical and environmental performance.

Keywords: Alternative materials. Textile waste. Pre-treatment. Immobilization.

¹Carina Lessa Silva

¹Universidade Federal de Pernambuco
Recife - PE - Brasil

²Érika Pinto Marinho

²Universidade Federal de Pernambuco
Caruaru - PE - Brasil

³Ana Cecília Vieira de Nóbrega

³Universidade Federal do Rio Grande do
Norte
Natal - RN - Brasil

⁴Arnaldo Manoel Pereira Carneiro

⁴Universidade Federal de Pernambuco
Recife - PE - Brasil

Recebido em 08/08/23

Aceito em 19/10/23

Introdução

No Brasil, a Companhia Pernambucana do Meio Ambiente do estado de Pernambuco (CPRH) mapeou os impactos ambientais da produção têxtil, sendo alguns deles: geração de efluentes líquidos industriais; geração de resíduos sólidos não perigosos; geração de resíduos sólidos perigosos (AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE, 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). Esses resíduos são, por vezes, descartados de forma irregular na natureza, principalmente no solo (AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE, 2018).

O efluente gerado por essas indústrias possui alta carga poluidora, tendo em vista que carrega 90% dos produtos químicos envolvidos em todo processo produtivo (AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE, 2018; Moura, 2021; Souto, 2017). Em decorrência dos impactos ambientais ocasionados nos principais corpos hídricos da região do 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 em corpos hídricos (AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE, 2018; Moura, 2021). Chen e Wu (2018), que definiram a atividade industrial têxtil como uma das mais antigas e um dos pilares econômicos da China, apontam a problemática do efluente gerado por esta que, além da coloração, é tóxico e possui potencial mutagênico à vida.

No Arranjo Produtivo Local de Confecções do Agreste Pernambucano, o tratamento realizado ainda se restringe a um simples processo físico-químico. As etapas principais são: gradeamento, equalização; coagulação/floculação/decantação; por fim, filtração. O filtrado pode ser reutilizado ou lançado nos corpos hídricos; já o material retido nos filtros, o lodo têxtil, deve ser encaminhado para descarte regular. Durante a etapa de coagulação são adicionados ao efluente alguns agentes coagulantes, como o policloreto de alumínio ($Al_2(OH)_3Cl_3$) e o sulfato de alumínio (Al_2SO_4) (AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE, 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 (AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE, 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). Na China, maior produtora de têxteis do mundo, são geradas cerca de 5,05 milhões de toneladas por ano (Ke *et al.*, 2018). 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.

A indústria da construção civil é responsável por ocasionar significativos impactos ambientais, desde o processo de produção das matérias primas, que envolve desde grandes volumes de extração mineral, à intensa geração de resíduos durante os processos de construção, operação e demolição (Conceição *et al.*, 2021). A Agência Internacional de Energia apontou que, na China, a produção de cimento Portland, que representa 57% do total mundial, é responsável por 12% das emissões de CO_2 nacionais (Wang *et al.*, 2023). No ano de 2019, apenas no Brasil, foram gerados 44,5 milhões de toneladas de resíduos da construção e demolição (Conceição *et al.*, 2021).

Nesse sentido, há um esforço recente em tornar o setor mais sustentável e uma das soluções é o desenvolvimento de materiais alternativos, como: concreto com resíduo da indústria do papel (Wong *et al.*, 2015); argamassa com incorporação de cinzas volantes (Hager; Sitarz; Mróz, 2021). Entretanto, a produção de novos materiais de construção incorporando resíduos industriais requer atenção em relação ao beneficiamento de matérias-primas, métodos de mistura de componentes e percentual de material residual a ser incorporado. 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 incorporando tal resíduo nos variados materiais de construção civil: argamassas (Beg *et al.*, 2022; Goyal *et al.*, 2019, 2022; Zhan *et al.*, 2020); concretos (Balasubramanian *et al.*, 2006; Beg *et al.*, 2022; Cheng *et al.*, 2023; Kasaw *et al.*, 2021; Praveenkumar *et al.*, 2023; Velumani; Senthilkumar, 2018; Zhan; Poon, 2015); tijolos cerâmicos (Anwar; Behrose; Ahmed, 2018; Beshah; Tiruye; Mekonnen, 2021; Chauhan; Chopra, 2017; Chen; Wu, 2018; Delaqua *et al.*, 2022; Herek *et al.*, 2012; Hossain *et al.*, 2018; Priyadarshini *et al.*, 2018; Rahman *et al.*, 2015; Saha *et al.*, 2022; Shathika *et al.*, 2013; Ullah *et al.*, 2020).

Dessa forma, este trabalho apresenta uma atualização do estado da arte da discussão científica de como os lodos provenientes de lavanderias industriais têxteis têm sido incorporados em materiais de construção civil. As análises compreendem, além da metodologia de incorporação e desempenho mecânico, a influência dos diferentes traços utilizados, bem como dos pré-tratamentos realizados no lodo têxtil nas propriedades obtidas e a capacidade de imobilização do resíduo por cada matriz.

Metodologia

Foi realizada uma pesquisa utilizando a base de dados Scopus, tendo sido aplicada a seguinte string de busca: 'textile sludge' AND ('material' OR 'concrete' OR 'mortar' OR 'asphalt' OR 'brick' OR 'cement') [restringindo a termos no título, resumo e palavras chave] AND 'construction' [em todos os campos do documento]. Foram incorporados os termos 'concrete', 'mortar', 'asphalt', 'brick' e 'cement', por se tratarem de aplicações comuns como matrizes de imobilização na construção civil, tendo por objetivo ampliar a busca. A decisão de buscar o termo 'construction' teve por objetivo restringir o domínio de aplicações ao cenário da construção civil.

Nos trabalhos selecionados, foram examinados os seguintes 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, as informações supracitadas foram obtidas (Figura 1).

Resultados e discussões

A busca inicial com a string descrita resultou em 120 documentos. Ao limitar para artigos em inglês, são totalizadas 78 produções. Para refinamento dos trabalhos encontrados, foi realizada a leitura do título e resumo, assim, resultaram 33 artigos, os quais foram lidos integralmente. Desses, foram selecionados os trabalhos que realizaram a incorporação de lodo têxtil em materiais de construção, descreveram a metodologia de incorporação e realizaram ensaios para avaliação do material desenvolvido, sendo excluídos os que não apresentaram essas informações, totalizando 22 estudos considerados na revisão (Figura 2).

Dados catalográficos

A distribuição cronológica da publicação dos artigos encontrados no período analisado está representada na Figura 3.

Os anos com maiores números de publicações foram 2018 e 2022, sendo cinco e quatro, respectivamente. Ao analisar as quantidades por faixa temporal, é possível observar uma maior concentração entre 2016 a 2023, dezessete trabalhos (77,3%), ao comparar com a faixa entre 2006 a 2016, período no qual totalizam-se cinco produções (22,7%). Essa concentração nos últimos 7 anos, dentre os 17 registrados, indica a crescente relevância do tema, porém, evidencia a carência de discussões sólidas.

De modo a compreender os países de origem da bibliografia estudada, foram avaliados seus locais de publicação (Figura 4).

Figura 1 - Fluxograma de análise dos trabalhos

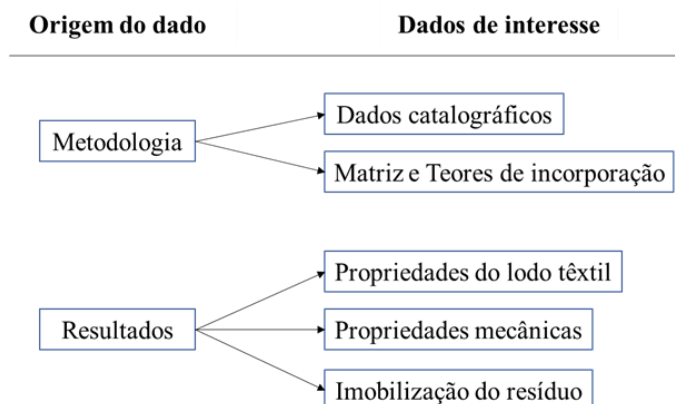


Figura 2 - Metodologia de seleção dos artigos analisados

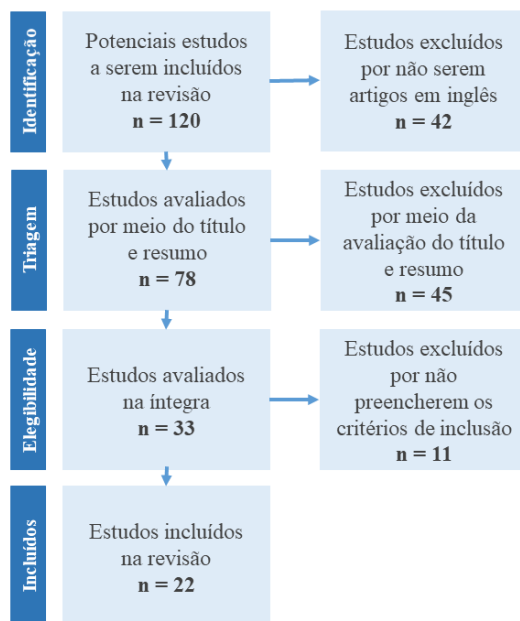


Figura 3 - Trabalhos por ano de publicação

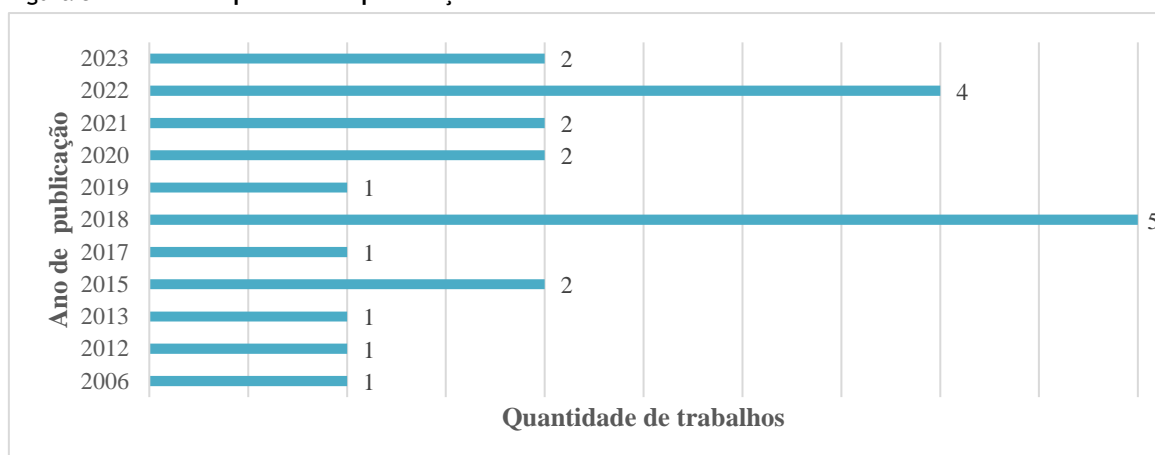
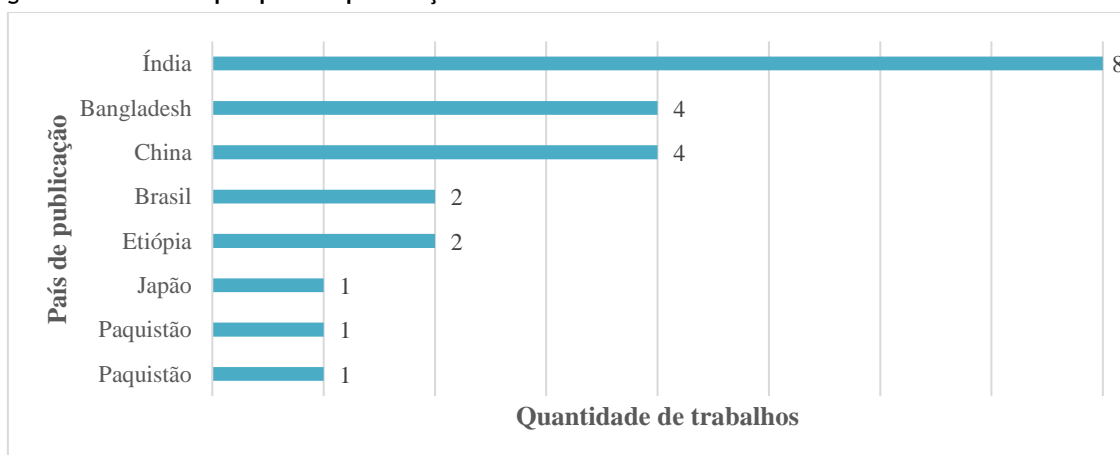


Figura 4 - Trabalhos por país de publicação



Entre os países indicados, são observados três dos dez maiores produtores mundiais de têxteis, 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 lugar (Mendes Junior, 2021). Outro fator importante a ser observado é que essas três nações são emergentes e, portanto, ainda não possuem tecnologias ambientais tão bem estabelecidas quanto outros países desenvolvidos que apresentam também grandes produções de têxteis, como a 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 apontaram, ainda, a problemática relacionada aos tratamentos simplificados, sumariamente físico-químicos, que ocasionam geração de grandes volumes de lodo têxtil, o que também foi levantado por Watari *et al.* (2021). Esses países desenvolvidos 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). Quase trinta anos após a publicação alemã, Índia, China e Brasil têm seus sistemas de tratamento de efluentes têxteis focados nos sistemas físico-químicos.

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 composição química dos materiais residuais é uma característica importante a ser compreendida, bem como esta pode variar, tendo em vista que, mesmo sendo incorporado enquanto agregado, estes podem ocasionar danos à matriz. Na Tabela 1, são apresentadas as diferentes composições químicas explicitadas pelos autores. Em vermelho, são destacados os componentes em maior teor nas amostras; em laranja, o segundo maior; por fim, em verde, o terceiro.

É importante destacar que os resultados apresentados são referentes a ensaios de Fluorescência de Raios X (FRX) e, portanto, contém apenas os componentes inorgânicos. 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 terceiro maior em outro; óxido de alumínio, um dos três principais componentes em onze amostras; óxido de silício, em dez; por fim, óxido de ferro, em seis.

Tabela 1 - Composição química das amostras de lodo têxtil em diferentes estudos

Autores	Beshah, Tiruye e Mekonnen (2021)	Chaulhan e Chopra (2017)	Chen e Wu (2018)	Cheng <i>et al.</i> (2023)	DeLaqua <i>et al.</i> (2022)	Goyal <i>et al.</i> (2019)	Goyal <i>et al.</i> (2022)	Kasaw <i>et al.</i> (2021)	Priyadarshini <i>et al.</i> (2018)	Rahman <i>et al.</i> (2015)	Ullah <i>et al.</i> (2020)	Zhan e Poon (2015)	Zhan <i>et al.</i> (2020)
Origem	Etiópia	Índia	China	China	Brasil	Índia	Índia	Etiópia	Índia	Japão	Bangla-desh	China	China
CaO	3,50%	22,60%	0,26%	6,34%	6,11%	33,50%	33,20%	23,87%	22,09%	2,80%	3,82%	0,87%	0,94%
Al ₂ O ₃	36,20%	0,48%	50,83%	20,21%	26,62%	0,30%	5,93%	12,73%	3,59%	44,20%	40,20%	6,20%	4,56%
MgO	2,80%	0,30%	-	0,06%	0,78%	1,00%	2,86%	1,79%	-	1,90%	1,42%	-	-
SiO ₂	15,00%	5,83%	41,68%	12,34%	29,52%	3,80%	22,00%	18,51%	15,16%	10,30%	26,20%	3,40%	2,50%
SO ₃	13,40%	-	3,95%	5,76%	-	0,40%	2,12%	9,33%	-	3,00%	22,00%	24,95%	18,23%
P ₂ O ₅	-	0,99%	-	-	1,97%	-	-	-	3,47%	2,90%	2,66%	2,79%	2,05%
Na ₂ O	-	0,72%	-	1,67%	0,93%	0,06%	0,30%	2,36%	-	12,80%	-	-	-
K ₂ O	-	-	0,33%	0,08%	0,97%	0,04%	1,20%	0,31%	-	1,00%	0,16%	-	-
Fe ₂ O ₃	12,10%	17,90%	0,65%	39,87%	2,45%	18,90%	2,50%	3,19%	-	10,70%	2,20%	60,44%	44,51%
TiO ₂	-	-	2,30%	1,55%	0,16%	-	0,36%	-	1,32%	3,10%	0,43%	0,53%	-
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	0,07%	-	0,18%	-	-
MnO	-	0,22%	-	-	0,79%	-	-	-	-	0,10%	0,10%	0,82%	0,60%
OUTROS	17,00%	50,96%	0,00%	12,12%	29,70%	42,00%	29,53%	27,91%	54,30%	7,20%	0,63%	0,00%	26,61%

Nota: Vermelho - 1º maior teor | Laranja - 2º maior teor | Verde - 3º maior teor

A presença da sílica pode estar relacionada à utilização de argila expandida na estonagem das peças, procedimento responsável por um desgaste estético no tecido, também necessário para preparação para recebimento de alvejantes e corantes. Quanto aos demais metais, cálcio, alumínio 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 Chauhan e Chopra (2017), Goyal *et al.* (2019), Zhan e Poon (2015) e Zhan *et al.* (2020), que possuem altos teores de óxido de ferro e baixos de óxido de alumínio.

Na Tabela 2, são apresentados dados de massa específica e 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.

Em relação à massa específica, é possível observar que o menor valor observado foi de 0,93 g/cm³ e o maior, 2,73 g/cm³. Conforme Moura (2021), essa variação está interligada às diferentes composições químicas do material. Arulpanian *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.

Em relação ao pH das amostras elencadas, o menor valor foi 6,04, indicando caráter ácido e, o maior valor foi 9,13, atestando caráter básico. Moura (2021) indica que a basicidade das amostras deste tipo de lodo está relacionada à presença de minerais como cálcio, magnésio e silício, o que pode ser visualizado na Tabela 1, sendo os três principais componentes da amostra avaliada pelo autor. Já o caráter levemente ácido, está presente nos lodos com elevados teores de Al³⁺ (Tabela 1); pois, o íon reage com a água promovendo a liberação dos íons H⁺.

Matriz de incorporação

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

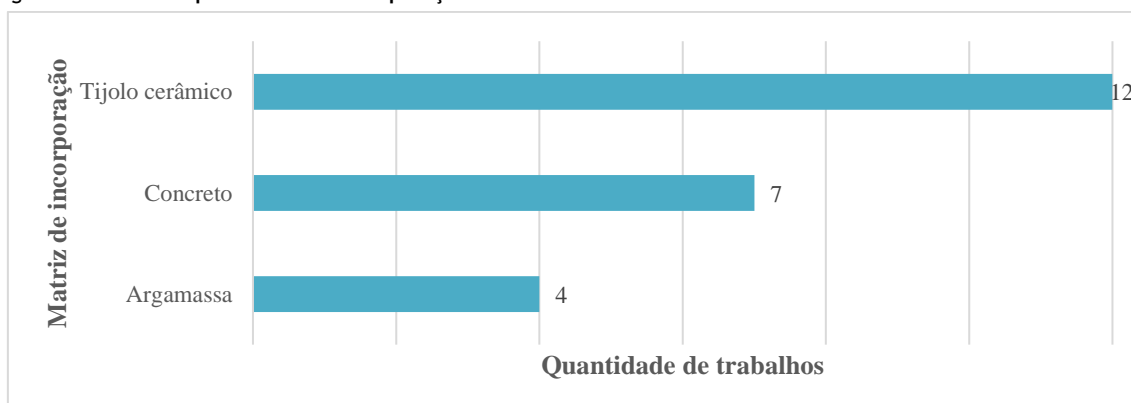
Os principais materiais de construção utilizados para destinação de lodo têxtil foram: tijolos cerâmicos, doze trabalhos; concretos, sete; por fim, argamassas, quatro. Beg *et al.* (2022) analisaram concretos e argamassas, por isso, totalizam-se 23 matrizes de incorporação. Por possuir granulometria de fíler, é coerente a utilização de tal resíduo em argamassas e concretos, tendo em vista os já conhecidos benefícios do efeito de preenchimento. No efeito fíler, as adições, devido às suas partículas finas, preenchem vazios na mistura, alterando o empacotamento dos grãos, o que leva à redução da porosidade e aumento da resistência (Irassar *et al.*, 2015).

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 com o melhor desempenho.

Tabela 2 - Massa específica e pH das amostras de lodo têxtil em diferentes estudos

Autores	Origem	Propriedades	
		Massa específica (g/cm ³)	pH
Balasubramanian <i>et al.</i> (2006)	Índia	2,4	9,13
Beshah, Tiruye e Mekonnen (2021)	Etiópia	-	7,44
Chauhan e Chopra (2017)	Índia	2,32	-
Chen e Wu (2018)	China	-	6,04
Goyal <i>et al.</i> (2019)	Índia	2,32	-
Hossain <i>et al.</i> (2018)	Bangladesh	-	6,4 - 6,7
Kasaw <i>et al.</i> (2021)	Etiópia	2,73	-
Praveenkumar <i>et al.</i> (2023)	Índia	0,93	7,9
Saha <i>et al.</i> (2022)	Bangladesh	2,3	6,8
Shathika <i>et al.</i> (2013)	Índia	2,21	7,14
Ullah <i>et al.</i> (2020)	Bangladesh	-	6,9
Zhan e Poon (2015)	China	1,14	-

Figura 5 - Trabalhos por matriz de incorporação



Argamassas

Na Tabela 3, são apresentadas informações acerca da incorporação do lodo têxtil em argamassas.

Em todas as misturas, foi utilizado cimento Portland de diferentes tipos, também foram considerados os teores de lodo têxtil em relação à massa de aglomerante, em valores variando entre 5% e 20%. A busca pela substituição do cimento Portland está relacionada à tentativa de minoração dos impactos ambientais relacionados ao seu processo produtivo, tais como extração mineral, emissão de gases do efeito estufa, além de ruídos sonoros e geração de poeira (Conceição *et al.*, 2021). Todas as análises foram realizadas com argamassas de cimento Portland, sendo o traço 1:3 utilizado em três dos quatro estudos. Goyal *et al.* (2022) realizaram o pré-tratamento do lodo têxtil por meio da estabilização com óxido de magnésio (MgO), em teores de 5%, 10% e 15%, em relação à massa de lodo têxtil. O procedimento teve por objetivo imobilizar os metais pesados e matéria orgânica presentes no resíduo.

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 4, são apresentados o teor de material incorporado com o melhor desempenho e 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.

A presença do lodo impactou negativamente no desempenho mecânico das argamassas, conforme três dos quatro trabalhos analisados. O teor de lodo, sem pré-tratamento, que ocasionou melhor desempenho no material foi de 5%, sendo observada redução da resistência à compressão em todos os estudos analisados (Beg *et al.*, 2022; Goyal *et al.*, 2019; Zhan *et al.*, 2020). De outra parte, no estudo no qual o lodo passou pelo pré-tratamento (GOYAL *et al.*, 2022), por meio da estabilização por MgO, foi possível incorporar um teor maior de lodo, que corresponde a uma massa superior, tendo em vista que Goyal *et al.* (2019, 2022) e Zhan *et al.* (2020) utilizaram a mesma proporção cimento:areia. Além de ser possível incorporar uma maior quantidade de resíduo, este promoveu uma melhora no desempenho no material produzido, tendo resistência à compressão 14,2% superior à amostra de referência. Ao comparar com a mistura sem estabilização, o benefício do procedimento é ainda mais visível, o aumento da resistência à compressão foi de 36,1%.

De outra parte, Goyal *et al.* (2019) relacionam o efeito deletério do lodo na mistura ao aumento na demanda de água com a adição do material, em decorrência do incremento na quantidade de finos, já que o lodo possui maior área superficial que o cimento. Esse maior teor de água que é necessário caso seja visada uma consistência específica, impacta diretamente no desempenho do material; pois, alguma porção desta não reagirá totalmente com o cimento e, posteriormente, deixará a mistura por meio da evaporação dando origem a poros.

Tabela 3 - Incorporação de lodo têxtil em argamassas

Autores	% incorporado	Informações gerais
Beg <i>et al.</i> (2022)	0%, 5% e 10% (em massa de cimento)	* Cimento Portland 53 <i>Grade</i> * Traço - 1:2,75 * a/c (fixo) - 0,5
Goyal <i>et al.</i> (2019)	0%, 5%, 10%, 15% e 20% (em massa de cimento)	* Cimento Portland 43 <i>Grade</i> * Traço - 1:3 * a/c - Não informada
Goyal <i>et al.</i> (2022)	0%, 5%, 10% e 15% (em massa de cimento)	* Cimento Portland 43 <i>Grade</i> * Traço - 1:3 * a/c - 0,5 * Estabilização MgO (5, 10 e 15%)
Zhan <i>et al.</i> (2020)	0%, 5%, 10%, 15% e 20% (em massa de cimento)	* Cimento Portland <i>Type I</i> * Traço - 1:3 * a/c - 0,5

Tabela 4 - Desempenho de argamassas com incorporação de lodo têxtil

Autores	% com melhor desempenho	Principais resultados
Beg <i>et al.</i> (2022)	5%	Resistência à compressão - 11,0 MPa (↓35,4%)
Goyal <i>et al.</i> (2019)	5%	Resistência à compressão - 44,0 MPa (↓2,2%) Absorção de água - 2,0% (↓6,98%)
Goyal <i>et al.</i> (2022)	10% (+10% de MgO)	Resistência à compressão - 31,3 MPa (↑14,2%)
Zhan <i>et al.</i> (2020)	5%	Resistência à compressão - 43,0 MPa (↓42,9%) Resistência à flexão - 5,5 MPa (↓21,4%)

Zhan *et al.* (2020) indicaram o aumento de macroporos e redução de microporos, 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, aumento na presença de etringita e redução de Silicatos de Cálcio Hidratados (C-S-H). Essa redução na quantidade de C-S-H relatada impacta diretamente na resistência observada, pois, a tal composto é associada a resistência obtida pelas misturas cimentícias no estado endurecido.

Nessas misturas que utilizaram o lodo sem pré-tratamento, este interagiu de forma negativa com a mistura nos estados fresco e endurecido, devido à presença de matéria orgânica e metais pesados. Beg *et al.* (2022) observaram, além do retardamento do início da pega, redução em 37% do tempo de pega. Goyal *et al.* (2019) visualizaram também o retardamento da pega, porém, ocorreu aumento da duração do tempo de pega. Com a estabilização, o potencial de filler do lodo têxtil pôde ser aproveitado, ocasionando melhora no desempenho observado por Goyal *et al.* (2022).

São obtidos valores relativamente distintos de resistência para misturas com mesmo teor de lodo, tipo de cimento e traço, esse comportamento pode estar associado a alguns fatores, tais como: variações granulométricas e de composição da areia; variações na composição química e granulometria do cimento; variações na composição química e granulométrica do lodo, bem como, o rigor empregado no procedimento experimental, tanto na produção do material, quanto na realização dos ensaios mecânicos.

Concretos

Na Tabela 5, são apresentados teores de incorporação do resíduo em concretos, bem como informações gerais de tais procedimentos.

Nos trabalhos analisados, o teor de lodo têxtil incorporado variou entre 2,5% e 35%, tendo sido considerado em relação à massa de cimento por seis dos sete estudos e, em relação à massa de areia, por dois. O tipo de aglomerante utilizado foi o cimento em todos, Velumani e Senthilkumar (2018) utilizaram o cimento Portland pozolânico, Praveenkumar *et al.* (2023) não informaram e os demais estudos utilizaram diferentes tipos de cimento Portland. Em relação ao traço utilizado, foram observadas variações consideráveis, sendo as substituições realizadas por massa de areia ou cimento, bem como no teor de água empregado, o que dificulta

a comparação direta entre o desempenho mecânico dos diferentes materiais. Outro aspecto é que alguns estudos realizaram também a incorporação de outros materiais, tais como: fibra de polipropileno e aditivo superplastificante (Cheng *et al.*, 2023); nano-alumina (Beg *et al.*, 2022; Goyal *et al.*, 2019, 2022; Zhan *et al.*, 2020; Praveenkumar *et al.*, 2023); microssílica e fibra de polipropileno (Velumani; Senthilkumar, 2018). Em relação ao lodo têxtil, foram realizados dois tipos de pré-tratamento no resíduo: calcinação (Cheng *et al.*, 2023), que tem por objetivo principal a retirada da matéria orgânica presente no resíduo; e estabilização com CaO (Zhan; Poon, 2015).

Na Tabela 6, é evidenciada a relação do resíduo incorporado com desempenho dos concretos avaliados na literatura.

Tabela 5 - Incorporação de lodo têxtil em concretos

Autores	% incorporado	Informações gerais
Balasubramanian <i>et al.</i> (2006)	0%, 10%, 20%, 30% (em massa de cimento)	* Cimento Portland 43 <i>Grade</i> * Traço - 1:2:3 * a/c - 0,35; 0,39; 0,44; 0,50
Beg <i>et al.</i> (2022)	0%, 5% e 10% (em massa de areia e cimento)	* Cimento Portland 53 <i>Grade</i> * Traço - 1:2,4:2,5 * a/c fixo - 0,54
Cheng <i>et al.</i> (2023)	0%, 10% e 15% e 20% (em massa de cimento)	* Cimento PII42.5 * Traço - 1:1,96:2,59 * a/c - 0,43 * Lodo calcinado * Fibra de polipropileno * Aditivo superplastificante
Kasaw <i>et al.</i> (2021)	0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% (em massa de cimento)	* Cimento 42,5 <i>Grade</i> * Traço 1:1,5:3,5 * a/c - 0,5
Praveenkumar <i>et al.</i> (2023)	2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 15%, e 20% (em massa de cimento)	* Cimento não informado * Traço - 1:1,38:2,51 * a/c - 0,44 * Nano-alumina (NA)
Velumani e Senthilkumar (2018)	0%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% (em massa de cimento)	Cimento Portland Pozolânico * Traços - 1:2,12:2,16 (a/c - 0,5) 1:1,54:1,70 (a/c - 0,4) * Microssílica (MS) * Fibra de polipropileno (FP)
Zhan e Poon (2015)	0%, 10%, 20%, 30% (em massa de areia)	* Cimento Portland <i>Type I</i> * Traço - 1:3,9:2,1 * a/c - Variável e Não informada * Estabilização com CaO

Tabela 6 - Desempenho dos concretos com incorporação de lodo têxtil

Autores	% com melhor desempenho	Principais resultados
Balasubramanian <i>et al.</i> (2006)	10%	Resistência à compressão - 39,7 MPa (↓3,3%) Absorção de água - 3,9% (↑8,1%)
Beg <i>et al.</i> (2022)	5% (substituindo cimento)	Resistência à compressão - 16,8 MPa (↓14,1%)
Cheng <i>et al.</i> (2023)	15% (substituindo agregado)	Resistência à compressão - 45,0 MPa (↑9,5%)
Kasaw <i>et al.</i> (2021)	10%	Resistência à compressão - 40,0 MPa (↓4,8%) Absorção de água - 10,2% (↑59,3%)
Praveenkumar <i>et al.</i> (2023)	2,5% (com NA)	Resistência à compressão - 45,0 MPa (↑3,4%)
Velumani e Senthilkumar (2018)	10% (com MS e FP)	Resistência à compressão - 65,3 MPa (↑34,9%) Absorção de água - 2,7% (↓18,2%)
Zhan e Poon (2015)	10%	Resistência à compressão - 43,3 MPa (↓16,9%)

Nota: NA - Nano-alumina; MS - Microssílica; e FP - Fibra de polipropileno.

Foi possível observar a influência deletéria da incorporação de lodo têxtil na resistência à compressão em quatro dos sete trabalhos analisados. O pré-tratamento por calcinação promoveu impacto positivo no desempenho (Cheng *et al.*, 2023), sendo o segundo maior valor obtido para resistência à compressão. O lodo com estabilização por CaO (Zhan; Poon, 2015), apesar de não promover melhora no desempenho, proporcionou o maior valor de resistência observado quando excluídos os materiais com adições ou aditivos. Os maiores valores de resistência à compressão foram obtidos nas misturas que utilizaram tais adições e aditivos, os únicos a observarem melhora no desempenho, ao ser comparado com o valor de referência (Cheng *et al.*, 2023; Praveenkumar *et al.*, 2023; Velumani; Senthilkumar, 2018). O menor valor de resistência foi obtido por Beg *et al.* (2022), apesar disso, os autores apontam que as peças produzidas atendem às especificações da norma americana acerca de materiais não estruturais, podendo ser utilizado em blocos de pavimento, por exemplo.

Apesar do pré-tratamento realizado por Cheng *et al.* (2023) ocasionar melhora no desempenho do concreto com incorporação do lodo, é preciso compreender os impactos do procedimento realizado, tendo em vista que este foi realizado a 1000 °C durante 3h. Além da possível transferência de poluição de substâncias tóxicas para a atmosfera, o gasto energético e emissões de gases do efeito estufa envolvidos no processo devem ser estudados de forma mais aprofundada.

Em decorrência da finura de suas partículas, o lodo têxtil aumenta a demanda por água da mistura, ocasionando, no estado endurecido, aumento da porosidade e conseqüente redução da resistência à compressão (Beg *et al.*, 2022). Por esse motivo, Cheng *et al.* (2023) optaram pela utilização de aditivo superplastificante, que proporciona a redução no teor de água para obtenção da consistência desejada.

O impacto negativo do lodo têxtil nos concretos produzidos está relacionado ao mesmo observado nas argamassas, a influência dos metais pesados e matéria orgânica presentes no resíduo no processo de hidratação do cimento, o que reduz a formação de C-S-H (Praveenkumar *et al.*, 2023). Nesse sentido, Praveenkumar *et al.* (2023) observaram que a adição de nanopartículas de alumina promoveu aumento significativo da formação de C-S-H. Da mesma forma que nas argamassas, Balasubramanian *et al.* (2006) observaram o retardamento do início da pega, justamente devido à interação do lodo têxtil à matriz cimentícia.

Tijolos cerâmicos

Na Tabela 7, são apresentadas informações relacionadas à incorporação do lodo têxtil em tijolos cerâmicos.

O teor de resíduo incorporado variou de 0,5% a 50%, em massa total da mistura. Rahman *et al.* (2015) realizaram procedimento de pré-tratamento no lodo, o calcinando a 800 °C, procedimento que tem por objetivo retirar a matéria orgânica do material, que, no processo de sinterização dos tijolos, é removida e resulta numa considerável perda de massa e, conseqüentemente, aumento da porosidade. Porém, o processo de calcinação adiciona impactos ambientais relevantes à produção, tais como, consumo energético, emissão de gases do efeito estufa e, especialmente, a transferência de poluição, tendo em vista que as substâncias presentes no lodo serão conduzidas ao ar.

A maior parte dos estudos, oito dos doze analisados, optou pela secagem ao ar anterior à secagem em estufa, o que permite uma certa economia de energia, tendo em vista que uma parte da umidade pode ser eliminada sem a necessidade da estufa. A secagem em estufa após a secagem ao ar foi efetuada por quatro desses e outros três realizaram diretamente a secagem em estufa. Em relação à sinterização, foram observadas algumas variações significativas, a temperatura variou de 450 °C a 1150 °C, já o período, de quinze dias a 2 horas. Essas diferenças, principalmente a temperatura de sinterização, influenciam diretamente nos resultados mecânicos obtidos.

Na Tabela 8, são expressos os impactos da incorporação do material residual têxtil no desempenho tijolos cerâmicos.

A maioria dos trabalhos, nove dos doze analisados, observou efeitos negativos nas propriedades analisadas. Hossain *et al.* (2018) verificaram perda de massa em torno de 60% superior para os tijolos contendo 25% de lodo têxtil, devido ao elevado teor de matéria orgânica no resíduo. 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 todos os estudos descritos. A maior resistência foi obtida por Rahman *et al.* (2015), que também incorporaram o maior teor de lodo – 30%, os resultados positivos foram atribuídos, entretanto, a outro resíduo incorporado, os resíduos de garrafas de vidro. Os autores alegaram que o derretimento do vidro durante o

processo de queima dos tijolos levou a obstrução dos poros gerados, que reduziram a absorção de água e aumentaram a resistência à compressão.

Um efeito que foi estudado apenas por Priyadharshini *et al.* (2018) é importante na aplicabilidade do material. Foi observado pelos autores que, a partir de 15% de incorporação de lodo, ocorreu uma queda de desempenho frente ao teste de eflorescência, sendo visualizado, no tijolo contendo 20% de material residual, mais de 50% da área coberta com depósitos de sais.

Apesar de Chen e Wu (2018) 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 na atmosfera das substâncias liberadas.

Imobilização do resíduo

Tão importante quanto realizar a avaliação mecânica do material, é compreender sua viabilidade ambiental, de modo a analisar a capacidade de imobilização do material residual na matriz de incorporação. Apesar de sua importância, apenas doze das vinte e três matrizes analisadas realizaram alguma avaliação do tipo. Daqueles que realizaram, dez efetuaram apenas o ensaio da lixiviação, inserindo o material em solução ácida; Delaqua *et al.* (2022) e Herek *et al.* (2012) realizaram também o ensaio de solubilização, no qual se submete o material em solução aquosa.

Tabela 7 - Incorporação de lodo têxtil em tijolo cerâmico

Autores	% incorporado	Informações gerais
Anwar, Behrose e Ahmed (2018)	0,5%, 1,5%, 3,5% e 5,25%	* Secagem ao ar por 10 dias * Secagem em estufa a 100 °C por 3 dias * Sinterização a 1050 °C por 8 dias
Beshah, Tiruye e Mekonnen (2021)	0%, 10%, 20%, 30%, 40%	* Secagem ao ar por 24h * Secagem em estufa a 105°C por 48h * Sinterização a 600, 900 e 1200°C por 6h
Chauhan e Chopra (2017)	0%, 3%, 6%, 9%, 12% e 15%	* Secagem ao ar por 6 dias * Sinterização a 800 °C por 8h
Chen e Wu (2018)	0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 30%, 40% e 50%	* Secagem em estufa a 200 °C por 12h e * Sinterização a 1150 °C por 2,5h
Delaqua <i>et al.</i> (2022)	0%, 2,5%, 5% e 10%	* Secagem em estufa a 110 °C até massa constante * Sinterização a 800, 900 e 1000 °C por 3 h
Herek <i>et al.</i> (2012)	0%, 5%, 10%, 15% e 20%	* Secagem em estufa a 100 °C por 24h * Sinterização entre 100 °C a 900 °C por 3 dias com aumento a cada 24h
Hossain <i>et al.</i> (2018)	0%, 10%, 25%, 50%	* Secagem ao ar * Sinterização a 450 °C por 24h
Priyadharshini <i>et al.</i> (2018)	0%, 5%, 10%, 15%, 20%	* Secagem ao ar por 10 a 12 dias * Sinterização a 900 °C
Rahman <i>et al.</i> (2015)	0%, 5%, 10%, 20%, 30% e 40%	* Secagem ao ar por 1 dia * Sinterização a 1150 °C por 2h * Lodo calcinado a 800 °C por 2h
Saha <i>et al.</i> (2022)	0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45% e 50%	* Secagem ao ar por 6 dias * Sinterização a 1150 °C por 15 dias * Cinzas volantes
Shathika <i>et al.</i> (2013)	0%, 3%, 6%, 9%, 15%, 20%, 30%	* Secagem ao ar por 24h * Sinterização a 1000 °C
Ullah <i>et al.</i> (2020)	0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%	* Sinterização a 1100 °C

Tabela 8 - Desempenho de tijolos cerâmicos com incorporação de lodo têxtil

Autores	% com melhor desempenho	Principais resultados
Anwar, Behrose e Ahmed (2018)	0,50%	Resistência à compressão – 29,0 MPa Absorção de água - 0,8% Perda de volume – 11,0% Obs.: Não teve amostra de referência
Beshah, Tiruye e Mekonnen (2021)	10% (1200°C)	Resistência à compressão - 30,4 MPa (↓6,4%) Absorção de água – 17,0% (↑12,0%) Perda de massa – 25,0% (↑67,0%)
Chauhan e Chopra (2017)	3%	Resistência à compressão – 6,0 MPa (↓33,0%) Absorção de água – 16,0% (Não teve amostra de referência)
Chen e Wu (2018)	5%	Resistência à compressão - 27,5% (↓3,5%)
Delaqua <i>et al.</i> (2022)	2,50%	Resistência à flexão - 9,2 MPa (↓9,8%); Absorção de água – 21,0% (↑2,4%)
Herek <i>et al.</i> (2012)	5%	Resistência à flexão - 35,9 MPa (↓0,5%) Absorção de água – 15,0% (↑50,0%)
Hossain <i>et al.</i> (2018)	25%	Resistência à flexão - 1,7 MPa (↑16,7%) Perda de massa - 5,5% (↑60,1%)
Priyadharshini <i>et al.</i> (2018)	5%	Resistência à compressão - 4,5 MPa (↓16,0%) Absorção de água - 12,6% (↑14,7%)
Rahman <i>et al.</i> (2015)	30% (c/ 10% de resíduo de vidro - garrafas)	Resistência à compressão – 74,0 MPa (↑155,2%) Absorção de água – 5,0% (↓28,6%)
Saha <i>et al.</i> (2022)	5% (+5% de FA)	Resistência à compressão - 6,2 MPa (↓6,1%) Absorção de água - (18,8% - Não teve alteração)
Shathika <i>et al.</i> (2013)	3%	Resistência à compressão - 5,6 MPa (↓29,8%) Absorção de água – 12,0% (↑9,1%) Perda de massa - 2,2% (↑29,4%)
Ullah <i>et al.</i> (2020)	10%	Resistência à compressão - 24,5 MPa (↓4,3%) Absorção de água - 12,8 % (↑12,0%) Perda de massa - 13,3% (↑23,0%)

No ensaio de lixiviação, conforme a NBR 10005 (ABNT, 2004a), que é baseada na USEPA 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 filtração do meio contendo os materiais, o líquido tem, então, sua composição analisada. Já no ensaio de solubilização, normatizado pela NBR 10006 (ABNT, 2004b), o material é mantido submerso em água, em repouso, por sete dias; posteriormente, ocorre a filtração e o extrato solubilizado tem a composição analisada. Os limites são definidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004c), com base nas normas internacionais.

Na Tabela 9, são apresentados os principais resultados dos ensaios de avaliação da imobilização do lodo têxtil nas matrizes analisadas.

Tabela 9 - Desempenho das matrizes com lodo têxtil nas avaliações de imobilização

Autores	Matriz de incorporação	Principais resultados
Zhan <i>et al.</i> (2020)	Argamassa	Lixiviação: * Todos os valores abaixo dos limites normativos; * Pequenas variações em relação à referência; * O maior foi o aumento no teor de As em 100% (valor 99,6% abaixo do limite normativo); * O teor de Se é o mais próximo do limite normativo (96,0% abaixo).
Cheng <i>et al.</i> (2023)	Concreto	Lixiviação: * Todos os valores abaixo dos limites normativos; * Não foram observadas diferenças consideráveis entre a amostra com e sem lodo têxtil; * O teor de Cr é o mais próximo do limite normativo (98,8% abaixo).
Kasaw <i>et al.</i> (2021)	Concreto	Obs.: Realizado apenas com o teor de 20% de lodo têxtil; Lixiviação: * Todos os valores abaixo dos limites normativos; * O teor de Ni é o mais próximo do limite normativo (98,1% abaixo).
Zhan e Poon (2015)	Concreto	Obs.: Realizado apenas com o teor de 10% (tratamento D); Lixiviação: * Todos os valores abaixo dos limites normativos; * O teor de Cu é o mais próximo do limite normativo (89,0% abaixo).
Anwar, Behrose e Ahmed (2018)	Tijolo cerâmico	Lixiviação: * Todos os valores abaixo dos limites normativos; * Em relação à amostra de referência: 65,0% mais Pb; 46,0% mais Cu; 84,0% mais Cr e 239,0% mais Zn.
Beshah, Tiruye e Mekonnen (2021)	Tijolo cerâmico	Lixiviação: * Todos os valores abaixo dos limites normativos; * Em relação ao lodo puro: 100,0% de imobilização do Pb; 86,0% do Cu e 95,0% do Zn.
Chen e Wu (2018)	Tijolo cerâmico	Obs.: Realizado apenas com a mistura com lodo e cinzas volantes. Lixiviação: * Todos os valores abaixo dos limites normativos; * O teor de Ba é o mais próximo do limite normativo (97,6% abaixo).
Delaqua <i>et al.</i> (2022)	Tijolo cerâmico	Obs.: Realizado apenas com o teor de 10% de lodo têxtil; Lixiviação: * Todos os valores abaixo dos limites normativos; Solubilização: * O teor de Al está 129,0% acima do limite normativo; * O teor de Mn está 670,0% acima do limite normativo.
Herek <i>et al.</i> (2012)	Tijolo cerâmico	Lixiviação: * Em relação à amostra de referência: 150,0% mais Al e 50,0% mais Fe. Solubilização: * Todos os valores abaixo dos limites normativos.
Rahman <i>et al.</i> (2015)	Tijolo cerâmico	Lixiviação: * Pequenas variações em relação à referência; * O teor de Mn é o mais próximo do limite normativo (96,0% abaixo).
Saha <i>et al.</i> (2022)	Tijolo cerâmico	Lixiviação: * Todos os valores abaixo dos limites normativos; * O teor de Cr é o mais próximo do limite normativo (99,9% abaixo).
Ullah <i>et al.</i> (2020)	Tijolo cerâmico	Lixiviação: * Todos os valores abaixo dos limites normativos; * Em relação à amostra de referência: 41,9% mais Cu. * O teor de Cd é o mais próximo do limite normativo (88,2%).

De forma geral, todas as matrizes tiveram desempenho satisfatório ao serem submetidas ao ensaio de lixiviação, estando os teores de metais no extrato lixiviado dentro dos parâmetros estabelecidos por norma. Em relação ao ensaio de solubilização, o material produzido por Delaqua *et al.* (2022) apresentou concentrações de Al e Mn acima do permitido. Apesar disso, os autores alegaram que o alumínio e manganês presentes na matriz estavam em sua forma mais estável, conforme observado pelo ensaio de Difração de Raios-X (DRX); portanto, não causaria danos ambientais. Essa alegação não considera a problemática principal da incorporação nos tijolos cerâmicos, além da transferência de poluição para a atmosfera, já citada anteriormente, por meio dos dados apresentados é possível observar que essa matriz não é capaz de realizar uma boa imobilização do material residual. Foram observados aumentos consideráveis no teor de metais em relação à amostra de referência por outros autores (Anwar; Behrose; Ahmed, 2018; Herek *et al.*, 2012; Ullah *et al.*, 2020). Em nenhum dos doze estudos analisados, foi realizado algum processo de estabilização do lodo têxtil, utilizando MgO ou CaO, por exemplo. A imobilização de lodo de vidro de chumbo por MgO promoveu resultados positivos em sua aplicação para fabricação de tijolos cerâmicos, sinterizados em temperatura semelhante aos estudos – 1000 °C (Abdel-Gawwad; Abd El-Aleem; Zayed, 2021).

Em relação às matrizes cimentícias, os resultados apresentados foram positivos. Em todos os estudos, os extratos lixiviados apresentaram teores de metais consideravelmente abaixo dos limites normativos. É importante ressaltar, entretanto, que nenhum dos materiais foi submetido à solubilização, análise também importante para verificação de aprisionamento dos metais à matriz.

Conclusões

Por meio dos estudos realizados, foi possível ter uma visão ampla do cenário de incorporação de lodo têxtil em materiais de construção civil. Para cada tipo de matriz, foram compreendidos os procedimentos de preparo e traços utilizados, bem como as características de cada lodo empregado e, conseqüentemente, como essas metodologias e propriedades influenciaram nos desempenhos obtidos. No que diz respeito ao lodo têxtil, foi possível observar de forma clara como os diferentes pré-tratamentos influenciaram nos materiais produzidos, ocasionando melhor desempenho frente aos ensaios mecânicos. Esses procedimentos possibilitam que a granulometria do lodo têxtil seja benéfica para a matriz sem que seus componentes impactem negativamente, por exemplo, no processo químico de hidratação do cimento Portland.

De modo geral, o desempenho mecânico de argamassas e concretos com incorporação do lodo têxtil não foi positivo, porém, os pré-tratamentos proporcionaram melhoras importantes. A utilização de aditivos superplastificantes nessas misturas se apresentou relevante para garantir a consistência desejada sem a elevação da relação a/c. Em relação ao pré-tratamento por calcinação, apesar dos bons resultados, é importante que sejam realizadas análises mais aprofundadas dos impactos ambientais envolvidos no processo, de modo a garantir se a alternativa é realmente positiva do ponto de vista da sustentabilidade. A estabilização química se apresentou como alternativa relevante a esse procedimento, tendo sido reportados estudos com bons resultados para as três matrizes analisadas.

As análises de imobilização indicaram resultados promissores para as matrizes cimentícias, sendo uma sugestão para trabalhos futuros a realização de ensaios de solubilização. Quanto aos tijolos cerâmicos, além da transferência de poluição devido a liberação de substâncias para a atmosfera durante a sinterização, foram observados aumentos consideráveis na liberação de metais, especialmente no ensaio de solubilização, que apresentou alguns teores fora do limite estabelecido por norma. Além disso, de maneira geral, os resultados mecânicos não foram positivos, sendo outros materiais adicionados responsáveis por melhoras de desempenho.

Portanto, por meio do apresentado, pôde-se aprofundar em detalhes relevantes acerca da fabricação e avaliação ambiental dos materiais alternativos com lodo têxtil incorporado, especialmente vislumbrando novas metodologias de processamento com a realização dos pré-tratamentos. É sugerido para trabalhos futuros que seja realizada a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) dos materiais produzidos, incluindo os diferentes pré-tratamentos, de forma a comparar, de maneira quantitativa, o comportamento desses materiais alternativos com os convencionais.

Referências

ABDEL-GAWWAD, H. A.; ABD EL-ALEEM, S.; ZAYED, A. Stabilization of hazardous lead glass sludge using reactive magnesia via the fabrication of lightweight building bricks. **Journal of Hazardous Materials**, v. 403, p. 124017, 2021.

- AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. **Lavando limpo**. Recife: Agência Estadual do Meio Ambiente, 2018.
- ANWAR, T. B.; BEHROSE, B.; AHMED, S. Utilization of textile sludge and public health risk assessment in Bangladesh. **Sustainable Environment Research**, v. 28, n. 5, p. 228–233, 2018.
- ARULPANDIAN, V. *et al.* feasibility study on paver blocks blended with textile effluent sludge and m-sand. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1006, n. 1, p. 012040, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004c.
- BALASUBRAMANIAN, J. *et al.* Reuse of textile effluent treatment plant sludge in building materials. **Waste Management**, v. 26, n. 1, p. 22–28, 2006.
- BEG, T. *et al.* Utilization of textile denim sludge waste in high load-bearing structural applications. **Polimery/Polymers**, v. 67, n. 7/8, p. 298–307, 2022.
- BESHAH, D. A.; TIRUYE, G. A.; MEKONNEN, Y. S. Characterization and recycling of textile sludge for energy-efficient brick production in Ethiopia. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 16272–16281, 2021.
- CHAUHAN, A. S.; CHOPRA, A. Incorporation of textile mill sludge and fly ash in burnt clay brick manufacturing. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 8, n. 7, p. 97–104, 2017.
- CHEN, C.; WU, H. Lightweight bricks manufactured from ground soil, textile sludge, and coal ash. **Environmental Technology**, v. 39, n. 11, p. 1359–1367, 2018.
- CHENG, Z. *et al.* Effect of textile sludge on strength, shrinkage, and microstructure of polypropylene fiber concrete. **Buildings**, v. 13, n. 2, 2023.
- CONCEIÇÃO, M. M. M. da *et al.* Diagnóstico dos resíduos de demolição e construção no Brasil. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 9, p. 87466–87481, 2021.
- DELAQUA, G. C. G. *et al.* Incorporation of sludge from effluent treatment plant of an industrial laundry into heavy clay ceramics. **Journal of Building Engineering**, v. 47, 2022.
- 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. *et al.* Utilization of textile sludge in cement mortar and paste. **Construction and Building Materials**, v. 214, p. 169–177, 2019.
- GOYAL, S. *et al.* Reutilization of textile sludge stabilized with low grade-MgO as a replacement of cement in mortars. **Construction and Building Materials**, v. 338, 2022.
- HAGER, I.; SITARZ, M.; MRÓZ, K. Fly-ash based geopolymer mortar for high-temperature application: effect of slag addition. **Journal of Cleaner Production**, v. 316, 2021.
- HEREK, L. C. S. *et al.* Characterization of ceramic bricks incorporated with textile laundry sludge. **Ceramics International**, v. 38, n. 2, p. 951–959, 2012.
- HOSSAIN, M. S. *et al.* Reuse of textile mill ETP sludge in environmental friendly bricks: effect of gamma radiation. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 151, p. 77–83, 2018.
- IRASSAR, E. F. *et al.* Hidratação e propriedades de cimentos compostos (com três adições) com fíler calcário e escória. **Revista ALCONPAT**, v. 5, n. 2, p. 84-96, 2015.
- KASAW, E. *et al.* Incineration of textile sludge for partial replacement of cement in concrete production: a case of ethiopian textile industries. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2021, 2021.
- KE, Y. *et al.* Sludge treatment by integrated ultrasound-fenton process: characterization of sludge organic matter and its impact on PAHs removal. **Journal of Hazardous Materials**, v. 343, p. 191–199, 2018.

MENDES JUNIOR, B. de O. **Setor têxtil: produção, comércio internacional e perspectivas para Brasil, Nordeste, Ceará e Pernambuco em 2021**. Indústria: Vestuário. Fortaleza: BNB, 2021. (Caderno Setorial Etene, n. 185).

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

PATIL, U. *et al.* Sustainable building materials using textile effluent treatment plant sludge: a review. **Green Materials**, v. 10, n.4, p. 154-168, 2021.

PRAVEENKUMAR, T. R. *et al.* Effective utilization of waste textile sludge composite with Al₂O₃ nanoparticles as a value-added application. **Applied Nanoscience**, v. 13, n. 2, p. 1251–1261, 2023.

PRIYADHARSHINI, B. *et al.* Utilization of textile sludge in manufacturing e-bricks. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 9, n. 11, p. 2266–2273, 2018.

RAHMAN, A. *et al.* Effects of waste glass additions on quality of textile sludge-based bricks. **Environmental Technology**, v. 36, n. 19, p. 2443–2450, 2015.

SAHA, G. C. *et al.* 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, 2022.

SHATHIKA, B. *et al.* Utilization of textile effluent wastewater treatment plant sludge as brick material. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 15, n. 4, p. 564–570, 2013.

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**. Recife, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Tecnologia Rural, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2017.

ULLAH, S. M. H. *et al.* Performance of industrial sludge-amended bricks manufactured in conventional kilns. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, n. 6, p. 1932–1942, 2020.

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, 2018.

WANG, Y. *et al.* The collaborative pollutants and carbon dioxide emission reduction and cost of ultra-low pollutant emission retrofit in China's cement kiln. **Journal of Cleaner Production**, v. 405, 2023.

WATARI, T. *et al.* 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, 2021.

WONG, H. S. *et al.* Hydrophobic concrete using waste paper sludge ash. **Cement and Concrete Research**, v. 70, p. 9–20, 2015.

ZHAN, B. J. *et al.* Recycling hazardous textile effluent sludge in cement-based construction materials: physicochemical interactions between sludge and cement. **Journal of Hazardous Materials**, v. 381, 2020.

ZHAN, B. J.; POON, C. S. Study on feasibility of reutilizing textile effluent sludge for producing concrete blocks. **Journal of Cleaner Production**, v. 101, p. 174–179, 2015.

Agradecimentos

Os autores agradecem pelo fomento e bolsa de pós-graduação à FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco) (IBPG-1707-3.01/22) e ao PRONEX (Programa de Apoio a Núcleos de Excelência)/NUTREL (Núcleo de Tecnologia e tratamento e reuso de efluentes e lodos).

Carina Lessa Silva

Análise de dados, Pesquisa, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de Pernambuco | Av. da Arquitetura, s/n, Cidade Universitária | Recife - PE - Brasil | CEP 50740-550 | E-mail: carina.lessa@ufpe.br

Érika Pinto Marinho

Análise de dados, Supervisão, Redação - revisão e edição.

Núcleo de Tecnologia | Universidade Federal de Pernambuco | Av. Marielle Franco, s/n, Nova Caruaru | CEP 55014-900 | Caruaru - PE - Brasil | E-mail: erika.pmarinho@ufpe.br

Ana Cecília Vieira de Nóbrega

Supervisão, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal do Rio Grande do Norte | Av. Senador Salgado Filho, 3000 | CEP 59078-900 | Natal - RN - Brasil | E-mail: anacecilianobrega@gmail.com

Arnaldo Manoel Pereira Carneiro

Supervisão, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de Pernambuco | Av. da Arquitetura, s/n, Cidade Universitária | CEP 50740-550 | Recife - PE - Brasil | E-mail: arnaldo.carneiro@ufpe.br

Editores: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros e Eduardo Pereira**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.