

Lodo de ETA como alternativa à argila na indústria cerâmica: Avaliação da qualidade e desafios

Camila Borba Rodrigues^{1*}, Arnaldo Manoel Pereira Carneiro¹

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Rua Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária, 50740-530, Recife, Pernambuco

* camila.brodrigues@ufpe.br

Resumo:

A indústria cerâmica desempenha um papel importante na produção de elementos de vedação e cobertura em todo o mundo. No entanto, devido à escassez de recursos, estão sendo buscados materiais alternativos para substituir a argila na composição cerâmica. O lodo proveniente de estações de tratamento de água (ETA) tem sido considerado como uma opção viável, devido às suas características químicas semelhantes à argila e à necessidade de uma destinação adequada para esse resíduo. Uma revisão da literatura revelou que o lodo apresenta particularidades que variam de acordo com o local e o momento da coleta. Existem diferentes formas de recebimento e tratamento do lodo para sua incorporação na cerâmica, e embora os óxidos majoritários presentes nas argilas e lodos sejam os mesmos, há variações significativas em seus percentuais, conforme relatado por diferentes autores. A qualidade da cerâmica produzida com lodo também é variável. Em geral, é observado um aumento na retração dimensional dos corpos de prova de cerâmica contendo lodo após a queima. No entanto, o uso de lodos com maiores teores de sílica e menores percentuais de material orgânico pode reduzir os efeitos da retração. Além disso, o uso de lodo resulta em um aumento na absorção de água nas cerâmicas, devido à formação de falhas durante a queima e ao aumento da porosidade aberta dos corpos de prova. A resistência mecânica dos corpos de prova também é reduzida com o aumento do teor de lodo na cerâmica. No entanto, resultados mais favoráveis são obtidos quando o lodo e a argila possuem similaridade química e mineralógica, o que contribui para a redução das tensões durante a queima. Em conclusão, é importante considerar a similaridade entre o lodo e a argila selecionados para a produção de cerâmica, a fim de minimizar os efeitos negativos. No entanto, não é aconselhável utilizar lodo na produção de cerâmica, devido à dificuldade de padronização do resíduo e aos efeitos adversos no produto final.

Palavras-chave: Indústria cerâmica; lodo de ETA; substituição; qualidade; efeitos negativos.

1. INTRODUÇÃO:

A indústria de cerâmica vermelha é uma das principais responsáveis pelos elementos de vedação e cobertura das edificações ao redor do mundo. Atualmente, a China é a principal produtora e exportadora de tijolos cerâmicos, respondendo por 67% da produção mundial, seguida pela Índia, com cerca de 17% [1,2]. O Brasil produz cerca de 64 bilhões de blocos cerâmicos por ano, consumindo 140 milhões de toneladas de argila [3]. Estes valores tornam o país responsável por cerca de 4% da produção mundial.

O processo produtivo de blocos cerâmicos para alvenaria envolve impactos ambientais tais como exploração de recursos naturais e poluição do ar, afetando a saúde humana. Contudo, estudos afirmam que a produção deste material tem menos impactos ambientais negativos que o uso alvenaria com blocos de concreto, por exemplo [4]. Parte desses impactos tem relação com a extração de recursos naturais, que pode ser reduzida com a substituição da matéria-prima por resíduos.

O consumo humano de água exige um tratamento adequado da água captada a fim de torná-la potável. O chamado sistema de tratamento convencional é composto das etapas de captação da água, coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção. Na etapa de coagulação, são adicionados sais tais como sulfato de alumínio, sulfato de ferro e cloreto de ferro, a fim de aglomerar as partículas de impurezas e eliminá-las durante a sedimentação e filtração [5]. Este processo resulta em água própria para o consumo e resíduos, chamados de lodo de estação de tratamento de água (ETA). O lodo de ETA possui propriedades resultantes das características da água bruta, minerais e matéria orgânica da água precipitada, e dos produtos usados para o tratamento, como coagulantes e outras adições [6]. A Fig.1 mostra a geração de lodo de ETA de diversos países.

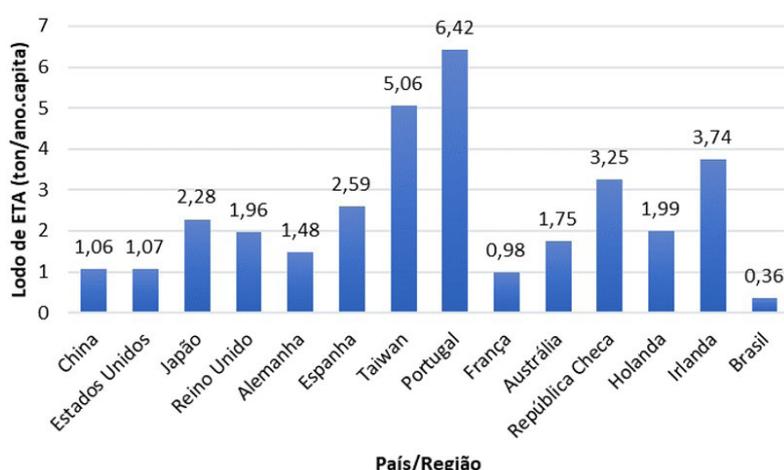


Figura 1. Quantidade estimada de Lodo de ETA gerado em diversos países [7,8].

Os coagulantes usados no tratamento de água podem conferir propriedades tóxicas ao lodo. A depender da qualidade do corpo hídrico e da concentração de alumínio, o lodo pode prejudicar o crescimento de algas e causar a morte de algumas espécies de peixes, caso seja lançado em corpos hídricos [9,10,11].

Apesar de representar de 1 a 3% do volume de água tratada, os dados sobre a destinação do lodo de ETA não são claros [12]. Estima-se que a geração global de lodo de ETA seja de mais de 10.000 t/ano, mas há pouca informação acerca de como este resíduo é tratado ou destinado [13].

Shamaki, Adu-Amankwah e Black [14] afirmam que a maior parte do lodo é disposto em aterros sanitários, o que tem sido desencorajado em função da limitação de espaço e do alto custo envolvido. No Brasil, a maior parte do lodo é lançada em corpos hídricos. Apesar dos esforços e pesquisas para encontrar uma alternativa para o uso de lodo de ETA, no Brasil, apenas cerca de 2% são empregados na construção civil ou usados como insumo na agricultura [15].

Há previsão do aumento de consumo de água potável em cerca de 130% nos próximos 20 anos em virtude da crescente urbanização e da expansão dos sistemas de abastecimento de água e saneamento [16]. Logo, também haverá maior geração de lodo que necessitará de destinação adequada.

Observando as particularidades de cada lodo, há possibilidade de uso para melhoria e recuperação de solos [17,18,19], uso em pavimentação [20] e recuperação do floculante usado [21]. Contudo, a maior parte das pesquisas sobre o lodo de ETA tem estudado o seu uso como insumo para a produção de materiais de construção. A semelhança química entre o lodo e o cimento fizeram com que o resíduo pudesse ser reciclado e incorporado ao cimento como clínquer ou adição [22,23]. Além da semelhança química, as características físicas e mineralógicas possibilitam a mistura do lodo a argilas para a produção de cerâmica para diversos fins. Há aplicação de lodo de ETA na produção de cerâmica estrutural [24,25,26], revestimentos [27,28]; agregados leves [29] e blocos cerâmicos [30,31,32].

Além disso, estudos com o uso de lodo e outras adições também foram desenvolvidos de forma a melhorar as propriedades de cerâmicas. Foram estudadas cerâmicas produzidas com lodo e cinza de casca de arroz para produção de cerâmicas com propriedades isolantes [33]; com sais de baterias recicladas [34], vidro [35], bentonita e silicato de sódio [36].

Diversas revisões foram escritas sobre o reaproveitamento de lodo de ETA. Contudo, o estudo do lodo como substituto de argilas para a produção de cerâmica é fundamental para a sustentabilidade do setor cerâmico nos próximos anos. Este artigo de revisão objetiva identificar as oportunidades de uso do lodo para a produção de cerâmica, investigando as propriedades do lodo de ETA e sua relação com as características das cerâmicas produzidas.

2. CARACTERÍSTICAS DO LODO DE ETA:

O lodo é produzido durante as etapas de decantação e filtração do processo de tratamento convencional de água potável, consistindo principalmente de microrganismos, matéria orgânica, resíduos do coagulante e óxidos químicos.

2.1. Composição do lodo de ETA:

A composição do lodo de ETA é resultante do tipo de tratamento empregado e da qualidade da água. Estudos mostram que os teores de argila, silte e areia variam em função da época e tratamento dado ao lodo após a coleta. Teixeira et al. [37] afirmam que o teor de areia presente no lodo tem relação com o nível do rio em que a água foi captada. Quando o nível do rio sobe, em períodos chuvosos, o teor de areia diminui. A Tab.1 mostra a variação de algumas propriedades de lodos estudados por diversos autores.

Tabela 1. Propriedades de lodos de ETA estudados por diversos autores [26,27,38,39,40]

Propriedade	Limite de liquidez (LL) (%)	Limite de plasticidade (LP) (%)	Índice de plasticidade (IP) (%)	Teor de areia (2,0 – 0,06 mm) (%)	Teor de silte (0,06 – 0,002 mm) (%)	Teor de argila (< 0,002 mm) (%)
Faixa de resultados	56 - 351,5	6 - 144,3	4,2 - 207,2	8,0 - 73,0	5,5 - 41	5,3 - 86,5

Os altos limites de liquidez e plasticidade foram observados por Monteiro et al. [38]. Os autores relacionam esses valores à presença de matéria orgânica, devido à restos de folhas e madeira, compostos orgânicos adsorvidos nas superfícies dos minerais e bactérias.

A presença de matéria orgânica também influencia o teor de argila, uma vez que envolve não só a presença de argilominerais, mas também partículas menores de 0,002 mm. A presença de partículas nesse diâmetro também é responsável pela alta plasticidade.

Possivelmente, o alto teor de partículas na faixa da areia, observado por Tartari et al. [39] tem relação com o tratamento dado ao lodo após a coleta. O lodo foi seco em estufa, destorroado, homogeneizado e peneirado. Ackah et al. [18] afirmam que após a secagem, o lodo forma conglomerados fortes, que não se dissociam com facilidade. Logo, a forma e diâmetro das partículas de lodo obtido após o destorroamento pode ser consequência da energia empregada na moagem.

O material estudado por Araújo et al. [40] possuía cerca de 41% de partículas na faixa do silte, classificando-o como um silte arenoso, em função do seu teor de silte. A curva granulométrica foi obtida em um granulômetro a laser, o que minimizou a formação de conglomerados.

A semelhança química entre lodo e argilas é o ponto de partida para diversos estudos, que substituíram parcialmente as argilas por lodo de ETA para produção de cerâmica [41]. Os óxidos majoritários presentes no lodo são SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, cujos teores variam de acordo com a qualidade da água e com os agentes químicos empregados. Também foi observado, em alguns estudos, uma alta perda ao fogo do lodo de ETA, devido à presença de matéria orgânica e voláteis. A Fig.2 mostra a relação entre os principais componentes químicos dos lodos estudados por cada autor. O teor de SiO₂ tem relação com a presença de quartzo e está associado à areia suspensa, presente na água tratada [18]. O resíduo estudado por Tantawy e Mohamed [31] continha alto teor de SiO₂ (59,70%), e a principal fase cristalina detectada foi quartzo (50%), seguindo por albita (30%) e calcita (21%). Em argilas, o SiO₂ pode provocar aumento de resistência em cerâmicas devido à maior formação de fase vítrea durante a queima [42].

A reação entre o alumínio do coagulante e os bicarbonatos e frações orgânicas do lodo resulta na formação de Al_2O_3 [18]. Os altos teores de Al_2O_3 observados por Benlalla et al. [25] são resultado do tipo de coagulante usado, à base de sulfato de alumínio.

O principal componente químico do lodo estudado por Kizinievič. et al. [30] foi o Fe_2O_3 . Os autores associaram esta característica ao alto teor de ferro encontrado nas águas subterrâneas do local de tratamento da água. O lodo estudado por Kizinievic et al. [30] possuía alto teor de hematita (68%), o que favoreceu a coloração avermelhada da cerâmica produzida com este. Os valores de perda ao fogo observados Mymrin et al. [34] foram associados ao alto teor de orgânicos do lodo, responsáveis pela formação de gases no interior das cerâmicas produzidas.

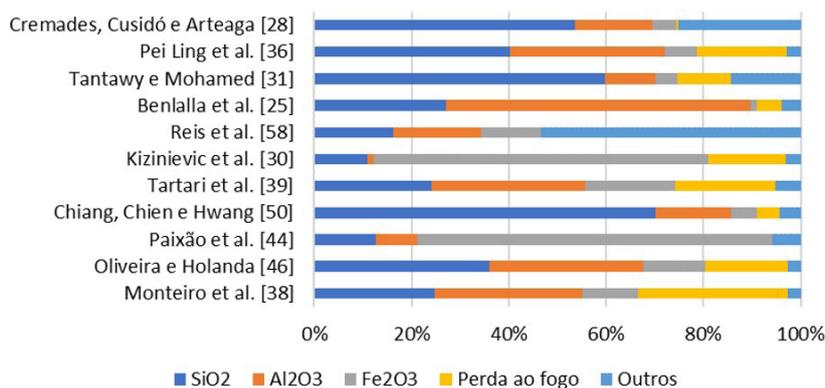


Figura 2. Composição química de lodos de ETA estudados por diversos autores

Além da composição química, a temperatura à qual a cerâmica é submetida é responsável pelas alterações estruturais que resultam no aumento ou redução de resistência, absorção e outras propriedades. Os ensaios termogravimétricos associam a alteração de massa às mudanças de fases ocorridas devido ao aumento de temperatura. A Tab.2 mostra como a temperatura altera as propriedades do lodo de ETA. Inicialmente, a perda de massa é provocada pela eliminação da água livre. Monteiro et al. [38] registraram o primeiro pico endotérmico a 95,9 °C, com uma perda de massa de 7,56%. Kizinievic et al. [30] observaram este pico em 107,3 °C, com perda de massa de 8%. Entre 200 e 463 °C, Kizinievic et al. [30] registraram um efeito exotérmico, cujo pico foi em 290 °C. Esse efeito está relacionado à queima de materiais orgânicos do lodo. A perda de massa a 463 °C foi de 20,5%. A perda de hidroxilas ocorre entre 489 e 517 °C. Monteiro et al. [38] associam esse evento a um pico endotérmico com perda de massa de 4,98%. Monteiro et al. [38] observaram um último pico exotérmico, associado à dissociação da metacaulinita em 931,2°C, sem perda de massa associada. Após os 900 °C, ocorre a decomposição de carbonatos associada à perda de massa de cerca de 20% [30,31].

Tabela 2. Alterações provocadas pela temperatura na estrutura da cerâmica

Temperatura (°C)	Evento	Referência
34-258	Perda de umidade	[30,31,38]
200-463	Queima de matéria orgânica	[30,38]
	Formação de hematita (Fe_2O_3)	[30]
489	Formação de boemita ($AlOOH$)	[31]
516,7	Desidroxilação da caulinita	[38]
931,2	Dissociação da metacaulinita	[38]
938	Decomposição de carbonatos	[31]

2.2. Recebimento e processamento do lodo de ETA para a produção de cerâmica:

A Tab.3 apresenta uma série de estudos realizados, com a definição dos elementos produzidos, teor de lodo empregado e país de origem. Observa-se que diversos estudos para o desenvolvimento de cerâmica com lodo de ETA mostram que o objetivo dos autores é de produzir uma cerâmica com qualidades semelhantes à cerâmica convencional, sem especificar o elemento pretendido.

A maior parte dos autores usou apenas lodo de ETA em substituição à argila, com percentuais que variaram de modo empírico. Observou-se também que a maior parte dos estudos provém de países em desenvolvimento, cujas políticas de destinação de resíduos ainda são pouco observadas. Monteiro e Vieira [43] destacam que, apesar de possuir abundantes reservatórios de argila, o Brasil desenvolve diversas pesquisas com adição de resíduos à cerâmica.

Tabela 3. Uso do lodo de ETA na produção de cerâmica.

Artefato cerâmico	Material	Teor de lodo (%)	País	Referência
Blocos cerâmicos	Lodo de ETA e Argila	0, 10, 20, 30	Brasil	[26]
	Lodo de ETA e Vidro	40, 60	Marrocos	[30]
	Lodo de ETA e Argila	0, 15, 30, 45 e 60	Egito	[31]
	Lodo e aditivos de MgO, Cr ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ ou Fe ₂ O ₃	-	Egito	[32]
Blocos e Pisos	Lodo de ETA e Argila	0, 2, 5, 10	Brasil	[44]
Blocos e telhas	Lodo de ETA e Argila	0, 3, 5, 10	Brasil	[38]
Blocos estruturais	Lodo de ETA e Argila	0, 10, 12,5, 15	Brasil	[45]
	Lodo de ETA e Argila	5, 10, 15, 20, 25, 30	Marrocos	[25]
Cerâmica vermelha	Lodo de ETA e Argila	0, 5, 10, 15	Brasil	[46]
	Lodo de ETA e Argila caulínica	0, 10	Brasil	[47]
	Lodo de ETA e Argila	0, 3, 5, 7, 11	Brasil	[48]
	Lodo de ETA e Argila	0, 4, 8, 12, 16	Brasil	[39]
	Lodo de ETA e Argila	0, 10, 15, 20	Brasil	[49]
	Lodo de ETA e Argila	5, 10, 20, 30, 40	Lituânia	[30]
	Lodo de ETA, vidro, sais de baterias e argila	-	Brasil	[34]
	Lodo de ETA, Argila, sílica, feldspatos e bentonita	0, 10, 20, 30	Malásia	[36]
	Lodo de ETA	-	Rússia	[24]
	Revestimento cerâmico	Lodo de ETA e Argila	0, 10, 20, 30, 40, 100	Colômbia
Lodo de ETA e Argila		0, 20, 30, 40 e 70	Espanha	[28]

Após a etapa de decantação e espessamento, o lodo tem sua umidade parcialmente removida, facilitando seu transporte para a destinação final. Por se tratar de um material ainda fluido, alguns autores optam por secá-lo. Contudo, devido às suas propriedades coloidais, o lodo perde suas características, formando flocos grossos, mesmo quando secos ao ar [18]. Dessa forma, após a secagem, é preciso moer o lodo para misturá-lo às argilas e adições para produção de cerâmicas. A forma como o lodo foi tratado em cada estudo está descrita na Tab.4.

Tabela 4. Beneficiamento do lodo após coleta na ETA

Autor	Secagem	Temperatura	Moagem	Diâmetro máximo da partícula (mm)
Chiang, Chien e Hwang [50]	Sim	105 °C (48 h)	Moagem	0,075 - 0,3
Monteiro et al. [38]	Sim	110 °C	-	-
Teixeira et al. [49]	Sim	110 °C	Moinho de facas	0,42
Kizinievic et al. [30]	Sim	100±5 °C	Moagem	0,63
Benlalla et al. [25]	Ao sol (72h) e em estufa	105 °C (48 h)	Moagem	0,60
Cruz et al. [45]	Ao ar	-	Moagem	-
Tantawy e Mohamed [31]	Sim	-	-	0,125
Ackah et al. [18]	Ao ar	-	Moagem	2 mm
Cremades, Cusidó e Arteaga [28]	Spray-dryer	-	Não	0,0015 - 0,05
Pei Ling et al. [36]	Sim	100 °C	Moinho de bolas	0,475
Algamil, Khalil e Saleem [32]	Ao ar e em estufa	110 °C (3 h)	Moinho de bolas	0,075

Chiang, Chien e Hwang [50] coletaram o lodo de ETA em uma lagoa de sedimentação. Segundo os autores, o lodo estava agregado de modo que os autores precisaram desagregar as partículas mecanicamente. Após o peneiramento, foram selecionadas partículas entre 0,300 e 0,075 mm. Monteiro et al. [38] observaram a necessidade de desagregação do lodo, contudo, o fizeram manualmente e sem controle do diâmetro final das partículas.

A uniformidade no tamanho das partículas foi o principal motivo para a moagem do lodo. Nenhum dos autores justificou o critério de escolha do diâmetro máximo e não consideraram seus efeitos nas cerâmicas produzidas. Contudo, a distribuição granulométrica influencia as características finais da cerâmica, pois facilita a formação de poros e evita fissuras durante a queima [51].

2.3. Condições de produção dos corpos de prova com substituição de argila por lodo de ETA:

A verificação das propriedades físicas das cerâmicas produzidas com lodo foi realizada de diversas formas nos diferentes estudos. A falta de uniformidade na elaboração dos corpos de prova e das temperaturas de queima impedem a comparação dos valores entre os autores. Os valores obtidos em cada ensaio devem ser comparados em termos de percentual de lodo e temperatura de queima, dentro de um mesmo estudo. A Tab.5 mostra como cada autor produziu seus corpos de prova.

Tabela 5. Condições de produção dos corpos de provas de diversos autores

Referência	Dimensões do corpo de prova	Temperatura de queima
[50]	Cilíndricos 20 × 55 mm	1000, 1050, 1100 e 1150 °C
[38]	115 × 25 × 10 mm	700, 900 e 1100 °C
[49]	60 × 20 × 5 mm	850, 900, 1000, 1100 e 1150 °C
[30]	7,0 × 7,0 × 7,0 mm	1000 e 1050 °C
[25]	80 × 30 × 20 mm	800, 900 e 1000 °C
[45]	Blocos de 8 furos de acordo com a norma brasileira (NBR 15270-1/2005)	1000 °C
[31]	250 × 120 × 65 mm	700, 850 e 1000 °C
[28]	Tiras de 70 × 10 mm ²	980 °C

Chiang, Chien e Hwang [50] produziram corpos de prova cilíndricos prensados a 588 MPa, com até 20% de substituição da argila por lodo. As amostras foram queimadas em temperaturas entre 1000 e 1150°C por 1 h. Os autores observaram que o aumento de temperatura provocou efeitos positivos na cerâmica, aumentando a retração, densidade e resistência e reduzindo a absorção, até 1100°C. O uso de lodo, de 5% a 20%, apenas foi indicado para produção de cerâmicas com temperatura de queima superiores a 1050 °C, correspondendo aos critérios de aceitação das normas locais.

Monteiro et al. [38] produziram corpos de prova de 115 × 25 × 10 mm com misturas umedecidas com 8% de água, prensadas a 20 MPa. O teor de lodo incorporado foi de 3 a 10%, e os corpos de prova foram queimados em temperaturas entre 700 e 1100 °C. Os autores afirmam que o lodo, em qualquer teor, reduz a qualidade da cerâmica produzida. Contudo, os melhores resultados foram observados em maiores temperaturas.

Teixeira et al. [49] compararam amostras com 0, 10, 15 e 20% de lodo, queimadas em temperaturas entre 850 e 1150°C. As dimensões dos corpos de prova com medidas iguais a 60 × 20 × 5 mm foram sugeridas por Santos [52]. Segundo o autor, as dimensões são suficientes para representar as características da cerâmica e o pouco material utilizado facilita a execução de ensaios em duplicata. Teixeira et al. [49] verificaram que o lodo piorou as propriedades das cerâmicas em temperaturas abaixo de 1000 °C.

Kizinievič et al. [30] realizaram um experimento com adição de 5, 10, 20, 30 e 40% de lodo em corpos de prova queimados entre 1000 e 1050°C. Os autores utilizaram um lodo proveniente de água rica em ferro misturada a uma argila rica em carbonatos, comum na região da Lituânia. Foram moldados corpos de prova prismáticos de 70 × 70 × 70 mm, com teor de água suficiente para sua conformação. Os autores observaram que o aumento de temperatura resultou em aumento da densidade dos corpos de prova, sendo mais evidente nas amostras com mais lodo.

O lodo usado por Benlalla et al. [25] possuía alto teor de Al₂O₃ em função do uso de sulfatos de alumínio no tratamento de água. Os autores moldaram corpos de prova de 80 × 30 × 20 mm, com teores de lodo de 5 a 30% e 10% de umidade. Os corpos de prova foram queimados em temperaturas de 800 a 1000 °C. Os autores relataram que o acréscimo de resistência também é maior em maiores temperaturas, mas essa tendência não teve relação com a quantidade de lodo. Foi visto também que a resistência aumentou entre as temperaturas de 800 °C e 900 °C, semelhantemente ao que aconteceu entre 900 e 1000°C.

Cruz et al. [45] estudaram o uso de lodo de ETA para produção de blocos cerâmicos estruturais. Os autores optaram pela produção de corpos de prova em forma de blocos de oito furos, segundo as normas técnicas brasileiras (ABNT NBR 15270-1, 2005). Foram usados de 0 a 15% de lodo queimado a 1000 °C.

Tantawy e Mohamed [31] estudaram a produção de blocos com substituição de 15 a 60% da argila convencional por lodo. Os corpos de prova de 250 × 120 × 65 mm foram moldados com 10% de umidade e queimados em temperaturas entre 700 e 1000 °C. O aumento da temperatura provocou aumento de densidade nos corpos de prova, principalmente entre 850 e 1000 °C.

O aumento da temperatura de queima atua nas transformações de fase na cerâmica, resultando em densificação dos corpos de prova. Essa condição é relevante para a melhoria da qualidade da cerâmica, incrementando sua resistência mecânica e reduzindo sua porosidade. Contudo, Chiang, Chien e Hwang [50] relataram piora das propriedades quando empregadas temperaturas superiores a 1100 °C. Logo, o aumento indiscriminado de temperatura não resulta em melhoria em qualquer condição. Outra questão é o gasto energético empregado para a queima da cerâmica. Pode-se considerar a temperatura de queima adequada, aquela que resulta em resultados satisfatórios para a cerâmica a ser produzida.

3. PROPRIEDADES DAS CERÂMICAS PRODUZIDAS COM LODO DE ETA:

O teor de lodo empregado altera a composição granulométrica e mineralógica da cerâmica, resultando em novas fases ou dificultando este processo. A Fig.3 mostra como o teor de lodo empregado por cada autor alterou a retração, em relação às amostras de referência.

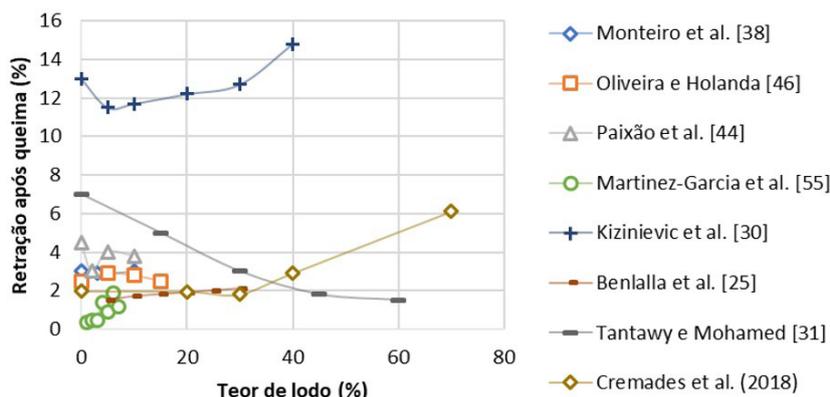


Figura 3. Retração de corpos de prova cerâmicos produzidos com lodo após a queima entre 900 e 1000 °C

Monteiro et al. [38] observaram pouca alteração na retração dos corpos de prova queimados em função do teor de lodo. Segundo os autores, o lodo tem teor elevado de SiO₂ em relação à argila, provocando o equilíbrio entre as fases formadas na cerâmica.

Kizinievic et al. [30], Benlalla et al. [25] observaram um aumento discreto da retração em função da presença do lodo. Apesar do comportamento semelhante, as propriedades dos lodos em estudo foram diferentes. Kizinievic et al. [30] utilizaram um lodo rico em Fe₂O₃, que é responsável por reduzir a retração em corpos cerâmicos [53]. O material estudado por Benlalla et al. [25] possuía uma alta relação Al₂O₃-SiO₂, que resulta em um baixo coeficiente de expansão térmica. Os padrões de difração da cerâmica queimada mostram a presença de minerais como quartzo, anortita e diopsídio. O quartzo é responsável por reduzir a retração em cerâmicas e o diopsídio e a anortita são minerais termodinamicamente estáveis nas temperaturas de queima estudadas [54].

Cremades, Cusidó e Arteaga [28] utilizaram um lodo com composição química e mineralógica semelhante à argila empregada nos experimentos, o que pode ter reduzido a tensão entre as partículas durante a queima, provocando a manutenção da retração de até 30% de lodo.

Martínez-García et al. [55] apresentaram um aumento súbito de retração após a incorporação do lodo na cerâmica. O comportamento pode estar associado à presença de calcita na composição mineralógica do lodo, que se decompõe em altas temperaturas provocando retração nos corpos de prova.

Tantawy e Mohamed [31] observaram que houve redução da retração após a queima nos corpos de prova produzidos com lodo. Os autores afirmam que houve baixa interação entre as partículas de lodo e argila, reduzindo a retração no corpo de prova. O lodo usado pelos autores é rico em SiO₂ e possui um percentual de perda ao fogo inferior ao da argila substituída, o que pode ter colaborado para a baixa retração.

Os resultados médios de absorção de água dos corpos de prova produzidos com lodo de ETA por diversos autores estão representados na Fig.4.

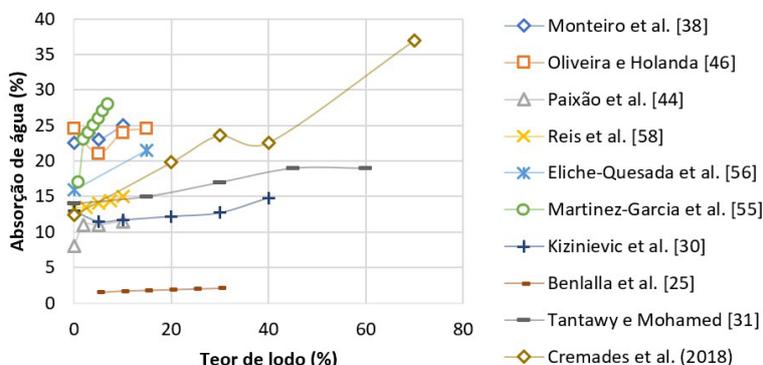


Figura 4. Absorção de água de corpos de prova cerâmicos produzidos com lodo após a queima entre 900 e 1000 °C

Oliveira e Holanda [46] não notaram alterações significativas nos corpos de prova produzidos com lodo. Os autores associaram os resultados de absorção à formação de conglomerados vítreos, favorecida pela presença de CaO e Al₂O₃, que reduziram a porosidade dos corpos de prova. As composições químicas e microestruturas das matérias primas estudadas são semelhantes, e a presença dos agentes de fluxo pode ter colaborado com a redução da temperatura necessária à sinterização da cerâmica e fortalecido a interface entre argila e lodo.

Monteiro et al. [38] associam o aumento da absorção dos corpos de prova produzidos com lodo à perda de massa na queima, observando que o lodo provoca aumento da porosidade da cerâmica. Para os autores, a correção da absorção poderia se dar por meio da adição de agentes de fluxo à massa argilosa e aumento da temperatura de queima. Eliche-Quesada et al. [56] verificaram que o uso de 15% de lodo provocou um aumento de mais de 40% na absorção de água em relação à amostra de referência. Os autores associaram a alta absorção com o aumento da porosidade aberta nos corpos de prova com lodo, que por sua vez foi relacionada à conexão de macroporos.

Martínez-García et al. [55] observaram que o uso de 1 a 15% de lodo resultou em variação da absorção de 22,67 a 27,90%, e que a inclusão de apenas 5% de lodo já modifica significativamente a qualidade da cerâmica. Os autores associam à redução da massa específica e à alta porosidade aberta provocada pela incorporação do lodo.

Kizinievic et al. [30] afirmam que a redução da absorção com adições de lodo de até 10% é resultado da densificação do corpo de prova, em função do aumento da temperatura de queima. Após isso, os efeitos do aumento da porosidade são observados, resultantes do rearranjo dos poros com a queima e do aumento da porosidade aberta.

Tantawy e Mohamed [31] também associaram o aumento da absorção de água à redução da massa específica da cerâmica, que por sua vez foi provocada pela decomposição de materiais carbonáticos e pela decomposição da matéria orgânica.

Apesar da semelhança química e mineralógica houve aumento de absorção de água nos corpos de prova estudados por Cremades, Cusidó e Arteaga [28]. Os autores demonstram que houve redução da massa específica quando o lodo foi incorporado, em virtude do alto teor de CaO do lodo. Aliado a isto, a queima da calcita libera CO₂, provocando um aumento de porosidade. Os autores relataram que há uma perda de massa de cerca de 40% e porosidade aberta de 50% nos corpos de prova com 70% de lodo.

Benlalla et al. [25] também chegaram a conclusões parecidas com os demais estudos. Em geral, pode-se observar um aumento de absorção de água associado ao aumento da retração após a queima. As alterações provocadas pela queima das cerâmicas com lodo resultam na eliminação de orgânicos, gerando gases que provocam, em geral, cerâmicas porosas, com poros interconectados.

A resistência dos corpos de prova produzidos com argila e lodo reflete as propriedades anteriormente estudadas (Fig.5). A resistência à flexão de blocos queimados é influenciada pelas fases que os compõem [57]. Alguns autores realizaram ensaios de resistência à tração na flexão e outros à compressão, dependendo da forma do corpo de prova adotado. Logo, não é possível realizar comparações entre os autores, mas apenas entre as condições resultantes dos percentuais de lodo utilizados.

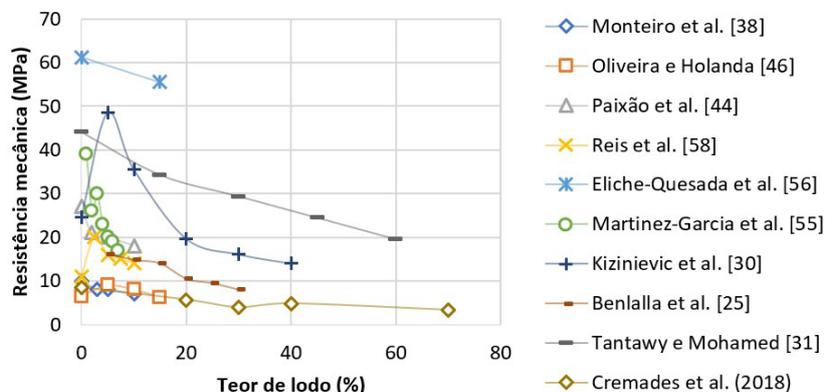


Figura 5. Resistência mecânica de corpos de prova cerâmicos produzidos com lodo após a queima entre 900 e 1000 °C

Oliveira e Holanda [46] observaram poucas variações entre os percentuais de lodo em estudo e a resistência do corpo de prova. Os resultados são coerentes com os dados de retração e resistência, demonstrando a interação entre estas propriedades. Oliveira e Holanda [46] afirmam que, além da semelhança na composição química, a argila e as misturas com o lodo também tinham semelhança mineralógica. Na temperatura de queima até 950 °C foram identificados picos característicos de quartzo, δ -Al₂O₃, hematita, feldspato potássico e ilita/mica, sendo os mesmos picos observados na mistura com 15% de lodo. Na queima a 1050 °C, houve formação de fase vítrea.

Monteiro et al. [38] associaram a redução da resistência dos corpos de prova produzidos com lodo em relação à amostra de referência ao aumento da porosidade provocada pelo lodo. A incorporação de 10% de lodo provoca a redução de cerca de 30% da resistência. Além da semelhança química entre argila e lodo, Monteiro et al. [38] relatam que o aumento da temperatura de queima foi importante para aumento da resistência, uma vez que a argila é de origem caulinítica e há formação da fase líquida em temperaturas mais altas.

Kizinievic et al. [30] e Reis et al. [58] apresentam um aumento de resistência inicial em corpos de prova com lodo, seguido por um decréscimo nos percentuais seguintes. Kizinievic et al. [30] observaram que a variação da resistência à compressão está diretamente relacionada com a densidade dos corpos de prova. O aumento do teor de lodo foi responsável pelo aumento da fragilidade da cerâmica em virtude da porosidade. Os autores demonstram que a baixa concentração de alumina em relação ao teor de ferro compromete a resistência. Quanto maior esta diferença, maior a queda da propriedade. Quando o teor de alumina foi ligeiramente maior, houve aumento de resistência.

Eliche-Quesada et al. [56], Tantawy e Mohamed [31] e Cremades, Cusidó e Arteaga [28] utilizaram argilas cujos percentuais de SiO₂ dos solos e lodos empregados nos estudos era em torno de 50%. O excesso de quartzo tem efeito negativo na mistura, devido à sua alta cristalinidade, uma vez que são pouco reativas. Este fator provoca a menor formação de fase líquida, inibindo o crescimento da mulita e o aumento de poros na estrutura [59]. Esta qualidade pode explicar a redução de resistência progressiva resultante dos experimentos destes autores.

É certo que, como qualquer resíduo, o lodo de ETA tenha características diferentes podendo variar bastante conforme o local de onde provém. Logo, é fundamental, observar as características tanto do lodo quanto da argila a serem empregados na produção da cerâmica de modo a obter um produto semelhante em qualquer que seja a situação. Desta forma, é necessário analisar quais os fatores que influenciam e como estes o fazem na qualidade da cerâmica de modo a quantificá-los e planejar o uso de cada insumo na fabricação dos produtos cerâmicos.

4. CONCLUSÕES:

A presente revisão teve como objetivo compilar os dados de pesquisas envolvendo o uso de lodo e como este interfere nas propriedades da cerâmica vermelha. Observou-se que a maior parte das pesquisas teve origem em países subdesenvolvidos, possivelmente pela dificuldade no gerenciamento do lodo de ETA.

A composição granulométrica do lodo de ETA tem relação com a forma de moagem e os procedimentos adotados por cada autor. Sua interferência na massa argilosa depende das características das argilas e do lodo utilizados.

Os percentuais de lodo usados por cada autor não tiveram motivação específica, e sua limitação tem relação com as propriedades dos corpos de prova cerâmicos após a queima.

Altas temperaturas de queima resultam numa melhor densificação dos corpos de prova com lodo, melhorando a qualidade deste material. Contudo, deve-se observar a energia necessária à produção da cerâmica, evitando gastos energéticos excessivos.

O aumento da retração observado nos corpos de prova tem relação com a composição química e mineralógica das composições. Os autores que relataram um alto teor de SiO₂ observaram retrações lineares após a queima inferiores aos demais. A alta perda ao fogo relacionada à composição de alguns lodos resultou em aumento da retração. O aumento da absorção de água está relacionado principalmente à formação de porosidade aberta, devido à perda de massa após a queima e à baixa interação entre as partículas de lodo e de argila. Na maior parte dos estudos houve redução de resistência mecânica. Os autores que observaram aumento de retração e absorção, relataram também redução da resistência. O surgimento de falhas provocadas pela alta porosidade também foi motivo para redução da resistência.

As pesquisas relacionadas demonstram que, em geral, o uso do lodo de ETA interfere negativamente nas propriedades cerâmicas, em função do teor de lodo empregado. Apesar de completos, os estudos mostram situações locais. O lodo de ETA tem características peculiares resultantes do tratamento de água, em função do local e época de coleta. Logo, o desafio é definir os parâmetros do lodo usado e da argila a ser substituída, de modo que haja pouca interferência das propriedades do lodo na cerâmica queimada. Apesar da semelhança com a argila, foi visto que há pouca interação entre os materiais, provocando falhas e prejuízos às propriedades cerâmicas.

Logo, apesar de ambientalmente sustentável, o uso do lodo de ETA não é recomendado para a produção de cerâmica, uma vez que existem outras possibilidades de destinação do resíduo e sua aplicação em cerâmicas resulta em piora do desempenho do material.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco, FACEPE, pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] Eil A, Li J, Baral P, Saikawa E, 2020. Dirty stacks, high stakes: an overview of brick sector in South Asia. Washington, DC: World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/33727>
- [2] Bhushan C, Basu D, Kumar Yadav N, Kumar R, 2016. National brick missioned: a scoping paper. Centre for Science and Environment, New Delhi. <https://www.hablakilns.com/wp-content/uploads/2018/04/National-Brick-Mission-a-scoping-paper-web.pdf>
- [3] MME, 2018. Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos. Brasília: SGM.
- [4] Muneron L M, Hammad A W, Najjar M K, et al., 2021. Comparison of the environmental performance of ceramic brick and concrete blocks in the vertical seals' subsystem in residential buildings using life cycle assessment. *Cleaner Eng. Technol.* 5, 100243. <https://doi.org/10.1016/J.CLET.2021.100243>
- [5] Fisher F D, 2011. Drinking water treatment plant residuals management: Summary of residuals generation, treatment, and disposal at large community water systems. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-11/documents/dw-treatment-residuals-mgmt-tech-report-sept-2011.pdf>
- [6] Babatunde A O, Zhao Y Q, 2007. Constructive approaches toward water treatment works sludge management: An international review of beneficial reuses. *Crit Rev Environ Sci Technol.* 37, 129–164. <https://doi.org/10.1080/10643380600776239>
- [7] De Carvalho Gomes S, Zhou J L, Li W, Long G, 2019. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. *Resour. Conserv. Recycl.* 145, 148–159. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.02.032>
- [8] SNIS, 2019. Diagnóstico dos serviços de água e esgotos. Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento (SNS).
- [9] George D B, Berk S G, Adams V D, et al., 1995. Toxicity of alum sludge extracts to a freshwater alga, protozoan, fish, and marine bacterium. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 29, 149–158. <https://doi.org/10.1007/BF00212964>

- [10]Mortula M, Bard S M, Walsh M E, Gagnon G A, 2009. Aluminum toxicity and ecological risk assessment of dried alum residual into surface water disposal. *Can. J. Civ. Eng.* 36, 127–136. <https://doi.org/10.1139/S08-042>
- [11]Yuan N, Wang C, Wendling L A, Pei Y, 2017. Ecotoxicological assessment of dewatered drinking water treatment residue for environmental recycling. *Environ. Technol. (U. K.)*. 38, 2241–2252. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1255665>
- [12]Hidalgo A M, Murcia M D, Gómez M, et al., 2017. Possible uses for sludge from drinking water treatment plants. *J Environ Eng (New York)*. 143, 1–7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001176](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001176)
- [13]Ahmad T, Ahmad K, Alam M, 2017. Sludge quantification at water treatment plant and its management scenario. *Environ. Monit. Assess.* 189. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6166-1>
- [14]Shamaki M, Adu-Amankwah S, Black L, 2021. Reuse of UK alum water treatment sludge in cement-based materials. *Constr. Build. Mater.* 275, 122047. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122047>
- [15]IBGE, 2020. Pesquisa nacional de saneamento básico 2017: abastecimento de água e esgotamento sanitário. IBGE, Rio de Janeiro. <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101734.pdf>
- [16]Fakhrul S M I, Karim Z, 2020. World's demand for food and water: The consequences of climate change. In: *Desalination. Challenges and Opportunities*. p 130
- [17]Caniani D, Masi S, Mancini I M, Trulli E, 2013. Innovative reuse of drinking water sludge in geo-environmental applications. *Waste Manage.* 33, 1461–1468. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.02.007>
- [18]Ackah L A, Guru R, Peiravi M, et al., 2018. Characterization of Southern Illinois water treatment residues for sustainable applications. *Sustainability*. 10, 1374–1387. <https://doi.org/10.3390/su10051374>
- [19]Elmontassir H, Zaki K, Wassate B, et al., 2019. Characterization of sludge from the treatment of drinking water and their valuation in the treatment of leachate. *Sci. Study and Res.: Chem. and Chem. Eng., Biotechnol., Food Ind.* 20, 89–102.
- [20]Nazir A K, Mahmoud E, Ali M, Ali N, 2020. Safe and economic disposal of water treatment residuals by reusing it as a substitution layer in roads construction (spectroscopic and geotechnical study). *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 27, 30490–30501. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09371-2>
- [21]Ooi T Y, Yong E L, Din M F M, et al., 2018. Optimization of aluminium recovery from water treatment sludge using response surface methodology. *J. Environ. Manage.* 228, 13–19. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.008>
- [22]Godoy L G G de, Rohden A B, Garcez M R, et al., 2019. Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. *Constr Build Mater.* 223, 939–950. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.333>
- [23]Wang L, Zou F, Fang X, et al., 2018. A novel type of controlled low strength material derived from alum sludge and green materials. *Constr Build Mater.* 165, 792–800. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.078>
- [24]Orlov A, Belkanova M, Vatin N, 2020. Structural ceramics modified by water treatment plant sludge. *Mater.* 13, 1–11. <https://doi.org/10.3390/ma13225293>
- [25]Benlalla A, Elmoussaoui M, Dahhou M, Assafi M, 2015. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. *Appl. Clay Sci.* 118, 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.012>
- [26]Teixeira S R, De Souza S A, De Souza N R, et al., 2006. Effect of the addition of sludge from water treatment plants on the properties of structural ceramic material. *Ceramica*. 52, 215–220
- [27]Torres P, Hernández D, Paredes D, 2012. Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. *Rev. Ing. de Construcción*. 27, 145–154. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732012000300003>
- [28]Cremades L V V, Cusidó J A A, Arteaga F, 2018. Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. *J. Cleaner Prod.* 201, 1071–1080. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.094>
- [29]Huang C H, Wang S Y, 2013. Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate. *Constr. Build. Mater.* 43, 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.016>
- [30]Kiziniavič O, Žurauskienė R, Kiziniavič V, Žurauskas R, 2013. Utilization of sludge waste from water treatment for ceramic products. *Constr. Build. Mater.* 41, 464–473. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.041>
- [31]Tantawy M A, Mohamed R S, 2017. Middle Eocene clay from Goset Abu Khashier: Geological assessment and utilization with drinking water treatment sludge in brick manufacture. *Appl. Clay Sci.* 138, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.01.005>
- [32]Algamal Y, Khalil N M, Saleem Q M, 2018. Usage of the sludge from water treatment plant in brick-making industry. *J. Chem. Technol. Metall.* 53, 504–510.
- [33]Ewais E M M, Elsaadany R M, Ahmed A A, et al., 2017. Insulating refractory bricks from water treatment sludge and rice husk ash. *Refract. Ind. Ceram.* 58, 136–144. <https://doi.org/10.1007/s11148-017-0071-6>
- [34]Mymrin V, Alekseev K, Fortini O M, et al., 2017. Water cleaning sludge as principal component of composites to enhance mechanical properties of ecologically clean red ceramics. *J. Cleaner Prod.* 145, 367–373. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.141>
- [35]Kiziniavič O, Kiziniavič V, Boris R, et al., 2017. Eco-efficient recycling of drinking water treatment sludge and glass waste: development of ceramic bricks. *J. Mater. Cycles Waste Manage.* 20:1228–1238. <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0688-z>
- [36]Pei Ling Y, Ooi C H, Matsumoto A, Yeoh F Y, 2018. Properties evaluation and fabrication of green clay reformulated from water sludge. *Ceram. Int.* 44, 1411–1419. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.09.214>
- [37]Teixeira S R, Aléssio P, Santos G T A, Dias F C, 2004. Influência da data da coleta do lodo de ETA incorporado em massas cerâmicas, nas suas propriedades tecnológicas. In: *48th Annual Meeting of the Brazilian Ceramic Society*. Curitiba, pp 1–12
- [38]Monteiro S N, Alexandre J, Margem J I, et al., 2008. Incorporation of sludge waste from water treatment plant into red ceramic. *Constr. Build. Mater.* 22, 1281–1287. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.013>
- [39]Tartari R, Módenes A N, Pianaro S A, Díaz-Mora N, 2011. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: Parte II: incorporação do lodo em mistura de argilas para produção de cerâmica vermelha. *Cerâmica* 57, 387–394. <https://doi.org/10.1590/s0366-69132011000400003>

- [40] Araújo F C, Scalize P S, Albuquerque A, Angelim R R, 2015. Caracterização física do resíduo de uma estação de tratamento de água para sua utilização em materiais de construção. *Cerâmica* 61:450–456. <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613601931>
- [41] Turner T, Wheeler R, Stone A, Oliver I, 2019. Potential alternative reuse pathways for water treatment residuals: Remaining barriers and questions. A review. *Water Air Soil Pollut.* 230. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4272-0>
- [42] Gencel O, Kazmi S M S, Munir M J, et al., 2021. Feasibility of using clay-free bricks manufactured from water treatment sludge, glass, and marble wastes: An exploratory study. *Constr. Build. Mater.* 298, 123843. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123843>
- [43] Monteiro S N, Vieira C M F, 2014. On the production of fired clay bricks from waste materials: A critical update. *Constr. Build. Mater.* 68, 599–610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.006>
- [44] Paixão L C C, Yoshimura H N, Espinosa D C R, Tenorio J A S, 2008. Effect of addition of high iron content sludge from water treatment plant on a clay-based ceramic. *Cerâmica*. 54, 63–76. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132008000100010>
- [45] Cruz D C, Oliveira J S, Alvarenga M C S, et al., 2016. Quality improvement of ceramic bricks by incorporation of sludge from water treatment units. *J. Eng. Exact Sci.* 2, 042–056. <https://doi.org/10.18540/jcecvl2iss2pp042-056>
- [46] Oliveira E M S, Holanda J N F, 2008. Influence of the addition of water treatment sludge on the properties and microstructure of red ceramic. *Cerâmica*. 54, 167–173. <https://doi.org/10.1590/s0366-69132008000200006>
- [47] Vieira C M F, Margem J I, Monteiro S N, 2008. Microstructural changes of clayey ceramic incorporated with filter sludge from water treatment plant. *Rev. Mater.* 13, 275–281. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762008000200005>
- [48] Vitorino J P., Monteiro S N, Vieira C M F, 2009. Caracterização e incorporação de resíduos provenientes de Estação de Tratamento de Água em cerâmica argilosa. *Cerâmica*. 55, 385–392. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132009000400008>
- [49] Teixeira S R, Santos G T A, Souza A E, et al., 2011. The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. *Appl. Clay Sci.* 53, 561–565. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.05.004>
- [50] Chiang K Y, Chien K L, Hwang S J, 2008. Study on the characteristics of building bricks produced from reservoir sediment. *J. Hazard. Mater.* 159, 499–504. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.046>
- [51] Brophy J H, Rose R M, Wulff J, 1972. *Ciência dos Materiais*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA.
- [52] Santos P S, 1989. *Tecnologia de argilas, aplicada às argilas brasileiras*. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blucher.
- [53] Amaral I B C, Prat B V, Reis A B, 2020. Effect of iron mining tailings as a red ceramic additive for decreased sintering temperature. *Rev. Mater.* 25. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200004.1157>
- [54] Malaiskiene J, Maclulaitis R, Kicaite A, 2011. Dependence of ceramics physical-mechanical properties on chemical and mineralogical composition. *Constr. Build. Mater.* 25, 3168–3174. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.047>
- [55] Martínez-García C, Eliche-Quesada D, Pérez-Villarejo L, et al., 2012. Sludge valorization from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry. *J. Environ. Manage.* 95, S343–S348. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.016>
- [56] Eliche-Quesada D, Martínez-García C, Martínez-Cartas M L, et al., 2011. The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks. *Appl. Clay Sci.* 52, 270–276. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.03.003>
- [57] Berdonosov S S, Prosvetkin N B, Alekseeva Y V, Melikhov I V, 2014. Tubular alumina as a key component of new thermally stable ceramic materials. *Inorg. Mater.* 50:997–1002. <https://doi.org/10.1134/S0020168514100057>
- [58] Reis A, Souza J, Perini B L., Ueno O K, 2014. Influência da adição de lodo, de uma estação de tratamento de água (ETA), nas propriedades mecânicas em cerâmica vermelha. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Cuiabá, pp 1716–1722