

Uso do lodo de esgoto na produção de agregados leves: uma revisão sistemática de literatura

Use of sewage sludge in the production of light aggregates: a systematic review of literature

Maelson Mendonça de Souza¹, Marcos Alyssandro Soares dos Anjos¹
André Luis Calado Araújo², Amanda Virgínia de Oliveira Soares²
Pedro Canísio Azevedo de Souza²

¹ Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, CEP: 59.078-970, Avenida Senador Salgado Filho, 300, Lagoa Nova, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.

e-mail: maelson.mendonca@ifrn.edu.br, marcos.alyssandro@gmail.com

² Diretoria Acadêmica de Construção Civil - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, IFRN, CEP: 59.015-000, Avenida Senador Salgado Filho, 1559, Tirol, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.

e-mail: andre.calado@ifrn.edu.br, amanda.v.o.s@hotmail.com, pedrosouzajs@outlook.com

RESUMO

O lodo de esgoto é o principal subproduto proveniente do tratamento de efluentes residuais. Sua produção é crescente em todo o mundo. Paralelamente, órgãos ambientais vêm restringindo vários métodos de deposição deste resíduo, exigindo cada vez mais a criação de práticas sustentáveis. Nesse contexto, a construção civil destaca-se como um parceiro em potencial. Diversos estudos empregaram o lodo de esgoto no desenvolvimento de novos materiais de construção, dentre os quais destaca-se o agregado leve (LWA). Assim, este estudo avaliou, a partir de uma revisão sistemática da literatura, o potencial de aplicação do lodo de esgoto no processo de fabricação de agregados leves. Dados importantes como: composição química; densidade; granulometria; resistência mecânica; absorção; temperatura de sinterização; aplicação em concretos e lixiviação, foram analisados e comparados as diretrizes internacionais e/ou a agregados comerciais. Os resultados são encorajadores, pois em todos os quesitos avaliados os agregados produzidos com lodo de esgoto atenderam aos padrões internacionais e/ou apresentaram resultados semelhantes aos de agregados comerciais. Demonstrou-se, portanto, que o lodo de esgoto possui viabilidade técnica para fabricação de LWA's, confirmando a potencialidade da gestão sustentável deste resíduo.

Palavras-chave: Agregado leve; Lodo de esgoto; LWA; Reutilização; Revisão sistemática

ABSTRACT

Sewage sludge is the main by-product from wastewater treatment. Its production is growing worldwide. At the same time, environmental agencies have been restricting various methods of disposal of this waste, increasingly demanding the creation of sustainable practices. In this context, construction stands out as a potential partner. Several studies have used sewage sludge in the development of new building materials, including lightweight aggregate (LWA). Thus, this study evaluated, from a systematic review of the literature, the potential application of sewage sludge in the light aggregate manufacturing process. Important data such as: chemical composition; density; granulometry; mechanical resistance; absorption; sintering temperature; concrete application and leaching, international guidelines and / or commercial aggregates were analyzed and compared. The results are encouraging, since in all evaluated aggregates the sewage sludge aggregates met international standards and / or showed similar results to those of commercial aggregates. Therefore, it has been demonstrated that sewage sludge has technical feasibility for LWA's manufacture, confirming the potential of sustainable management of this waste.

Keywords: Lightweight aggregate; Sewage sludge; LWA; Reuse; Systematic review

1. INTRODUÇÃO

O saneamento é indispensável para garantia da saúde humana; suas ações buscam controlar agentes deletérios ao bem-estar físico, social e mental da população. Nesse contexto, o esgotamento sanitário é uma das principais ferramentas utilizadas pelo saneamento para a coleta, o tratamento e a destinação correta ao esgoto produzido por uma dada comunidade. Infelizmente, resíduos com alto poder de poluição são gerados durante a etapa de tratamento. Nesse cenário, um dos principais subprodutos concebidos durante o tratamento de águas residuais é o lodo de esgoto [1-4].

Pesquisas demonstram que a geração de lodo de esgoto vem crescendo significativamente no mundo, atingindo patamares de crescimento de até 100% em um ano em países como a Bulgária, República Checa, Polônia e Romênia [1]. Porém, um maior rigor nas legislações ambientais em todo o mundo, vem impedindo vários métodos tradicionais de descarte do lodo, como o despejo em aterros sanitários ou oceanos, tornando sua disposição cada vez mais difícil [3]. Sendo assim, fica clara a urgente necessidade de uma gestão sustentável deste resíduo de maneira a propor formas de reutilização para o lodo.

Além disso, o consumo exacerbado dos recursos naturais vem diminuindo gradativamente sua disponibilidade. Tal realidade tende a prejudicar o processo produtivo industrial. Dentre as indústrias mais atingidas destaca-se a da construção civil, setor que culturalmente extrai da natureza seus componentes básicos como, por exemplo, os agregados naturais e as matérias-primas para produção de aglomerantes [5]. Por outro lado, nos últimos anos a construção civil vem se destacando positivamente no tocante ao reaproveitamento de resíduos, com ênfase para a reutilização de subprodutos na produção de concretos e cimentos.

Estudos anteriores vêm buscando desenvolver novos materiais de construção, a partir da reutilização do lodo de esgoto, inserido de forma parcial ou total no componente fabricado [1]. O resíduo em questão vem sendo testado de diversas formas: (a) Em substituição parcial ao clínquer de cimento; (b) Como adição pozolânica durante a fabricação do cimento; (c) Na fabricação de agregados; (d) Em argamassas e concretos [2]. Em muitos dos casos os resultados são animadores. Porém, dentre os vários métodos de reuso do lodo, a aplicação do resíduo na produção de agregados leves destaca-se como um dos melhores métodos de gerenciamento sustentável para o subproduto em questão [1].

Portanto, visando fornecer mais clareza sobre tal problemática, o trabalho em questão busca a partir de uma revisão sistemática da literatura avaliar o potencial de aplicação do lodo de esgoto no processo de fabricação de agregados leves. Para tanto, realiza-se, de forma complementar, uma análise comparativa com os métodos tradicionalmente utilizados. O registro do conhecimento a partir da revisão sistemática, também permite a identificação de lacunas de pesquisa que ainda necessitem de avanço ou desenvolvimento.

2. METODOLOGIA

Revisão sistemática da literatura é a estratégia de pesquisa escolhida para o presente estudo. O método em questão auxilia a tomada de decisões por meio da integração de evidências de estudos com resultados práticos e valores humanos, diminuindo a distância entre teoria e prática. O resultado da revisão sistemática proporciona a produção de um estudo claro e replicável, que pode ser facilmente auditado e validado.

A questão de pesquisa desenvolvida neste estudo busca identificar se há viabilidade técnica e potencial de sustentabilidade para aplicação total ou parcial do lodo de esgoto na produção de agregados leves. A técnica em questão ainda não possui produção comercial, mas já conta com algumas pesquisas realizadas de forma isolada. Os principais conceitos da pesquisa são apresentados a partir dos critérios PICO (Quadro 01):

Quadro 1: Critérios P.I.C.O

CRITÉRIOS P.I.C.O	DESCRIÇÃO
POPULAÇÃO	Produção de agregados leves
INTERVENÇÃO	Com lodo de esgoto
COMPARAÇÃO	Com argila
RESULTADO	Verificar viabilidade técnica, proporcionar sustentabilidade

Considerando a relevância da informação nesta área de pesquisa, o estudo em questão optou por selecionar apenas duas bases de dados eletrônicas de literatura revisada por pares: Scopus e ScienceDirect. Três palavras-chave foram associadas ao tema: Agregado leve (Lightweight aggregate ou LWA) e Lodo de esgoto (Sewage sludge). A partir da combinação das palavras-chave elaborou-se a string de busca: “sewage sludge”

AND (“lightweight aggregate” OR LWA). As buscas foram realizadas até setembro de 2018.

A revisão sistemática em foco selecionou apenas estudos publicados em inglês ou português. Também foram definidos 4 critérios para exclusão de pesquisas: (1) O estudo não foi publicado em periódico, congresso ou livro; (2) A pesquisa não apresenta contribuições na área da engenharia; (3) A publicação apresenta o uso de lodo de esgoto para outras finalidades; (4) Não é possível ter acesso ao estudo. Em seguida, foram eliminadas as duplicidades de pesquisas, restando apenas 21 estudos após esta etapa [1-21]. Por fim, mais três estudos, julgados como essenciais para elaboração deste documento, foram inseridos ao presente trabalho [22-24]. Cabe ressaltar que estes estudos adicionais não foram considerados desde o início da triagem por não atender aos critérios de exclusão. O processo de busca e triagem dos estudos, a partir dos critérios pré-estabelecidos resultou na obtenção de 24 estudos relevantes para presente pesquisa e é representado por meio da Tabela 01.

Tabela 1: Triagem dos estudos relevantes.

BASE DE DADOS	TOTAL	RESTANTE APÓS CRITÉRIO DE EXCLUSÃO				ESTUDOS IGUAIS	ESTUDOS ADICIONAIS
		1	2	3	4		
SCIENCEDIRECT	244	209	104	20	20	21	24
SCOPUS	74	62	49	32	15		

Um arranjo das publicações anuais, relevantes para o tema desta pesquisa, é apresentado na Figura 01. É notório que o conteúdo em questão é algo ainda recente e que o interesse por tal assunto vem aumentando nos últimos anos.

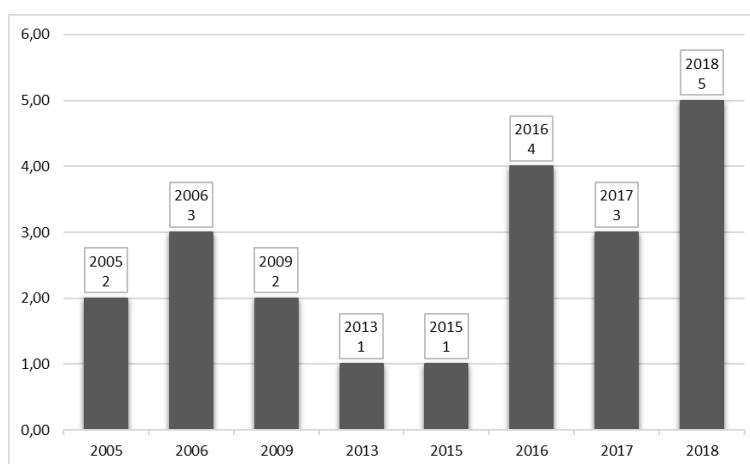


Figura 1: Taxa de publicações anuais.

3. RESULTADOS

3.1 CARACTERÍSTICAS DO LODO DE ESGOTO

3.1.1. Composição química

A obtenção de agregados de baixa densidade ocorre, na maioria dos casos, devido à expansão do material quando submetido a altas temperaturas, e tal expansão depende fundamentalmente da composição química da matéria-prima utilizada [3]. Assim sendo, um passo importante para produção de LWA é a correta definição das proporções dos componentes químicos, de forma a garantir que a mistura se localize na faixa de argila expansiva (SiO_2 : 48-70%, Al_2O_3 : 8-25% e Σ Fluxo: 4,5 a 31%) [4,5].

A Tabela 02 apresenta as composições de óxidos dos lodos de esgoto utilizados nas pesquisas encontradas. A maioria dos estudos fez uso de análises por espectrômetro de fluorescência de raios (FRX). De forma geral, os principais óxidos encontrados são o SiO_2 , o Al_2O_3 , o CaO e o Fe_2O_3 . Por outro lado, vários compostos não foram computados, por serem irrelevantes na análise da faixa de argila expandida, sendo aqui de-

nominados “Outros”.

Tabela 2: Composição de óxidos dos lodos utilizados para produção de agregados.

ESTUDO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Outros
[3]	52,00	20,94	8,98	4,06	2,21	1,30	3,11	7,40
[4]	24,37	7,95	6,08	10,69	10,68	0,34	5,33	34,56
[5]	36,20	14,40	9,20	6,60	2,90	0,00	2,50	28,20
[6]	44,89	11,62	6,81	6,49	0,10	0,04	2,93	27,12
[7]	9,97	10,67	4,05	2,55	0,90	0,30	1,45	70,11
[8]	9,97	10,67	4,05	2,55	0,90	0,30	1,45	70,11
[9]	29,10	15,20	16,40	11,50	3,60	2,30	1,80	20,10
[10]	9,97	10,67	4,05	2,55	0,90	0,30	1,45	70,11
[11]	63,31	15,38	6,81	1,80	1,03	0,70	1,52	9,45
[12]	43,60	16,60	10,40	5,61	1,40	0,82	2,34	19,23
[13]	6,08	2,40	1,27	41,53	1,83	0,08	0,11	46,70
[18]	6,41	9,85	0,63	2,25	0,61	0,15	0,37	79,73
[19]	14,40	38,52	1,54	3,57	0,93	0,58	0,64	39,82
[20]	39,10	11,20	9,23	3,68	2,20	0,75	1,70	32,14
[21]	6,08	2,40	1,27	41,53	1,83	0,08	0,11	46,70

É notória a grande dispersão das composições químicas encontradas. Considerando que os estudos em questão foram realizados em lugares e épocas distintas, é comum perceber que a tecnologia aplicada em cada região propiciará um método específico de tratamento para o esgoto, que resultará em um subproduto singular. Cabe ressaltar que em algumas pesquisas a produção do LWA foi concebida através da aplicação do lodo na forma de cinza [2, 6, 11, 12, 14].

Na maioria dos estudos o lodo utilizado não se adequou a faixa de argila expandida, exigindo do processo a adição de outro produto para o correto balanceamento das proporções dos componentes. Nesse contexto, diversas adições foram testadas, como por exemplo: argila [3,9], alguns tipos de cinzas [4, 6, 13, 21], pó de vidro [5,6], sedimento fluvial [7, 8, 10], cimento Portland [11], lodo de lavagem de agregado [18, 19] e resíduo de construção e demolição [20]. Segundo Tsai [6] a adição de pó de vidro, em até 20% em massa, provocou elevação dos teores de SiO₂ e redução no Σ Fluxo (Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O e K₂O), resultando em inchaço.

3.2 Características do LWA produzido com lodo de esgoto

3.2.1 Densidade

De acordo com as normas europeias, o agregado leve (Lightweight aggregate ou LWA), destinado a aplicação em concreto e argamassa, deve apresentar massa unitária inferior a 1200 kg/m³ e massa específica não superior a 2000 kg/m³ [21]. Os valores mínimos e máximos encontrados para massa unitária (Figura 02-a) e massa específica (Figura 02-b) dos LWA's produzidos com lodo de esgoto são expostos a seguir. É possível perceber uma grande dispersão nos resultados, ainda que na maioria dos casos os valores obtidos atendam as exigências prescritas em norma.

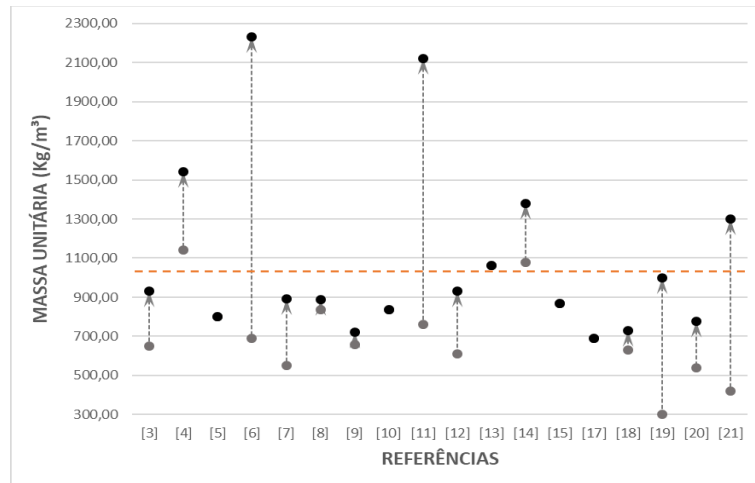


Figura 2(a): Massa unitária dos LWA's de lodo de esgoto.

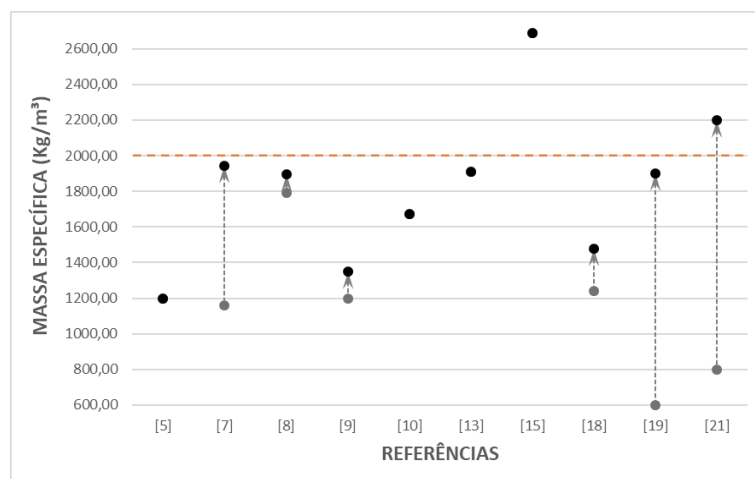


Figura 2(b): Massa específica dos LWA's de lodo de esgoto.

Vale ressaltar, que a maioria dos estudos expostos obteve mais de dois resultados e que grande parte destes valores se concentrou abaixo dos limites preestabelecidos, indicando que a utilização do material em questão, de forma exclusiva ou parcial, possui viabilidade técnica neste quesito. Prioritariamente, os ganhos de densidade foram obtidos a partir da elevação na temperatura de sinterização.

3.2.2 Granulometria

O processo de fabricação de agregados leves comerciais, em diversos países, resulta na obtenção de partículas com distribuição granulométrica variando entre 1 mm e 25 mm [23]. Nesse contexto, o material em questão situa-se em duas faixas granulométricas distintas: Agregado miúdo (Partículas menores que 4,75mm) e Agregado graúdo (Partículas maiores que 4,75mm) [24]. A Figura 03 demonstra as faixas de composição granulométrica empregadas nas pesquisas encontradas nesta revisão sistemática.

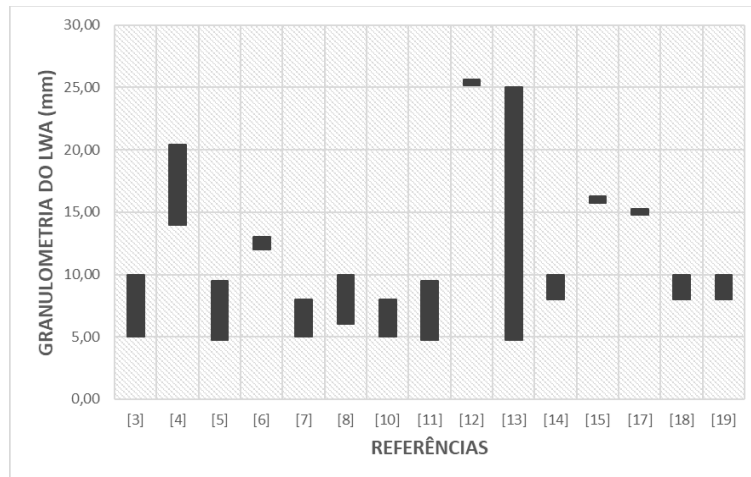


Figura 3: Composição granulométrica dos LWA's de lodo de esgoto.

Através da análise e compilação dos dados da literatura publicada é possível perceber que o LWA produzido a partir do lodo de esgoto possui, na maioria dos casos, um diâmetro de partículas variando de 4,75mm a 25,4mm, podendo, portanto, ser utilizado como agregado graúdo para produção de concretos. Chama atenção o fato de que nenhuma pesquisa desenvolveu LWA com granulometria adequada para agregado miúdo.

3.2.3 Resistência mecânica

Tomando por base o Departamento Nacional de Padrões da China (CNBS), a mínima resistência à compressão, exigida para um LWA sinterizado destinado à produção de concretos é de 7,50 MPa [7]. No entanto, cabe ressaltar que em algumas pesquisas foi possível produzir concreto estrutural com resistência à compressão da ordem de 40MPa a partir da aplicação de um LWA com resistência à compressão de 6 MPa [21].

Em grande parte das pesquisas os testes de resistência mecânica à compressão foram realizados a partir da compressão diametral de amostras individuais do LWA sinterizado [4,7]. A compilação dos melhores resultados obtidos em cada pesquisa é apresentada através da Figura 04. Nota-se que a maior parte dos resultados se concentra acima do valor exigido pela norma supracitada. Contudo, alguns trabalhos afirmam que a elevação dos teores de lodo, quando de sua utilização parcial na mistura, exerce forte influência negativa sobre a resistência mecânica dos LWAs sinterizados [4,5].

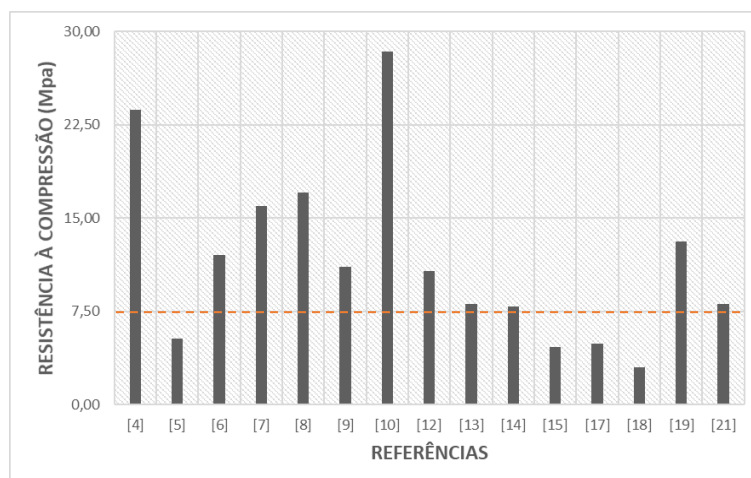


Figura 4: Resistência à compressão dos LWA's de lodo de esgoto.

3.2.4 Absorção de água

A morfologia do LWA tem grande relevância no controle da absorção de água. Um agregado com estrutura de poros conectados irá absorver significativamente mais água do que um outro com estrutura de poros isolados e superfície vítrea [5]. Estudos apontam que a temperatura de sinterização tem papel fundamental no controle da absorção. A sinterização da mistura promove a densificação das partículas, reduzindo a entrada de água na matriz do agregado [21].

De forma simultânea, o lodo de esgoto possui baixo ponto de fusão, apresentando-se como postulante adequado para produção de LWAs, uma vez que promoverá redução na temperatura necessária para densificação do material, proporcionando assim uma menor absorção [4]. Agregados leves comerciais apresentam, geralmente, capacidade de absorção de água após 24 horas de imersão de no máximo 20% [5].

A análise da absorção também demonstrou grande variedade de resultados. De forma a simplificar a apresentação dos estudos, os resultados foram divididos em um histograma (Figura 05) de acordo com a preponderância dos resultados. Em apenas dois estudos [12,18] os resultados encontrados não alcançaram os valores comumente apresentados por LWA's comerciais, demonstrando novamente o potencial do LWA produzido a partir de lodo de esgoto.

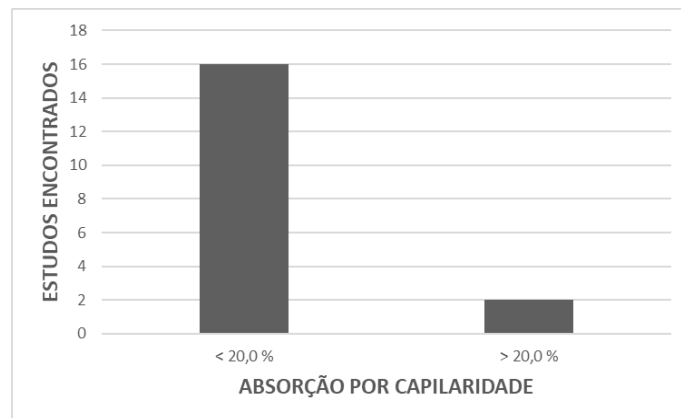


Figura 5: Absorção dos LWA's de lodo de esgoto.

3.2.5 Temperatura de sinterização

A temperatura de sinterização desempenha papel fundamental no controle de várias características do agregado leve: porosidade; densidade; absorção de água; resistência mecânica e até mesmo no controle da lixiviação de metais pesados [8], [10], [13], [21]. Contudo, não foram encontradas normas que definam qual a temperatura ideal para sinterização de agregado leve. Sendo assim, a compilação dos dados apresenta uma tendência da temperatura ideal para LWAs produzidos à base, exclusiva ou parcial, de lodo de esgoto.

Avaliando a Figura 06 é possível perceber que a temperatura de sinterização variou de 880 a 1300 ° C. No entanto, nota-se uma grande concordância dos estudos na utilização de temperaturas próximas a casa dos 1100° C. Em grande parte dos estudos o LWA ideal foi obtido próximo a essa faixa de temperatura, o que pode diagnosticar que essa é a temperatura preferível para sinterização de agregados leves elaborados a partir da utilização do lodo de esgoto.

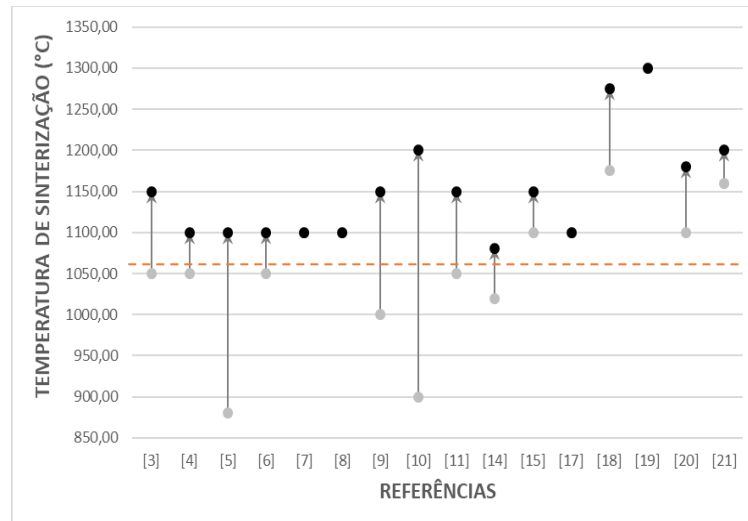


Figura 6: Temperatura de sinterização dos LWA's de lodo de esgoto.

3.2.6 Lixiviação de metais pesados

A reutilização do lodo de esgoto, para qualquer aplicação, requer sérios cuidados, pois o subproduto em questão pode conter vários agentes prejudiciais ao meio ambiente e a saúde humana, como por exemplo uma relevante concentração de metais pesados [8]. Cobre, cádmio, chumbo, mercúrio e cromo, são os metais pesados comumente encontrados no lodo de esgoto e ocorrem principalmente devido ao tratamento de efluentes industriais [1].

Um método extensivamente aplicado na avaliação da toxicidade característica de metais pesados presentes em resíduos é o TCLP (*Toxicity characteristic leaching procedure*) [7]. Tal método foi amplamente utilizado nos estudos encontrados. De forma geral, os agregados leves produzidos com lodo de esgoto apresentaram teores variados de metais pesados. Porém, em todas as pesquisas as concentrações encontradas atendiam aos níveis aceitáveis das regulamentações ambientais [3-8], [10-13], [15, 17].

3.2.7 Aplicação em concretos estruturais

A utilização de agregados leves na produção de concretos estruturais não é algo recente: os primeiros relatos datam aproximadamente do ano 1100 a.C. [23]. Atualmente, vários LWA's comerciais vêm sendo empregados para tal finalidade [13]. Requisitos técnicos preestabelecidos pela ASTM C330 e a ACI 318 exigem que o concreto leve estrutural apresente resistência à compressão mínima de 17,2 MPa aos 28 dias [5].

Apenas 4 estudos demonstraram o emprego do LWA fabricado com lodo de esgoto na produção de concreto leve estrutural [2], [3], [5], [13]. Apesar do baixo número de pesquisas os resultados são animadores, pois todos esses estudos alcançaram padrões de resistência capazes de atender as normas supracitadas. Nesse contexto, cabe destacar os resultados obtidos nos estudos [5] e [13] os quais elaboraram concretos leves estruturais com resistência à compressão de 49,5 e 50,4 MPa respectivamente. Tais resultados são semelhantes aos encontrados quando do uso de LWA's comerciais.

4. OPORTUNIDADES DE PESQUISA

A presente revisão sistemática permitiu identificar lacunas na literatura atual. Sendo assim, são apresentadas abaixo, algumas sugestões de pesquisa que podem potencializar o uso do lodo de esgoto na produção de agregados leves:

4.1 APLICAÇÃO DO LWA EM CONCRETO

Apenas um pequeno número de pesquisas utilizou o LWA proveniente do lodo de esgoto na produção de concreto estrutural. Considerando que os resultados alcançados nos estudos anteriores são positivos, um aumento no número de pesquisas poderia despertar o interesse para o uso desse novo agregado.

4.2 PRODUÇÃO DE AGREGADOS MIÚDOS

Nenhum dos estudos encontrados abordou a produção de LWA com a granulometria do agregado miúdo. Considerando que vários agregados comerciais produzidos pelo mundo possuem esta faixa granulométrica, fica clara a urgente necessidade para a produção de novas pesquisas que abordem tal conteúdo.

4.3 RISCOS À SAÚDE

Avaliando que o lodo de esgoto pode agir de forma deletéria a saúde humana, percebe-se a necessidade de estudos que traduzam os riscos inerentes ao operador deste resíduo, quando de sua aplicação na produção de agregados leves. Dessa forma, será possível reduzir os riscos e ao mesmo tempo aumentar a confiabilidade da comunidade acadêmica no uso do lodo de esgoto.

4.4 ESTUDOS DE CASOS

Aplicações práticas são fundamentais para consolidação do material em estudo. Infelizmente, não foram encontrados estudos de casos sobre a aplicação do LWA de lodo de esgoto em organizações privadas do setor da construção civil.

5. CONCLUSÕES

O uso do lodo de esgoto na produção de agregados leves tornou-se mais compreensível após a aplicação da metodologia de revisão sistemática sobre o tema em foco. De modo geral, a presente pesquisa revelou que o lodo de esgoto possui viabilidade técnica para fabricação de LWA's. O material em estudo atendeu aos requisitos exigidos por normas internacionais, apresentando resultados comparáveis aos de agregados leves comerciais, popularmente utilizados na produção de concretos. Consequentemente, fica claro o potencial de sustentabilidade apresentado por tal subproduto. De forma isolada é possível concluir que:

- A composição química do lodo de esgoto tende a agir como fator limitante para sua utilização, como único constituinte, na produção de agregados. Percebeu-se grande dispersão de resultados. Na maioria dos casos as análises de FRX resultaram em materiais fora da faixa de argila expansiva, exigindo assim a adição de novos materiais para a correta proporção dos óxidos.
- Os dados encontrados para densidade, absorção, resistência mecânica e o controle da lixiviação de metais pesados, revelaram resultados otimistas. Predominantemente, o LWA ótimo foi obtido em temperaturas próximas a 1100° C, demonstrando que essa faixa de temperatura pode ser considerada mais adequada para sinterização de LWA de lodo de esgoto.
- Quando da aplicação em concretos o LWA produzido com lodo de esgoto apresentou resultados satisfatórios, demonstrando capacidade para produção de compósitos estruturais. Entretanto, tal conclusão é baseada em um número escasso de pesquisas. Nesse contexto, percebe-se a necessidade de novos estudos, de forma a alicerçar o uso do lodo de esgoto no LWA e sua posterior aplicação no concreto. Similarmente, ficou clara a necessidade de investigação sobre a aptidão do lodo de esgoto para produção de agregados leves miúdos.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ŚWIERCZEK, L., CIEŚLIK, B. M., KONIECZKA, P., "The potential of raw sewage sludge in construction industry-A review", *Journal of Cleaner Production*, v. 200, pp. 342-356, Nov. 2018.
- [2] LYNN, C. J., *et al.*, "Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete", *Construction and Building Materials*, v. 98, pp. 767-779, Nov. 2015.
- [3] MUN, K. J., "Development and tests of lightweight aggregate using sewage sludge for nonstructural concrete", *Construction and Building Materials*, v. 21, n. 7, pp. 1583-1588, Jul. 2007.
- [4] WANG, X., *et al.*, "Development of lightweight aggregate from dry sewage sludge and coal ash", *Waste management*, v. 29, n. 4, pp. 1330-1335, Apr. 2009.
- [5] TUAN, B. L. A., *et al.*, "Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete", *Construction and building materials*, v. 47, pp. 334-339, Oct. 2013.

- [6] TSAI, C. C., WANG, K. S., CHIOU, J., “Effect of SiO₂–Al₂O₃–flux ratio change on the bloating characteristics of lightweight aggregate material produced from recycled sewage sludge”, *Journal of hazardous materials*, v. 134, n. 1-3, pp. 87-93, Jun. 2006.
- [7] LIU, M., *et al.*, “Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment”, *Ceramics International*, v. 44, n. 4, pp. 4313-4319, Mar. 2018.
- [8] LIU, M., XU, G., LI, G., “Effect of the ratio of components on the characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment”, *Process Safety and Environmental Protection*, v. 105, pp. 109-116, Jan. 2017.
- [9] LI, B., *et al.*, “Effects of a two-step heating process on the properties of lightweight aggregate prepared with sewage sludge and saline clay”, *Construction and Building Materials*, v. 114, pp. 119-126, Jul. 2016.
- [10] LIU, M., *et al.*, “Effects of sintering temperature on the characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment”, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 748, pp. 522-527, 2018.
- [11] CHIOU, J., *et al.*, “Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash”, *Waste Management*, v. 26, n. 12, pp. 1453-1461, 2006.
- [12] WANG, K. S., *et al.*, “Lightweight properties and pore structure of foamed material made from sewage sludge ash”, *Construction and Building Materials*, v. 19, n. 8, pp. 627-633, Oct. 2005.
- [13] LAU, P. C., TEO, D. C. L., MANNAN, M. A., “Mechanical, durability and microstructure properties of lightweight concrete using aggregate made from lime-treated sewage sludge and palm oil fuel ash”, *Construction and Building Materials*, v. 176, pp. 24-34, Jul. 2018.
- [14] CHEESEMAN, C. R., VIRDI, G. S., “Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash”, *Resources, Conservation and Recycling*, v. 45, n. 1, pp. 18-30, Sep. 2005.
- [15] FRANUS, M., BARNAT-HUNEK, D., WDOWIN, M., “Utilization of sewage sludge in the manufacture of lightweight aggregate”. *Environmental monitoring and assessment*, v. 188, n. 1, pp. 10, 2016.
- [16] AYATI, B., *et al.*, “Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate”, *Construction and Building Materials*, v. 162, pp. 124-131, Feb. 2018.
- [17] KANARI, N., *et al.*, “Use of residual materials for synthesis of lightweight granulates by thermal treatment process”, *Applied Clay Science*, v. 123, pp. 259-271, Apr. 2016.
- [18] GONZÁLEZ-CORROCHANO, B., *et al.*, “Valorization of washing aggregate sludge and sewage sludge for lightweight aggregates production”, *Construction and Building Materials*, v. 116, pp. 252-262, Jul. 2016.
- [19] GONZÁLEZ-CORROCHANO, B., ALONSO-AZCÁRATE, J., RODAS, M., “Production of lightweight aggregates from mining and industrial wastes”. *Journal of Environmental Management*, v. 90, n. 8, pp. 2801-2812, Jun. 2009.
- [20] HE, B. F., “Lightweight Ceramsite based on sewage sludge made by Muffle furnace”, In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 61, n. 01, p. 012036, IOP Publishing, 2017.
- [21] LAU, P. C., TEO, D. C. L., MANNAN, M. A., “Characteristics of lightweight aggregate produced from lime-treated sewage sludge and palm oil fuel ash”, *Construction and Building Materials*, v. 152, pp. 558-567, Oct. 2017.
- [22] NAKAGAWA, E. Y., *et al.*, *Revisão Sistemática da Literatura em Engenharia de Software: Teoria e Prática*, 1 ed., Rio de Janeiro, Elsevier, 2017.
- [23] ROSSIGNOLO, J. A., *Concreto leve estrutural: Produção, propriedades, microestrutura e aplicações*, 1 ed., São Paulo, Pini, 2009.
- [24] MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. JM., *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*, 3 ed., São Paulo, Pini, 2008.

ORCID

Maelson Mendonça de Souza	https://orcid.org/0000-0002-3451-4179
Marcos Alyssandro Soares dos Anjos	https://orcid.org/0000-0001-9563-2534
André Luis Calado Araújo	https://orcid.org/0000-0001-5050-992X
Amanda Virgínia de Oliveira Soares	https://orcid.org/0000-0002-9577-1697
Pedro Canísio Azevedo de Souza	https://orcid.org/0000-0003-3017-045X