

**CINZAS DE LODO DE ESGOTO EM CONCRETOS ECOEFICIENTES: UMA
REVISÃO DA LITERATURA PARA PRODUÇÃO DE ADIÇÃO MINERAL -
TEMPERATURA DE CALCINAÇÃO E A SUA RELAÇÃO COM A
POZOLANICIDADE – PESQUISAS DE 2014 A 2024**

¹MARIELLE VIEIRA FELIX ROCHA, ²BRUNO LUÍS DAMINELLI, ³OSWALDO CASCUDO

³ANDRIELLI MORAIS ⁴JULIANA NOBRE RIBEIRO PONTES

¹Universidade de São Paulo (USP), ²Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU-USP),

³Universidade Federal de Goiás (UFG), ⁴Ciplan Cimento

<marielle.felix@gmail.com> <bruno.daminelli@usp.br> <ocascudo@gmail.com> <andriellimoraes@ufg.br>

<juliananrpontes@gmail.com>

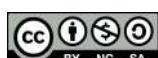
DOI: 10.21439/conexoes.v19.4045

Resumo. O lodo de esgoto produzido anualmente no mundo inteiro excede 30 milhões de toneladas e o processo de incineração tem se tornado a forma de gerenciamento mais adequada deste resíduo. Esta incineração é capaz de reduzir até 90% do volume de lodo, restando 10% de cinzas residuais que podem ser utilizadas em substituição parcial ao cimento *Portland* no concreto, contribuindo para a redução de emissões de CO. Este trabalho tem objetivo de sintetizar o conhecimento técnico no contexto brasileiro e internacional, quanto as pesquisas com cinza de lodo de esgoto no que tange às melhores temperaturas para a sua calcinação e produção de adição mineral, analisando a sua pozolanicidade e os percentuais mais comumente utilizados em substituição ao cimento *Portland* em concretos. Foi definido um recorte temporal entre os anos de 2014 e 2024 para artigos nacionais e internacionais. Foram utilizadas as bases de dados: catálogo de teses e dissertações CAPES, Portal de periódicos UFG, Portal de busca integrada (USP), Portal de periódicos CAPES, Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações e plataforma *Science direct*. Resultados mostraram que a cinza de lodo de esgoto (CLE) é promissora como material pozolânico quando incorporada ao cimento *Portland*, devido à presença de sílica amorfa e alumina. Esses compostos aumentaram a reatividade da pasta de cimento e influenciaram positivamente a cinética de hidratação, aperfeiçoando assim, propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. Conclui-se que o uso otimizado de CLE contribuiu para a produção de concretos ecoeficientes, tornando-se deste modo, uma alternativa viável para a construção civil.

Palavras-chave: cinzas de lodo de esgoto (CLE); pozolanicidade; resíduos; sustentabilidade; adição mineral.

**SEWAGE SLUDGE ASH IN ECO-EFFICIENT CONCRETES: A LITERATURE
REVIEW FOR MINERAL ADDITION PRODUCTION – CALCINATION
TEMPERATURE AND ITS RELATIONSHIP WITH POZZOLANICITY – RESEARCH
FROM 2014 TO 2024**

Abstract. Sewage sludge produced annually worldwide exceeds 30 million tons and the incineration process has become the most appropriate way to manage this waste. This incineration is capable of reducing up to 90% of the sludge volume, leaving 10% of residual ash that can be used as a partial replacement for Portland cement in concrete, contributing to the reduction of CO emissions. This work aims to synthesize the technical knowledge in the Brazilian and international context, regarding research on sewage sludge ash regarding the best temperatures for its calcination and production of mineral addition, analyzing its pozzolanicity and the



CINZAS DE LODO DE ESGOTO EM CONCRETOS ECOEFICIENTES: UMA REVISÃO DA LITERATURA PARA PRODUÇÃO DE ADIÇÃO MINERAL - TEMPERATURA DE CALCINAÇÃO E A SUA RELAÇÃO COM A POZOLANICIDADE – PESQUISAS DE 2014 A 2024

percentages most commonly used as a replacement for Portland cement in concrete. A time frame was defined between the years 2014 and 2024 for national and international articles. The following databases were used: CAPES catalog of theses and dissertations, UFG periodicals portal, Integrated search portal (USP), CAPES periodicals portal, Brazilian Digital Library of Theses and Dissertations and Science direct platform. Results showed that sewage sludge ash (SSA) is promising as a pozzolanic material when incorporated into Portland cement, due to the presence of amorphous silica and alumina. These compounds increased the reactivity of the cement paste and positively influenced the hydration kinetics, thus improving the mechanical properties and durability of the concrete. It is concluded that the optimized use of SSA contributed to the production of eco-efficient concrete, thus becoming a viable alternative for civil construction.

Keywords: sewage sludge ash (SSA); pozzolanicity; waste; sustainability; mineral admixture.

1 INTRODUÇÃO

Frente à degradação intensa dos recursos hídricos, os esgotos de diversas cidades brasileiras vêm sendo tratados em estações de tratamento de esgoto (ETEs) que operam com diferentes sistemas tecnológicos. Nessas estações, contudo, ocorre a geração de um resíduo semissólido, pastoso e de natureza predominantemente orgânica, chamado de lodo de esgoto (Andrade, 1999). O lodo seco produzido anualmente no mundo inteiro já excede 30 milhões de toneladas e, atualmente no Brasil, estima-se uma produção anual de mais de 300 mil toneladas de lodo seco, considerando todas as ETEs (Krüger; Grabner; Adam, 2014).

É de conhecimento que os lodos de ETEs têm sido dispostos em cursos de água sem nenhum tratamento. Todavia essa prática tem sido questionada por órgãos ambientais devido aos possíveis riscos à saúde pública e à vida aquática. Estima-se que a produção de lodos de ETE's nos municípios operados pela Sabesp, no Estado de São Paulo, seja de aproximadamente 90 toneladas por dia, em base seca. Os usos benéficos mais utilizados ou de maior potencial de utilização para o Estado de São Paulo são: fabricação de cimento, disposição no solo, cultivo de grama comercial, fabricação de tijolos, solo comercial, compostagem e plantações de cítricos (Iwaki, 2018).

Segundo Iwaki (2018), o processamento e a disposição final do lodo podem representar até 60% do custo operacional de uma ETE. Diante da necessidade de preservação ambiental ao se destinar corretamente os resíduos sólidos resultantes do tratamento de esgoto, surge o desafio de encontrar formas economicamente viáveis e ecologicamente mais seguras para reutilizar o lodo, reintegrando um produto de descarte ao ciclo produtivo.

Há de se mencionar que a possível substituição parcial do cimento Portland por cinza de lodo vem sendo estudada e alguns pesquisadores notaram uma redução nos custos de produção do concreto. Essa substituição é uma prática frequente nos Estados Unidos, Japão e em alguns países da Europa. Além da economia, observa-se também que, dependendo da quantidade utilizada de cinza de lodo, ocorre um aumento na resistência do concreto endurecido, devido à redução de seus poros (Geyer, 2001). As cinzas de lodo, independente da região, partilham de óxidos principais, como o SiO_2 , Al_2O_3 e CaO e em menores teores Fe_2O_3 , Na_2O , MgO , P_2O_5 e SO_3 (Lynn *et al.*, 2015).

Além disso, no Brasil foi instituída a Lei 12.305/2010 de Política Nacional de Resíduos Sólidos que define rejeitos como sendo resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada. Destaca-se ainda dentro desta lei que fica proibido o descarte desses resíduos em lixões e ela atribui responsabilidades às indústrias pela destinação dos resíduos sólidos (baseando-se no princípio do poluidor-pagador).

O processo de incineração reduz os resíduos em aproximadamente 70% em massa e 90% em volume. Essa incineração produz cinzas residuais de lodo de esgoto e são uma opção de gestão interessante para o manejo dos grandes volumes produzidos e, ao mesmo tempo, uma forma de reduzir os elementos potencialmente inseguros que o lodo de esgoto orgânico pode conter. A literatura cita a substituição de 35% de cimento *Portland* por lodo calcinado entre temperaturas de 700°C a 800°C, segundo Pereira (2012).

Levantamentos recentes indicam que a produção global de cimento *Portland* atingiu o valor de $4,1 \times 10^{12}$ kg no ano de 2020 (Hatfield, 2021). Além das preocupações diretas de saúde pública, a produção de cimento *Portland* requer 4 GJ de energia por tonelada e libera na atmosfera aproximadamente 1 tonelada de CO_2 por tonelada de



cimento. Isto contribui significativamente para o aquecimento global. A bibliografia relata que a produção de cimento *Portland* representa 90% das emissões de CO₂ na indústria do concreto (Mehta; Monteiro, 2014).

O tema deste manuscrito insere-se no contexto de sustentabilidade e de economia circular na construção civil, a partir do uso de cinzas de lodos de esgoto, como adição mineral e em substituição parcial ao cimento *Portland* em concretos. A redução do uso de cimento ao concreto, sem prejuízos de comportamento mecânico e desempenho, pode conceber uma ação ecológica proeminente em escala macro na produção de concretos com dosagens mais otimizadas e ecoeficientes. Em paralelo, sabe-se que resíduos de outras indústrias, como a cinza de casca de arroz, sílica ativa, cinza do bagaço de cana, cinzas volantes, entre outras também vêm sendo utilizados em concretos. Ademais, a disposição final mais adequada das CLE evita contaminação de solos e novos cursos d'água, reduzindo impactos ambientais.

Este trabalho tem objetivo de sintetizar o conhecimento técnico no contexto brasileiro e internacional, quanto as pesquisas com cinza de lodo de esgoto no que tange às melhores temperaturas para a sua calcinação e produção de adição mineral, analisando a sua pozolanicidade e os percentuais mais comumente utilizados em substituição ao cimento *Portland* em concretos.

2 METODOLOGIA DA PESQUISA

Para o presente trabalho, foi escolhido o rótulo de metodologia de revisão da literatura, conforme classificado por Grant e Booth (2009), como uma das formas de revisão. Desta forma, para a produção de concretos ecoeficientes substituindo o cimento por CLE, foram realizados estudos biométricos sobre o termo “cinza de lodo de esgoto” ou “sewage sludge ash” em bases de dados nacionais e internacionais, quais sejam: catálogo de teses e dissertações CAPES; Portal de Periódicos da Universidade Federal de Goiás – UFG; Portal de Busca Integrada (USP); Portal de Periódicos CAPES; Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações e plataforma *Science Direct*.

Especificamente, o Portal de Periódicos da UFG foi incluído no levantamento por se tratar de um repositório institucional com acesso direto a revistas e trabalhos técnicos que, eventualmente, podem não estar indexados em bases como a CAPES ou *ScienceDirect*, especialmente no caso de anais de eventos e publicações regionais.

Após a coleta de dados, foi realizada uma análise descritiva biométrica, incluindo contagem de publicações por ano, autores, instituições, países e a identificação das revistas mais influentes, bem como dos artigos mais citados no que se refere às temperaturas de incineração do lodo de esgoto, à pozolanicidade e aos percentuais de substituição de CLE em relação ao cimento *Portland*. O período de busca foi delimitado entre os anos de 2014 a 2024.

Inicialmente, foram identificados 69 artigos internacionais na base de dados *ScienceDirect*, por meio de busca estruturada com os termos relacionados à utilização da cinza de lodo de esgoto em materiais cimentícios. Foram aplicados filtros para selecionar apenas artigos revisados por pares, com perfil de pesquisa experimental e pertencentes às subáreas de Engenharia e Ciência dos Materiais.

Os parâmetros utilizados para identificar a relevância, aderência ao escopo do artigo e exclusão foram:

- adequação ao escopo da pesquisa, onde apenas estudos que abordavam diretamente o uso da cinza de lodo de esgoto (CLE ou *sewage sludge ash*) como substituição parcial do cimento em concretos ou argamassas;
- tipo de estudo, com prioridade para artigos com abordagem experimental que apresentassem dados quantitativos sobre propriedades mecânicas, durabilidade, comportamento pozolânico ou mecanismos de autocicatrização;
- periódicos qualificados – publicações em revistas indexadas e reconhecidas na área de Engenharia Civil e Materiais, com preferência por aquelas listadas no Qualis/CAPES (estratos A1 a B2) ou com fator de impacto relevante (no caso de periódicos internacionais);
- abrangência temporal e técnica – prioridade para estudos que cobrissem variações em parâmetros como temperatura de queima, tempo de retenção, tipo de resfriamento e percentual de substituição do cimento; e
- citações e impacto acadêmico, no qual foi considerado o número de citações e a frequência de referência em outros estudos sobre o tema. Esses critérios possibilitaram a elaboração de uma tabela comparativa estruturada, que permite visualizar a evolução das metodologias, lacunas identificadas e tendências sobre o uso da CLE no contexto da produção de concretos ecoeficientes.

Após a remoção de duplicidades e a exclusão de trabalhos não aderentes ao escopo do presente estudo, foram selecionados 10 artigos considerados mais relevantes para análise comparativa e discussão dos resultados.

Também foram analisadas pesquisas nacionais relacionadas ao uso da cinza de lodo de esgoto (CLE) como material cimentício suplementar. Para isso, foram selecionados 11 trabalhos científicos entre dissertações, teses e artigos considerados mais relevantes, com base em critérios como aderência ao tema, abordagem experimental, qualidade da publicação e impacto acadêmico. Os resultados foram organizados em uma tabela comparativa, permitindo identificar padrões metodológicos, faixas de temperatura de queima, percentuais de substituição do cimento, propriedades pozolânicas e características físicas da CLE.

As redes de coautoria foram mapeadas para examinar colaborações, enquanto a análise de co-ocorrência de palavras revelou tópicos de pesquisa emergentes. O software *VOSviewer* foi utilizado para criar visualizações das redes de coautoria e co-ocorrência de palavras nos 69 artigos internacionais, resultados da busca.

3 Análise dos Resultados

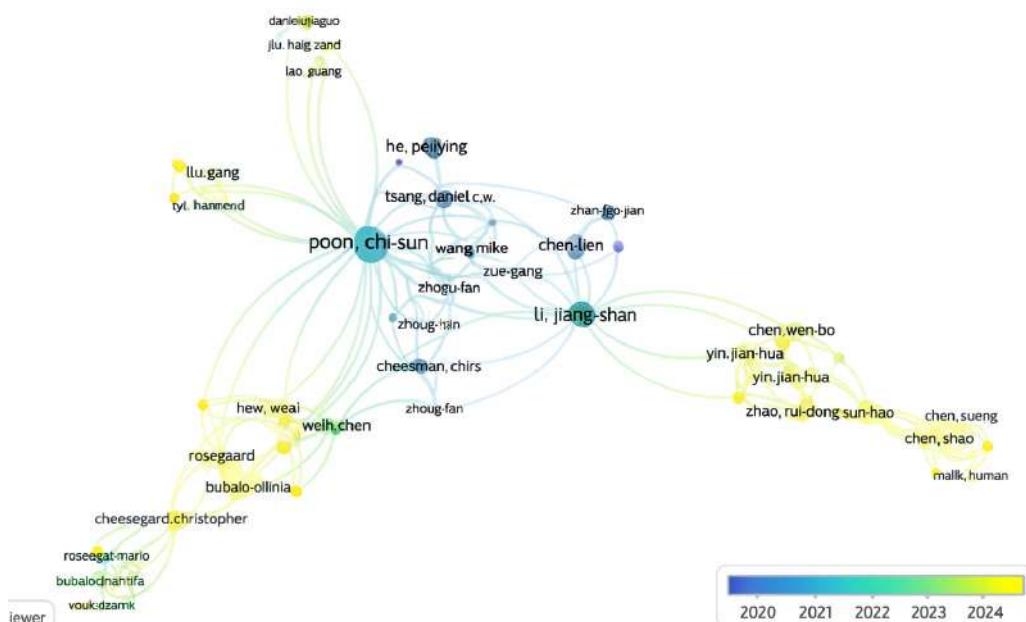
3.1 Resultados bibliométricos

O software *VOSviewer* foi utilizado para criar visualizações das redes de coautoria e co-ocorrência de palavras. Infográficos foram obtidos e representam a correlação de autoria. Notou-se que muitos artigos se baseiam e citam um autor principal.

Na imagem 1 acima, se observa que o autor principal que trata sobre o assunto é Poon, Chi-sun, com maior número de artigos publicados (14) e citações (53) e esses artigos se referem ao período de 2021 a 2022 através da análise de cor.

Na imagem 2 abaixo, se correlaciona as palavras-chaves de todos os artigos. Pode-se observar que o termo mais encontrado “sewage sludge ash” aparece como palavra-chave em 38 artigos e é citado 154 vezes no geral. De acordo com as cores representadas, observa-se que os artigos que citam e que utilizam o termo são datados entre 2020 e 2022.

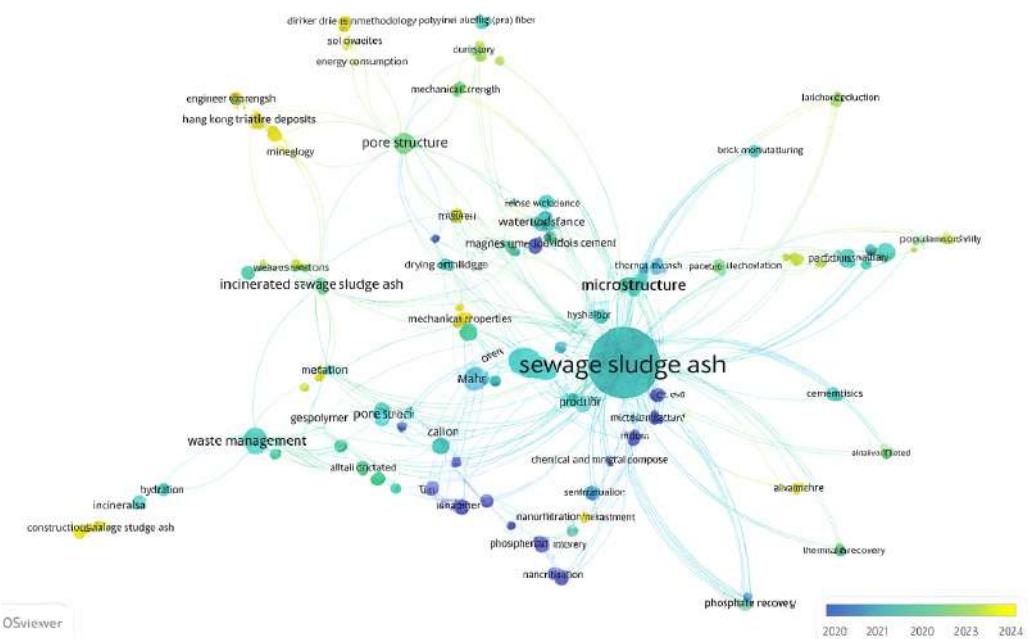
Figura 1: Correlação entre autores em artigos internacionais



Fonte: Autoria própria (2024).

Foram exportados da plataforma *science direct* 69 artigos internacionais e foram selecionados 10 artigos para análise de características em comum.

Figura 2: Correlação entre palavras-chave em artigos internacionais



Fonte: Autoria própria (2024).

Foram determinadas as seguintes características a serem analisadas: local de estudo, tipo de cinza utilizada, temperatura de queima da cinza, pozolanicidade da cinza, percentual de substituição e tamanho da partícula. Em relação ao local de estudo, observa-se que a grande maioria das pesquisas foram realizadas na China. O tipo de cinza mais utilizado é a cinza de lodo de esgoto doméstico, que em sua maioria também já é fornecida das próprias estações de tratamento que já possuem a incineração como procedimento. A temperatura de queima, quando realizada, já que em alguns casos a cinza já foi obtida sem a necessidade de requeima, em sua grande maioria está entre 800°C. A pozolanicidade das cinzas utilizadas, foi mencionada em poucos artigos, nos quais confirmam o potencial pozolânico do material. O percentual de substituição da cinza de lodo de esgoto se ocorreu em diferentes faixas a depender do estudo a ser realizado, porém se observou a taxa de 10% mais frequente em estudos. As partículas de cinza utilizadas também se apresentaram em diferentes tamanhos, mas muito próximos a 30 µm, em média.

De acordo com as informações obtidas, pode-se perceber que em relação ao local de estudo, não se tem maioria em alguma universidade em específico, sendo os estudos realizados em vários locais. O tipo de cinza estudado em sua totalidade foi a cinza de lodo de esgoto e essa cinza foi queimada pois não há o procedimento de incineração de esgoto no Brasil, a temperatura, em sua maioria, mais utilizada foi a de 800°C. Em relação a pozolanicidade, observa-se que a maioria dos estudos apresentaram potencial pozolânico. Os percentuais de substituição foram variados mas entre as faixas de 5% a 20% e as partículas também possuem tamanhos variados entre 10 a 45 µm.

Em relação ao local de estudo, observou-se que a grande maioria das pesquisas foi realizada na China, e as próprias estações de tratamento já possuem a incineração como procedimento. Em geral, as temperaturas de queima variaram entre 400°C e 950°C, sendo, na maioria dos casos, a cinza utilizada sem necessidade de requeima, com temperatura média de 800°C entre 1 e 4 horas. Alguns autores citaram temperaturas de queima mais baixas, como 400°C com duração de 30 horas de queima. Alguns trabalhos mencionaram também a taxa de aquecimento de 10°C/min. A pozolanicidade das cinzas utilizadas foi mencionada em poucos artigos, e neles foi confirmado o potencial pozolânico do material.

No que tange ao percentual de substituição de cimento por cinza de lodo de esgoto, prevaleceu o valor de 10% em massa na maioria dos estudos. As partículas de cinza utilizadas também se apresentaram em diferentes tamanhos ($3 \mu\text{m}$ a 2 mm), a depender de sua origem, processamento, tempo e temperatura de calcinação, mas, em média, próximas de $30 \mu\text{m}$.

Em relação ao contexto nacional (2001 a 2024), vários locais do Brasil estudaram a CLE, e a calcinação da cinza não seguiu um padrão de queima. Muito embora a temperatura utilizada, em sua maioria, tenha sido de 800°C, esta esteve frequentemente associada a análises térmicas, físico-químicas e mineralógicas que demonstram melhoria no comportamento pozolânico (Basto; Neto; Régis, 2018; Santos, 2020; Santana, 2022).

Quanto à pozolanicidade, a maioria dos trabalhos nacionais apresenta resultados positivos, com destaque para estudos que associam a reatividade à temperatura e à mineralogia da cinza (Costa, 2014; Fontes *et al.*, 2016). Os percentuais de substituição do cimento por cinza variam geralmente entre 5% e 20%, sendo esse intervalo o mais comum em testes de desempenho mecânico e durabilidade. O tamanho das partículas da CLE também variou significativamente entre os estudos, com valores entre 3 μm e 30 μm , apresentando média mais recorrente em torno de 20–30 μm (Thiago, 2014; Santos, 2020).

3.2 Discussão técnica

3.2.1 Cinética de reação no estado fresco

A influência das CLE na hidratação do cimento *Portland* foi investigada no estudo de Mejdi *et al.* (2020). Eles descobriram que a mistura de cimento *Portland* com CLE influenciou a cinética de hidratação, notadamente a dissolução da alita — silicato tricálcico (C_3S). Isto retardou o tempo de fim de pega.

Também houve um aprimoramento das propriedades em escala de engenharia, a saber: aumento do comportamento mecânico à compressão e aumento da durabilidade, a partir do consumo de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e formação de maior quantidade de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Estas mudanças conduziram a transformações físicas no volume total dos sólidos e, portanto, nas propriedades de porosidade e permeabilidade dos sistemas estudados.

Yan *et al.* (2023) pesquisaram a cinética de hidratação e a montagem de fases de cimentos ternários misturados à base de CLE, comparativamente a misturas sem CLE. Eles também observaram um retardo no tempo final de pega do cimento. Os autores explicaram que a hidratação precoce do C_3S em cimentos ternários foi inibida pela CLE, o que conduziu a uma menor hidratação inicial de C_3S em comparação ao cimento comum sem CLE.

Em idades mais avançadas, as misturas com cimentos ternários exibiram hidratação de C_3S mais elevada. Isto se deve ao aumento da disponibilidade de água e à presença de superfícies adicionais de CLE, que promoveram a nucleação heterogênea dos produtos de hidratação. Os mesmos autores mencionaram que a dissolução de sulfatos adicionais presentes na CLE promoveu uma melhoria adicional na reatividade do C_3A do cimento.

A reação pozolânica da CLE gerou C-(A)-S-H (Hidratado de Silicato de Cálcio e Alumínio) adicional, o qual alterou a composição química do C-(A)-S-H em cimentos ternários. Por fim, em termos de microestrutura, o C-(A)-S-H tende a apresentar uma estrutura mais complexa do que o C-S-H comum sem CLE, e essa complexidade pode resultar em melhores propriedades mecânicas e químicas. A presença de alumínio pode melhorar a resistência à carbonatação, enquanto a presença de sulfatos pode reduzir a permeabilidade do concreto, o que é benéfico para a durabilidade a longo prazo.

3.2.2 Reatividade

Segundo Zhou *et al.* (2025), a cinza de lodo de esgoto incinerada contém uma alta concentração de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , que exibiu uma atividade pozolânica semelhante à cinza volante de carvão. No entanto, foi demonstrada uma variação nas propriedades da CLE incinerada e na atividade pozolânica entre os métodos de incineração em diferentes temperaturas, tempos (duração) de incineração e modos de resfriamento.

Além disso, uma maior proporção de fases amorfas e minerais cristalinos foi obtida em amostras de CLE incineradas em temperaturas mais altas, bem como uma redução no tamanho das partículas com o aumento da temperatura de incineração. Quando se trata da distribuição de tamanho da partícula, pode-se observar que a alta temperatura teve uma influência significativa na diminuição da distribuição de tamanho de partícula. Especialmente, a distribuição de tamanho da CLE calcinada à temperatura de 800°C foi de 0,02 μm a 100 μm , enquanto para temperaturas de 600°C a 700°C o valor máximo observado foi de 200 μm (Zhou *et al.*, 2025).

3.2.3 Temperatura

Os resultados de diversos autores mostraram que a calcinação influencia a microestrutura do CLE e aumenta a sua atividade pozolânica, a qual atinge seu máximo na temperatura de 800°C (Zhou *et al.*, 2025; Yan *et al.*, 2023;

Zhang; Qian; Ma, 2014).

A presença de água absorvida e matéria orgânica no lodo de esgoto calcinado na faixa de temperatura de 300°C a 500°C prolonga fortemente o tempo de pega e afeta negativamente a resistência à compressão e o grau de hidratação de argamassas. Embora as altas quantidades de P_2O_5 e SO_3 no CLE na faixa de 700°C a 800°C aumentem a demanda de água e prolonguem o tempo de pega em comparação com argamassa de controle, as resistências à compressão e o grau de hidratação aumentaram com o tempo e se tornam superiores aos da argamassa controle (sem CLE) aos 90 dias de idade, para uma taxa de substituição de 15% de cimento por CLE, em massa. Os melhores resultados mecânicos foram obtidos para a substituição de 5% de cimento por CLE na idade de 28 dias Tantawy *et al.* (2012).

Ainda segundo Tantawy *et al.* (2012), o teor de cal fixa na CLE aumentou 779% entre as temperaturas de 300°C e 800°C. Isto revelou importantes mudanças na microestrutura do CLE, ocasionadas pelo processo de queima, resultando em melhoria da atividade pozolânica e da capacidade de adsorção de cal do material. O estudo também destaca que a calcinação acima de 800°C pode provocar a cristalização excessiva da sílica amorfa, resultando na redução da pozolanicidade, o que reforça a importância de otimizar a temperatura de calcinação para preservar as propriedades reativas da CLE. Assim, o lodo de esgoto calcinado a 800°C apresenta a maior atividade pozolânica.

Nos estudos de Zhou *et al.* (2025), a incineração a 800°C por 1 h e o resfriamento por recozimento apresentaram excelente distribuição de tamanho de partícula, teor de SiO_2 amorfado aprimorado e melhoria na atividade pozolânica, além de demonstrar que a lixiviação de metais pesados atendeu aos requisitos normativos.

Observou-se também nos estudos de Zhou *et al.* (2025) que o CLE incinerado a 600°C e 700°C sob resfriamento normalizado apresentou baixa atividade pozolânica, com índices de atividade de resistência abaixo de 55%, dificultando sua aplicação em materiais cimentícios — exceto quando utilizado apenas para efeitos físicos e não químicos.

3.2.4 Resistência à compressão

Em geral, as resistências à compressão diminuíram com a redução da temperatura de calcinação do CLE e com o aumento do nível de substituição de cimento por CLE. Aos 28 dias de idade, as resistências à compressão de argamassas de cimento contendo 5% de CLE, calcinada entre 700°C e 800°C, foram superiores às da argamassa controle. Enquanto que, para o nível de substituição de 10%, as resistências à compressão das argamassas de cimento utilizando CLE calcinadas às temperaturas de 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C e 800°C diminuíram em 29%, 24%, 15%, 11%, 2% e 2%, e em 55%, 48%, 35%, 27%, 12% e 9% para um nível de substituição de 20%, respectivamente. Esta diminuição pode ser explicada pela morfologia irregular das partículas de CLE, pela elevada absorção de água nessas superfícies e pela pequena atividade pozolânica da CLE calcinada a baixas temperaturas (Yan *et al.*, 2023).

Além disso, segundo Yan *et al.* (2023), a baixa quantidade de cal e a baixa atividade pozolânica do CLE calcinado entre 300°C e 500°C retardaram as reações de hidratação das misturas CLE–cimento e, assim, diminuíram a resistência à compressão das argamassas. Eles justificaram que o alto teor de P_2O_5 (óxido de fósforo) nas misturas CLE–cimento reduziu a resistência à compressão devido à decomposição do C_3S (silicato tricálcico) para formar C_2S (silicato dicálcico) rico em P_2O_5 . Isto retardou a hidratação dos silicatos de cálcio e afetou as características de resistência das argamassas.

Naamane, Rais e Taleb (2016) afirmou que, em idades precoces, as resistências à compressão das argamassas de cimento contendo CLE calcinadas a 700°C e 800°C foram semelhantes às da argamassa controle. Após 28 dias, as resistências à compressão das argamassas de cimento contendo mais de 5% de SSA diminuem ligeiramente. Porém, aos 90 dias, as resistências à compressão das argamassas de cimento SSA foram iguais às da argamassa controle para uma taxa de substituição de 15%, com valores de 45 MPa. Esses resultados são confirmados pelo grau de hidratação, que aumenta com o tempo em comparação com a argamassa controle. Assim, o processo de hidratação do cimento SSA necessita de mais tempo para atingir as resistências à compressão solicitadas, pois, após 28 dias, as taxas de reações de hidratação do cimento SSA são mais rápidas que as do cimento *Portland*.

4 CONCLUSÕES

Com base nas pesquisas analisadas, pode-se concluir que:

- a CLE apresentou potencial significativo como material pozolânico, quando incorporada a concretos de cimento Portland;
- a CLE contém sílica amorfa e alumina, que podem contribuir para a reatividade pozolânica, e sua inclusão na mistura de cimento pode influenciar positivamente a cinética de hidratação, muito embora promova retardo do tempo de fim de pega;
- a médio e longo prazo, a inclusão de CLE pode aumentar propriedades mecânicas e de durabilidade de materiais cimentícios (concretos e argamassas);
- a temperatura de queima em torno de 800°C, com tempo de calcinação de 3 horas, maximizou a atividade pozolânica e alterou favoravelmente a distribuição do tamanho das partículas de CLE;
- no que tange ao percentual de substituição de cimento por CLE, prevaleceu o valor de 10% de substituição, em massa, na maioria dos estudos. Contudo, percentuais entre 5% e 40% foram estudados;
- partículas de CLE também apresentaram tamanhos entre 3 μm e 2 mm, com média de 30 μm ;
- a CLE incinerada, quando utilizada de forma otimizada, não apenas contribui para a sustentabilidade e economia circular ao reduzir resíduos e áreas de armazenamento, mas também pode melhorar as propriedades físicas e químicas de concretos e argamassas.

Salvo melhor juízo, e sem analisar ainda as emissões de CO₂ para avaliar materiais cimentícios com e sem CLE, a CLE é promissora como uma alternativa viável e benéfica para o setor da construção civil.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 12653/2014:** Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. Revisão 2015.
- ANDRADE, C. A. **Nitratos e metais pesados no solo e em plantas de *Éucalyptus grandis* após aplicação de biossólido da ETE de Barueri.** Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 1999.
- ASTM. **ASTM C618:** Standard specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. West Conshohocken, 2008a.
- BASTO, P.; NETO, A. d. M.; RÉGIS, P. d. A. Caracterização e determinação da pozolanicidade de cinzas de lodo de tratamento de esgoto. In: **Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis.** Coimbra: Portugal, 2018.
- BRASIL. **Lei 12.305/2010:** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm.
- COSTA, F. M. S. **Feasibility study of the use of sewage sludge ash as addition in Portland cement mortar.** 122 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- FELIPE, A. S. **Utilização de nanotubos de carbono e nano-SiO₂ em argamassas produzidas com cinzas do lodo de esgoto em substituição parcial do cimento Portland.** Tese (Doutorado) — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015.
- FONTES, C. M. A. *et al.* Cinza de lodo de esgoto (cle) em concretos de alto desempenho: caracterização e aplicação. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, 2016.
- GEYER, A. L. B. **Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto.** Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- GEYER, A. L. B. Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto. In: **44º Congresso Brasileiro do Concreto.** Belo Horizonte: BH, 2002.
- GRANT, M. J.; BOOTH, A. A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. **Health Info Libr Journal**, v. 26, n. 2, p. 91–108, 2009.
- HATFIELD, A. K. **Cement Statistics and Information.** 2021. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-cement.pdf>.
- IWAKI, G. **Destinação final de lodos de ETAs e ETEs.** 2018. Disponível em: <https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/destinacao-final-de-lodos-de-etas-e-etes/>.
- KRÜGER, O.; GRABNER, A.; ADAM, C. Complete survey of german sewage sludge ash. **Environmental Science & Technology**, v. 48, n. 20, p. 11811–11818, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/es502766x>.
- LYNN, C.; DHIR, R.; GHATAORA, G.; WEST, R. Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 767–779, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.122>.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON, 2014.
- MEJDI, M. *et al.* Hydration mechanisms of sewage sludge ashes used as cement replacement. **Cement and Concrete Research**, v. 135, p. 106115, 2020.
- MULLER, M. *et al.* Influence of silica fume on the microstructure of cement pastes: New insights from 1h nmr relaxometry. **Cement and Concrete Research**, p. 1–10, 2015.
- NAAMANE, S.; RAIS, Z.; TALEB, M. The effectiveness of the incineration of sewage sludge on the evolution of physicochemical and mechanical properties of portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 783–789, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.195>.
- NUVOLARI, A. *et al.* **Esgoto sanitário:** coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 565 p.
- PEREIRA, K. L. A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos.** 102 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

SANTANA, T. C. **Estudo da aplicação do lodo de esgoto e da cinza de lodo de esgoto em materiais de construção:** uma revisão sistemática. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Feira de Santana, 2022.

SANTOS, C. L. L. **Análise de propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de argamassas para concreto produzidas com cinzas de lodo de esgoto calcinado.** Dissertação (Mestrado) — Universidade de Pernambuco, Recife, 2020.

TANTAWY, M. A.; EL-ROUDI, A. M.; ABDALLA, E. M.; ABDELZAHER, M. A. Evaluation of the pozzolanic activity of sewage sludge ash. **ISRN Chemical Engineering**, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5402/2012/487037>.

THIAGO, C. M. d. S. **Avaliação do Potencial Pozolânico da Cinza de Lodo de Águas Residuárias por Meio de Técnicas Instrumentais.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, 2014.

URBIZAGASTEGUI, R.; RESTREPO-ARANGO, C. Crescimento da literatura sobre bibliometria, informetria e cientometria no brasil. **Revista Ibero-Americana de Ciência da Informação**, v. 10, n. 1, p. 6–31, 2017. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/RICI/article/view/2469>.

VERONESE, R. B. A.; MOREIRA, K. C. B.; SIDEL, S. M.; D'OLIVEIRA, M. C. d. P. E. Avaliação do uso de cinza do lodo de esgoto como substituição parcial ao uso do cimento em misturas de concreto. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, 2021. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/18041/209209214435>.

YAN, X. *et al.* Hydration of ternary blended cements with sewage sludge ash and limestone: hydration mechanism and phase assemblage. **Construction and Building Materials**, v. 375, p. 130868, 2023.

ZHANG, Z.; QIAN, S.; MA, H. Corrigendum to “investigating mechanical properties and self-healing behavior of micro-cracked ecc with different volume of fly ash”. **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 479, 2014.

ZHOU, Y.; YU, P.; YANG, H.; LI, S.; HE, S. Pore structure and compressive strength of alkali-activated mortar with sewage sludge ash (ssa) under optimal incineration conditions. **Construction and Building Materials**, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061824018865>.