

7° CONRESOL

7° Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade

CURITIBA/PR - 14 a 16 de Maio de 2024

ESTUDO DA REATIVIDADE DAS CINZAS DE LODO TÊXTIL EM PASTAS COM HIDRÓXIDO DE CÁLCIO POR ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.7.24.VII-019>

Igor Vieira Fernandes (*), Marina Cartaxo Braga Morais de Oliveira, Marcos David dos Santos, Antônio Acácio de Melo Neto

* Universidade Federal de Pernambuco, UFPE – Campus Recife. igor.vfernandes@ufpe.br

RESUMO

A gestão inadequada dos resíduos gerados pelas lavanderias localizadas no Arranjo Produtivo Local da Confecção do Estado de Pernambuco tem levado ao descarte inadequado do lodo têxtil em aterros sanitários, sem qualquer tratamento prévio. Este estudo propõe investigar a viabilidade de empregar o Lodo Têxtil (LOTex) como um material cimentício suplementar, com o intuito de mitigar os impactos ambientais associados e promover uma gestão mais eficiente dos resíduos no setor têxtil. O LOTex foi submetido a um processo de calcinação para aumentar sua reatividade pozolânica, utilizando diferentes temperaturas (600°C, 700°C e 800°C). Além disso, investigou-se o efeito da finura do material por meio da moagem das amostras e classificação em duas faixas de finura (sem moagem e com superfície específica de 1200 m²/kg). As características físicas, como massa específica, superfície específica e granulometria a laser, foram determinadas para todas as amostras, enquanto análises termogravimétricas foram realizadas para caracterização química. Um estudo com pastas de hidróxido de cálcio (CH) e LOTex foi conduzido, no qual foram medidas as perdas de massa nas pastas pura e com as amostras estudadas, quantificando a quantidade de água liberada na reação e determinando a quantidade de CH consumida por cálculos estequiométricos. Observou-se uma redução no teor de CH com o aumento da finura e da calcinação, especialmente nas cinzas a 600°C. Apenas as cinzas calcinadas a 800°C apresentaram menor consumo de CH em relação às amostras *in natura*, possivelmente devido estas apresentarem matéria orgânica, que superestimou os valores de perda de massa na temperatura de desidratação do CH. Assim, considerando as restrições deste estudo, confirma-se a viabilidade do uso do LOTex devidamente beneficiado com moagem e calcinação como um material cimentício suplementar alternativo.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo têxtil, Cinzas de lodo, Análise termogravimétrica, Materiais pozolânicos, Sustentabilidade.

ABSTRACT

The improper management of waste generated by laundries located in the Local Productive Arrangement of Clothing in the State of Pernambuco has led to the inadequate disposal of textile sludge in landfills without any prior treatment. This study aims to investigate the feasibility of using Textile Sludge (LOTex) as a supplementary cementitious material, with the aim of mitigating associated environmental impacts and promoting more efficient waste management in the textile sector. The LOTex was subjected to a calcination process to increase its pozzolanic reactivity, using different temperatures (600°C, 700°C, and 800°C). Additionally, the effect of material fineness was investigated through sample grinding and classification into two fineness ranges (unground and with a specific surface of 1200 m²/kg). Physical characteristics such as specific mass, specific surface area, and laser granulometry were determined for all samples, while thermogravimetric analyses were performed for chemical characterization. A study with calcium hydroxide (CH) and LOTex pastes was conducted, measuring mass losses in pure pastes and those with the studied samples, quantifying the amount of water released in the reaction, and determining the amount of CH consumed by stoichiometric calculations. A decrease in CH content was observed with increasing fineness and calcination, especially in ashes at 600°C. Only ashes calcined at 800°C showed lower CH consumption compared to the in-nature samples, possibly due to the presence of organic matter, which overestimated the mass loss values at the CH dehydration temperature. Thus, considering the limitations of this study, the feasibility of using properly beneficiated LOTex with grinding and calcination as an alternative supplementary cementitious material is confirmed.

KEY WORDS: Textile sludge, Sludge ashes, Thermogravimetric analysis, Pozzolanic materials, Sustainability.



INTRODUÇÃO

A indústria desempenha um papel vital à economia da sociedade moderna, impulsionando o crescimento da industrialização e urbanização. Nas últimas décadas, a preocupação com a gestão adequada dos diversos resíduos gerados pelos setores industriais tem crescido significativamente. O setor têxtil representa um dos mais antigos e proeminentes do mundo. Segundo a Agência Estadual de Meio Ambiente - CPRH (2018), as lavanderias têxteis contribuem significativamente na economia, impulsionando o setor comercial e gerando emprego e renda.

As lavanderias têxteis desempenham um papel fundamental ao conduzir uma variedade de processos, incluindo lavagem, amaciamento, tingimento, descoloração e qualquer outro processo de modificação dos produtos têxteis (Cometti *et al.*, 2016). No entanto, esses processos resultam na geração de resíduos sólidos, como o lodo têxtil (LOTex) e as cinzas de biomassa, que muitas vezes são descartadas de forma inadequada na natureza. Essa prática irregular de descarte ressalta a potencial degradação ambiental associado à indústria têxtil, contribuindo para poluição hídrica, atmosférica e do solo (CPRH, 2018).

O lodo têxtil proveniente do arranjo produtivo local (APL) de confecções do Agreste pernambucano é classificado como um resíduo semissólido, enquadrado como não perigoso (Classe II) pela CPRH e composto de matéria orgânica e inorgânica, podendo apresentar metais pesados e outros produtos químicos, o que torna seu tratamento um processo fundamental (CPRH, 2018; Balasubramanian *et al.*, 2005). Entretanto, quando submetido a processos de beneficiamento adequados, o LOTex pode adquirir características físicas e químicas que o tornam adequado para ser utilizado como componente na construção civil.

Além disso, a indústria da construção civil é responsável por uma série de impactos ambientais, que vão desde o processo de produção de matérias primas até a geração de resíduos durante os processos construtivos. Um exemplo significativo é o cimento Portland, que sozinho contribui com cerca de 8% das emissões globais de CO₂ (Andrew, 2017). Nessa vertente, surge a urgência em tornar o setor mais sustentável. Uma alternativa viável é o desenvolvimento de materiais que possam ser empregados como substitutos aos materiais de construção convencionais.

Dentro desse contexto, a reutilização do LOTex na construção civil pode ser uma destinação sustentável para esse rejeito indesejado e oferecer uma eficaz estabilização e imobilização dos componentes perigosos dentro do concreto. Dentro desse contexto, pode ser utilizado como substituto do cimento Portland ou agregados, contribuindo para o controle da exploração de recursos naturais e redução das emissões de CO₂ oriundas do processo de fabricação do cimento Portland (Goyal *et al.*, 2019).

Portanto, este estudo visa contribuir para a destinação adequada do LOTex, avaliando sua reatividade pozolânica tanto no estado *in natura* como beneficiado na forma de cinzas do lodo moídas, através de análise termogravimétrica de pastas com hidróxido de cálcio. O estudo visa esclarecer a viabilidade de sua aplicação como material cimentício suplementar e preencher lacunas existentes na literatura em relação à pozolanicidade desse rejeito.

OBJETIVOS

Este estudo, com o intuito de contribuir para a destinação apropriada do lodo têxtil (LOTex), concentra-se na avaliação, da reatividade pozolânica de amostras de lodo têxtil *in natura* e cinzas de lodo têxtil moídas, por meio da análise termogravimétrica de pastas com hidróxido de cálcio, a fim de investigar a viabilidade de sua aplicação como material cimentício suplementar.

Com isso, mais especificamente objetiva-se: analisar a influência do beneficiamento do LOTex, com moagem e calcinação, na pozolanicidade das amostras estudadas; caracterizar o LOTex *in natura* e as cinzas de lodo têxtil (CLT) em relação às suas propriedades físicas e químicas; e avaliar as propriedades pozolânicas utilizando um método não normatizado com pastas de hidróxido de cálcio e lodo têxtil por termogravimetria.

METODOLOGIA

Materiais

Cinzas de lodo têxtil (CLT)

O Lodo Têxtil utilizado nesta pesquisa, obtido na Lavanderia Nossa Senhora do Carmo em Caruaru, Pernambuco, foi submetido a um beneficiamento por moagem e calcinação. Parte do material não foi submetida a calcinação, sendo denominada como *in natura*, e outra parte foi calcinada em temperaturas de 600, 700 e 800°C. Dentre as temperaturas escolhidas, decidiu-se manter acima de 550°C para eliminar a maior parte dos compostos orgânicos macromoleculares e materiais voláteis indesejáveis. A escolha de limitar a temperatura a 800°C se deu na tentativa de evitar a redução da amorficidade do material por conta da sinterização e a própria cristalização da sílica amorfa (Vasques Mendonça *et al.*, 2015; Xie *et al.*, 2018). Esse procedimento se deu em mufla, com 3 horas de permanência no patamar de queima e com taxa de aquecimento de 10°C/min.

Ainda com o intuito de aumentar sua reatividade, as cinzas do lodo (CLT) resultantes foram moídas em moinho de bolas para se obter duas faixas de finura. Estas faixas foram separadas de acordo com suas superfícies específicas de Blaine em amostra sem moer (apenas destorroada) e de 1200 m²/kg. Todas as amostras foram caracterizadas quanto às propriedades físicas (por meio dos ensaios de massa específica, finura Blaine e granulometria a laser) e químicas (por meio da análise termogravimétrica – ATG).

Hidróxido de cálcio (CH)

Foi utilizado hidróxido de cálcio P.A., fornecido pela empresa Química Moderna, com teor mínimo de 95%, por se tratar de material com elevado grau de pureza, e com massa específica de 2,24 g/cm³. Pela granulometria a laser foi possível verificar um diâmetro superficial médio das partículas de 3,99 µm, confirmando-se a elevada finura deste material.

Caracterização de materiais anidros

Para as análises físicas das amostras foram determinadas a massa específica por meio do frasco de Le Chatelier e a superfície específica pelo método do permeabilímetro de Blaine. A espectrometria de difração a laser foi realizada em um equipamento de modelo Mastersizer 2000 da Malvern Instruments. Para melhor compreender a composição do lodo bruto e das cinzas, também foram realizadas análises químicas por meio da termogravimetria (ATG), que foi realizada em um equipamento Mettler Toledo de modelo Star System, em atmosfera dinâmica de nitrogênio (N₂) com fluxo de 50 mL/min, com um intervalo de 30 a 1000°C, numa taxa de aquecimento de 10 °C/min.

Métodos

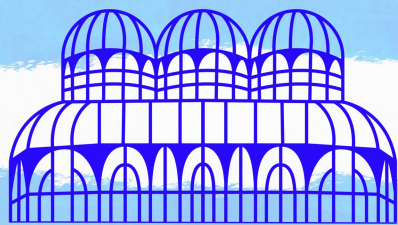
Mistura, moldagem e cura das pastas

A avaliação da reatividade pozolânica foi realizada a partir da quantificação do consumo de hidróxido de cálcio no ensaio de termogravimetria. Na Tabela 1, estão apresentadas as proporções de mistura das pastas, em massa, para cada uma das amostras estudadas. Vale salientar que as proporções de cal e material pozolânico foram as mesmas que são comumente utilizadas no ensaio de atividade pozolânica com cal do normativo NBR 5751:2015 (ABNT, 2015). Inclusive, para execução de todas as pastas, utilizou-se uma massa fixa de hidróxido de cálcio de 17,34, pois é uma medida equivalente ao necessário para a moldagem de metade de um corpo de prova recomendado por essa norma, tendo em vista que essa quantidade é mais do que suficiente quando se trata de moldagem de pastas.

Tabela 1. Quantidades de material, em massa (g), utilizadas nas pastas com cal.

Fonte: O autor, 2023

Mistura	Código da amostra	δ (g/cm ³)	Massa da adição (g)	Água (g)
1	LT in nat - SM	2,16	33,44	33,01
3	LT in nat - B1200	2,03	31,43	31,70
4	CLT600 - SM	2,73	42,27	38,74
6	CLT600 - B1200	2,65	41,03	37,94
7	CLT700 - SM	2,85	44,12	39,95
9	CLT700 - B1200	2,70	41,80	38,44
10	CLT800 - SM	2,84	43,97	39,85
12	CLT800 - B1200	2,72	42,11	38,64
13	Hidróxido de Cálcio	2,24	34,68	33,81



O procedimento para preparar as pastas envolveu a mistura dos materiais sólidos com água em um agitador mecânico por 2 minutos a 1600 rpm. Após homogeneização, as pastas foram colocadas em recipientes cilíndricos, de dimensões 3,5 cm x 5 cm, e cobertas com plástico filme para reduzir a evaporação e a carbonatação durante a cura térmica. A cura foi realizada com as pastas armazenadas sob vácuo e mantidas em dessecador durante as primeiras 24 horas a 23 ± 2 °C. Vale salientar que foram mantidos no dessecador tanto a sílica gel, visando evitar a absorção de umidade, quanto o hidróxido de bário, que retém o CO₂ do ar, com o intuito de evitar a carbonatação. Em seguida, foram transferidas para uma estufa a 55 ± 2 °C nos 6 dias seguintes. Após 7 dias, os corpos de prova foram congelados em nitrogênio líquido, em uma temperatura de aproximadamente -180°C, para congelamento instantâneo da água livre e a consequente interrupção da hidratação.

Liofilização

Após o congelamento, as amostras foram liofilizadas para remover a água livre e congelada, preservando a água quimicamente combinada e parte da água adsorvida na estrutura dos compostos hidratados formados. A liofilização envolveu a aplicação de baixa pressão (inferior a 500 µHg) e baixa temperatura (preferencialmente abaixo de -30°C), seguida por um aumento gradual da temperatura durante 24 horas para promover a sublimação. As amostras liofilizadas foram finamente moídas e o pó resultante, depois de ter sido passado na peneira de 75 µm, foi usado no ensaio de termogravimetria. Na ATG foram utilizados os mesmos parâmetros de ensaios que foram usados na caracterização dos materiais anidros.

Cálculo do consumo de hidróxido de cálcio

Levando em consideração que a pozolana reage com o hidróxido de cálcio (CH), e que o consumo deste representa o avanço da reação pozolânica, é importante a avaliação do consumo do mesmo. Este foi determinado medindo as perdas de massa na pasta pura desse composto. No ensaio de ATG, a desidratação da pasta ocorreu entre 380 a 450°C, liberando uma molécula de água pela reação $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$. A quantidade de água liberada foi quantificada, permitindo, por meio de cálculos estequiométricos, a determinação da quantidade de CH consumida. O consumo foi calculado a partir das equações 1 e 2.

$$Am_{CH,ATG} = m_{CH,ATG} \times \frac{m_{CH}}{m_{CH} + m_{poz}} \quad \text{equação (1)}$$

$$Cons. CH_{\theta} = 100 \times \frac{Am_{CH,ATG} - m_{poz,ATG}}{Am_{CH,ATG}} \quad \text{equação (2)}$$

É válido ressaltar que a quantidade de hidróxido de cálcio foi ajustada com a relação mássica de CH e pozolana. Essa correção foi realizada porque as substituições volumétricas de hidróxido de cálcio por amostras de lodo têxtil reduzem significativamente as intensidades dos picos, sendo necessária para que se tenha uma representação mais precisa da quantidade consumida. Dessa forma, as massas $m_{CH,ATG}$ e $m_{poz,ATG}$ são as massas de hidróxido de cálcio na pasta pura e de hidróxido de cálcio na pasta com o mesmo e a pozolana, obtidas após os cálculos estequiométricos com as perdas de massa do ensaio de ATG. A $Am_{CH,ATG}$, por sua vez, representa a massa ajustada de hidróxido de cálcio da pasta pura, e ela quem deve ser usada na expressão do consumo, como mostrado na equação 2.

RESULTADOS

Caracterização física

Em relação aos resultados obtidos com a caracterização física, observou-se que as amostras menos densas são as de LOTex *in natura*, variando, a depender da faixa de finura, de 2,03 a 2,16 g/cm³, e as mais densas são as calcinadas em temperaturas elevadas, 700 e 800°C, apresentando valores de 2,7 a 2,85 g/cm³. Foi observado que a calcinação promoveu aumento na massa específica, muito provavelmente devido à remoção de quase toda a matéria orgânica, que possui material carbonáceo de massa específica menor (Agra *et al.*, 2023).

Por outro lado, observou-se que a massa específica reduz à medida que aumenta a superfície específica. O que pode ser explicado pelo fato de que a massa específica é uma propriedade definida pela relação entre uma quantidade de massa e um determinado volume, sendo este desconsiderando os vazios entre as partículas (Neville e Cremonini, 2016). Como o empacotamento de partículas é maior quanto menor for o tamanho das partículas, é plausível que as amostras mais finas

apresentem um menor volume de vazios entre as partículas. Portanto, menor será o volume de vazios a ser desconsiderado e menor será a massa específica.

Ademais, observou-se que para as amostras sem moer, apenas destorroadas, o aumento da temperatura de calcinação resultou em diminuição da superfície específica. Para o LOTex *in natura* a finura Blaine foi de 347,83 m²/kg, enquanto para a cinza calcinada a 800°C foi de apenas 184,64 m²/kg. Fato que ocorreu, assim como discutido em outros trabalhos (Basto *et al.*, 2019; Agra *et al.*, 2023), em decorrência da maior recristalização da sílica amorfa presente nas amostras com o aumento da temperatura de calcinação.

Por fim, confirmou-se pela granulometria a laser que todas as amostras apresentaram uma granulometria bem graduada, com tamanho entre 0,1 µm e 1 mm, e que aquelas com a faixa de finura mais elevada (1200 m²/kg) apresentaram valores de diâmetros característicos relativamente próximos, como já era esperado. A Tabela 2 apresenta todos os dados referentes à caracterização física das amostras estudadas.

Tabela 2. Massa específica, superfície específica e diâmetros característicos das amostras estudadas.

Fonte: O autor, 2023

Amostras	Massa específica	Faixa de superfície	Superfície específica (m ² /kg)	Diâmetros característicos		
				D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀
LT in nat - SM	2,16	300 ± 50	347,83	5,57	104,97	392,91
LT in nat - B1200	2,03	1200 ± 50	1249,06	1,11	9,21	40,31
CLT600 - SM	2,73	300 ± 50	290,65	5,80	99,48	336,37
CLT600 - B1200	2,65	1200 ± 50	1244,60	2,22	12,59	42,43
CLT700 - SM	2,85	250 ± 50	245,40	6,42	135,06	361,39
CLT700 - B1200	2,70	1200 ± 50	1214,84	1,92	12,37	41,76
CLT800 - SM	2,84	200 ± 50	184,64	9,75	170,24	407,90
CLT800 - B1200	2,72	1200 ± 50	1154,64	1,76	11,49	36,91

Legenda:
D10: Diâmetro que representa na curva de distribuição a quantidade acumulada em 10%;
D50: Diâmetro que representa na curva de distribuição a quantidade acumulada em 50%;
D90: Diâmetro que representa na curva de distribuição a quantidade acumulada em 90%;

Caracterização química

A Figura 1 apresenta as curvas de termogravimetria, ATG (A) e termogravimetria derivada, DTG (B) das cinzas e do próprio lodo *in natura*, a fim de tornar clara a comparação entre eles.

Quando se observa o lodo *in natura*, percebe-se quatro estágios distintos, o primeiro caracterizado por uma perda de massa de 9,2% que ocorre por volta de 30°C até 200°C, aproximadamente, devido principalmente à saída de umidade, mas também à degradação de alguns compostos orgânicos leves (Vasques Mendonça *et al.*, 2015). O segundo representado por uma perda de massa de cerca de 16,05%, que vai em torno de 200°C até 510°C, relacionada à combustão de compostos orgânicos macromoleculares e materiais voláteis (Xie *et al.*, 2018). O terceiro estágio, que vai em torno de 510°C até 750°C, com perda de massa de cerca de 13,72% e um pico bem evidente em torno de 660°C, pode se referir tanto à decomposição de matéria orgânica de difícil degradação, quanto à descarbonatação de carbonatos (Scrivener *et al.*, 2016). Ademais, o quarto e último estágio, onde ainda há uma leve perda de massa de cerca de 4,03%, com um pico de destaque a aproximadamente 835°C, se refere, provavelmente, à decomposição de minerais inorgânicos, certamente polimorfos cristalinos dos carbonatos, como a calcita (Sathiyá e Swaminathan, 2022). A perda de massa total foi de 42,38% na análise termogravimétrica do Lodo têxtil *in natura*.

Percebeu-se que as cinzas apresentaram comportamento com o mesmo raciocínio do lodo bruto, com quatro estágios bem definidos, porém com algumas diferenças claras em relação ao mesmo. No primeiro estágio, de 30°C até 200°C, não há mais a presença de compostos orgânicos leves, como era observado no lodo bruto, apenas nota-se a saída de umidade (Vasques Mendonça *et al.*, 2015). No segundo estágio (200°C até 510°C), é nítido que não há nenhuma presença significativa de compostos orgânicos macromoleculares e materiais voláteis (Xie *et al.*, 2018). No terceiro estágio (por volta de 510°C a 710°C), percebe-se que não há mais a aparição de possíveis materiais orgânicos de difícil degradação, mas ainda se observa marcadamente a presença de carbonatos na amostra calcinada a 600°C, isso em virtude da descarbonatação completa ocorrer em temperaturas mais elevadas, e, portanto, não é observado o mesmo

pico evidente do gráfico de DTG para as amostras calcinadas a 700 e 800°C (Sathiya e Swaminathan, 2022). Para o quarto e último estágio, percebe-se uma perda de massa mais evidente para a amostra CLT600 e menor para as amostras CLT700 e CLT800, em virtude de nesta temperatura ainda existirem alguns minerais inorgânicos, provavelmente polimorfos cristalinos dos carbonatos, como calcita, que se decompõem termicamente somente entre 600°C e 800°C (Scrivener *et al.*, 2016). As perdas de massa totais foram de 14,90%, 7,50% e 7,42% para CLT600, CLT700 e CLT800, respectivamente, na análise termogravimétrica das cinzas de LOTex.

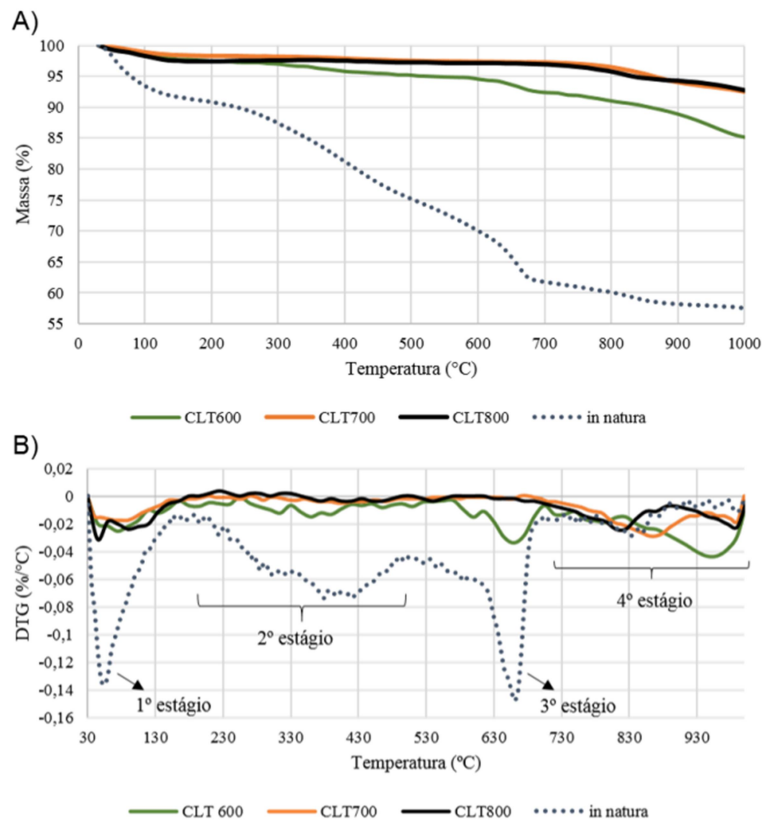


Figura 1. Análise termogravimétrica do lodo in natura e cinzas. Fonte: O autor, 2023

Estudo em pastas de hidróxido de cálcio

O estudo por termogravimetria das pastas foi realizado com o propósito de avaliar o consumo de hidróxido de cálcio (CH) baseado na perda de massa da pasta pura de CH. O pico de desidratação do CH, analisando a curva termogravimétrica da pasta pura, foi identificado na faixa de 380 a 450°C, conforme ilustrado na Figura 2, que traz as curvas de ATG e DTG da pasta pura de hidróxido de cálcio.

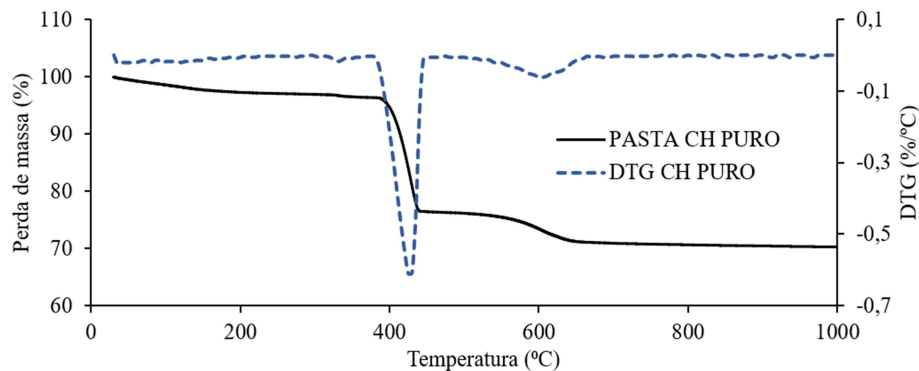


Figura 2. Curvas de ATG e DTG para a pasta pura de hidróxido de cálcio. Fonte: O autor, 2023.

Na Figura 3 estão apresentadas as curvas de termogravimetria derivada para cada uma das pastas de hidróxido de cálcio e amostra de LOTex, seja esta calcinada ou *in natura*, moída ou sem moer.

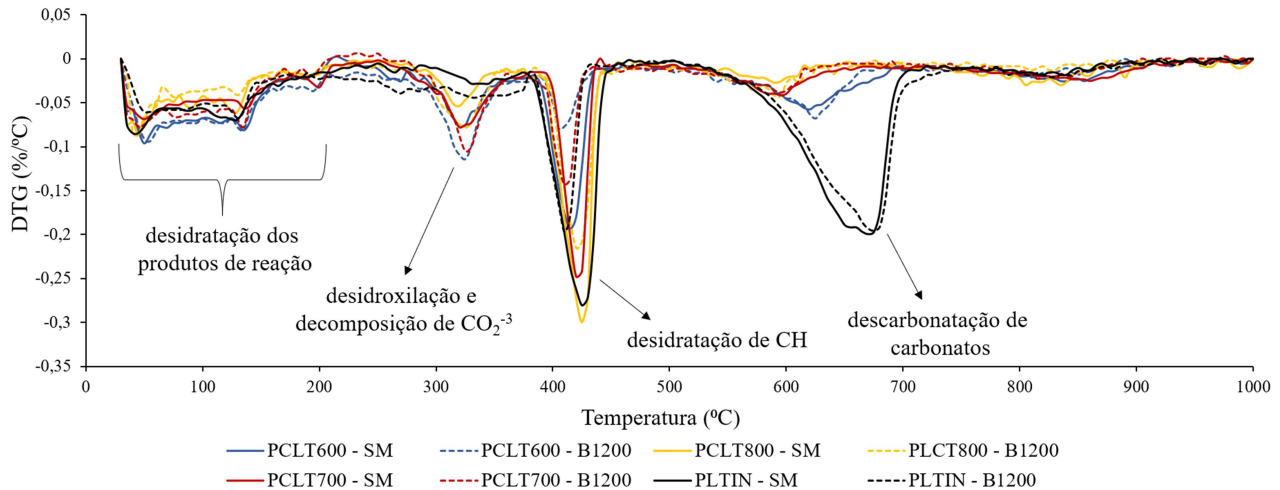


Figura 3. Curvas de DTG para as pastas de hidróxido de cálcio p.a e cada uma das amostras de LOTex estudadas. Fonte: O autor, 2023.

Quando se analisa as curvas percebe-se que todas indicam cerca de 5 estágios. Apresentam um estágio inicial de picos, que varia de cerca de 30°C até 250°C, referentes a eliminação de moléculas de água tanto adsorvidas fisicamente como presentes nos espaços interlamelares de produtos da reação pozolânica, como silicoaluminatos de cálcio hidratado na forma de gismondina. Já a decomposição térmica do segundo estágio, que vai em torno de 250°C até 380°C, é típica de perda de hidroxilas das lamelas desses produtos de reação (desidroxilação) e decomposição de ânions carbonatos (CO_2^{-3}) das hidrotalcitas e hidrocalumitas (Scrivener *et al.*, 2016). O terceiro estágio, por sua vez, indo de 380°C a 450°C, é o principal foco de análise do andamento da reação pozolânica neste trabalho, tendo em vista que se refere, como já mencionado, ao pico característico de perda de água do CH e onde pode-se observar seu consumo. O quarto estágio, que vai em torno de 550°C até 700°C, pode corresponder tanto à decomposição de matéria orgânica de difícil degradação, quanto, principalmente, à descarbonatação de carbonatos (Sathiya e Swaminathan, 2022; Scrivener *et al.*, 2016), e é válido não deixar de lado um pico ínfimo, em temperaturas acima de 800°C, que pode caracterizar um quinto e último estágio, que provavelmente está relacionado com a decomposição de minerais inorgânicos, provavelmente polimorfos cristalinos dos carbonatos, como a calcita, presentes já nos materiais anidros (Peng *et al.*, 2015; Sathiya e Swaminathan, 2022).

A Tabela 3 apresenta os valores numéricos calculados a partir da análise quantitativa das curvas de termogravimetria das pastas. As amostras calcinadas a 600°C foram as que apresentaram maiores consumos de CH, seguida pelas pastas com cinzas calcinadas a 700°C, com LOTex *in natura* e com cinzas calcinadas a 800°C. De maneira geral, percebe-se que a técnica da calcinação contribuiu para aumentar a reatividade, pois considerando a mesma faixa de finura de 1200 m^2/kg , as pastas com cinzas apresentaram menor teor de CH em relação as pastas com LOTex *in natura*, confirmando maior consumo do mesmo na reação pozolânica. A única exceção ocorreu para as amostras calcinadas a 800°C, que obtiveram consumos de CH inferiores as amostras *in natura*. Porém, isso pode ter acontecido, como já explicado em outro estudo, pelo fato de as amostras não calcinadas possuírem um elevado teor de matéria orgânica, de forma que pode terminar superestimando ligeiramente os valores de perda de massa na faixa de temperatura de desidratação do CH, fazendo-as parecerem mais reativas que as calcinadas a 800°C (Torres *et al.*, 2020).

Com os resultados da análise termogravimétrica também foi possível confirmar o impacto da moagem na intensificação da reação pozolânica. Isso pode ser visualizado quando se analisa a diferença entre o consumo de CH para as amostras sem moagem (SM) e para as amostras moídas (B1200). Dentre aquelas não moídas, esse parâmetro variou de 6,42% até 28,24%, para as amostras calcinadas a 800°C e a 600°C, respectivamente. Enquanto que para aquelas de maior finura, variou de 28,39%, para a CLT800, até o valor mais elevado de 57,44% para a CLT600. Portanto, com o aumento da finura das amostras de LOTex, o teor de CH diminuiu, resultando em uma redução do pico característico de desidratação do mesmo, e confirmando o maior avanço da reação pozolânica.

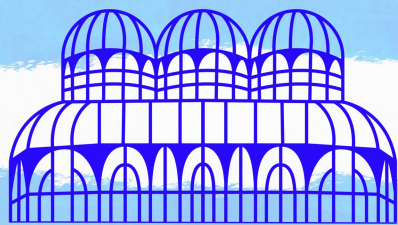


Tabela 3. H₂O medido a partir da perda de massa, CH medido estequiometricamente e consumo de CH calculado para as pastas de CH-LOTex por ATG.

Fonte: O autor, 2023

Amostra	Perda de massa entre 380 e 450 (%)	H ₂ O medido (mg)	CH medido (mg)	CH consumido (%)
LT IN - SM	7,70	0,38	1,55	8,16%
LT IN - B1200	5,02	0,28	1,17	32,33%
CLT600 - SM	5,67	0,27	1,10	28,24%
CLT600 - B1200	2,92	0,16	0,66	57,44%
CLT700 - SM	5,73	0,32	1,30	13,26%
CLT700 - B1200	3,05	0,22	0,92	40,51%
CLT800 - SM	10,37	0,34	1,41	6,42%
CLT800 - B1200	6,93	0,27	1,10	28,39%

CONCLUSÕES

E relação as análises físicas, observou-se que a calcinação resultou em aumento da massa específica devido à remoção da matéria orgânica presente no lodo, cuja densidade é menor. Além disso, verificou-se uma redução dessa propriedade à medida que a superfície específica das amostras aumentava. Também foi observado que temperaturas de calcinação mais elevadas dificultaram a moagem devido à recristalização da sílica amorfa e aos fenômenos de sinterização.

Quanto à avaliação química por termogravimetria das amostras, observou-se que tanto o lodo têxtil *in natura* quanto as cinzas provenientes dele apresentam comportamentos térmicos distintos, com múltiplos estágios de perda de massa. No entanto, as cinzas mostraram diferenças claras em relação ao lodo bruto em termos de presença e comportamento dos compostos orgânicos e inorgânicos durante os estágios de aquecimento. Isso sugere que a calcinação do lodo têxtil resulta em mudanças significativas em sua composição química e estrutura mineralógica.

No ensaio termogravimétrico das pastas, foi possível quantificar o teor de hidróxido de cálcio estequiometricamente e, assim, obter uma quantificação da reação pozzolânica. Verificou-se que o teor de CH diminuiu tanto com o aumento da finura das amostras como com a realização da calcinação, tendo destaque novamente as cinzas calcinadas a 600°C. Porém, verificou-se que apenas as cinzas calcinadas a 800°C apresentaram teores de consumo de CH menores que as amostras *in natura*. Concluiu-se, então, que isso ocorreu em virtude de as amostras não calcinadas possuírem significativa matéria orgânica, o que acaba superestimando os valores de perda de massa na faixa de temperatura de desidratação do CH.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT, NBR 5751. Materiais pozzolânicos — Determinação da atividade pozzolânica com cal aos sete dias Pozzolanic. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 4, 2015.
2. CPRH - Agência Estadual de Meio Ambiente. **Lavando Limpo**. Recife: [s. n.], 2018.
3. AGRA, Tiago M S et al. Applied Clay Science Characterizing and processing a kaolinite-rich water treatment sludge for use as high-reactivity pozzolan in cement manufacturing. **Applied Clay Science**, v. 236, n. February, p. 106870, 2023.
4. ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production. **Earth System Science Data Discussions**, [s. l.], p. 1–25, 2017.
5. BALASUBRAMANIAN, J., SABUMON, P.C., LAZAR, J. U., ILANGO VAN. R. Reuse of textile effluent treatment plant sludge in building materials. **Waste Management**, v. 26, n.1, p. 22-28, 2006.
6. BASTO, PRISCILLA; SAVASTO JÚNIOR, HOLMER; MELO NETO, Antônio Acácio. Characterization and pozzolanic properties of sewage sludge ashes (SSA) by electrical conductivity. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, p. 103410, 2019.
7. COMETTI, J. *et al.* Diagnóstico ambiental comparativo entre 2014 e 2015 das indústrias têxteis do município de Toritama-PE. *In*: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, VII, 2016. **Anais [...]**. Campina Grande/PB, 2016.



8. GOYAL, S., SIDDIQUE, R., JHA, S., SHARMA, D. Utilization of textile sludge in cement mortar and paste. **Construction and Building Materials**, v. 214, p. 169-177, 2019.
9. NEVILLE, A. M.; CREMONINI, R. **Propriedades do Concreto**. 5ª edição ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
10. SATHIYA, Sathiya Prabhakaran; SWAMINATHAN, G. Thermogravimetric study of textile lime sludge and cement raw meal for co-processing as alternative raw material for cement production using response surface methodology and neural networks. **Environmental Technology & Innovation**, v. 25, p. 102100, 1 fev. 2022.
11. SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.
12. TORRES, S. M.; LIMA, V. M. E.; BASTO, P. E. A.; JÚNIOR, N. T. A.; NETO, A. A. M. Assessing the pozzolanic activity of sugarcane bagasse ash using X-ray diffraction. **Construction and Building Materials**, v. 264, p. 120684, 2020.
13. VASQUES MENDONÇA, Andressa R. et al. Thermogravimetric analysis and kinetic study of pyrolysis and combustion of residual textile sludge. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 121, n. 2, p. 807–814, 22 ago. 2015. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-015-4551-y>>. Acesso em: 28 set. 2022.
14. XIE, Candie et al. Quantifying thermal decomposition regimes of textile dyeing sludge, pomelo peel, and their blends. **Renewable Energy**, v. 122, p. 55–64, 1 jul. 2018.
15. PENG, Xiaowei; MA, Xiaoqian; XU, Zhibin. Thermogravimetric analysis of co-combustion between microalgae and textile dyeing sludge. **Bioresource Technology**, v. 180, p. 288–295, 1 mar. 2015.