ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Potencial pozolânico de cinzas de lodo têxtil em pastas de hidróxido de cálcio por difração de raios-X

Pozzolanic potential of textile sludge ash in calcium hydroxide pastes by X-ray diffraction

Igor Vieira Fernandes
Universidade Federal de Pernambuco | Recife | Brasil | igor.vfernandes@ufpe.br
Hérculys Guimarães Carvalho
Universidade Federal de Pernambuco | Recife | Brasil | herculys.carvalho@ufpe.br
Marcos David dos Santos
Universidade Federal de Pernambuco | Recife | Brasil | marcos.david@ufpe.br
Marina Cartaxo Braga Morais de Oliveira
Universidade Federal de Pernambuco | Recife | Brasil | cartaxo.braga@ufpe.br
Antônio Acácio de Melo Neto
Universidade Federal de Pernambuco | Recife | Brasil | antonio.meloneto@ufpe.br
Romildo Morant de Holanda
Universidade Federal Rural de Pernambuco |Recife| Brasil| romildo.morant@ufrpe.br

Resumo

Este estudo investiga a possibilidade de utilizar o Lodo Têxtil (LOTex) como material cimentício suplementar, visando mitigar o impacto ambiental e melhorar a gestão de resíduos no setor têxtil. O LOTex foi beneficiado com moagem e calcinação para aumentar sua reatividade pozolânica, com diferentes temperaturas de calcinação (600°C, 700°C e 800°C). Além disso, a influência da superfície específica do material foi examinada, através de moagem das amostras e classificação em duas faixas (sem moagem e 1200 m²/kg). Todas as amostras foram caracterizadas física e mineralogicamente. Com isso, foi conduzido um estudo em pastas de hidróxido de cálcio (CH) e LOTex, no qual foi verificado por difração de raios-X o consumo de CH por meio do decréscimo relativo da intensidade de seus picos característicos (18° e 24°2Θ). O estudo comprovou o aumento da reatividade das amostras com a calcinação e o aumento da superfície específica. As amostras que apresentaram melhor desempenho pozolânico foram as calcinadas a 600°C. Portanto, dentro das limitações deste estudo, comprova-se a viabilidade do uso do LOTex, beneficiado com moagem e calcinação, como um material cimentício suplementar alternativo.

Palavras-chave: Lodo têxtil. Cinzas de lodo. Pozolanicidade. Material cimentício suplementar. Difração de raios-X.

Como citar:
FERNANDES, Igor Vieira; CARVALHO, Hérculys Guimarães; SANTOS, Marcos David dos; OLIVEIRA, Marina Cartaxo Braga Morais de; MELO NETO, Antônio Acácio de; HOLANDA, Romildo Morant de. Potencial pozolânico de cinzas de lodo têxtil em pastas de hidróxido de cálcio por difração de raios-X. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

Abstract

This study investigates the possibility of using Textile Sludge (LOTex) as a supplementary cementitious material, aiming to mitigate the environmental impact and improve waste management in the textile sector. LOTex was treated with grinding and calcination to increase its pozzolanic reactivity, with different calcination temperatures (600°C, 700°C, and 800°C). In addition, the influence of the material's specific surface area was examined by grinding the samples and classifying them into two ranges (no grinding and 1200 m²/kg). All samples were physically and mineralogically characterized. With this, a study was conducted on calcium hydroxide (CH) and LOTex pastes, in which the consumption of CH was verified by X-ray diffraction through the relative decrease in the intensity of its characteristic peaks (18° and 24°2Θ). The study proved the increase in the reactivity of the samples with calcination and the increase in the specific surface area. The samples that presented the best pozzolanic performance were those calcined at 600°C. Therefore, within the limitations of this study, the feasibility of using LOTex, treated with grinding and calcination, as an alternative supplementary cementitious material is proven.

Keywords: Textile sludge. Sludge ash. Pozzolanicity. Supplementary cementitious material. X-ray diffraction.

INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da indústria têxtil, impulsionado pela demanda global por vestuário, tem gerado um volume significativo de resíduos, especialmente o lodo proveniente dos processos de tratamento de efluentes. Além dos impactos diretos no meio ambiente, o descarte inadequado do lodo têxtil (LOTex) acarreta custos elevados para as empresas do setor e representa um risco à saúde pública. No Arranjo Produtivo Local de Confecções do Agreste Pernambucano (APLCAPE), segundo maior polo têxtil do Brasil, a produção de LOTex atinge proporções alarmantes, exigindo soluções inovadoras para sua gestão ambientalmente adequada [1][2].

Paralelamente, a construção civil é responsável por uma série de impactos ambientais, sendo a produção de cimento Portland um dos principais desafios, já que esta é responsável por cerca de 8% das emissões globais de CO_2 [3]. Diante desse cenário, a busca por novos materiais cimentícios suplementares para a redução desses impactos torna-se imperativa.

Neste estudo, considerando que o lodo têxtil possui propriedades favoráveis à sua reutilização na construção civil, objetivou-se avaliar a pozolanicidade do LOTex através de análises de difração de raios-X, com um enfoque prático. Para isso, foram utilizadas pastas contendo CH e cinza de LOTex, as quais foram analisadas pelo método DRIP (Decréscimo Relativo da Intensidade dos principais Picos de CH). Este método apresenta-se como uma alternativa prática e simples em comparação a métodos de análise quantitativa já estabelecidos, como o método de Rietveld, e tem sido amplamente aplicado como uma análise semiquantitativa da reatividade do material em diversos estudos publicados em periódicos de elevado fator de impacto [4][5][6]. O principal objetivo deste estudo foi investigar a viabilidade do uso deste resíduo beneficiado como material cimentício suplementar.

METODOLOGIA

MATERIAIS

O presente estudo utilizou Lodo Têxtil proveniente da Lavanderia Nossa Senhora do Carmo, localizada em Caruaru, Pernambuco. Este material foi submetido a um processo de beneficiamento que envolveu moagem e calcinação. Uma parte do lodo não foi calcinada, sendo referida como "*in natura*", enquanto outra parte foi submetida à calcinação em diferentes temperaturas: 600, 700 e 800°C.

A escolha dessas temperaturas teve como objetivo primeiro provocar a perda da água quimicamente ligada, pois esse processo resulta em uma estrutura colapsada e desarranjada, levando a um estado amorfo que pode aumentar a reatividade pozolânica do material calcinado [7][8]. Além disso, a calcinação foi mantida acima de 550°C para garantir a eliminação da maioria dos compostos orgânicos macromoleculares e materiais voláteis indesejáveis. Com o intuito de evitar redução da amorficidade do material devido a processos de sinterização e cristalização da sílica amorfa, limitou-se a temperatura a 800°C [9][10]. Este processo de calcinação foi realizado em um forno mufla, com 3 horas no patamar de queima e uma taxa de aquecimento de 10°C/min.

Com o objetivo de aumentar sua reatividade, as cinzas do lodo (CLT) resultantes foram submetidas à moagem em moinho de bolas para a obtenção de duas faixas de superfície específica. Estas foram definidas com base nos valores obtidos pelo ensaio do permeabilímetro de Blaine, em amostras não moídas (apenas destorroadas) e com 1200 ± 50 m²/kg. Todas as amostras foram submetidas à caracterização quanto às propriedades físicas (através de ensaios de massa específica, Blaine e granulometria a laser) e mineralógicas (por difração de raios-X).

Ademais, para os estudos em pastas da pozolanicidade, foi utilizado hidróxido de cálcio p.a. (CH) com teor mínimo de 95%, cedido pela empresa Química Moderna, com massa específica de 2,24 g/cm³ e com um diâmetro superficial médio das partículas de 3,99 µm, obtido pelo ensaio de granulometria a laser.

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS ANIDROS

A análise física das amostras incluiu a determinação da massa específica pelo método do frasco de *Le Chatelier* e a mensuração da superfície específica pelo método do permeabilímetro de *Blaine*. A caracterização granulométrica foi realizada através de espectrometria de difração a laser, usando um equipamento Mastersizer 2000 da Malvern Instruments. Para entender melhor a composição do lodo bruto e das cinzas, foram feitas análises mineralógicas por difração de raios-X, utilizando um difratômetro Bruker D2 Phaser. Os parâmetros do ensaio incluíram um intervalo de varredura (2θ) de 5 a 80°, passo angular de 0,05°, tempo de aquisição de 0,575 segundos por passo, corrente de 10 mA, tensão de 30 kV e uso de um tubo de feixe de cobre com comprimento de onda de 1,54 Å.

MISTURA, MOLDAGEM E CURA DAS PASTAS

As proporções em massa das misturas das pastas para cada amostra estão detalhadas na Tabela 1. Seguiram-se as recomendações da NBR 5751 [11] para o procedimento de cura, que consiste em 1 dia a 23 ± 2°C fora da estufa e 6 dias a 55 ± 2°C na estufa, e para a quantidade de material potencialmente pozolânico, definida como 2/3 do volume de hidróxido de cálcio. Embora esta seja uma investigação microestrutural em pastas e não um ensaio em argamassas, o método DRIP adere aos procedimentos da norma para garantir conformidade com os parâmetros do único ensaio padronizado de avaliação do potencial pozolânico com cal aos 7 dias, sem a influência do agregado.

A relação água/aglomerante foi fixada em 0,65, ao invés de seguir a recomendação da NBR 5751 [11] de variar essa propriedade ao fixar o índice de consistência. Taylor [12] indica que a relação ideal para pastas varia de 0,45 a 0,65, com a alita e a belita hidratando mais rapidamente a 0,65. Com base nisso e na experiência de trabalhos anteriores no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes [4][5][6], fixou-se a relação em 0,65 para garantir que a análise do potencial pozolânico seja atribuída à reatividade das amostras de LOTex, sem interferência da variação da quantidade de água.

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

Código da amostra	δ (g/cm³)	Massa da adição (g)	Água (g)
LT in nat - SM	2,16	33,44	33,01
LT in nat - B1200	2,03	31,43	31,70
CLT600 - SM	2,73	42,27	38,74
CLT600 - B1200	2,65	41,03	37,94
CLT700 - SM	2,85	44,12	39,95
CLT700 - B1200	2,70	41,80	38,44
CLT800 - SM	2,84	43,97	39,85
CLT800 - B1200	2,72	42,11	38,64
Hidróxido de Cálcio	2,24	34,68	33,81

Fonte: o autor.

As pastas foram preparadas misturando os materiais sólidos com água em um agitador mecânico por 2 minutos a 1600 rpm. Após homogeneização, as pastas foram colocadas em recipientes cilíndricos (3,5 cm x 5 cm) e cobertas com plástico filme para minimizar a evaporação e a carbonatação durante a cura térmica. A cura inicial foi realizada sob vácuo em dessecador a 23 ± 2 °C por 24 horas, com sílica gel e hidróxido de bário para evitar a absorção de umidade e a carbonatação. Em seguida, as amostras foram transferidas para uma estufa a 55 ± 2 °C por 6 dias. Após 7 dias, os corpos de prova foram congelados em nitrogênio líquido a aproximadamente -180 °C para interromper instantaneamente a hidratação.

LIOFILIZAÇÃO

Após o congelamento, as amostras foram liofilizadas para remover a água livre e congelada, mantendo a água quimicamente combinada e parte da água adsorvida na estrutura dos compostos hidratados. O processo de liofilização envolveu a aplicação de baixa pressão (menos de 500 µHg) e baixa temperatura (abaixo de -30°C), seguida por um aumento gradual da temperatura ao longo de 24 horas para promover a

sublimação. Após a liofilização, as amostras foram moídas em moinho analítico e o material passante na peneira de abertura de malha 75 µm, foi acondicionado em eppendorfs para ser encaminhado ao ensaio de DRX.

CÁLCULO DO CONSUMO DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO

O consumo de hidróxido de cálcio indica o progresso da reação pozolânica, já que o material pozolânico reage com ele. A determinação desse consumo foi feita com base nos picos de 18° e 34°, os mais intensos na pasta de cal hidratada. Foram calculados o decréscimo relativo da intensidade do pico ($DRIP_{18}$ e $DRIP_{34}$) e o consumo de hidróxido de cálcio ($Cons.CH_\theta$), conforme outros estudos [4][5][6]. A equação usada para DRIP é:

$$DRIP_\theta = 100 \times \frac{I_{CH,\theta} - I_{poz,\theta}}{I_{CH,\theta}} \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde $I_{CH,\vartheta}$ é a intensidade do ângulo θ na pasta com hidróxido de cálcio pura e $I_{poz,\vartheta}$ é a intensidade no pico do ângulo θ na pasta de hidróxido de cálcio e pozolana.

Levando em consideração que houve redução das intensidades dos picos pelas substituições volumétricas de 2/3 de CH por amostras de LOTex, para representar mais fielmente a quantidade consumida, o valor de DRIP foi ajustado pela razão mássica de $Ca(OH)_2$ e pozolana na pasta. A equações 2 e 3 representam o ajuste da intensidade da pasta pura e do consumo de CH, respectivamente.

$$ACH_{puro} = I_{CH,\theta} \times \frac{m_{CH}}{m_{CH} + m_{poz}} \quad \text{(Equação 2)}$$

$$Cons.CH_\theta = 100 \times \frac{ACH_{puro} - I_{poz,\theta}}{ACH_{puro}} \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde ACH_{puro} é o teor ajustado na pasta pura com de hidróxido de cálcio, enquanto m_{CH} e m_{poz} são as massas de hidróxido de cálcio na pasta pura e de material pozolânico usado em cada mistura de pasta, respectivamente.

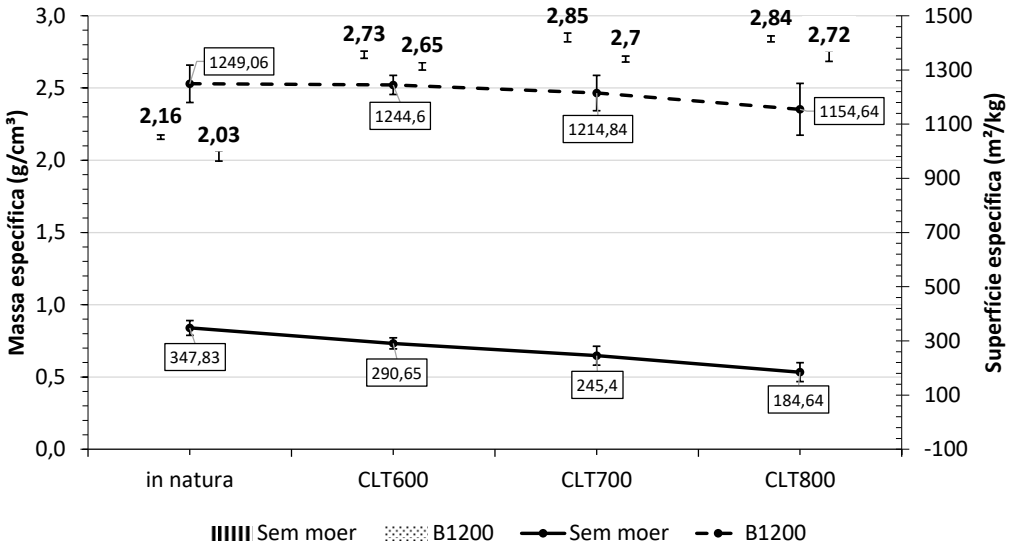
RESULTADOS E DISCUSSÕES

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A Figura 1 apresenta os dados de massa específica e superfície específica de todas as amostras estudadas.

A caracterização física revelou que as amostras de lodo têxtil *in natura* (LOTex) são as menos densas, variando de 2,03 a 2,16 g/cm³, enquanto as calcinadas a 700 e 800°C são as mais densas, com valores entre 2,7 e 2,85 g/cm³. A calcinação aumentou a massa específica, provavelmente devido à remoção da matéria orgânica, que possui material carbonáceo de baixa densidade [6]. Para as amostras apenas destorroadas, a temperatura de calcinação reduziu a superfície específica, que foi de 347,83 m²/kg para o LOTex *in natura*, enquanto a cinza calcinada a 800°C apresentou 184,64 m²/kg. Esse fenômeno é atribuído à recristalização da sílica amorfa com o aumento da temperatura de calcinação, conforme observado em outros estudos [6][13].

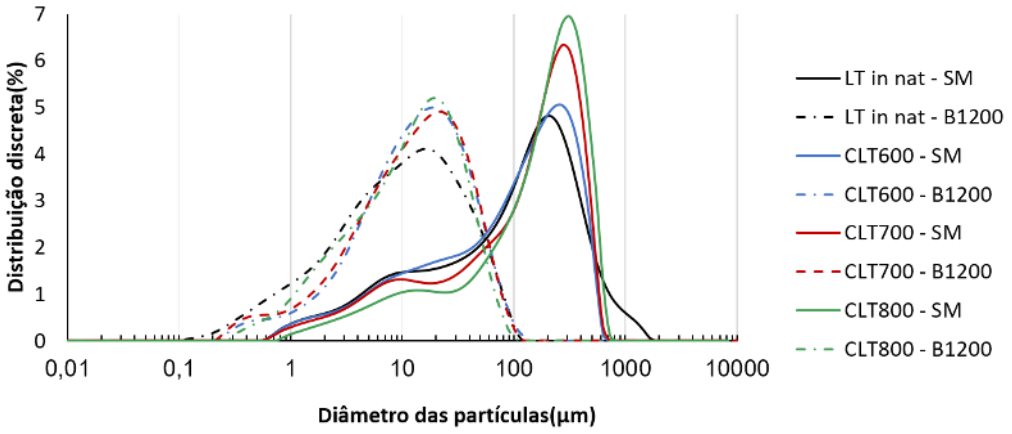
Figura 1 - Massa específica e superfície específica das amostras estudadas.



Fonte: o autor.

Por fim, a granulometria a laser confirmou que todas as amostras apresentaram uma granulometria bem graduada, com tamanhos entre 0,1 µm e 1 mm (Figura 2). As amostras com maior superfície específica (1200 m²/kg) apresentaram curvas de distribuição discreta mais afastadas para a esquerda e mostraram valores de diâmetros característicos próximos (Tabela 2), conforme esperado.

Figura 2 - Distribuição granulométrica discreta das amostras analisadas.



Fonte: o autor.

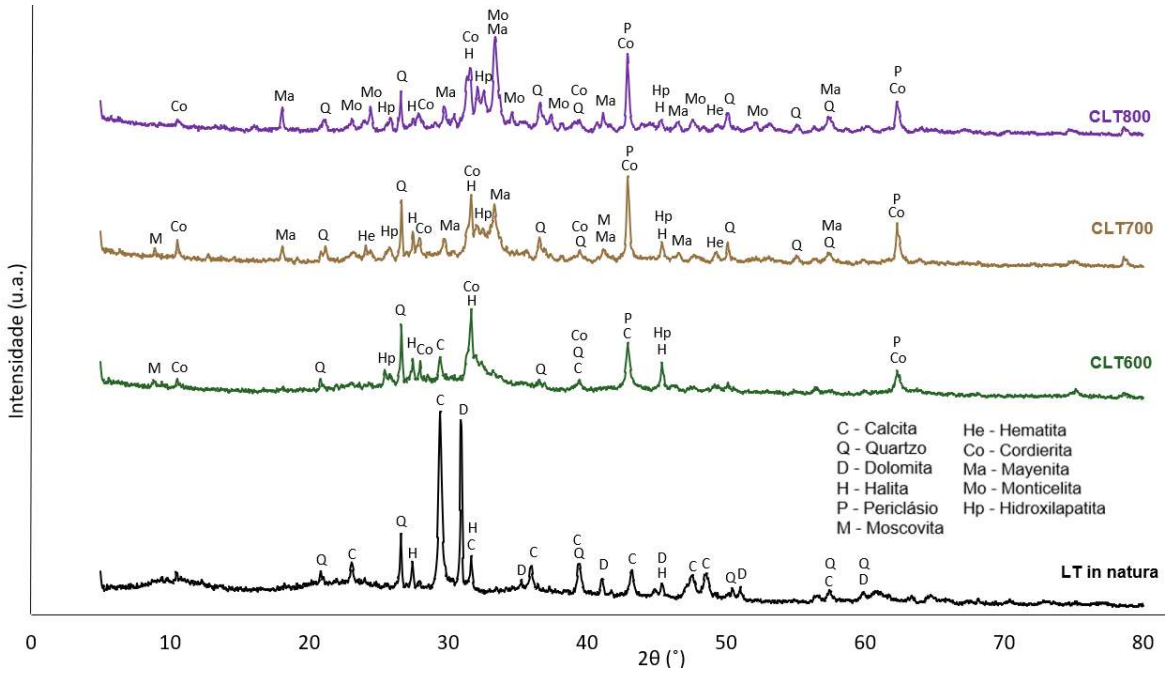
Tabela 2 - Diâmetros característicos das amostras estudadas.

Amostras	Diâmetros característicos		
	D_{10}	D_{50}	D_{90}
LT in nat - SM	5,57	104,97	392,91
LT in nat - B1200	1,11	9,21	40,31
CLT600 - SM	5,80	99,48	336,37
CLT600 - B1200	2,22	12,59	42,43
CLT700 - SM	6,42	135,06	361,39
CLT700 - B1200	1,92	12,37	41,76
CLT800 - SM	9,75	170,24	407,90
CLT800 - B1200	1,76	11,49	36,91

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A Figura 3 apresenta os difratogramas das amostras anidras. Na amostra *in natura*, foram identificados picos de calcita ($CaCO_3$), quartzo (SiO_2), dolomita ($Ca.Mg(CO_3)_2$) e halita (NaCl). Nas cinzas calcinadas a 600°C (CLT600), picos de calcita foram observados devido à decomposição térmica da calcita, enquanto a dolomita se decompôs, resultando em periclásio (MgO) [14]. Picos de moscovita ($Kal_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$) foram encontrados nas amostras CLT600 e CLT700, o que pode ser explicado pela temperatura de desidroxilação da mesma que, dependendo do polimorfo tratado, pode se iniciar em 750°C [15], enquanto cordierita ($Mg_2Al_4Si_5O_{18}$), mayenita ($Ca_{12}Al_{14}O_{33}$) foram observadas associadas ao metamorfismo térmico regional de baixa pressão em materiais aluminosos e em calcários impuros, respectivamente [16][17]. Foram encontrados picos referentes possivelmente a hidroxilapatita, associada ao uso de CaO no tratamento do efluente, similar ao processo descrito por Chen *et al*. [18]. Na amostra CLT800, houve formação de monticellita associada ao metamorfismo de alta temperatura e baixa pressão em dolomitos silicosos.

Figura 3 - Difratogramas do lodo têxtil e das cinzas.

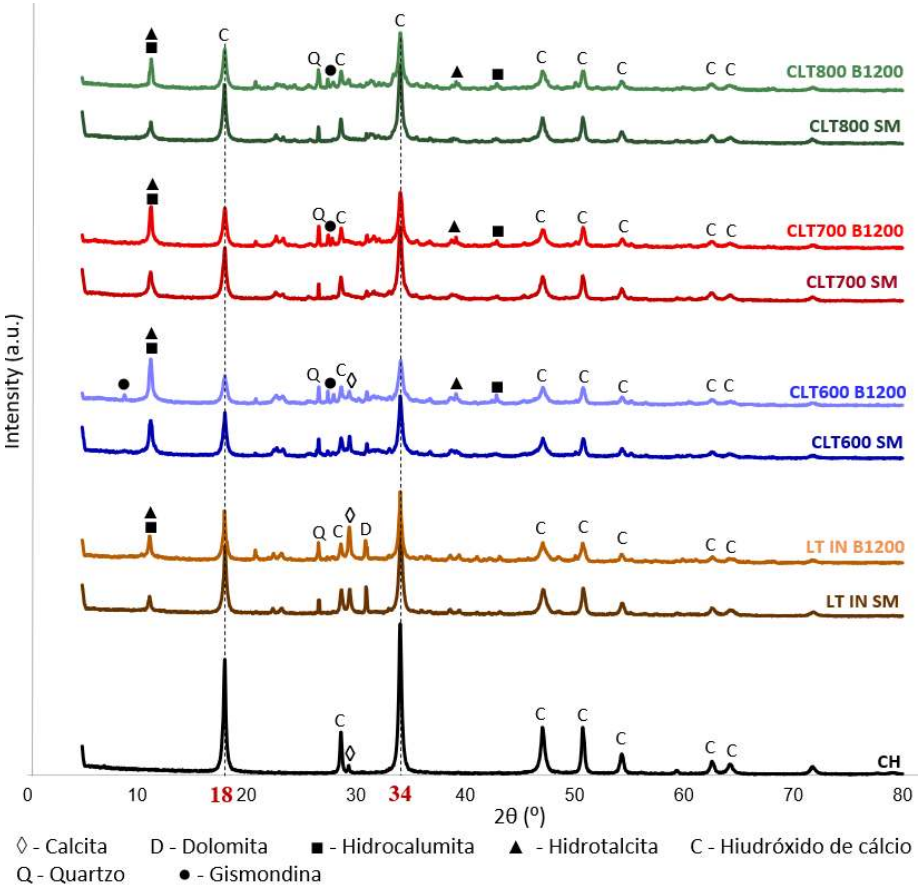


Fonte: o autor.

ESTUDO EM PASTAS DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A reatividade do material foi estimada através de uma análise semiquantitativa dos difratogramas, observando o decréscimo relativo da intensidade dos picos de CH durante a reação pozolânica. A identificação dos picos foi realizada comparando o difratograma com o banco de dados do International Centre of Diffraction Data (ICDD) utilizando o software X'Pert HighScore Plus. A Figura 4 mostra os difratogramas das pastas estudadas após 7 dias de cura.

Figura 4 - Difratograma das pastas de hidróxido de cálcio p.a. com amostras de lodo têxtil aos 7 dias.



Fonte: o autor.

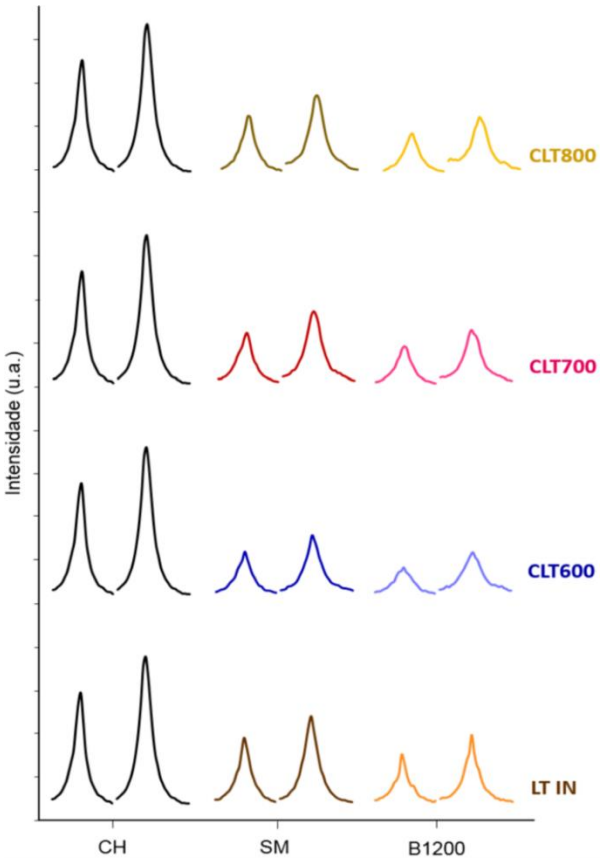
A partir dos difratogramas, é possível inferir que reações entre óxidos de alumínio e silício com hidróxido de cálcio resultam na formação de silicoaluminato de cálcio hidratado (gismondina, $CaAl_2Si_2O_9.4H_2O$) [19]. Apesar da presença de magnésio no LOTex e nas cinzas, não foram observados picos de brucita ($Mg(OH)_2$) e periclásio (MgO) nas pastas, mas sim hidrotalcita ($(Mg_{0,667}Al_{0,333})(OH)_2(CO_3)_{0,167}(H_2O)_{0,5}$) [20]. O que é positivo, pois brucita e periclásio possuem efeito expansivo. Provavelmente, os íons de magnésio reagiram com os íons de alumínio, formando hidrotalcita.

Além disso, reações envolvendo compostos de cálcio, alumínio e cloro presentes nas cinzas de lodo podem gerar cloroaluminato de cálcio hidratado, conhecido como hidrocalumita ($Ca_8Al_4(OH)_{24}(CO_3)Cl_2(H_2O)_{1,6}(H_2O)_8$)). Um exemplo é a reação entre halita (NaCl) e hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), que forma cloreto de cálcio ($CaCl_2$). Este cloreto reage com compostos de alumínio do LOTex, como a mayenita ($Ca_{12}Al_{14}O_{33}$), resultando em hidrocalumita [21][22][23]. A presença desta após a hidratação é benéfica, pois ela liga íons cloreto, reduzindo a quantidade de cloreto livre e, consequentemente, o risco de corrosão no concreto armado [24], o que explica a ausência de halita nas pastas, apesar de sua presença nas amostras anidras de LOTex.

Nos difratogramas da Figura 4, observa-se uma clara diminuição dos picos característicos do hidróxido de cálcio nas pastas com LOTex. Para melhor visualizar esse fenômeno, a Figura 5 destaca os dois principais picos de CH (a 18° e 34°) para cada

amostra, evidenciando claramente seu consumo devido à reação pozolânica. Sem escalas numéricas, mas em proporções dimensionais, são comparados os dois principais picos de CH na pasta pura com os mesmos picos nos difratogramas das pastas contendo LOTex.

Figura 5 - Comparação entre os picos de 18° e 34° do hidróxido de cálcio de pastas com amostras de LOTex *in natura* e cinzas.



Fonte: o autor.

A redução da intensidade dos picos de CH é mais acentuada com o aumento da finura Blaine da amostra e a calcinação, ocorrendo juntamente com o surgimento de produtos da reação não presentes nos materiais anidros. Isso era esperado e concorda com outros resultados, pois maior superfície específica e calcinação aumentam a reatividade. A Tabela 3 mostra valores numéricos de intensidade dos picos de CH, percentual de decréscimo relativo da intensidade dos picos (DRIP) e consumo de hidróxido de cálcio a 18° e 34° ajustado pela razão mássica.

Torres *et al*. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e [5] destacam que o DRIP, embora mensure o consumo de hidróxido de cálcio nas pastas com LOTex através da redução da intensidade dos picos principais, não é uma medida exata da reação pozolânica, pois se trata de uma análise semiquantitativa. Para obter uma estimativa mais precisa do consumo de hidróxido de cálcio, a intensidade dos picos da pasta pura foi corrigida pela razão mássica de CH e pozolana na pasta analisada, como já explicado no cálculo do consumo.

Tabela 3 - Valores de intensidades dos picos de CH, decréscimo relativo da intensidade dos picos (DRIP) e consumo de CH a 18° e 34° por DRIP para as pastas em estudo.

Amostra	Intensidade do pico		DRIP (%)		Consumo de CH por DRIP (%)	
	18°	34°	18°	34°	18°	34°
LT IN - SM	3737,00	4963,00	40,83%	41,18%	2,80%	3,37%
LT IN - B1200	2746,00	3834,00	56,52%	54,56%	30,26%	27,11%
CLT600 - SM	2406,00	3274,00	61,91%	61,20%	30,96%	29,67%
CLT600 - B1200	1542,00	2315,00	75,59%	72,56%	56,33%	50,93%
CLT700 - SM	2840,00	4031,00	55,03%	52,23%	16,89%	11,71%
CLT700 - B1200	2119,00	2953,00	66,45%	65,00%	39,49%	36,88%
CLT800 - SM	3171,00	4299,00	49,79%	49,05%	7,36%	5,99%
CLT800 - B1200	2222,00	3027,00	64,82%	64,13%	36,34%	35,09%

Fonte: o autor.

As amostras calcinadas a 600°C mostraram maior consumo de CH, com percentuais de consumo por DRIP acima de 29%, enquanto as amostras in natura apresentaram percentuais a partir de 2,8%. Para as amostras moídas, o aumento da temperatura de calcinação reduziu a reatividade, com amostras calcinadas a 700°C e 800°C apresentando percentuais de consumo de CH por DRIP superiores a 10% e 5%, respectivamente. Isso indica que a calcinação aumenta a reatividade do material, mas temperaturas mais altas podem reduzir a reatividade devido à sinterização.

A moagem também contribuiu para a diminuição dos picos de CH, indicando maior consumo devido à reação pozolânica. Amostras com maior finura Blaine (1200 m²/kg) apresentaram os maiores valores de consumo de hidróxido de cálcio por DRIP, com a amostra LT IN-B1200, de pior resultado entre as amostras submetidas à moagem, superando 30% e a CLT600-B1200, com o melhor desempenho, alcançando mais de 55%.

CONCLUSÕES

A análise física do lodo revelou que a calcinação aumenta a massa específica devido à remoção da matéria orgânica, que possui densidade menor. No entanto, essa propriedade diminui com o aumento da superfície específica. Na análise mineralógica por difração de raios-X, a amostra de LOTex *in natura* mostrou predominância de calcita e dolomita, ausentes nas cinzas calcinadas a altas temperaturas devido à decomposição térmica, dando lugar a novas fases.

Estudos com pastas indicaram a presença de fases oriundas dos materiais anidros e produtos de hidratação, como hidrocalumita, hidrotalcita e gismondina. Observou-se o consumo de hidróxido de cálcio e formação de compostos hidratados, evidenciando a reação pozolânica. Amostras mais finas e calcinadas a 600°C apresentaram melhor desempenho.

O estudo concluiu que o LOTex, com tratamento térmico e moagem adequados, pode ser uma adição alternativa ao cimento Portland, embora sejam necessárias avaliações

adicionais de coletas sazonais e de diferentes localidades, bem como estudos mais profundos sobre viabilidade técnica e econômica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco, pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa, e à Lavanderia Nossa Senhora do Carmo, por ceder o lodo objeto de estudo deste trabalho.

REFERÊNCIAS

[1] LELOUP, W. D. A. **Efeitos da adição de lodo têxtil e cinzas de lenha gerados no APL de confecções pernambucano em argamassas de cimento Portland**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco - Centro Acadêmico do Agreste, 2013.

[2] SOUTO, T. J. M. P. **Estudo do comportamento químico e ambiental de efluentes industriais e resíduos sólidos oriundos de lavanderias do polo têxtil no Agreste Pernambucano**. 2017. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2017.

[3] ANDREW, R. M. Global CO2 emissions from cement production. **Earth System Science Data Discussions**, p. 1–25, 2017. DOI: https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019.

[4] 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.

[5] BASTO, P. E. A; LIMA, V. M. E.; NETO, A. A. M. Effect of curing temperature in the relative decrease peak intensity of calcium hydroxide pastes for assessing pozzolanicity of supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 325, p. 126767, 28 mar. 2022.

[6] 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. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.106870.

[7] MARTÍNEZ-GARCÍA, C. et al. Sludge valorization from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry. **Journal of Environmental Management**, v. 95, n. SUPPL., p. S343–S348, 1 mar. 2012.

[8] MOHAMMED, Siline. Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: A review. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 10–19, 1 jun. 2017.

[9] 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, 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/s10973-015-4551-y.

[10] XIE, Candie *et al.* Quantifying thermal decomposition regimes of textile dyeing sludge, pomelo peel, and their blends. **Renewable Energy**, v. 122, p. 55–64, 2018.

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 5751**. Materiais pozolânicos — Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias Pozzolanic. Rio de Janeiro, 2015.

[12] TAYLOR, Harold F. W. Cement chemistry. 2nd ed. **Academic Press**, v. 20, n. 4, p. 335, 1997.

[13] 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.DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103410.

[14] RIBEIRO, D. V.; SANTOS, B. S.; DIAS, C. M. R.; SANTANA, H. A.; AMARAL, I. B. C.; NETO, J. S. A.; CILLA, M. S.; JÚNIOR, N. S. A.; LIMA, P. R. L.; PINTO, S. A.; SIQUEIRA, T. P. L.; SANTOS, T. A. **Princípios da ciência dos materiais cimentícios: produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2021.

[15] MACKENZIE, R.C. **The Differential Thermal Investigation of Clays**. Londres: Mineralogical Society, 1957.

[16] NAVARRO, G. R. B.; ZANARDO, A.; MONTIBELLER, C. C.; LEME, T. G. **Ciclossilicatos**. , 2017. Disponível em: https://museuhe.com.br/site/wp-content/uploads/2018/02/Museu-HE-CORDIERITA.pdf. Acesso em: 7 out. 2022.

[17] DELGADO, L. G.; DELGADO, A. L.; LÓPEZ, F. A.; ANDRÉS, S. L. Mayenita: Aluminato Cálcico Sintetizado a partir de un Residuo Peligroso de Aluminio. **Revista de la sociedad española de mineralogia**, v. 13, p. 115–116, 2010.

[18] CHEN, Jingjing *et al.* Efficient recovery of phosphorus in sewage sludge through hydroxylapatite enhancement formation aided by calcium-based additives. **Water Research**, v. 171, p. 115450, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115450.

[19] MELLO, L. C. A. **Efeitos das elevadas temperaturas em Concretos Autoadensáveis com altos teores de resíduo da Biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim**. 2019. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2019.

[20] SALOMÃO, R.; AMARAL, L. F.; PANDOLFELLI, V. C. Adição de cimento de aluminato de cálcio e seus efeitos na hidratação do óxido de magnésio. **Cerâmica**, v. 56, p. 135–140, 2010.

[21] DAI, Y.; QIAN, G.; CHI, Y.; XU, Y.; ZHOU, J.; LIU, Q.; XU, Z. P.; QIAO, S. Effective removal and fixation of Cr(VI) from aqueous solution with Friedel's salt. **Journal of Hazardous Materials**, v. 170, p. 1086–1092, 2009.

[22] SOUSA, L. R. **Avaliação de pastas de cimento contendo Resíduo de Craqueamento Catalítico (ECAT) em exposição à névoa salina e ao dióxido de carbono supercrítico**. 2019. 241 f. - Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, 2019.

[23] ZAGO, S. D. **Avaliação da durabilidade do concreto da construção civil com a utilização de agregados de escória de aciaria LD**. 2019. 260 f. - Universidade de São Paulo, 2019.

[24] ZHANG, D.; SHAO, Y. Effect of early carbonation curing on chloride penetration and weathering carbonation in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 516–526, 2016.