



# 7° CONRESOL

7° Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade

CURITIBA/PR - 14 a 16 de Maio de 2024

## AVALIAÇÃO DA POZOLANICIDADE DO LODO TÊXTIL BRUTO E BENEFICIADO PARA USO COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO EM CONCRETO SECO

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.7.24.VII-013>

Igor Vieira Fernandes (\*), Marcos David dos Santos, Antônio Acácio de Melo Neto

\* Universidade Federal de Pernambuco, UFPE – Campus Recife. [igor.vfernandes@ufpe.br](mailto:igor.vfernandes@ufpe.br)

### RESUMO

No Arranjo Produtivo Local (APL) da Confeção do Estado de Pernambuco, há uma questão significativa relacionada à gestão inadequada do lodo têxtil gerado pelas lavanderias. Esse problema resulta no descarte inadequado desse resíduo em aterros sanitários, sem tratamento prévio, o que pode ter impactos ambientais negativos. Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial pozolânico do lodo têxtil (LOTex), por meio da aplicação de métodos padronizados, e seu comportamento como adição em misturas de concreto seco prensado. Um beneficiamento foi realizado através de moagem e de calcinação em mufla para conferir maior amorficidade, e, conseqüentemente, desenvolver propriedades pozolânicas. Tanto o material bruto como a cinza (CLT) oriunda do beneficiamento passaram por uma caracterização física, química e mineralógica. Para avaliação das propriedades físicas, foram realizados os ensaios de massa específica pelo frasco de Le Chatelier, superfície específica de Blaine e granulometria a laser. Dentre as análises químicas e mineralógicas, foram realizados os ensaios de Fluorescência de Raios-X (FRX) e Difração de raios-X (DRX). Na fase inicial, foram conduzidos ensaios conforme as normas brasileiras NBR 5751:2015 e NBR 5752:2014 para avaliar a atividade pozolânica do lodo têxtil em estado bruto e beneficiado, respectivamente, demonstrando que apenas o segundo atendeu aos requisitos pozolânicos. Em uma segunda etapa, concretos secos foram investigados com 0, 5, 10 e 15% de substituição de cimento pela cinza de lodo moída. A incorporação da CLT no concreto seco provocou redução dos valores de absorção de água e índices de vazios e aumento dos valores de resistência à compressão, com destaque para o concreto com 10% de substituição.

**PALAVRAS-CHAVE:** Lodo têxtil, Cinza de lodo, Pozolanicidade, Concreto seco, Sustentabilidade.

### ABSTRACT

In the Local Productive Arrangement (APL) of the Apparel Industry in the State of Pernambuco, there is a significant issue related to the inadequate management of textile sludge generated by laundries. This problem leads to the improper disposal of this waste in landfills without prior treatment, which can have negative environmental impacts. In this context, this study aimed to evaluate the pozzolanic potential of textile sludge (LOTex) through standardized methods and its behavior as an additive in pressed dry concrete mixtures. Beneficiation was carried out through grinding and calcination in a muffle furnace to confer greater amorphicity and, consequently, develop pozzolanic properties. Both the raw material and the ash (CLT) resulting from beneficiation underwent physical, chemical, and mineralogical characterization. For the evaluation of physical properties, tests were conducted for specific mass by Le Chatelier flask, Blaine specific surface area, and laser granulometry. Among the chemical and mineralogical analyzes, X-ray Fluorescence (XRF) and X-ray Diffraction (XRD) tests were performed. In the initial phase, tests were conducted according to Brazilian standards NBR 5751:2015 and NBR 5752:2014 to assess the pozzolanic activity of textile sludge in its raw and beneficiated states, respectively, demonstrating that only the latter met pozzolanic requirements. In a second stage, dry concretes were investigated with 0, 5, 10, and 15% substitution of cement by ground sludge ash. The incorporation of CLT in dry concrete resulted in a reduction in water absorption values and void indices and an increase in compressive strength values, with emphasis on concrete with 10% substitution.

**KEY WORDS:** Textile sludge, Sludge ash, Pozzolanicity, Dry concrete, Sustainability.

### INTRODUÇÃO

A indústria desempenha um papel fundamental nas economias contemporâneas, sendo um catalisador essencial para o desenvolvimento. O rápido processo de urbanização e industrialização tem sido acompanhado por um significativo aumento na construção de infraestruturas, entretanto, essa expansão vem também associada a uma série de desafios ambientais (Goyal et al., 2019). A geração de resíduos sólidos industriais tem se destacado como um dos principais dilemas enfrentados pela sociedade global.



No contexto brasileiro, o Arranjo Produtivo Local de Confecções do Agreste Pernambucano (APLCAPE) emerge como o segundo maior polo têxtil do país, empregando cerca de 100 mil pessoas e produzindo aproximadamente 900 milhões de peças anualmente, ficando atrás apenas do polo de São Paulo. A quantidade de lodo gerado por lavanderias está diretamente relacionada à eficácia dos sistemas de tratamento de efluentes, sejam eles de natureza físico-química ou biológica (Souto, 2017).

Entretanto, as indústrias têxteis destacam-se como grandes consumidoras de água e emissores de efluentes em larga escala para o meio ambiente, a menos que tais efluentes sejam devidamente tratados. O lodo resultante desses processos de tratamento de águas residuais torna-se um subproduto inevitável e muitas vezes perigoso, frequentemente contaminado com metais pesados oriundos de corantes, solventes, surfactantes e outros produtos químicos (Karthik e Rathinamoorthy, 2015). Além disso, é importante ressaltar que a produção de compósitos cimentícios, especialmente o cimento Portland, contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa, representando entre 5% e 10% do total (Ahmed et al., 2021), o que gera uma série de impactos ambientais e aumento nas emissões de CO<sub>2</sub>. Diante desse cenário, destaca-se a necessidade premente de explorar novos materiais cimentícios suplementares (Torres et al., 2020).

Nesse contexto, o lodo têxtil desponta como um material potencialmente reutilizável na indústria da construção civil, suscitando interesse em explorar sua pozolanicidade. Este estudo visa, após caracterizar o LOTex *in natura* e a cinza resultante do processo de beneficiamento em termos de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas, avaliar as propriedades pozolânicas dessas amostras, por meio de métodos padronizados, e avaliar sua eficácia como substituto parcial do cimento Portland em concreto seco.

## OBJETIVOS

Tendo em vista que o Lodo Têxtil apresenta características que o torna reutilizável na construção civil, este trabalho buscou avaliar a pozolanicidade desse resíduo, tanto em seu estado bruto como submetido a um beneficiamento por moagem e por calcinação, através de métodos normatizados para incorporá-lo como substituto parcial do cimento em concreto seco.

Com isso, mais especificamente objetiva-se: caracterizar o LOTex *in natura* e a cinza proveniente de seu beneficiamento em relação às suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas; avaliar as propriedades pozolânicas utilizando métodos normatizados e reconhecidos; e incorporar o material em concreto seco substituindo parcialmente o cimento Portland.

## METODOLOGIA

### Materiais

#### Cinza de lodo têxtil (CLT)

O Lodo Têxtil (LOTex) utilizado nesta pesquisa, proveniente da Lavanderia Nossa Senhora do Carmo em Caruaru, Pernambuco, passou por um processo inicial de secagem a 100°C, durante 24 horas. Para possibilitar ensaios de caracterização química e mineralógica foi necessário destorroar o material para obtê-lo no estado de pó. Para isso, foi realizado uma moagem inicial rápida de amostras de 1kg por vez, durante 2 minutos, em moinho de bolas, com intuito apenas de destorroar o material. Por fim, o lodo têxtil foi passado em peneira com abertura igual a 0,6 mm, e o material passante foi armazenado em sacos plásticos para uso nas etapas seguintes.

Foi realizada uma calcinação a 600°C em mufla, com 3 horas de permanência no patamar de queima e com taxa de aquecimento de 10°C/min, para remover a água quimicamente ligada, conferir ao material um estado amorfo e, conseqüentemente, aumentar sua reatividade. A escolha da temperatura baseou-se em estudo anterior (Fernandes, 2023). Ainda com o intuito de aumentar sua reatividade, a cinza do lodo (CLT) resultante foi moída a úmido em moinho de bolas para atingir uma superfície específica de aproximadamente 1200 m<sup>2</sup>/kg. O LOTex *in natura* e a CLT moída foram caracterizados quanto a propriedades físicas (massa específica, finura Blaine e granulometria a laser), químicas (fluorescência de raios-X - FRX) e mineralógicas (difração de raios-X - DRX).

#### Outros materiais



Para a etapa de investigação da pozolanicidade foi utilizado hidróxido de cálcio P.A., com teor mínimo de 95% por se tratar de material com elevado grau de pureza, com massa específica de 2,24 g/cm<sup>3</sup>. Um cimento Portland composto com filer, CP II-F 40, com massa específica de 3,1 g/cm<sup>3</sup> e finura Blaine de 444,6 m<sup>2</sup>/kg. O agregado miúdo usado nesta etapa não foi areia normal padronizada como é recomendado por norma, em virtude de questões técnico-financeiras, foi uma areia quartzosa de módulo de finura 2,25, dimensão máxima característica de 2,4 mm e massa específica de 2,47 g/cm<sup>3</sup>. Um aditivo superplastificante, Sika Viscocrete 100HE, também foi utilizado nos ensaios de pozolanicidade para melhorar o adensamento de algumas amostras sem variar a relação água/aglomerante.

Na etapa de elaboração do concreto seco, foi utilizado um cimento Portland de alta resistência inicial, CP V-ARI, com massa específica de 3,1 g/cm<sup>3</sup> e finura Blaine de 442,2 m<sup>2</sup>/kg. Foram empregados dois agregados miúdos e um agregado graúdo. Uma areia com massa específica de 2,63 g/cm<sup>3</sup> e absorção de água de 0,8%, pó de pedra com massa específica de 2,62 g/cm<sup>3</sup> e absorção de água de 0,4%. A areia e o pó de pedra apresentaram módulos de finura de 2,25 e 2,73, respectivamente. Enquanto que a pedra britada utilizada apresentou 2,74 g/cm<sup>3</sup> de massa específica e 0,8% de absorção de água.

### Caracterização dos materiais anidros

Para as análises físicas das amostras investigadas, do cimento Portland e do hidróxido de cálcio foram determinadas a massa específica por meio do frasco de Le Chatelier e a superfície específica pelo método do permeabilímetro de Blaine. Também foi realizada a espectrometria de difração a laser, com um equipamento de modelo Mastersizer 2000 da Malvern Instruments, que é um ensaio com o objetivo de detalhar a distribuição granulométrica das amostras objeto de estudo.

Para melhor compreender a composição do lodo e da cinza, também foram realizadas análises químicas e mineralógicas por meio da fluorescência de raios-X (FRX) e difração de raios-X (DRX). O FRX foi obtido utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios-X modelo Rigaku modelo ZSX Primus II. O DRX foi realizado em um difratômetro da Bruker de modelo D2 Phaser. Os parâmetros do ensaio foram: intervalo de varredura (2θ) de 5 a 80°, passo angular = 0,05°, tempo por passo de 0,575 segundos, intensidade da corrente de 10 mA, tensão do equipamento de 30 kV. O tubo do feixe era de cobre, emitindo um comprimento de onda de 1,54 Å.

## **Métodos**

### Investigação da pozolanicidade

#### *a) Atividade pozolânica com cal – NBR 5751:2015*

O estudo seguiu os procedimentos estabelecidos pela NBR 5751 (ABNT, 2015) para determinar a atividade pozolânica com hidróxido de cálcio. O procedimento envolve a confecção de argamassa contendo o material pozolânico, no caso deste estudo as amostras de lodo, o hidróxido de cálcio, a areia e a água, conforme especificado pela norma. Foram moldados três corpos de prova cilíndricos de dimensões 5x10 cm, utilizando 104g de hidróxido de cálcio e calculando a quantidade de material pozolânico equivalente ao dobro do volume de hidróxido de cálcio, como descrito na equação 1.

$$m = 2 \times \frac{d_{poz}}{d_{cal}} \times 104 \quad \text{equação (1)}$$

A quantidade de água é determinada pelo ensaio da mesa de consistência, descrito pela NBR 7215 (ABNT, 2019), no qual a norma recomenda utilizar água até obter um espalhamento de 225 ± 5 mm. Porém, seguir essa recomendação normativa exigiria variar a relação água/aglomerante, o que, segundo alguns autores, não é positivo em termos científicos, pois a quantidade de água passaria a influenciar nos valores de resistência mais do que a reação pozolânica (Hoppe Filho, *et al.*, 2017). A relação água/ligante foi fixada em 0,65, valor utilizado com base na experiência do Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes da UFPE, para evitar interferências nos resultados da análise (Torres *et al.*, 2020). As misturas foram moldadas e curadas de acordo com as especificações da norma. A Tabela 1 traz os quantitativos dos materiais utilizados nos traços.

**Tabela 1. Proporções dos materiais para confecção das argamassas do ensaio de atividade pozolânica com cal.**

**Fonte: O autor, 2023.**

Código da amostra	Ca(OH) <sub>2</sub> (g)	Areia (g)	Amostra (g)	Água (g)
LOTex in	2,16	104,00	936,00	200,57

CLT	2,65	104,00	936,00	246,07
-----	------	--------	--------	--------

A cura das argamassas foi realizada nos próprios moldes metálicos de tampas inferiores e superiores rosqueáveis, durante 7 dias, sendo que no primeiro dia foi curada em temperatura ambiente ( $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ) e nos outros 6 dias em estufa a  $55 \pm 2^\circ\text{C}$ . Depois foram rompidos em prensa elétrica do tipo rompido em uma prensa elétrica do tipo AGV-X Shimadzu com capacidade para 300kN. Após o ensaio, para que o material seja considerado pozolânico, deve atender aos requisitos físicos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014), com uma resistência mínima de 6 MPa de acordo com a NBR 5751:2015.

b) *Índice de atividade pozolânica com cimento Portland – NBR 5752:2014*

A avaliação da pozolanicidade também foi realizada conforme a NBR 5752 (ABNT, 2014), que analisa a atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias. O ensaio envolve a preparação de uma argamassa de referência (argamassa A) e uma com 25% de substituição do cimento pelo material pozolânico (argamassa B). As quantidades de água e areia são fixas e a dosagem para 6 corpos de prova cilíndricos de dimensões 5x10 cm está disposta na Tabela 2.

**Tabela 2. Dosagem em massa para moldagem de seis corpos de prova cilíndricos. Fonte: NBR 5752, 2014.**

Material	Massa (g)	
	Argamassa A	Argamassa B
Cimento Portland	624 ± 0,4	468 ± 0,4
Material Pozolânico	-	156 ± 0,2
Areia normal	1872	1872
Água	300 ± 0,2	300 ± 0,2
Aditivo superplastificante	-	Quando necessário

O procedimento de moldagem e mistura dos materiais seguiu o preconizado pela NBR 7215 (ABNT, 2019). Os corpos de prova foram curados durante 28 dias, inicialmente nos moldes em câmara úmida por aproximadamente 24 horas e, em seguida, foram desmoldados e submersos em uma solução saturada com cal durante os 27 dias restantes. Ao final deste período os corpos de prova foram rompidos à compressão.

O índice de desempenho das pozolanas com o cimento Portland (*I<sub>cimento</sub>*) foi calculado pela razão entre a resistência média dos corpos de prova cilíndricos moldados com a argamassa contendo a substituição de 25% de material pozolânico (*f<sub>cB</sub>*) e a resistência média da argamassa de referência (*f<sub>cA</sub>*), conforme equação 2.

$$I_{cimento} (\%) = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100 \quad \text{equação (2)}$$

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), o índice de desempenho (*I<sub>cimento</sub>*) deve ser no mínimo 90% para que o material seja considerado pozolânico.

Dosagem e moldagem dos corpos de prova de concreto seco

O traço de referência foi obtido a partir da obtenção de uma curva granulométrica ponderada da mistura de agregados, variando as quantidades percentuais dos mesmos até que estivesse dentro dos limites de arranjo granulométrico considerado satisfatório para produção das peças de concreto seco, estabelecidos por Fernandes (2018). A Figura 1 traz os limites estabelecidos por este autor juntamente com a curva do presente estudo.

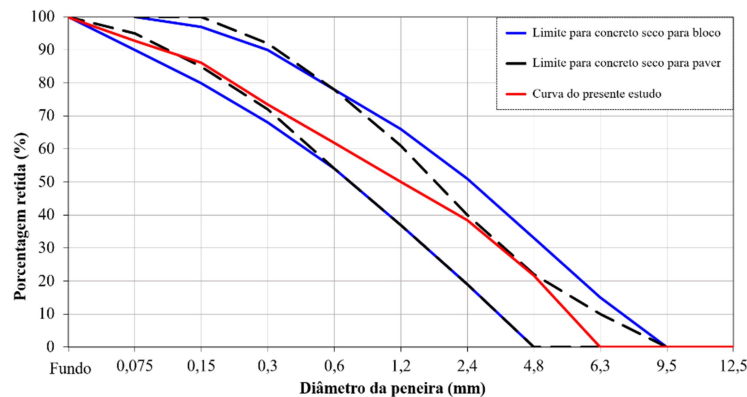


Figura 1. Curva granulométrica ponderada dos agregados e limites de Fernandes (2018). Fonte: O autor, 2023.

A relação água/cimento considerada foi de 0,42, que é utilizada comercialmente pela maioria das empresas no mercado da região e por uma empresa parceira do projeto de pesquisa, fabricante de pré-moldados de concreto. A porcentagem de substituição está apresentada no código da mistura. Os códigos são do tipo CIMXCLT-Y, que representa uma substituição de Y% de cimento por cinza de lodo têxtil. Os traços utilizados e o consumo dos aglomerantes são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Proporções de materiais das misturas de concreto seco. Fonte: O autor, 2023.

Código	Traço (cim:a:b:pp:clt:a/c)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de CLT (kg/m <sup>3</sup> )
REF	1:1,74:2,46:1,40:0:0,42	335,43	0,00
CIM95CLT5	<b>0,95</b> :1,74:2,46:1,40: <b>0,05</b> :0,42	335,10	16,76
CIM 90CLT10	<b>0,90</b> :1,74:2,46:1,40: <b>0,10</b> :0,42	334,78	33,48
CIM85CLT15	<b>0,85</b> :1,74:2,46:1,40: <b>0,15</b> :0,42	334,40	50,17

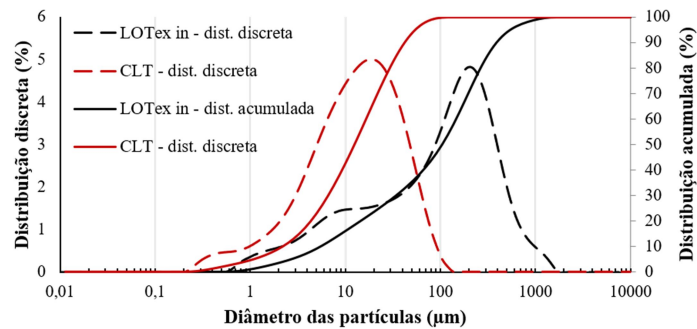
Legenda: cim = cimento; a = areia; b = brita; pp = pó de pedra; clt = cinza de lodo têxtil; a/c = relação água/cimento.

No laboratório, apesar da dificuldade em reproduzir as condições vibroprensadas de fábrica e alcançar resistência à compressão semelhante, a padronização do método para todas as misturas permite resultados coerentes. Os materiais secos foram misturados em misturador mecânico por 5 minutos, moldando-se 8 corpos de prova cilíndricos (5x10cm) para cada amostra e idade (7 e 28 dias), totalizando 64 corpos de prova. Inicialmente, as misturas foram compactadas manualmente em 3 camadas com 20 golpes cada, usando um cilindro de metal de 46 mm de diâmetro e 6 kg. Posteriormente, uma adaptação na prensa elétrica foi realizada para adensar uma quarta camada com carga controlada de aproximadamente 13 Mpa por 60s. Os corpos de prova foram submersos em água para cura até os ensaios de absorção, índice de vazios e resistência à compressão (idades de 7 e 28 dias).

## RESULTADOS

### Caracterização física, química e mineralógica

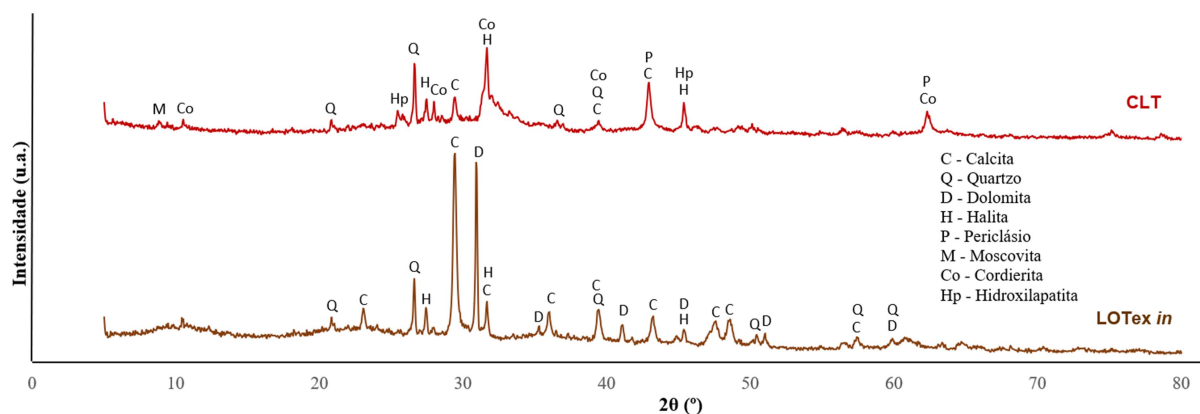
Os valores obtidos para massa específica e superfície específica do lodo têxtil *in natura*, apenas destorroado, foram de 2,16 g/cm<sup>3</sup> e 347,83 m<sup>2</sup>/kg, respectivamente. Ao passo que a cinza de lodo têxtil moída apresentou massa específica de 2,65 g/cm<sup>3</sup> com uma superfície específica de 1244,60 m<sup>2</sup>/kg. A Figura 2 apresenta a curvas de distribuição granulométrica discreta e acumulada das amostras obtidas por granulometria a laser.



**Figura 2. Distribuições granulométricas discreta e acumulada das amostras estudadas. Fonte: O autor, 2023.**

Quanto às análises químicas, foi obtida a composição química em óxidos por FRX. Verificou-se que tanto o LOTex quanto a CLT consistem predominantemente em óxido de cálcio (CaO), óxido de silício (SiO<sub>2</sub>), óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxido de magnésio (MgO). A elevada quantidade de cálcio e magnésio ocorre em virtude da adição de cales (que podem ser cálcicas, dolomíticas ou magnesianas) no tratamento de efluentes para correção do pH. A presença de alumínio é justificada pelo fato de as lavanderias utilizarem sulfato de alumínio ou polícloro de alumínio como principal coagulante no processo. E a presença de silício, por sua vez, é atribuída aos procedimentos de estonagem, em que utilizam granulados abrasivos para desgastar as peças e preparar os tecidos para receberem os corantes e alvejantes (Souto, 2017).

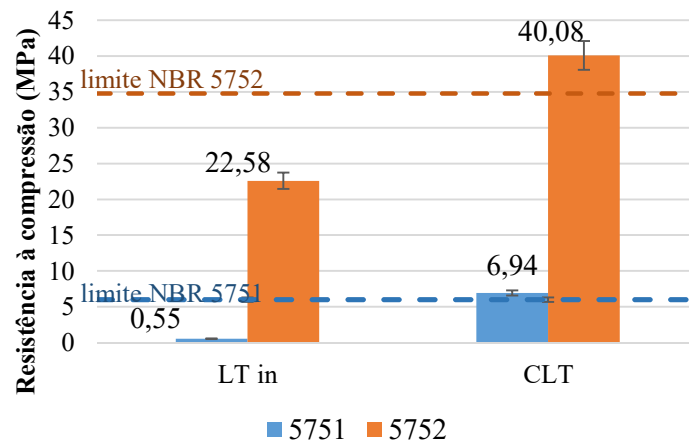
Durante as análises mineralógicas, foram encontrados no material *in natura* picos de calcita (CaCO<sub>3</sub>), quartzo (SiO<sub>2</sub>), dolomita (Ca.Mg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) e halita (NaCl). Enquanto que na cinza, percebeu-se que não houve a presença de dolomita, em virtude de sua decomposição térmica, dando origem ao periclásio (MgO). Além disso, em virtude do provável processo de sinterização do material em temperatura elevada, observou-se a presença de moscovita (KAl<sub>2</sub>(AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>2</sub>). E com os possíveis metamorfismos térmicos, foram observadas fases como cordierita (Mg<sub>2</sub>Al<sub>4</sub>Si<sub>5</sub>O<sub>18</sub>) e hidroxilapatita (Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH)<sub>2</sub>). A Figura 3 traz os difratogramas das amostras.



**Figura 3. Difratogramas do LOTex in natura e da cinza de lodo. Fonte: O autor, 2023.**

### Investigação da pozolanicidade

A Figura 4 mostra os resultados de resistência à compressão para os dois ensaios de avaliação da pozolanicidade normatizados realizados neste estudo: avaliação da atividade pozolânica com hidróxido de cálcio aos 7 dias e determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias. Essa figura também apresenta os requisitos mínimos exigidos para NBR 5751 (atingir ao menos a resistência à compressão de 6MPa) e para NBR 5752 (atingir pelo menos 90% da resistência de referência, que foi 38,63MPa, sendo, portanto, 34,76 MPa).



**Figura 4. Resistência à compressão para misturas com cal aos 7 dias e com cimento aos 28 dias. Fonte: O autor, 2023.**

Foi possível perceber que a amostra de LOTex *in natura* tem reatividade muito baixa, pois não atingiu o requisito mínimo de nenhum dos ensaios de resistência à compressão. Enquanto, por outro lado, a CLT se mostrou com bom potencial pozolânico, superando os limites mínimos exigidos pelas normas NBR 5751 e NBR 5752 em 3,75%, e 15,7% respectivamente. Assim, enquanto a amostra bruta não é indicada para uso como adição de cimento, o material beneficiado pode ser utilizado como material pozolânico.

Ao analisar os resultados, percebe-se que tanto a calcinação como a moagem demonstraram realmente ser eficazes para potencializar a atividade pozolânica do material, pois a cinza apresentou resistência mecânica muito superior à amostra de LOTex *in natura* para ambos os ensaios de avaliação da pozolanicidade. O papel positivo da calcinação está exatamente no fato de que ela provoca a remoção completa da água quimicamente ligada, resultando na perda de hidroxilas e na formação de uma estrutura amorfa colapsada e desarranjada, o que aumenta a reatividade do material calcinado (Mohammed, 2017). Ademais, a contribuição da moagem para o aumento da reatividade também era esperada, tendo em vista que é essencial que a pozolana apresente determinada finura para que reaja quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperatura ambiente. Segundo estudiosos, quanto mais finamente moído o material com potencial pozolânico, maior tende a ser a sua reatividade (Neville e Cremonini, 2016).

Embora essas considerações são válidas para ambos os ensaios de resistência aqui mencionados, é importante perceber que enquanto no ensaio de argamassas com hidróxido de cálcio têm-se as maiores contribuições para resistência na própria reação pozolânica, no ensaio de argamassas com cimento também há a contribuição do efeito filer. Isso ocorre porque nas misturas com hidróxido de cálcio, este é o mais fino no sistema, enquanto nas misturas da NBR 5752, a CLT passa a ser o material mais fino, de tal forma que elas que irão proporcionar o efeito de “preenchimento de vazios” entre as partículas do cimento e o processo de nucleação heterogênea (Snellings e Scrivener, 2015). Fatos que também contribuem para o aumento da resistência, justificando o valor de 15,7% mais alto do que o requisito mínimo.

Por fim, outro ponto importante a ser discutido nesta etapa, é o fato de a amostra *in natura* apresentar valores de resistência muito baixos em ambos os testes. Isto era esperado em virtude dessa amostra possuir elevado teor de matéria orgânica, que, como já relatado na literatura, atrapalha as reações de hidratação. Os orgânicos podem ser absorvidos pela superfície tanto dos grãos anidros como dos produtos de hidratação, formando uma camada protetora temporária que atrasa a hidratação (Goyal *et al.*, 2019).

#### Concreto Seco

##### a) Resistência à compressão

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos para resistência à compressão média de cada uma das amostras de concreto seco, para as idades de 7 e 28 dias.

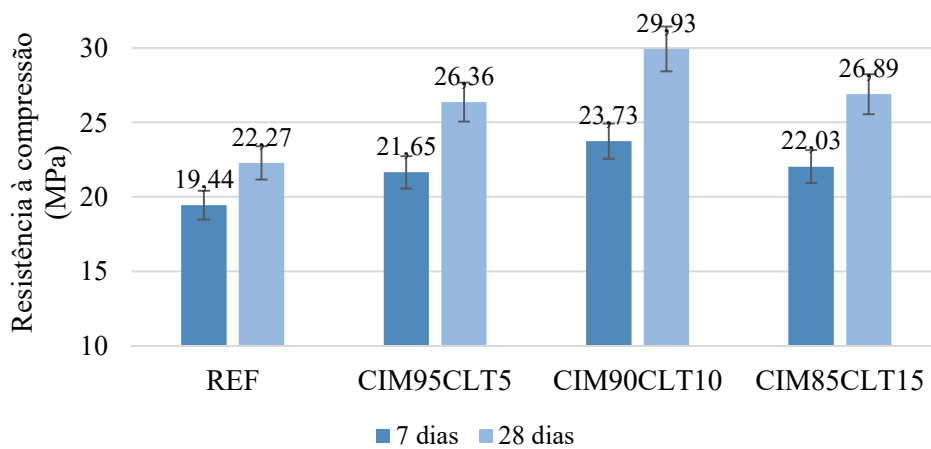


Figura 5. Valores de resistência à compressão (MPa) dos concretos secos estudados. Fonte: O autor, 2024.

Todos os concretos deste estudo demonstraram aumento progressivo na resistência com o tempo de cura, evidenciando a contínua hidratação dos materiais. A presença de cinzas de lodo têxtil resultou em resistências superiores em comparação com a amostra de referência em ambas as idades. O concreto seco com 10% de substituição apresentou os maiores valores de resistência à compressão, com aumentos percentuais de 22,07% e 34,40% para 7 e 28 dias, respectivamente. Os valores comprovam que a incorporação de CLT melhorou o arranjo de partículas. Além de contribuírem com sua reatividade pozolânica, as partículas de rejeito provavelmente atuaram como filer, preenchendo os vazios deixados pelas demais partículas da mistura e atuando como pontos de nucleação para hidratação do cimento, comprovando o que já foi discutido nos ensaios de avaliação da pozolanicidade.

b) Absorção e Índice de vazios

A Figura 6 contém os valores percentuais de absorção de água e índices de vazios para as amostras analisadas. Percebe-se claramente a partir dos dados que esses parâmetros são diretamente proporcionais, e que a amostra com 10% de cinza de lodo têxtil apresenta valores inferiores para as duas propriedades em relação as demais.

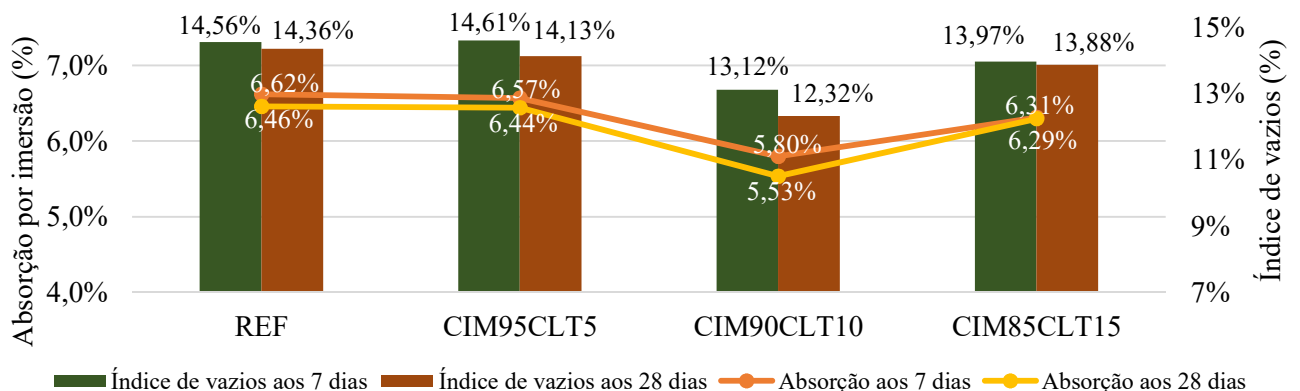


Figura 6. Valores de absorção e índices de vazios dos concretos secos estudados. Fonte: O autor, 2024.

Sabe-se da literatura que a absorção de água em concreto seco, diretamente relacionada à sua porosidade, reduz consideravelmente o seu desempenho (Fernandes, 2018). Diante disso, o melhor comportamento foi observado no concreto seco com 10% de CLT, pois demonstrou reduções significativas, em comparação com o concreto de referência, na absorção de água (12,39% e 14,40% aos 7 e 28 dias, respectivamente) e no índice de vazios (9,89% e 14,21% aos 7 e 28 dias, respectivamente). Como quanto maior o percentual de vazios, maior a capacidade do concreto de reter líquido em seu interior, era de se esperar que o comportamento das duas grandezas fosse similar.





Contudo, considerando que o bom empacotamento de partículas leva a um melhor preenchimento dos vazios na mistura, o que aumenta a eficiência do uso de ligantes e reduz a porosidade intergranular, a incorporação da cinza de lodo têxtil na mistura em substituição parcial ao cimento contribui para a redução da absorção e do índice de vazios, conforme mostrados nos resultados.

## CONCLUSÕES

A partir da realização do estudo, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- Enquanto o lodo têxtil in natura apresentou baixa reatividade pozolânica, não atendendo aos requisitos mínimos para os ensaios realizados, a cinza de lodo têxtil mostrou bom potencial pozolânico. Isso confirmou a eficácia do beneficiamento por moagem e calcinação no aumento da reatividade do material;
- A adição de cinzas de lodo têxtil ao concreto resultou em resistências superiores, destacando-se o concreto com 10% de substituição.
- A absorção de água e o índice de vazios foram significativamente reduzidos no concreto com 10% de cinza de lodo têxtil em comparação com a amostra de referência.
- O bom empacotamento de partículas e a redução da porosidade intergranular, proporcionados pela incorporação de cinza de lodo têxtil, contribuíram para a melhoria do desempenho do concreto, evidenciada pela redução da absorção de água e do índice de vazios e o aumento da resistência mecânica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT, NBR 12653. Materiais pozolânicos - Requisitos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 5, 2014.
2. ABNT, NBR 5751. Materiais pozolânicos — Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias Pozzolanic. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 4, 2015.
3. ABNT, NBR 5752. Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias Pozzolanic. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 4, 2014.
4. ABNT, NBR 7215. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 8, 2019.
5. Ahmed, S.; Alhoubi, Y.; Elmesalami, N.; Yehia, S.; Abed, F. Effect of recycled aggregates and treated wastewater on concrete subjected to different exposure conditions. **Construct. Build. Mater.** 266 (2021), 120930. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120930>.
6. FERNANDES, I.D. **Blocos e Pavers - Produção e Controle de Qualidade**. 8. ed. Ribeirão Preto: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda, 2018.
7. FERNANDES, I.V. **Avaliação da Pozolanicidade de Lodo Proveniente de Estação de Tratamento de Efluentes da Indústria Têxtil para uso como Material Cimentício Suplementar**. 2023. 141 f. Universidade Federal de Pernambuco, 2023.
8. GOYAL, S et al. Utilization of Textile Sludge in Cement Mortar and Paste. **CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS**, v. 214, p. 169–177, 2019.
9. HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; QUARCIONI, V. A.; MEDEIROS, M. H. F. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-x (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 3, 2017.
10. Karthik, T.; Rathinamoorthy, R. Recycling and reuse of textile effluent sludge. **Environmental Implications of Recycling and Recycled Products**, pp. 213–258, Springer, Berlin, Germany, 2015.
11. 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.
12. NEVILLE, A. M.; CREMONINI, R. **Propriedades do Concreto**. 5ª edição ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
13. SNELLINGS, R; SCRIVENER, K. L. Rapid screening tests for supplementary cementitious materials: Past and future. **Materials and Structures**, 2015.
14. 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. Universidade Federal Rural de



Pernambuco, 2017.

15. 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.