



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

IGOR VIEIRA FERNANDES

**AVALIAÇÃO DA POZOLANICIDADE DO LODO PROVENIENTE DE ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA TÊXTIL PARA USO COMO
MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR**

Recife

2023

IGOR VIEIRA FERNANDES

**AVALIAÇÃO DA POZOLANICIDADE DO LODO PROVENIENTE DE ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA TÊXTIL PARA USO COMO
MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção de título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto.

Coorientador: Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda.

Recife

2023

Catálogo na fonte:
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

F363a Fernandes, Igor Vieira.
Avaliação da pozolanicidade do lodo proveniente de estação de tratamento de efluentes da indústria têxtil para uso como material cimentício suplementar / Igor Vieira Fernandes. – 2023.
141 f.: il., fig., tab., abrev. e siglas.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto.
Coorientador: Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2023.
Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia civil. 2. Lodo têxtil. 3. Cinzas de lodo. 4. Pozolanicidade. 5. Material cimentício suplementar. 6. Sustentabilidade. I. Melo Neto, Antônio Acácio de (Orientador). II. Holanda, Romildo Morant de (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2023-78

IGOR VIEIRA FERNANDES

**AVALIAÇÃO DA POZOLANICIDADE DO LODO PROVENIENTE DE ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA TÊXTIL PARA USO COMO
MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas.

Aprovada em: 21/03/2023.

BANCA EXAMINADORA

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Mauro Mitsuuchi Tashima (Examinador Externo)
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Participação por videoconferência
Profa. Dra. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Campina Grande

Participação por videoconferência
Profa. Dra. Aline Figueirêdo da Nóbrega (Examinadora externa)
Universidade Federal da Paraíba

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus, por todas as oportunidades concedidas nesta existência.

Aos meus pais, Ivanildo Fernandes e Maria da Conceição, por todo incentivo e por me proporcionarem tudo de melhor em todos os aspectos da vida. À minha irmã, Ísis Fernandes, pelo apoio, compreensão e parceria na vivência do dia a dia.

À minha namorada, Beatriz Lira, por todo apoio e carinho em todos os momentos, além de sua compreensão nos instantes em que necessitei estar distante.

Ao professor Antônio Acácio, pela dedicação ao seu trabalho, pela presteza de sempre, boa vontade e preocupação para com todos os seus orientandos.

Agradeço aos meus amigos Marcos e Hérculys, companheiros de mestrado, pela parceria nas tarefas do cotidiano e a convivência diária.

Ao meu amigo e irmão Eduardo Aguiar, pela parceria e o apoio de sempre.

Aos meus colegas do LabTag e da UFPE, Nathália, Camilla, Sofia, Paulo Neto, Alisson, Tacila, Danilo e Silvano, pelo convívio e experiências compartilhadas. E, em especial, a Victor Estolano e Priscilla Basto, que sempre foram extremamente solícitos em transmitir seus conhecimentos, de tal forma que contribuíram significativamente na realização deste trabalho com importantes esclarecimentos.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco - FACEPE, pela concessão de recursos de auxílio à pesquisa e pela bolsa concedida.

Agradeço aos demais colegas de outros laboratórios da UFPE que contribuíram de alguma forma com o nosso projeto, como Filipe Marinho, do Laboratório de Tecnologia Mineral do Departamento de Engenharia de Minas, e Mariana, do Laboratório de Petroquímica (LPQ) do Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia (LITPEG), além dos técnicos do Núcleo de Estudos Geoquímicos do Laboratório de Isótopos Estáveis (NEG-LABISE).

À Lavanderia Nossa Senhora do Carmo, pela boa disposição em ceder o lodo têxtil, objeto de estudo dessa pesquisa, e, por meio de Jacqueline, conceder explicações primordiais sobre todo o processo de beneficiamento do jeans e tratamento do efluente realizado na empresa.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil que estiveram presentes na minha formação acadêmica.

Por fim, agradeço a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

O impacto ambiental causado pelo APL da Confecção do Estado de Pernambuco na geração de resíduos sólidos é a problemática principal de motivação deste estudo. A maioria das lavanderias situadas no APL não dão destino correto aos resíduos gerados, sendo o LOTex, comumente despejado em aterros sanitários sem qualquer tipo de tratamento. Esta pesquisa tem como objetivo a avaliação da pozolanicidade do LOTex para sua utilização em substituição parcial ao cimento. O lodo foi coletado no APL de Pernambuco e submetido ao beneficiamento por meio de 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. Para análise da área específica, as amostras *in natura* e calcinadas foram submetidas a moagem e classificadas de acordo com a faixa de finura: sem moer, 600, 900 e 1200 m²/kg. De acordo com os resultados, apenas as amostras calcinadas a 600°C com finuras Blaine de 900 m²/kg e 1200 m²/kg obedeceram aos requisitos mínimos de ambos os testes indiretos de compressão em argamassas (NBR 5751:2015 e NBR 5751:2014) para serem consideradas materiais pozolânicos. Além disso, observou-se que a resistência foi favorecida com a realização da calcinação e com o aumento da superfície específica das amostras. Corroborando com os resultados obtidos, os ensaios de DRX e ATG trazem a confirmação do aumento do consumo de hidróxido de cálcio (CH), o que caracteriza uma reação pozolânica. No ensaio de DRX, o aumento desse consumo é comprovado por meio do decréscimo da intensidade dos picos característicos do CH (18° e 24°2 θ) e a formação dos compostos hidratados. Na ATG observou-se o consumo do CH por meio da diminuição do pico no intervalo de 380 a 450°C, aproximadamente. De acordo com os resultados de DRX e ATG, o melhor desempenho foi obtido nas amostras calcinadas a 600°C. A partir da aplicação do coeficiente de Pearson observou-se que, no geral, foram obtidas correlações consideradas fortes entre os métodos. Dentro das limitações desta pesquisa, demonstra-se a viabilidade do LOTex, com tratamento térmico e moagem adequados, como um material alternativo para ser utilizado como adição ao cimento Portland.

Palavras-chave: iodo têxtil; cinzas de lodo; pozolanicidade; material cimentício suplementar; sustentabilidade.

ABSTRACT

The environmental impact caused by the APL of the Fabrication of the State of Pernambuco in the generation of solid waste is a main problem that motivated this study. Most laundries located in the APL do not correctly dispose of the waste generated, and Textile Sludge (TexSlud) is commonly dumped in landfills without any kind of treatment. This research aims to evaluate the pozzolanicity of TexSlud for its use in partial replacement of cement. The sludge was collected at the APL in Pernambuco and submitted to processing through grinding and calcination. Part of the material was not submitted to calcination, being denominated as in natura, and another part was calcined at temperatures of 600, 700 and 800°C. For the analysis of the specific area, the fresh and calcined samples were subjected to grinding and classified according to the fineness range: unground, 600, 900 and 1200 m²/kg. According to the results, only the samples calcined at 600°C with Blaine finenesses of 900 m²/kg and 1200 m²/kg met the minimum requirements of both indirect compression tests in mortars (NBR 5751:2015 and NBR 5751:2014) for be considered pozzolanic materials. In addition, it was observed that the resistance was favored with the calcination and with the increase of the specific surface of the samples. Corroborating the results obtained, the XRD and TGA tests confirm the increase in calcium hydroxide (CH) consumption, which characterizes a pozzolanic reaction. In the XRD test, the increase in this consumption is evidenced by the decrease in the intensity of the characteristic CH peaks (18° and 24°2 θ) and the formation of hydrated compounds. In TGA, the consumption of CH is observed by means of the decrease of the peak in the interval from 380 to 450°C, approximately. According to the XRD and TGA results, the best performance was obtained in the samples calcined at 600°C. From the application of the Pearson coefficient, it is observed that, in general, the correlations of foram obtained are considered strong between the methods. Within the limitations of this search, the feasibility of TexSlud, heat treatment and proper methods, as an alternative material to be used as an addition to Portland cement, is demonstrated.

Keywords: textile sludge; sludge ashes; pozzolanicity; supplementary cementitious material; sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Processo de beneficiamento do Jeans.....	27
Figura 2 -	Processo de tratamento de efluentes e formação do lodo.....	29
Figura 3 -	Esquema do programa experimental.....	52
Figura 4 -	Coleta e armazenamento do LOTex: 1) estoque de sacos plásticos com lodo na lavanderia; 2) exposição ao ar livre, em lonas, para retirada de excesso de umidade; 3) armazenamento, após secagem em estufa, em recipientes.....	53
Figura 5 -	Curvas de distribuição granulométrica discreta e acumulada do lodo têxtil in natura destorroado.....	54
Figura 6 -	Difratograma do lodo têxtil in natura destorroado.....	56
Figura 7 -	Análise termogravimétrica do Lodo têxtil in natura destorroado...	57
Figura 8 -	Calcinação do LOTex a 600, 700 e 800°C por 3 horas no forno...	58
Figura 9 -	Aparência das amostras destorroadas in natura e calcinadas.....	58
Figura 10 -	Moinho de bolas (A), corpos moedores utilizados (B) e inserção destes no moinho durante sua preparação (C).....	59
Figura 11 -	Fluxograma esquemático do beneficiamento do Lodo têxtil.....	60
Figura 12 -	Difratograma do hidróxido de cálcio P.A.....	63
Figura 13 -	Distribuição granulométrica discreta e acumulada do hidróxido de cálcio P.A.....	63
Figura 14 -	Distribuição granulométrica discreta e acumulada do agregado miúdo.....	64
Figura 15 -	Determinação da massa específica do LOTex utilizando o frasco de Le Chatelier.....	67
Figura 16 -	Permeabilímetro de Blaine.....	69
Figura 17 -	Granulômetro a laser Mastersizer 2000 utilizado neste trabalho..	71
Figura 18 -	Amostra sendo inserida no difratômetro D2 Phaser da Bruker.....	73
Figura 19 -	Ensaio de consistência e moldagem dos corpos de prova.....	77
Figura 20 -	Dessecador (a) e estufa (b) a 55°C com pastas de hidróxido de cálcio e lodo têxtil.....	81
Figura 21 -	Container de nitrogênio líquido utilizado para interromper a hidratação (a) e refrigerador com temperatura de -30° C (b).....	82

Figura 22 - Liofilizador L101 da Liotop utilizado na pesquisa.....	83
Figura 23 - Valores de massa específica do LOTex in natura e das cinzas....	87
Figura 24 - Distribuições granulométricas discretas (a) e acumuladas (b) das amostras de LOTex in natura.....	90
Figura 25 - Distribuições granulométricas discretas (a) e acumuladas (b) das amostras calcinadas a 600°C.....	90
Figura 26 - Distribuições granulométricas discretas (a) e acumuladas (b) das amostras calcinadas a 700°C.....	91
Figura 27 - Distribuições granulométricas discretas (a) e acumuladas (b) das amostras calcinadas a 800°C.....	91
Figura 28 - Termogravimetria (A) e Termogravimetria Derivada (B) do LOTex in natura e das cinzas de lodo.....	97
Figura 29 - Difrátogramas do lodo têxtil in natura e das cinzas.....	99
Figura 30 - Resistência à Compressão (MPa) aos 7 dias das argamassas de LOTex in natura e cinzas para as várias faixas de finura Blaine avaliadas.....	101
Figura 31 - Correlação entre a Resistência à compressão (MPa) da NBR 5751 e a superfície específica (m ² /kg) do LOTex in natura e das cinzas.....	103
Figura 32 - Resistência à Compressão (MPa) aos 28 dias das argamassas de referência, LOTex in natura e cinzas para as várias faixas de finura Blaine avaliadas.....	104
Figura 33 - Correlação entre a Resistência à compressão (MPa) da NBR 5752 e a superfície específica (m ² /kg) do LOTex in natura e das cinzas.....	106
Figura 34 - Correlação entre as resistências à compressão da NBR 5752 modificada e NBR 5751 modificada.....	108
Figura 35 - Difrátogramas das pastas de hidróxido de cálcio p.a. com amostras de lodo têxtil aos 7 dias, com a/agl=0,65.....	109
Figura 36 - Comparação entre os picos de 18° e 34° do hidróxido de cálcio de pastas contendo as amostras de LOTex in natura e cinzas.....	111
Figura 37 - Correlação entre consumo de CH (%) por DRIP a 18° (a) e a 34° (b) e a resistência à compressão obtida pela NBR 5751	

	modificada (MPa).....	115
Figura 38 -	Correlação entre consumo de CH por RIR (%) e a resistência à compressão obtida pela NBR 5751 modificada (MPa).....	115
Figura 39 -	Curvas de ATG e DTG para a pasta pura de hidróxido de cálcio p.a.....	116
Figura 40 -	Curvas de DTG para as pastas de hidróxido de cálcio e amostras de CLT600.....	117
Figura 41 -	Curvas de DTG para as pastas de hidróxido de cálcio e amostras de CLT700.....	117
Figura 42 -	Curvas de DTG para as pastas de hidróxido de cálcio e amostras de CLT800.....	118
Figura 43 -	Curvas de DTG para as pastas de hidróxido de cálcio e amostras de LT in natura.....	118
Figura 44 -	Correlação entre consumo de CH (%) determinado por ATG e a resistência à compressão obtida conforme a NBR 5751 (MPa)....	120
Figura 45 -	Correlação entre consumo de CH (%) por ATG e por DRIP a 18° e a 34°.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Trabalhos acerca das aplicações de lodo têxtil na engenharia civil.....	30
Tabela 2 -	Composição química em óxidos de diferentes amostras de lodo têxtil.....	43
Tabela 3 -	Composição química em quantidade de óxidos (%) para o lodo têxtil em seu estado bruto.	54
Tabela 4 -	Composição química em quantidade de óxidos (%) do hidróxido de cálcio P.A.....	62
Tabela 5 -	Composição química do cimento CP II-F-40 obtida por FRX.....	64
Tabela 6 -	Características físicas e mecânicas do cimento CP II-F-40.....	65
Tabela 7 -	Dados técnicos do aditivo superplastificante SIKA VISCOCRETE 100HE.....	65
Tabela 8 -	Quantidade de material, em massa (g), utilizada em cada traço, com $a/agl = 0,65$	76
Tabela 9 -	Dosagem em massa para moldagem de seis corpos de prova cilíndricos - NBR 5752:2014.....	78
Tabela 10 -	Índices de consistência médios (I_c médio) obtidos na moldagem dos corpos de prova.....	79
Tabela 11 -	Quantidades de material, em massa (g), utilizadas nas pastas com cal.....	80
Tabela 12 -	Superfície específica e moagem adotada para cada uma das amostras estudadas.....	88
Tabela 13 -	Diâmetros característicos e percentuais retidos na peneira 45 μm para as amostras estudadas.....	92
Tabela 14 -	Composição química semiquantitativa em óxidos e perda ao fogo para o LOTex in natura e para as cinzas de lodo.....	94
Tabela 15 -	Índice de atividade pozolânica (IAP) para todas as amostras de LOTex in natura e cinzas.....	105
Tabela 16 -	Valores de intensidades de pico de hidróxido de cálcio, consumo de CH por RIR, decréscimo relativo da intensidade dos picos (DRIP) e consumo de CH a 18° e 34° por DRIP para	

	as pastas em estudo.....	112
Tabela 17 -	H ₂ O medido a partir da perda de massa, CH medido estequiometricamente e consumo de CH calculado para as pastas de CH-LOTex por ATG.....	119
Tabela 18 -	Valores dos coeficientes de correlação de Pearson aplicados entre os diferentes métodos de avaliação da atividade pozolânica.....	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
a/agl	Relação água/aglomerante
a/c	Relação água/cimento
APL	Arranjo Produtivo Local
ATG	Análise Termogravimétrica
CH	Hidróxido de cálcio
CLT	Cinza de lodo têxtil
CLT600	Cinza de lodo têxtil calcinado a 600°C
CLT600 – SM	Cinza de lodo têxtil calcinado a 600°C sem moer
CLT600 – B600	Cinza de lodo têxtil calcinado a 600°C com finura Blaine de 600 m ² /kg
CLT600 – B900	Cinza de lodo têxtil calcinado a 600°C com finura Blaine de 900 m ² /kg
CLT600 – B1200	Cinza de lodo têxtil calcinado a 600°C com finura Blaine de 1200 m ² /kg
CLT700	Cinza de lodo têxtil calcinado a 700°C
CLT700 - SM	Cinza de lodo têxtil calcinado a 700°C sem moer
CLT700 – B600	Cinza de lodo têxtil calcinado a 700°C com finura Blaine de 600 m ² /kg
CLT700 – B900	Cinza de lodo têxtil calcinado a 700°C com finura Blaine de 900 m ² /kg
CLT700 – B1200	Cinza de lodo têxtil calcinado a 700°C com finura Blaine de 1200 m ² /kg
CLT800	Cinza de lodo têxtil calcinado a 800°C
CLT800 - SM	Cinza de lodo têxtil calcinado a 800°C sem moer
CLT800 – B600	Cinza de lodo têxtil calcinado a 800°C com finura Blaine de 600 m ² /kg
CLT800 – B900	Cinza de lodo têxtil calcinado a 800°C com finura Blaine de 900 m ² /kg
CLT800 – B1200	Cinza de lodo têxtil calcinado a 800°C com finura Blaine de 1200 m ² /kg

C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DRIP	Decréscimo Relativo da Intensidade do Pico
DRX	Difração de raios-X
DTG	Termogravimetria Derivada
FRX	Fluorescência de raios-X
Ic médio	Índice de consistência médio
LOTex	Lodo têxtil
LT in nat	Lodo têxtil <i>in natura</i>
LT in nat – SM	Lodo têxtil <i>in natura</i> sem moer
LT in nat – B600	Lodo têxtil <i>in natura</i> com finura Blaine de 600 m ² /kg
LT in nat – B900	Lodo têxtil <i>in natura</i> com finura Blaine de 900 m ² /kg
LT in nat – B1200	Lodo têxtil <i>in natura</i> com finura Blaine de 1200 m ² /kg
NBR	Norma brasileira
NM	Norma Mercosul
PCLT600 – SM	Pasta de hidróxido de cálcio e cinza de lodo têxtil calcinado a 600°C sem moer
PCLT600 – B600	Pasta de hidróxido de cálcio e cinza de lodo têxtil calcinado a 600°C com finura Blaine de 600 m ² /kg
PCLT600 – B900	Pasta de hidróxido de cálcio e cinza de lodo têxtil calcinado a 600°C com finura Blaine de 900 m ² /kg
PCLT600 – B1200	Pasta de hidróxido de cálcio e cinza de lodo têxtil calcinado a 600°C com finura Blaine de 1200 m ² /kg
PCLT700 – SM	Pasta de hidróxido de cálcio e cinza de lodo têxtil calcinado a 700°C sem moer
PCLT700 – B600	Pasta de hidróxido de cálcio e cinza de lodo têxtil calcinado a 700°C com finura Blaine de 600 m ² /kg
PCLT700 – B900	Pasta de hidróxido de cálcio e cinza de lodo têxtil calcinado a 700°C com finura Blaine de 900 m ² /kg
PCLT700 – B1200	Pasta de hidróxido de cálcio e cinza de lodo têxtil calcinado a 700°C com finura Blaine de 1200 m ² /kg
PCLT800 – SM	Pasta de hidróxido de cálcio e cinza de lodo têxtil calcinado a 800°C sem moer
PCLT800 – B600	Pasta de hidróxido de cálcio e cinza de lodo têxtil calcinado a

	800°C com finura Blaine de 600 m ² /kg
PCLT800 – B900	Pasta de hidróxido de cálcio e cinza de lodo têxtil calcinado a 800°C com finura Blaine de 900 m ² /kg
PCLT800 – B1200	Pasta de hidróxido de cálcio e cinza de lodo têxtil calcinado a 800°C com finura Blaine de 1200 m ² /kg
PF	Perda ao fogo
Ph	Potencial hidrogeniônico
RIR	<i>Relative Intensity Ratio</i> (Taxa de Intensidade Relativa)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVAS.....	19
1.2	OBJETIVOS.....	20
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1	O ARRANJO PRODUTIVO LOCAL (APL) DE CONFECÇÕES DO AGRESTE PERNAMBUCANO.....	23
2.2	LAVANDERIA E O PROCESSO QUE ORIGINA O LODO TÊXTIL.....	25
2.3	UTILIZAÇÃO DE LODO TÊXTIL NA ENGENHARIA CIVIL.....	29
2.3.1	Uso de Lodo têxtil em materiais cimentícios.....	30
2.3.1.1	Uso de Lodo têxtil como ligante alternativo.....	31
2.3.1.2	Uso de Lodo têxtil como agregado.....	34
2.3.2	Uso de Lodo têxtil em materiais cerâmicos e tijolos.....	36
2.3.3	Uso de Lodo têxtil em outras aplicações na engenharia civil.....	40
2.4	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS LODOS TÊXTEIS UTILIZADOS EM OUTROS TRABALHOS.....	42
2.5	MATERIAIS POZOLÂNICOS.....	45
2.6	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA POZOLANICIDADE.....	47
2.6.1	Métodos Diretos.....	47
2.6.2	Métodos Indiretos.....	48
2.6.3	Métodos Alternativos.....	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	51
3.2	MATERIAIS.....	52
3.2.1	Lodo têxtil <i>in natura</i> e cinzas.....	52
3.2.1.1	Beneficiamento: moagem e calcinação.....	53
3.2.2	Hidróxido de cálcio.....	62
3.2.3	Agregado miúdo.....	63
3.2.4	Cimento Portland.....	64
3.2.5	Aditivo.....	65
3.3	PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS.....	66

3.3.1	Caracterização física dos materiais anidros.....	66
3.3.1.1	Massa específica real por meio do frasco de Le Chatelier.....	66
3.3.1.2	Massa específica do agregado miúdo.....	67
3.3.1.3	Superfície específica pelo método de Blaine.....	69
3.3.1.4	Distribuição granulométrica por difração a laser.....	70
3.3.1.5	Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	71
3.3.2	Caracterização química e mineralógica.....	71
3.3.2.1	Fluorescência de raios-X (FRX).....	71
3.3.2.2	Difração de raios-X (DRX)	72
3.3.2.3	Análise Termogravimétrica (ATG)	73
3.3.3	Análise da pozolanicidade.....	74
3.3.3.1	Determinação da atividade pozolânica com cal – NBR 5751:2015 – Modificada.....	74
3.3.3.2	Determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias – NBR 5752:2015 – Modificada.....	77
3.3.3.3	Pastas com hidróxido de cálcio.....	80
3.3.3.4	Correlação dos resultados por análise estatística.....	85
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	87
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	87
4.1.1	Análises físicas.....	87
4.1.2	Análises químicas.....	93
4.1.3	Análise mineralógica.....	98
4.2	TESTES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	100
4.2.1	Índice de atividade pozolânica com cal (ABNT NBR 5751: 2015 – modificada)	100
4.2.2	Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (ABNT NBR 5752: 2014 – modificada)	103
4.3	TESTES EM PASTAS DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO.....	108
4.3.1	Difração de raios-X.....	108
4.3.2	Análise termogravimétrica.....	116
4.3.3	Correlação entre métodos por análise estatística.....	121
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	123
5.1.1	Conclusões.....	123

5.1.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	126
	REFERÊNCIAS.....	127
	APÊNDICE A – VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO OBTIDOS PARA OS CORPOS DE PROVA NOS ENSAIOS DA NBR 5751 E ANÁLISE ESTATÍSTICA BÁSICA	140
	APÊNDICE B – VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO OBTIDOS PARA OS CORPOS DE PROVA NOS ENSAIOS DA NBR 5752 E ANÁLISE ESTATÍSTICA BÁSICA	141

1 INTRODUÇÃO

Nesta seção serão descritos o contexto acerca do tema, justificativas para a realização deste estudo, bem como os objetivos alcançados e a estrutura do trabalho.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVAS

O problema abordado neste projeto é a geração do Lodo têxtil (LOTex) como o principal resíduo sólido gerado no Arranjo Produtivo Local (APL) da Confecção. Para contextualizar a magnitude do problema gerado pelo LOTex é preciso contextualizar o APL da Confecção do Estado de Pernambuco. O APL está concentrado no agreste Pernambucano, conecta 33 cidades e tem como principais polos as cidades de Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe e Toritama. É considerado o 2º maior polo de confecção do Brasil, movimentando cerca de R\$ 6 bilhões de reais por ano e empregando cerca de 250 mil pessoas (BRITO, 2020). O lado negativo do APL é o impacto ambiental causado pelo mesmo na geração de resíduos sólidos, o que é um problema mundial, pois a estimativa é de que são geradas mais de 2 bilhões de toneladas de resíduos sólidos por ano (NAÇÕES UNIDAS, 2018). Em pesquisa realizada por Araújo e Fontana no ano de 2017, nenhuma empresa situada no Polo Têxtil do Agreste Pernambucano possuía um Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos – PGRS e nem algum tipo de certificação ambiental, como a ISO 14000, criada ainda na década de 90. Em torno de 64% das lavanderias situadas no APL da confecção não dão o destino correto aos resíduos sólidos gerados, sendo o LOTex despejados no lixão municipal das cidades sem qualquer tipo de tratamento (AMARAL et al., 2012).

O cimento Portland é o principal material da construção civil utilizado no mundo. Somente no Brasil, a produção de cimento totalizou 58,4 milhões de toneladas, em 2020 (SINIC, 2020). E de acordo com as projeções, acredita-se que no ano de 2050, as indústrias de todo planeta totalizem, cerca de, 6 bilhões de toneladas produzidas (SCRIVENER, 2014). A fabricação do cimento Portland envolve a calcinação do calcário, cuja reação química resulta na liberação de dióxido de carbono (CO₂), um dos gases mais abundantes e preocupantes na temática do

aquecimento global. Devido a sua grande produção mundial, a indústria de cimento contribui com 8% das emissões globais de CO₂ (ANDREW, 2017). É crescente o estudo da utilização de resíduos na construção civil, com maior ênfase em duas vertentes: como substituição parcial do cimento Portland ou como substituição parcial do agregado. De modo geral, o emprego destes materiais visa obter um destino adequado aos mesmos e contribuir no desempenho do composto cimentício ao qual o resíduo é incorporado. Neste estudo, o foco é a avaliação da pozolanicidade do resíduo (Lodo têxtil) para a utilização em substituição parcial ao cimento Portland, e, para isso, o resíduo deverá apresentar características que o classifiquem como um material pozolânico ou ao menos atributos que o tornem uma possível adição inerte.

Uma vez que o lodo de efluente têxtil possui qualidades que o tornam reciclável para o uso na construção civil, que atualmente ainda seja destinado de forma inadequada e que ainda não há na literatura trabalhos que avaliem a pozolanicidade desse lodo em específico, percebe-se a importância deste trabalho. Valendo salientar, ademais, que poucos estudos avaliaram as influências da moagem e calcinação nas propriedades pozolânicas e características físicas, químicas e mineralógicas do rejeito em questão, mostrando que são necessários estudos para que as qualidades desse material se tornem vantagens reais para a indústria da construção, população e meio ambiente.

1.2 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo principal analisar o comportamento do lodo de estação de tratamento de efluentes da indústria têxtil como um possível material pozolânico, por meio de técnicas normalizadas e não normalizadas, a fim de avaliar seu potencial para adição ao cimento Portland.

Como objetivos específicos, podem ser listados:

- Analisar a influência do beneficiamento do Lodo têxtil, moagem e calcinação, na pozolanicidade das amostras estudadas;
- Caracterizar o LOTex *in natura* e as cinzas de lodo após o tratamento, em relação às suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas;
- Avaliar as propriedades pozolânicas das amostras estudadas por meio de

métodos normatizados, como os ensaios de compressão em argamassas com uso de cal hidratada (NBR 5751:2015) e cimento (NBR 5752:2014);

- Avaliar as propriedades pozolânicas utilizando métodos não normatizados com pastas de hidróxido de cálcio, como difração de raios-X e termogravimetria;
- Avaliar a correlação entre os valores obtidos com os métodos que são normatizados e os que não são.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado em 5 seções, além das referências bibliográficas. A primeira aborda uma introdução ao assunto, contextualizando a problemática do lodo têxtil, apresentando a dimensão do APL da Confecção pernambucano, e as justificativas, com foco principal na sustentabilidade, para a realização desse tipo de estudo, além dos objetivos geral e específicos a serem alcançados no trabalho, e a estrutura na qual está organizada esta dissertação.

A seção 2 está dividida em 5 partes e apresenta uma revisão da literatura. A primeira trata do APL da Confecção pernambucano de maneira mais profunda, abordando seu surgimento, crescimento e estabilização. Na segunda, são discutidos os procedimentos de beneficiamento nas Lavanderias e o processo de tratamento do efluente que origina o lodo têxtil. Na terceira, são realizadas tanto a busca na literatura dos diversos trabalhos que abordaram a aplicação desse resíduo na engenharia civil, como uma discussão sucinta sobre cada um deles. A quarta parte apresenta, de maneira geral, a caracterização dos lodos têxteis estudados na literatura e a quinta traz considerações acerca dos materiais pozolânicos e os métodos de avaliação da pozolanidade.

A seção 3, além de apresentar o programa experimental do desenvolvimento do trabalho, no qual são descritas suas variáveis e etapas investigadas, contempla os materiais utilizados no estudo e a metodologia adotada nos ensaios de caracterização e avaliação da atividade pozolânica.

A seção 4 expõe os resultados experimentais obtidos ao longo do estudo e realiza as devidas discussões sobre cada um deles, levando em consideração a influência da moagem e da calcinação na pozolanidade das amostras estudadas.

Por fim, a seção 5 contempla as considerações finais do trabalho, decorrentes dos resultados abordados, e as sugestões para novas pesquisas sobre o assunto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir será apresentado o referencial teórico sobre o tema relacionado à pesquisa, e todo embasamento para o seu desenvolvimento. Dividida em cinco partes: O APL da confecção do Agreste pernambucano, a lavanderia e o processo que origina o lodo têxtil, utilização de lodo têxtil em materiais de construção, adições minerais e pozolanas e métodos de determinação da pozolanicidade.

2.1 O ARRANJO PRODUTIVO LOCAL (APL) DE CONFECÇÕES DO AGRESTE PERNAMBUCANO

O APL de confecções do Agreste pernambucano é um aglomerado de iniciativas produtivas e comerciais relacionadas ao setor de confecções que é consolidado atualmente como uma fonte de renda e ocupação, e abriga uma grande quantidade de municípios, dentre os quais, os protagonistas são evidentemente Santa Cruz do Capibaribe, Toritama e Caruaru, pois são responsáveis por cerca de 70% da produção desse arranjo produtivo. Pode se destacar a presença de micro, pequenas e médias empresas, especializadas na confecção de vestuário e focadas na produção de variados itens da indústria da moda, como vestimentas jeans, brim, malharia, casual, íntimo e infantil (ESTEVES, 2019; EBRAHIM, 2014).

Em virtude da crise agrícola da cotonicultura e das diversas dificuldades em fabricar outros tipos de produtos, já que a região sempre apresentou características muito secas do semiárido nordestino, dificultando, por exemplo, o plantio, por volta da década de 1940 surgiram iniciativas de homens e mulheres, comerciantes do município de Santa Cruz do Capibaribe, que passaram a se deslocar para a capital e negociar produtos locais. Galinhas, queijo e carvão vegetal passaram a ser trocados por retalhos de tecido, os quais começaram a ser utilizados por costureiras na confecção de roupas, toalhas e lençóis para incrementar a venda nas feiras da região. A partir de certo momento, essas atividades foram se estabelecendo, de tal maneira que a quantidade de produtores e vendedores se ampliou e aumentou a demanda pelos retalhos de tecido, constituindo a chamada “Feira da Sulanca”. Após uma primeira fase de atividades marcadas por um caráter majoritariamente semiartesanal, pautado no uso dos retalhos como matéria-prima principal, foi na

década de 1960 que ocorreram os primeiros sinais de modernização e de expansão produtiva e comercial com a substituição das máquinas manuais e elétricas domésticas por uma quantidade considerável de máquinas industriais de baixa rotação no processo produtivo (LIRA, 2006; CABRAL, 2007).

Com o passar do tempo, a “sulanca” ficou conhecida como a feira dos produtos de qualidade inferior e com preços acessíveis para as camadas da população com baixa renda. Com o crescimento da produção e venda, se estendeu a outros municípios da região. Toritama, por exemplo, que na década de 30 tinha forte mercado com a produção de calçados, caracterizada por ser artesanal e destinada também a população de baixa renda, voltou-se na década de 80 para produção de jeans. Isso ocorreu porque nesse período a produção de calçados de couro vinha sendo substituída consideravelmente por produtos sintéticos tanto nacionais quanto importados, e, por outro lado, o município vizinho de Santa Cruz do Capibaribe se encontrava em forte ascensão na confecção de vestuários (RAPOSO e GOMES, 2003; MARTINS et al., 2009).

Dessa forma, Toritama passou a utilizar as mesmas máquinas e equipamentos que eram utilizados na produção de calçados, com determinadas adaptações, na produção do jeans e passou a compor a produção da “sulanca”. Contudo, no início dos anos 2000, Toritama se torna o maior polo de produção de vestuário de jeans do Norte e Nordeste, com uma estimativa de produção de cerca de 15% da produção nacional desse tipo de roupa e, conjuntamente ao crescimento desse mercado, desenvolveram-se no município as lavanderias, nas quais se realizavam os procedimentos de lavagem, amaciagem, tingimento e descoloração do jeans (RAPOSO e GOMES, 2003; MARTINS et al., 2009).

Já Caruaru, que já contava com outras atividades econômicas e já possuía a sua feira popular reconhecida nacionalmente, com destaque para a atividade calçadista e produção e comercialização de peças de artesanato, só veio a ingressar nas atividades produtivas e comerciais da “sulanca” também no início de 1980. Mesmo Caruaru já possuindo dinamismo que o consagrava enquanto polo regional, a “sulanca” se tornou tão importante para o Agreste pernambucano que terminou sendo também acrescentada ao espaço produtivo dessa cidade (ESTEVEES, 2019).

Por volta de 2002, tendo em conta o destaque das atividades produtivas e comerciais em confecções no Agreste, o Sindinvest - PE (Sindicato das Indústria do Vestuário do Estado de Pernambuco), com apoio do Sebrae (Serviço Brasileiro de

Apoio às Micro e Pequenas Empresas) e de um conjunto de instituições, optou por instalar uma subsele na região, tornando o que antes era conhecido como “feira da sulanca” em “Polo de Confecções do Agreste Pernambucano”, também conhecido como “Polo da Moda de Pernambuco”. Diante disso, culminou no surgimento de um projeto com objetivo de modernizar as atividades ali desenvolvidas e atuar sobre a reelaboração da imagem do arranjo produtivo local. A partir de então, a marca “sulanca”, que sempre foi associada a produtos de qualidades muito inferiores, foi sendo desconstruída e dando lugar ao título de “Polo de Confecções” (OLIVEIRA, 2011).

Na atualidade, são movimentados bilhões de reais com a produção anual de cerca de 800 milhões de peças de vestuário para os comércios nacionais e internacionais nas cidades de Santa Cruz do Capibaribe, Toritama e Caruaru (FEBRATEX GROUP, 2019). Toritama hoje se destaca pela expressiva produção do jeans e, além de dezenas de empresas de confecção, ela também apresenta inúmeras indústrias de beneficiamento têxtil. O polo se tornou o segundo maior distribuidor de jeans nacional, ficando atrás apenas do Polo Paulista, que já tem décadas de tradição. Em Toritama se encontra o grande centro comercial denominado de Parque das Feiras. Caruaru, por sua vez, teve inaugurado o Polo Comercial de Caruaru, que hoje emprega três mil pessoas e é formado por mais de 300 lojas dos mais variados seguimentos. Já a cidade de Santa Cruz dispõe do Moda Center, considerado o maior shopping atacadista de confecções da América Latina, reunindo mais de 10 mil pontos comerciais que chega a receber por semana uma quantidade superior a 150 mil clientes (EBRAHIM, 2014; ESTEVES, 2019; FEBRATEX GROUP, 2019).

2.2 LAVANDERIA E O PROCESSO QUE ORIGINA O LODO TÊXTIL

É importante perceber que vários são os processos produtivos que constituem a indústria têxtil, estando entre eles a fiação, a tecelagem e o acabamento, que envolve o beneficiamento e enobrecimento dos fios, tecidos e confecções, de tal forma que em determinada produção pode apresentar todas as etapas conhecidas ou até mesmo só uma. Nesse contexto, apenas empresas de médio e grande porte conseguem realizar todas essas etapas, de tal maneira que existem várias empresas de pequeno porte que realizam apenas uma das etapas, que são justamente as

conhecidas como lavanderias e tinturarias. Nessas pequenas empresas de beneficiamento têxtil, os tecidos geralmente são tratados para melhorar sua aparência e são aferidas as características específicas de qualidade do produto (AVELAR, 2012; BELTRAME, T., 2000).

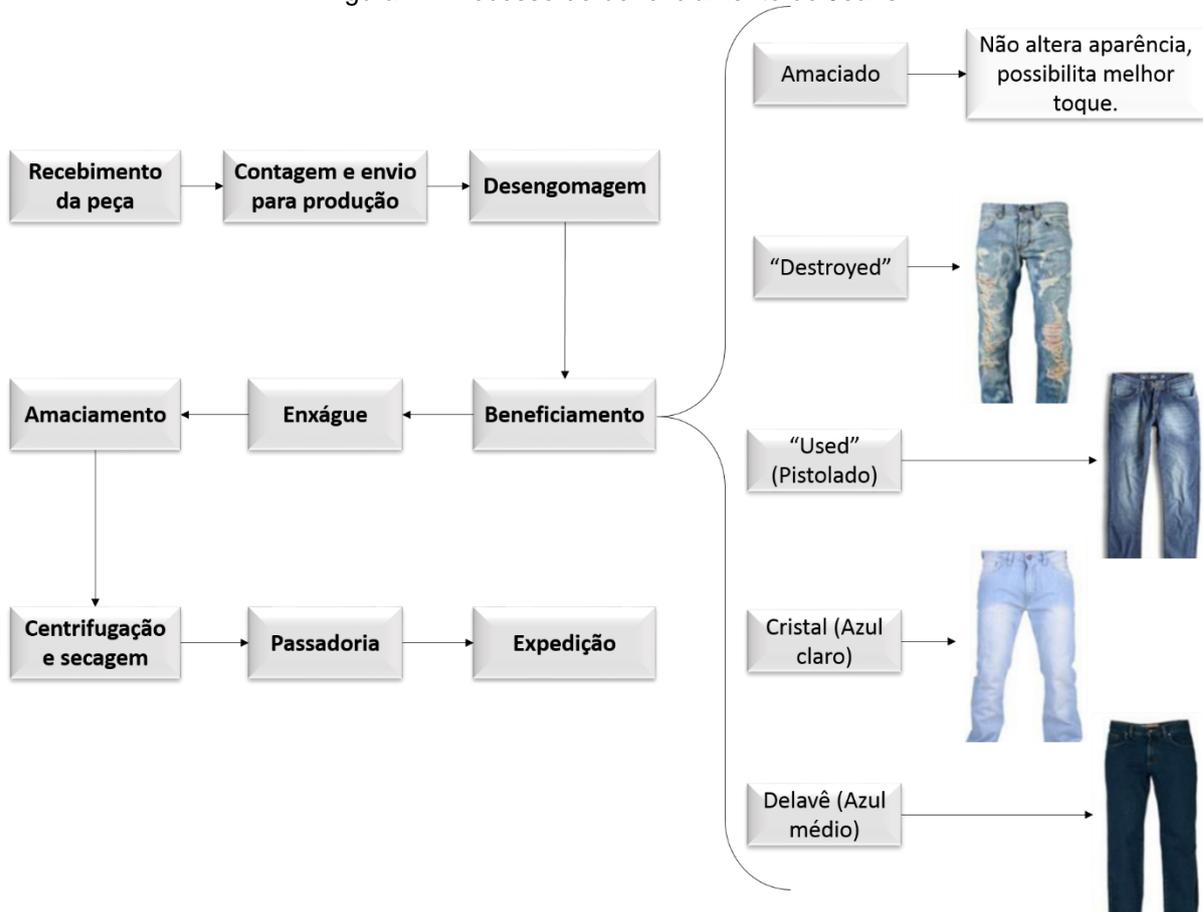
Segundo Cometti et al. (2016), cabe às lavanderias os processos de lavagem, amaciamento, tingimento, descoloração e demais processos de modificação na aparência do produto têxtil. Silva (2016) explica que no processo as peças são recebidas pela lavanderia, são contadas e encaminhadas para a produção, que se inicia com a etapa de desengomagem, na qual ocorre a retirada da goma aplicada na tecelagem e, posteriormente, são realizadas as transformações relativas ao processo de beneficiamento do jeans.

Dentre os processos de beneficiamento, estão o amaciamento, o “destroyed”, “used” (também conhecido como pistolado), cristal (ou azul médio) e o delavê (ou azul claro). O amaciamento não faz nenhuma transformação na aparência do tecido, apenas retira a goma que enrijece os fios por meio de processos químicos e, conseqüentemente, possibilitam uma melhor sensação ao toque ao tecido, tornando-o mais agradável ao uso (OLIVEIRA, 2008). No processo “destroyed”, as peças geralmente são envelhecidas pelo atrito com pedras ou enzimas, no qual há várias combinações de cortes ou desgastes, para provocar na peça uma característica desgastada (PEZZOLO, 2007). O “used”, por sua vez, aplica na superfície do tecido um jato de uma solução de permanganato de potássio, alumínio e uma terceira substância química dependendo do índice de desbote que se deseje aplicar, por meio da utilização de uma pistola de pressão (COMUNIDADE DE MODA, 2015). Já nos processos cristal (azul claro) e delavê (azul médio), há aplicação dos mais variados agentes oxidantes, como o cloro, peróxido de hidrogênio, hipoclorito de sódio e permanganato de potássio, com o intuito de descolorir a peça dependendo do aspecto estético que se deseja (SILVA, 2016).

Contudo, depois de cada peça passar pelo processo específico de diferenciação, todas são encaminhadas para o enxágue, seguido do amaciamento (nova lavagem com o intuito de retirar os resíduos dos produtos químicos utilizados), da centrifugação e secagem (em que as peças passam pelas secadoras e centrifugas para, além de secar, retirar resíduos das “pedras” e restos de tecidos retirados no processo de “destroyed”), passadoria (na qual as vestimentas são passadas com ferros manuais ou prensas a vapor) e, por fim, expedição, etapa em

que as peças podem ser embaladas ou amarradas em lotes e expedidas aos clientes (FERREIRA, 2018). A Figura 1 ilustra o procedimento completo.

Figura 1 - Processo de beneficiamento do Jeans



Fonte: Adaptado de Silva (2016) e Souto (2017)

Durante o processo de beneficiamento são gerados muitos efluentes têxteis, nos quais estão presentes cerca de 90% dos produtos químicos empregados, que são eliminados após cumprirem seus objetivos. Esses efluentes acabam possuindo uma composição bastante heterogênea, em virtude da realização dos processos distintos já descritos anteriormente, e uma grande quantidade material tóxico e recalcitrante, podendo apresentar forte coloração e possuir grande quantidade de sólidos suspensos e metais pesados, compostos orgânicos clorados e surfactantes. Contudo, à medida que vai se aproximando do seu final, começa-se o processo de tratamento desses efluentes residuais (SOUTO, 2017; LELOUP, 2013; STRÖHER et al., 2012).

O processo físico-químico de coagulação-floculação, seguido de filtração, é o mais utilizado pela grande maioria das lavanderias, e é após esse processo que há a produção do lodo. A quantidade desse rejeito está relacionada com a eficiência do tratamento utilizado. Valendo ressaltar que nesse tipo de tratamento é muito comum, até em virtude do fato das empresas estarem situadas geralmente em regiões urbanas com pouca disponibilidade de área, o emprego de estações compactas (LIMA, 2014; STRÖHER et al., 2012).

Na primeira etapa do tratamento dos efluentes, ocorre a remoção de resíduos por uma espécie de peneira que impede o arraste de sólidos grosseiros, o que é importante pois a passagem dos mesmos pode provocar dificuldades nos processos seguintes, e o efluente é direcionado para a caixa de passagem, que já funcionará como uma espécie de decantador inicial (ZAGONEL et al., 2015). Logo em seguida, ocorre um processo de equalização, no qual os materiais passam por uma homogeneização com o auxílio de bolhas de ar ejetadas, permitindo que não ocorram consideráveis variações nos parâmetros nas etapas seguintes do tratamento (SOUZA et al., 2013).

Em uma segunda etapa, ocorre a decantação, na qual podem ser utilizados alguns tipos de coagulantes no efluente, como é o caso do sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) ou o policloreto de alumínio ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3$), que atuam nas cargas superficiais das moléculas desestabilizando-as e facilitando a formação de flocos. Como as reações desses compostos de alumínio com a água levam ao aumento da acidez da solução, muitas vezes é utilizado óxido de cálcio para corrigir o pH a partir da formação dos hidróxidos e aumento da alcalinidade do meio, pois isso permite a aglutinação das partículas e contribui para redução da turbidez e cor do efluente. Vale salientar que frequentemente ocorrem dificuldades de coagulação dos flocos formados e, portanto, há a utilização de coagulantes auxiliares para o processo de floculação, como o hidróxido de sódio (NaOH) e o bicarbonato de cálcio para acelerar a precipitação (SOUTO, 2017; LIBÂNIO, 2010).

Dessa maneira, com a etapa de decantação, os sólidos, por apresentarem maior densidade, se depositam na parte inferior dos tanques e formam o lodo têxtil, que é encaminhado para os leitos de secagem, enquanto a fração líquida dos decantadores segue para os filtros de fluxo ascendente, em meio filtrante contendo carvão ativado, que são utilizados visando à remoção de partículas responsáveis

pela cor e turbidez (ZAGONEL; BUSS; MENEZES, 2015), A Figura 2 mostra todo o processo simplificado.

Figura 2 - Processo de tratamento de efluentes e formação do lodo



Fonte: O Autor (2023)

2.3 UTILIZAÇÃO DE LODO TÊXTIL NA ENGENHARIA CIVIL

Várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas a fim de buscar formas de beneficiamento adequadas para o lodo, de forma que seu potencial para uso na engenharia civil aumente. Uma das maneiras de destinação do lodo têxtil comumente sugerida por vários trabalhos, é seu uso em aplicações na engenharia civil. Dentre elas, se destacam as aplicações na área de materiais de construção, seja em materiais cimentícios (como material alternativo substituindo parcialmente o cimento ou agregado miúdo) ou em materiais cerâmicos (aplicado em substituição parcial à argila), mas também estão presentes em alguns estudos em outros setores da engenharia civil, como a pavimentação e a geotecnia.

Nesta etapa do trabalho, foi realizada uma busca na literatura acerca dos trabalhos que utilizaram lodo têxtil para aplicações no setor da engenharia civil. Foram realizadas buscas tanto na base de dados da Scopus quanto em repositórios de teses e dissertações, levando em conta trabalhos publicados até outubro de 2022, e foram encontrados um total de 41 trabalhos, sendo 20 acerca de aplicações em materiais cimentícios, 17 em materiais cerâmicos e tijolos e 4 em outros tipos de aplicações. A Tabela 1 apresenta todos os trabalhos encontrados e nos itens seguintes serão discutidos, sucintamente, cada um deles.

Tabela 1 - Trabalhos acerca das aplicações de lodo têxtil na engenharia civil

Materiais cimentícios	Materiais cerâmicos e tijolos	Outras aplicações na engenharia civil
Prim (1998)	Herek et al. (2012)	Karthikeyan e Vinothkumar (2017)
Pietrobon et al. (2002)	Almeida et al. (2015)	Cheng et al. (2020)
Pietrobon et al. (2004)	Aquino et al. (2015)	Oliveira et al. (2020)
Balasubramanian et al. (2006)	Castro et al. (2015)	Moura (2021)
Patel e Pandey (2009)	Rahman et al. (2015)	
Altidiz et al. (2012)	Soares (2016)	
Leloup (2013)	Velumani et al. (2016)	
Altidiz et al. (2014)	Anwar et al. (2017)	
Rahman et al. (2017)	Chauan e Chopra (2017)	
Sudheesh et al. (2015)	Chen e Wu (2018)	
Zhan e Poon (2015)	Ferreira (2018)	
Ramya e Shanthankumar (2017)	Hossain et al. (2018)	
Velumani e Santhilkumar (2018)	Priyadharshini e Kavisri (2018)	
Arulpandian et al. (2019)	Gunavel et al. (2019)	
Goyal et al. (2019)	Beshah et al. (2021)	
Zhan et al. (2020)	Premkumar et al. (2021)	
Kasaw et al. (2021)	Delaqua (2022)	
Goyal et al. (2022)		
Kanmani et al. (2022)		
Sathiya e Swaminathan (2022)		

Fonte: O Autor (2023)

2.3.1 Uso de Lodo têxtil em materiais cimentícios

Alguns estudos investigaram a aplicação do LOTex em materiais cimentícios tanto como um ligante, substituindo parcialmente o cimento, quanto como agregado miúdo, substituindo parcialmente a areia. A seguir serão descritos sucintamente os estudos referentes às duas situações.

2.3.1.1 Uso de Lodo têxtil como ligante alternativo

O primeiro trabalho encontrado na literatura acerca da valorização do lodo têxtil como material de construção foi o de Prim (1998), no qual houve a investigação da solidificação desse resíduo com cimento por um lado e com cimento e cinza pesada de carvão por outro. Foram avaliados parâmetros mecânicos, físico-químicos e estruturais. A autora obteve resistências mecânicas apreciáveis em relação às exigidas para bloco vasado de concreto simples para alvenaria estrutural, argamassas e tijolos maciços cerâmicos e observou que os metais ficaram retidos na matriz solidificada, indicando que o processo pode ser ambientalmente seguro e que o produto resultante do mesmo pode ser considerado para uso como material de construção.

Pietrobon e outros pesquisadores estudaram a solidificação/estabilização de lodo de tratamento de lavanderia têxtil em pastas e argamassas de cimento no ano de 2002 e realizaram um estudo sobre a lixiviação de contaminantes de compostos lodo-cimento em 2004. No primeiro estudo, as argamassas com substituição de até 25% obtiveram cerca de 40% da resistência da argamassa de referência na idade de 28 dias, e a lixiviação ocorrida nos corpos de prova sem incorporação de lodo foi similar aos que continham esse rejeito. No segundo trabalho, os resultados mostraram que as concentrações dos elementos presentes no extrato lixiviado para as amostras com substituição de 30% de lodo ficaram abaixo dos limites estabelecidos pela NBR 10004:1987.

Balasubramanian et al. (2006) realizaram um estudo sobre a substituição do cimento Portland por lodo têxtil em concretos. Os autores exploraram a viabilidade de reutilizar o lodo para substituir 10%, 20% e 30% de cimento para produzir vários produtos de concreto diferentes, como ladrilhos, blocos vazados, blocos de pavimento, entre outros. Os autores perceberam que o lodo atrasou a pega do cimento e observaram que a substituição máxima de 30% só poderia ser feita para concretos não estruturais.

Patel e Pandey (2009), por sua vez, tentaram usar um cimento Portland pozolânico para tentar estabilizar o lodo têxtil. Esses pesquisadores chegaram a utilizar até 70% de lodo para preparar blocos, usando também cinzas volantes. Os resultados de resistência à compressão sugeriram que as misturas poderiam ser usadas para várias aplicações estruturais e não estruturais. Ademais, perceberam

uma lixiviação insignificante de metais pesados, o que confirmou o potencial de estabilização do sistema aglutinante de cimento e lodo.

Altidis et al. (2012) estudaram a influência da temperatura de queima na decomposição térmica do lodo têxtil por meio da análise termogravimetria (ATG) e análise térmica diferencial (ATD) com o intuito de utilizá-lo como aditivo para concretos e/ou pré-moldados. As curvas de ATG e ATD do lodo bruto demonstraram três etapas de decomposição térmica, com uma perda de massa relativa à perda de água, de hidroxila e matéria orgânica, enquanto que para o lodo calcinado apresentou duas etapas de decomposição referente à perda de água e hidroxila. Ademais, o espectro infravermelho apresentou bandas características de SiO_2 , O-H e C-H para o lodo bruto, mas para o calcinado observou a eliminação das bandas de O-H e C-H.

Sudheesh et al. (2015) avaliaram o efeito da adição de lodo têxtil como substituto parcial do cimento, pó de pedra como substituto parcial do agregado miúdo convencional e adição de fibras de polipropileno para aumentar as características de desempenho de blocos de pavimentação. Os resultados mostraram que as combinações com substituição de 30% de cimento por lodo e adição de fibra em 0,75% e 1% renderam blocos com resistência de 30 MPa aos 28 dias, e as combinações de 20% de lodo substituindo o cimento e com as frações de fibra de até 1% apresentaram resistência superiores a 50 MPa, sendo permitidas, nesse último caso, até aplicações de tráfego pesado.

No estudo realizado por Zhan e Poon (2015), descobriu-se que o lodo apresentava concentrações elevadas de amônia, em virtude do amplo uso de corantes na indústria têxtil. Diante disso, os autores elaboraram um método de pré-tratamento à base de cal a fim de diminuir os níveis de amônia do lodo têxtil e então incorporá-lo em blocos de concreto. Eles observaram que a resistência dos blocos diminuiu com o aumento do percentual de lodo, e que nenhum dos blocos excedeu os limites estabelecidos pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA, mostrando que os metais pesados podem ser estabilizados na mistura cimentícia.

Ramya e Shanthakumar (2017) estudaram a substituição do cimento por lodo nos percentuais de 5%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Dos resultados, inferiu-se que apenas até a substituição de 30% é permitida para que os blocos sólidos atendam a todos os requisitos específicos dos normativos da ASTM (Sociedade Americana de Testes e Materiais) e BIS (Gabinete de Normas Indianas).

Velumani e Senthilkumar (2018) substituíram cimento por lodo têxtil e por um lodo da indústria de papel em pavers, com porcentagens variando de 10 a 35%. Os autores constataram aumento da resistência à compressão no teor de 10% e demonstraram que acima dessa porcentagem a resistência foi inversamente proporcional ao teor de lodo têxtil, enquanto a absorção diretamente proporcional.

No trabalho de Arulpandian et al. (2020) foram avaliados os percentuais de 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de substituição de cimento por lodo na produção de blocos de pavimentação, que foram moldados seguindo as recomendações das normas indianas, e com os resultados revelou-se que acima da adição de 15% de substituição de lodo no concreto a diminuição da resistência à compressão é considerável e a absorção de água esteve dentro dos limites estabelecidos pelos padrões indianos.

Goyal e demais pesquisadores, no ano de 2019, estudaram a incorporação de lodo têxtil em argamassa e pasta de cimento, realizando substituições de até 20% em relação a massa de cimento. Os resultados mostraram que para adições de até 5% de lodo, não ocorrem alterações negativas nas propriedades da argamassa e da pasta, mas percebeu-se que a adição desse rejeito provocou redução da fluidez da pasta cimento-lodo no estado fresco e levou ao aumento do número de poros, e da resistência à compressão no estado endurecido. Já no ano de 2022, avaliaram a estabilização do lodo têxtil com óxido de magnésio (MgO) para confeccionar corpos de prova de argamassa e avaliar as suas características mecânicas, microestruturais e de absorção. Consideraram, então, ótima a substituição de até 10% de substituição do cimento por lodo têxtil estabilizado, tendo em vista que não afetava negativamente as propriedades da argamassa.

Zhan et al. (2020) realizaram um estudo que avaliou as interações entre o lodo e o cimento, incluindo avaliação físico-química e microestrutural das misturas. Seus resultados mostraram que o lodo retardou marcadamente a hidratação do cimento em idade precoce, e que, quanto maior o percentual de lodo têxtil incorporado, maior foi a redução do conteúdo de portlandita aos 7 e 28 dias. Os autores perceberam no teste de lixiviação que todos os metais pesados presentes no lodo permaneceram estabilizados de forma efetiva na mistura com cimento.

Outro estudo que tenta encontrar uma solução ambientalmente amigável para o gerenciamento de lodos têxteis, é o trabalho realizado por Kasaw et al. (2021). Os pesquisadores buscaram incinerar o lodo em uma temperatura de 625°C e utilizar a

cinza em substituição parcial ao cimento na produção de concreto. Da mesma forma que em trabalhos anteriores, os resultados mostraram que conforme o percentual de lodo calcinado aumenta, a resistência a compressão diminui e a absorção de água aumenta, e que até 20% da substituição do cimento obtém-se uma substituição sólida. Ademais, o teste de lixiviação revelou uma quantidade muito baixa de metais pesados liberados das amostras, revelando que as cinzas de lodo podem ser usadas em concretos sem representar um risco significativo de poluição por metais pesados.

Uma abordagem interessante, embora não seja uma aplicação direta em materiais cimentícios, está no estudo realizado por Sathiya e Swaminathan (2022), no qual foram empregadas técnicas analíticas avançadas para investigar as propriedades do lodo têxtil para ser utilizado como matéria-prima para produção de cimento. A espectrometria de emissão óptica de plasma indutivamente acoplado revelou que o lodo investigado no referente trabalho é rico em óxidos metálicos que são matérias-primas essenciais para o processo de fabricação do cimento. O lodo têxtil foi fundido em temperaturas de calcinação e as transições de fases foram comparadas com as da farinha crua. A cinética de degradação térmica foi calculada sob condições não isotérmicas, de 30°C a 900°C, em uma taxa de aquecimento de 10, 15 e 20°C/min, e técnicas de regressão de superfície de resposta identificaram o efeito da taxa de aquecimento e temperatura na perda de massa. Contudo, um modelo de rede neural otimizado foi desenvolvido para prever o comportamento da degradação térmica do lodo têxtil e da farinha crua, a metodologia de superfície de resposta confirmou que a perda de massa teve uma relação quadrática com a taxa de aquecimento e temperatura e o perfil de alta estabilidade térmica do lodo têxtil indicou adequação para uso como matéria-prima alternativa.

2.3.1.2 Uso de Lodo têxtil como agregado

Leloup (2013) avaliou as propriedades físico-químicas de argamassas com percentuais de 1, 2 e 3% de substituição da areia por lodo têxtil, e os mesmos teores foram testados com a introdução concomitante, também como substituição, de 1% de cinza de algaroba. Os resultados mostraram que a inclusão dos resíduos viabilizava a utilização das argamassas, e que embora aquelas com resíduos tenham apresentado redução de 40% nos valores de resistência à compressão,

satisfizeram o requisito para seu emprego em fins não estruturais. Ademais, comprovaram que os contaminantes contidos nos resíduos são imobilizados na argamassa através dos ensaios de lixiviação e solubilização.

Altidis et al. (2014) estudaram a incorporação de lodo têxtil residual no concreto, variando as proporções de agregado em relação ao cimento em 1:2, 1:3, 1:4 e 1:5 e com percentuais de substituição de lodo de 3%, 5% e 7%. Perceberam, então, que a absorção de água aumentava com o aumento de lodo e a resistência a compressão diminuía tanto com o aumento do teor de agregado como de lodo têxtil.

Rahman et al. (2017) processaram o lodo têxtil para obter pó fino e o utilizaram para substituir parcialmente tanto o agregado miúdo como o cimento. Foram então avaliadas propriedades físicas, morfológicas e mecânicas das amostras. Os resultados mostraram que a adição de lodo substituindo agregado ou cimento, em argamassas e concretos, leva a uma diminuição das resistências à compressão e à flexão, a um aumento da absorção de água e da porosidade. Em relação a lixiviação, observaram que a concentração de metais foi bastante baixa em relação aos limites especificados pelo Departamento de Meio Ambiente de Bangladesh, e chegaram à conclusão que o lodo pode sim ser utilizado para fabricar componentes de construção, porém não estruturais em virtude da menor resistência das peças.

Já nos estudos de Kanmani et al. (2022), foram moldados blocos de pavimentação substituindo o lodo têxtil tanto pelo agregado miúdo como pelo cimento. Dentre os blocos moldados, também houve a avaliação de adição de cal e de cinza volante, em que o primeiro substituiu apenas o cimento e a cinza substituiu, assim como o lodo, o cimento e o agregado miúdo. Contudo, todas as diferentes misturas foram comparadas com o bloco de pavimentação padrão. Os resultados mostraram que os blocos de pavimentação com lodo substituindo areia, apresentaram melhor resistência à compressão que os blocos convencionais, sendo aquele com adição de 15% de lodo, 30% de cal e 15% de cinza volante o que apresentou melhor resistência mecânica e durabilidade.

2.3.2 Uso de Lodo têxtil em materiais cerâmicos e tijolos

Também existe uma quantidade relevante de trabalhos na literatura com a incorporação de lodo têxtil em materiais cerâmicos e alguns tipos de tijolos, que serão descritos objetivamente a seguir.

Herek (2012) estudou a incorporação de lodo têxtil em massa cerâmica para fabricação de blocos de vedação nas seguintes porcentagens de lodo em massa: 0% (referência), 5%, 10%, 15% e 20%. Para análise da estabilização/solidificação dos metais, foram realizados testes de lixiviação e de solubilização, e para verificação da qualidade do produto como material de construção foram realizados testes de resistência à compressão. Com os resultados, observou-se que enquanto a resistência foi inversamente proporcional a quantidade de lodo adicionada, a absorção foi diretamente proporcional. Nos ensaios de lixiviação e solubilização confirmou-se a estabilização dos metais nas misturas cerâmicas e chegou-se à conclusão que até 20% de incorporação de lodo é possível de se fabricar blocos cerâmicos mantendo-se os parâmetros normativos.

Almeida et al. (2015) avaliaram a inserção de lodo têxtil em cinco tipos de argilas coletadas na região norte do Paraná. Foi realizada uma análise qualitativa de blocos cerâmicos com incorporação de 15% de lodo têxtil, em função de suas características. Os blocos foram submetidos a testes de resistência à compressão, lixiviação, solubilização e absorção de água. Contudo, verificou-se que o processo foi realmente capaz de imobilizar de forma eficaz os metais presentes no resíduo têxtil, a maioria dos blocos cerâmicos atingiram o limite mínimo de resistência à compressão especificado por norma e todas as amostras atenderam as especificações normativas para a absorção de água.

Já no estudo realizado por Aquino (2015), foram fabricados blocos cerâmicos de vedação incorporando lodo têxtil na massa argilosa, com 6 percentuais diferentes de substituição em massa variando de 2% a 10% de lodo. Também foi moldado o bloco cerâmico de referência, sem nenhum percentual de lodo, a fim de serem realizadas as devidas comparações. Com os resultados, foi possível observar que a absorção de água aumentou com a adição do resíduo, levando a produção de peças mais porosas e, portanto, menos resistentes. Diante disso, perceberam que o percentual mais viável, inclusive em escala de produção industrial, é o de 2% de incorporação de lodo.

O trabalho de Castro et al. (2015), por sua vez, já trata da avaliação das características físicas, mecânicas, de toxicidade e de superfície de blocos cerâmicos acústicos, fabricados com inserção de lodo de estação de tratamento de efluentes têxteis. Os autores realizaram incorporações de até 35% de lodo, mas verificaram a porcentagem de 20% como sendo a limite para fornecer um material com características de acordo com os padrões estabelecidos pela legislação brasileira, em virtude de que foi observado o aumento da quantidade e diversidade de poros nas peças à medida que se acrescentou o resíduo à composição. Ademais, assim como nos outros trabalhos, também houve confirmação da imobilização dos poluentes na massa de argila.

Rahman et al. (2015) investigaram a utilização do lodo têxtil como substituto da argila na produção de tijolos. Os autores perceberam que a adição desse rejeito aumentava os poros e piorava a qualidade do produto. Diante disso, decidiram incorporar também resíduo de vidro para que melhorasse a qualidade dos tijolos em termos de absorção e resistência. Contudo, uma composição de 30% de lodo, 60% de argila e 10% de resíduo de vidro apresentou os melhores resultados em termos de resistência, tendo em vista que a fusão dos resíduos de vidro contribuía para obstruir os poros das peças e melhorar o desempenho. Ademais, com o teste de lixiviação, não foram detectados compostos significativos de metais pesados, estando em conformidade com a regulamentação padrão.

Velumani et al. (2016) avaliaram tijolos de cinzas volantes com inserção de lodo têxtil. A mistura possuía cal, gesso, cinzas volantes e pó de pedra, e foram incorporados lodo nos percentuais de 15%, 20%, 25%, 30% e 35%. Com os resultados, percebeu-se que a resistência à compressão está diretamente ligada às porções de lodo adicionadas, de tal maneira que quanto mais lodo têxtil havia na mistura, menor era a resistência. E em relação à absorção, observou-se um aumento até o percentual de 25% e, posteriormente, notou-se um decréscimo dessa propriedade.

Soares (2016), em seu trabalho de mestrado, utilizou lodo e argila para fabricação de tijolos, e posteriormente, barras cerâmicas por extrusão, com percentuais de 0%, 10%, 20% e 30% de lodo em relação a argila, em peso úmido. As peças foram sinterizadas nas temperaturas de 850°C, 900°C e 950°C. As amostras foram avaliadas em relação à absorção de água, retração linear e resistência mecânica. Com o trabalho, a autora concluiu que é possível o

reaproveitamento de lodo têxtil para a produção de tijolos, sendo fundamental a realização prévia dos testes, uma vez que as propriedades técnicas sofrem variação dependendo do processamento escolhido.

Anwar et al. (2017) estudaram o risco do lodo têxtil para a saúde pública e inseriram lodo têxtil em tijolos cerâmicos em percentuais, em massa, de 0,5%, 1,5%, 3,5% e 5,25%. Em relação aos resultados, também observaram que a medida que ocorre aumento da quantidade do resíduo na mistura, há aumento na absorção de água e decréscimo na resistência mecânica. Ademais, concluíram que a confecção dos tijolos com lodo é uma boa alternativa para aprisionar o material contaminante e evitar a contaminação de solos e geração de prejuízos ao meio ambiente e a saúde da população.

Chauan e Chopra (2017) também avaliaram a reutilização de lodo e cinzas volantes em tijolos de argila calcinada. Segundo os autores, as composições químicas do lodo têxtil e das cinzas volantes foram muito próximas à composição do solo e, portanto, essas adições foram utilizadas em substituição ao mesmo na fabricação dos tijolos. Enquanto a incorporação do lodo foi variada em percentuais de 0% a 15%, a quantidade de cinzas volantes foi mantida constante. Concluíram que até 9% de incorporação de lodo pode ser efetivamente realizado na fabricação de tijolos, pois fornece resistência acima do limite estabelecido pelo Gabinete de Normas Indianas.

Chen e Wu (2018), por sua vez, focaram na investigação da viabilidade da fabricação de tijolos leves a partir do lodo têxtil. As peças moldadas envolveram uma mistura de solo moído, lodo têxtil e cinzas de carvão como matérias-primas. Os autores determinaram uma proporção ótima entre os materiais da mistura e chegaram aos valores percentuais de 20:20:60 (lodo: cinzas de carvão: solo moído). Os tijolos produzidos com essa proporção obtiveram valores de compressão de 13,7 MPa, com uma densidade aparente de 1,47 g/cm³ e com concentrações muito baixas de metais pesados no ensaio de lixiviação de característica tóxica, atendendo as regulamentações.

Ferreira (2018) avaliou a incorporação de lodo têxtil em cerâmica vermelha, nos percentuais de substituição, em massa, de 0%, 2,5%, 5% e 10%. Os corpos de prova foram executados por extrusão e queimados nas temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C. Com os resultados, em relação a resistência mecânica, o autor percebeu uma relação inversamente proporcional com o teor de resíduo, devido ao

aumento dos poros. Já com relação a absorção, observou uma relação diretamente proporcional à quantidade de lodo, estando dentro dos limites apenas as peças queimadas a 1000°C. Contudo, apenas a incorporação de 5%, em massa, de lodo na cerâmica vermelha foi indicada como possível destinação para esse rejeito.

Hossain et al. (2018) estudaram a respeito da adição do lodo têxtil em tijolos ecológicos, porém, diferentemente dos outros trabalhos, o resíduo foi desintoxicado inicialmente a partir da submissão à radiação gama. Os percentuais de incorporação foram 0%, 10%, 25% e 10%, com algumas misturas envolvendo apenas quantidades de solo e lodo e outras contendo também areia. Segundo os autores, a radiação a qual o lodo era submetido também era capaz de promover o aumento da afinidade entre o resíduo e as partículas de argila. Contudo, observou-se que a substituição do solo por lodo em até 50% em massa, apresentou um bom comportamento na produção dos tijolos, mas observaram que com o processo de queima a eliminação da matéria orgânica levou à criação de vazios que reduziram a densidade, aumentaram a absorção de água e tornaram as peças menos resistentes.

Priyagarshini e Kavisri (2018) levaram em consideração a escassez de argila em muitas partes de sua região e viram no lodo têxtil mais uma alternativa para reduzir o uso desse insumo natural. Assim, fabricaram tijolos com os percentuais de 5%, 10% e 15% de lodo substituindo parcialmente a argila. Diante das investigações, observaram que a densidade de tijolos e a resistência à compressão diminuem à medida que o teor de lodo nos tijolos aumenta, enquanto a absorção e a eflorescência da água nos tijolos aumentam, similarmente ao concluído nos trabalhos anteriormente mencionados.

Gunavel et al. (2019) fabricaram tijolos com inserção de lodo têxtil e cimento. A quantidade do lodo variou entre 1,5 e 1,7, em volume, e a quantidade de cimento foi mantida constante em 0,75. Com os resultados, observaram uma alta resistência à compressão e valores baixos de absorção de água, o que levou a melhores desempenhos das peças. Os autores concluíram que a utilização de tijolos é considerada válida, pois foram vistos como econômicos e com resultados mecânicos satisfatórios quando comparados aos tijolos convencionais.

Seguindo o mesmo raciocínio de alguns trabalhos já mencionados, Beshah et al. (2021) prepararam tijolos incorporando lodo em proporções variando de 10% a 40%, com temperaturas de queima de 600, 900 e 1200°C, e concluiu que as porcentagens de 10 e 20% satisfizeram bons critérios conforme os padrões da

Etiópia, com resistência à compressão de 30,43 e 29,10 Mpa, respectivamente, queimados a 1200°C. Além disso, foram encontradas concentrações muito baixas de metais pesados nos ensaios de lixiviação, mostrando que são efetivamente estabilizados nos tijolos de argila queimados.

Premkumar et al. (2021) avaliou as características de tijolos de cinzas volantes com adição de lodo têxtil. Foram moldados tijolos com várias proporções misturadas de cimento, lodo, cinzas volantes e pó de pedra em peças de dimensões 230 mm x 100 mm x 75 mm. Os autores analisaram a densidade, a absorção de água e a resistência à compressão para cada amostra com diferentes concentrações de materiais. Diante das análises, observaram que a densidade das peças reduzia muito com a adição de lodo, e consideraram um aspecto muito positivo, tendo em vista que a menor densidade, segundo os autores, reduz os custos de transporte e mão de obra. Observaram que para cada 20% de lodo têxtil adicionado à mistura, a densidade reduzia em 10%, e que a economia de custos atingiu um máximo de quase 20%.

Por fim, o último trabalho encontrado na literatura relacionado ao uso de lodo em materiais cerâmicos foi o estudo realizado por Delaqua et al. (2022), que assim como outros trabalhos anteriores, avaliou a viabilidade técnica, ambiental e econômica de usar o lodo têxtil seco como matéria-prima para indústria cerâmica tradicional. Os resultados demonstraram que a presença de matéria orgânica no resíduo resultou em alta perda ao fogo, o que aumentou a porosidade da cerâmica, gerando aumento na absorção de água, retração linear de queima e redução da resistência mecânica, mas os valores de todas essas propriedades ainda se encontravam dentro dos limites exigidos pelas normas brasileiras. Em relação à análise ambiental, pode-se concluir que este resíduo pode ser utilizado como subproduto para indústrias cerâmicas tradicionais sem causar danos significativos ao meio ambiente.

2.3.3 Uso de Lodo têxtil em outras aplicações na engenharia civil

Foram encontrados também trabalhos que constituem aplicações do lodo têxtil no setor da engenharia civil, mas não estão dentro da área de materiais de construção ou que abordam mais de uma área. Estes serão descritos objetivamente a seguir.

Um trabalho que trata acerca de geotecnia, é o estudo de Karthikeyan e Vinothkumar (2017), que investiga a melhora das propriedades geotécnicas do solo de algodão preto, que é uma argila expansiva que processa altas características de inchaço e encolhimento devido à alterações no teor de umidade. Diante disso, foi adicionado lodo têxtil a esse solo, em proporções variadas de 10 a 50%, variando os incrementos em intervalos de 10%, e cal hidratada, em proporções de 2% a 10%, acrescentando incrementos de 2%. Concluíram que o solo de algodão preto estabilizado com 20% de lodo e 6% cal, em peso de solo, se mostrou com um desempenho ideal.

Outro estudo nessa área foi o de Cheng et al. (2020), que buscou aplicar lodo têxtil em material de subleito, utilizando tecnologia de solidificação/estabilização e um método de construção do esqueleto, que busca aumentar a resistência do rejeito e estabilizar os metais perigosos e orgânicos presentes no mesmo. Os resultados mostraram que a resistência à compressão não confinada do lodo têxtil como ligante esteve abaixo de 100 KPa, que após a adição de gesso e material esquelético do solo a resistência aumentou mais de 400 KPa, e que no teste de lixiviação os metais e orgânicos estiveram abaixo do valor padrão no extrato lixiviado. Contudo, o lodo foi disposto para subleito por meio da tecnologia e os resultados de lixiviação e resistência estiveram de acordo com os resultados de laboratório.

Oliveira et al. (2020), por sua vez, apresentou um estudo sobre a aplicação de lodo têxtil calcinado como material constituinte de base e sub-base de pavimentos. O lodo foi incorporado num percentual, em relação à massa de solo, de 10%, 15% e 20%. Os autores perceberam, posteriormente, a necessidade de utilizar uma estabilização química à mistura de solo e lodo, com percentuais de 1%, 3%, 5% e 7% de cimento Portland. Contudo, observaram que a incorporação de 10% de lodo levou a um melhor desempenho mecânico e estabilização física, porém, devido às características do resíduo, a estabilização química com adição de 5% e 7% de cimento Portland foi necessária. Assim, concluíram que, embora seja possível o uso de solo adicionado de 10% de lodo nas camadas de base e sub-base em pavimentos com baixo volume de tráfego, os aditivos adicionados podem acabar onerando os custos da aplicação.

Um trabalho que trata acerca de pavimentação asfáltica é o estudo de doutorado de Moura (2021), no qual utilizou-se lodo têxtil em revestimentos asfálticos e analisou-se os âmbitos mecânicos, microscópicos e ambientais. Foram

realizadas dosagens do tipo Marshall contendo de 2% a 5% de lodo e 4,5% a 6,5% de ligante, com o intuito de obter a máxima inclusão do rejeito nos parâmetros limites aceitáveis. O autor concluiu que a inclusão de lodo não gerou prejuízos à durabilidade do concreto asfáltico e demonstrou adesividade satisfatória, bem como que não houve efeito negativo na resistência à tração, deformação permanente e rigidez das misturas. Em relação à resistência à fadiga, afirmou que o lodo não apresentou efeito deletério ao revestimento asfáltico e os resultados de deformação permanente indicam que as misturas avaliadas são indicadas para vias de tráfego médio. Ademais, os ensaios de lixiviação, solubilização e análises microscópicas demonstraram bom aprisionamento do resíduo dentro da matriz asfáltica.

2.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DOS LODOS TÊXTEIS UTILIZADOS EM OUTROS TRABALHOS

Foram avaliados nos trabalhos da Tabela 1, aqueles que apresentavam composição química em óxidos. Dentre os 41 trabalhos encontrados, apenas 14 trouxeram esse tipo de caracterização, e são apresentados na Tabela 2. Os valores sublinhados representam os óxidos em maior concentração, e os que estão em negrito indicam os três maiores componentes de cada estudo

Tabela 2 - Composição química em óxidos de diferentes amostras de lodo têxtil

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Localidade	SC- Brasil	PE-Brasil	PB- Brasil	Japão	China	Bangladesh	Índia	China	RJ- Brasil	Índia	Índia	China	Etiópia	PE-Brasil
SiO ₂	2,94	36,82	59,59	10,3	3,4	12,15	5,83	41,68	29,52	15,16	3,8	2,5	15	14,81
Al ₂ O ₃	10,34	22,13	2,51	44,2	6,2	53,14	0,48	50,83	25,52	3,59	0,3	4,56	36,2	3,62
Fe ₂ O ₃	0,12	8,16	1,28	10,7	60,45	15,65	17,9	0,65	2,45	26,92	18,9	44,51	12,1	1,44
CaO	1,67	8,92	11,71	2,8	0,87	2,5	22,6	0,26	6,11	22,09	33,5	0,94	3,5	28,18
Na ₂ O	1,64	-	-	12,8	-	-	0,72	-	0,93	-	0,06	-	-	-
K ₂ O	0,41	3,49	-	1	-	-	-	0,33	0,97	-	0,04	-	-	-
MnO	-	1,55	-	0,1	0,82	-	0,22	-	0,79	-	-	0,6	-	1,63
TiO ₂	0,43	-	-	3,1	0,53	-	0,01	2,3	0,16	1,32	-	-	-	-
MgO	0,81	-	6,53	1,9	-	-	0,3	-	0,78	-	1	-	2,8	20,98
Cl	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,18
P ₂ O ₅	4,82	7,23	2,62	2,9	2,79	-	0,99	-	1,97	3,47	-	2,05	-	-
SO ₃	-	11,07	3,51	3	24,95	3	-	3,95	-	1,62	0,4	18,23	13,4	4,34
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,07	-	-	-	-
outros	-	0,63	1,03	7,2	-	13,56	50,95	0	1,2	25,76	1,4	0,31	17	2,82
PF	76,42	-	11,22	-	11,81	-	-	-	29,6	-	40,6	26,3	-	20

Adaptado de (1) Prim (1998); (2) Leloup (2012); (3) Oliveira et al. (2014); (4) Rahman et al. (2015); (5) Zhan e Poon (2015); (6) Rahman et al. (2017); (7) Chauhan e chopra (2017); (8) Chen e Wu (2018); (9) Ferreira (2018); (10) Priyadharshini e Kavisri (2018); (11) Goyal et al. (2019); (12) Zhan et al. (2020); (13) Beshah et al. (2021); (14) Moura (2021).

Fonte: O autor, de acordo com adaptações (2023)

Diante desses resultados, percebe-se a grande variabilidade da composição química de lodos têxteis. Enquanto os trabalhos na Índia apresentam lodos com elevadas quantidades de ferro e de cálcio, por exemplo, no Brasil é mais marcante a presença de silício e de cálcio, ao passo que em Bangladesh observa-se uma maior quantidade de alumínio. É possível notar que até mesmo em regiões diferentes de um mesmo país ocorrem variações significativas na composição química de lodos. Percebe-se que no Nordeste brasileiro é mais marcante a presença de cálcio no lodo do que em regiões ao Sul do país. Na China existem trabalhos nos quais se destaca a quantidade de óxido de ferro, enquanto em outros é marcante na composição química a presença de óxido de alumínio. De maneira geral, percebeu-se com a revisão da literatura que isso ocorre em virtude dos diferentes tipos de processos de beneficiamento têxtil e de tratamento do efluente residual adotados, que variam muito de uma empresa para outra, principalmente de países diferentes com variadas culturas.

Contudo, embora seja difícil uma generalização da composição química dos lodos têxteis, observa-se que a presença marcante de silício, alumínio e cálcio se dá principalmente devido ao emprego de argila expandida na estonagem, de sulfato ou policloreto de alumínio na etapa de floculação, e aplicação de óxido de cálcio para correção do pH ou mesmo coagulantes auxiliares, com cálcio em sua composição, no tratamento dos efluentes, respectivamente (SOUTO, 2017; SILVA, 2016).

Além disso, em metade dos trabalhos apresentados na Tabela 1, são trazidos dados referentes a perda de massa ao fogo. Por meio desses trabalhos, percebeu-se que esse parâmetro se refere a perda de massa ocorrida durante queima, que ocorre em virtude da volatilização de compostos, principalmente carbonatos e matéria orgânica. Dentro desse aspecto, as amostras de lodo têxtil geralmente possuem muito material orgânico, que está relacionado com os tecidos beneficiados no processo e com alguns corantes usados que possuem origem orgânica. As fibras têxteis utilizadas, por exemplo, que são classificadas em naturais e sintéticas, são constituídas por compostos orgânicos. As fibras naturais são baseadas em celulose e proteínas, presentes na seda, no algodão, lã e linho. Já nas sintéticas são encontrados compostos orgânicos como acetato de celulose, poliamida, poliéster, entre outros (GUARATINI e ZANONI, 2000).

Em relação a composição mineralógica, foram encontrados difratogramas de caracterização do lodo têxtil em 7 trabalhos dos 14 apresentados na Tabela 1. As

fases mineralógicas mais predominantes na maioria das amostras de lodo são a calcita (CaCO_3) e o quartzo (SiO_2). Segue abaixo a lista das principais fases encontradas nos trabalhos mencionados:

- **Patel e Pandey (2012):** calcita (CaCO_3), vaterita (CaCO_3), hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e sulfato de cálcio (CaSO_4);
- **Leloup (2012):** quartzo (SiO_2), sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) e óxido de ferro (Fe_2O_3);
- **Soares (2016):** Difrátograma quase que totalmente amorfo pelo fato da amostra ser composta por mais de 80% de matéria orgânica;
- **Goyal et al. (2019):** calcita (CaCO_3), quartzo (SiO_2) e óxido de ferro (Fe_2O_3);
- **Moura (2021):** calcita (CaCO_3), quartzo (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2);
- **Ferreira (2018):** calcita (CaCO_3), quartzo (SiO_2), nordstrandita (Al(OH)_3) e heterosita (FePO_4);
- **Delaqua (2022):** calcita (CaCO_3), quartzo (SiO_2), nordstrandita (Al(OH)_3) e heterosita (FePO_4).

Por fim, vale salientar que para a CPRH (2018), levando em consideração a classificação da norma NBR 10004 (ABNT, 2004), considera o lodo têxtil como sendo um resíduo não perigoso (Classe II).

2.5 MATERIAIS POZOLÂNICOS

Antes do termo “pozolana” ser estendido a materiais variados de origens diferentes, era atribuído apenas às rochas vulcânicas existentes na Província de Pozzuoli. O termo foi, então, derivado do nome desse local, que foi antiga Puteoli do Império Romano. Essas rochas foram utilizadas como os primeiros materiais cimentícios, em virtude do fato de possuírem propriedade de endurecimento quando misturadas, na presença de água, com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Com o tempo, o termo foi atribuído também a outros materiais, naturais ou artificiais, de origens, composições e estruturas diferentes, que apresentam comportamento

semelhante ao desses materiais de origem vulcânica (CORDEIRO et al., 2009; DONATELLO et al., 2010; SAMPAIO, 2013).

Atualmente, tanto a norma brasileira NBR 12653 (ABNT, 2014) quanto a norma americana ACI 116R-00 (2005), definem as pozolanas como materiais silicosos ou sílico-aluminosos, que por si só possuem capacidade cimentante nula ou muito baixa, mas que reagem com o hidróxido de cálcio na presença de água e formam compostos com propriedades ligantes.

A NBR 12653 (ABNT, 2014) faz duas classificações acerca dos materiais pozolânicos. A primeira os divide em naturais, artificiais e argilas calcinadas. Pozolanas naturais são os materiais de origem vulcânica ou sedimentar, geralmente com caráter petrográfico ácido, com atividade pozolânica. Artificiais, por sua vez, são materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais com pozolanicidade, e as argilas calcinadas são provenientes de incineração de certas argilas em temperaturas geralmente de 500 a 900°C, apresentando atividade pozolânica. A segunda classificação, divide os materiais pozolânicos nas classes N, C e E, descritas como segue:

- Classe N: Pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas;
- Classe C: Cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas;
- Classe E: Quaisquer pozolanas, não contempladas nas classes N e C.

Mas dentro desse contexto, é válido salientar que Massazza (2003) já afirmava que classificar as pozolanas é uma tarefa muito difícil, tendo em vista que uma mesma classe inclui materiais que são muito diferentes em termos de composição química, mineralógica e origem geológica, e que mesmo assim são relacionados apenas pela capacidade que apresentam de reagir e endurecer quando misturados com cal e água.

As pozolanas, segundo Mehta e Monteiro (2014) reagem com a portlandita, produzida pela hidratação do cimento e formam os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), o que leva a um refinamento dos poros e do tamanho dos grãos, de tal maneira que aumenta a resistência da pasta de cimento e contribui para aumentar a impermeabilidade e reduzir as microfissuras de concretos e argamassas.

2.6 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA POZOLANICIDADE

Quando se analisa os métodos de determinação da atividade pozolânica, é importante se atentar para o fato de que são basicamente divididos em duas categorias: os métodos diretos e os indiretos. Os primeiros, também chamados de métodos químicos, se referem aos que monitoram a presença e o consumo de hidróxido de cálcio com o tempo através de métodos analíticos, e os indiretos, conhecidos também como físicos, se referem ao que utilizam as propriedades físicas de uma amostra como uma extensão da pozolanicidade (DONATELLO et al., 2010).

Porém, alguns pesquisadores, como Medeiros et al. (2015) e Gava e Prudêncio (2007), recomendam que seja feita avaliação por mais de um método, tendo em vista que os químicos e mecânicos possuem limitações e não refletem o real desempenho que seria obtido pelo material pozolânico em argamassas e concretos. Ademais, mesmo que os resultados de diferentes métodos não apresentem correlação entre eles, é necessário que um deles apresente uma tendência evolutiva de consumo de hidróxido de cálcio. A seguir é discutido sucintamente sobre os métodos diretos e indiretos de avaliação da pozolanicidade.

2.6.1 Métodos Diretos

Os métodos diretos tem como principal característica a obtenção de resultados rápidos, e isso se dá porque neles não se acompanha a reação pozolânica, o que é uma vantagem quando precisa-se avaliar o potencial pozolânico do material em curto intervalo de tempo (VASCONCELOS, 2013). Os métodos diretos normalizados atualmente no Brasil são aqueles que envolvem a quantificação de hidróxido de cálcio consumido por titulação. Dentre eles, os mais tradicionais são os métodos de Chapelle modificado e de Frattini.

O método de Chapelle modificado, descrito pela NBR 15895 (ABNT, 2010), que se dá devido a modificações realizadas no procedimento desenvolvido por Chapelle, torna possível caracterizar a pozolana através da taxa de reação do hidróxido de cálcio em um certo período de tempo, que é acelerado pelo aumento da temperatura. A atividade pozolânica é definida, então, pela quantidade de cal fixada pela pozolana por meio de duas soluções de hidróxido de cálcio (uma com proporção de 1g/1g de pozolana/hidróxido de cálcio e uma solução para o ensaio em

branco, só com hidróxido de cálcio) em uma temperatura de 90°C durante 16 horas (CORDEIRO et al., 2009; ABNT, 2010).

Já no método de Frattini, estabelecido pela NBR 5753 (ABNT, 2016), a titulação química é utilizada com o intuito de determinar as concentrações de íons de cálcio (Ca^{+2}) e hidróxido (OH^-) dissolvidas em uma solução aquosa contendo cimento e pozolana depois de certo período de tempo, e a concentração de íon cálcio necessária para tornar-se uma solução de mesma alcalinidade saturada. Contudo, o resultado será dado como positivo se a quantidade de cálcio na solução com cimento for menor do que na solução saturada (DONATELLO et al., 2010; ABNT, 2016).

2.6.2 Métodos Indiretos

Os métodos indiretos não fornecem uma informação sobre o material pozolânico em si, eles medem geralmente uma propriedade física da amostra indicando a extensão da atividade pozolânica. Propriedades como resistência à compressão, condutividade elétrica e evolução do calor por calorimetria, são algumas das utilizadas para a execução desses métodos (DONATELLO et al., 2010).

O método de medição do calor de hidratação utiliza um calorímetro isotérmico, no qual não há variação de temperatura durante as medições. Scrivener et al. (2015) explica que os compostos de cimento são produtos metaestáveis, de tal forma que, quando o cimento é hidratado, eles reagem com a água e adquirem estados estáveis de baixa energia, sendo essas reações exotérmicas. Portanto, por esse método permite-se o registro de medidas contínuas ao longo do tempo, sendo ele indicado, tendo em vista a elevada taxa de calor, para o estudo da fase inicial de hidratação (NAKANISHI, 2013).

Os métodos de condutividade elétrica levam em consideração que o consumo do hidróxido de cálcio em um material pozolânico levará a uma redução dessa propriedade. Dentre eles, um dos métodos mais tradicionais é o de Payá et al. (2001), que, levando em consideração as contribuições do estudo de Lúxan et al. (1989), e o fato de que a dissolução do hidróxido de cálcio até atingir o equilíbrio de saturação é lenta, apresentaram uma metodologia na qual a pozolanidade de um material é definida através da medida da condutividade elétrica de uma amostra em

solução insaturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nas temperaturas 40, 60 e 80°C, com medições de condutividade para os períodos de 100, 1.000 e 10.000 segundos. Ademais, consideraram a influência da pozolana na condutividade das suspensões de água, de maneira que essa contribuição era subtraída da condutividade relativa ao sistema de pozolana e hidróxido de cálcio.

Os métodos relativos à determinação do índice de atividade pozolânica são determinados por meio da avaliação da reatividade com cal e com cimento Portland. No primeiro caso, descrito pela norma NBR 5751 (ABNT, 2015), há a moldagem de três corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 50 mm de diâmetro de 100 mm de altura, de argamassas com pozolana, hidróxido de cálcio P.A., areia normal e água, utilizando uma formulação pré-estabelecida nesse normativo para as quantidades dos materiais sólidos e com água suficiente para atingir uma consistência de 225 ± 5 mm. Diante disso, determina-se a atividade pozolânica com cal por meio do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova após sete dias de cura.

Já no segundo caso, em que há a determinação da atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias, segundo a norma NBR 5752 (ABNT, 2014), são utilizadas duas diferentes formulações de argamassas: A argamassa A, contendo apenas cimento Portland como aglomerante, e a argamassa B, que contém 25% de material pozolânico substituindo parcialmente o cimento. Ademais, a B deverá possuir uma quantidade de superplastificante que forneça um índice de consistência que esteja dentro do intervalo de ± 10 mm do obtido para a argamassa A de referência. O índice de desempenho para este caso será dado pela relação percentual entre as resistências à compressão média da argamassa B e a argamassa de referência.

A avaliação dos índices de pozolanicidade é feita através do estabelecido pela norma NBR 12653 (ABNT, 2014), que determina que o material pode ser considerado pozolânico se caso apresente índice de atividade pozolânica, aos 28 dias com cimento, igual ou superior a 90%, e/ou obtenha resistência mínima de 6 MPa em argamassas com cal aos 7 dias.

2.6.3 Métodos Alternativos

Existem diversas críticas em trabalhos da literatura em relação aos métodos normalizados. Medeiros et al. (2015), por exemplo, mostra que os ensaios normalizados podem acabar apresentando resultados distorcidos de pozolanicidade, especialmente para pozolanas reativas. Dessa forma, ele considera que a realização de um estudo holístico com foco na microestrutura dos materiais é necessária para avaliar o verdadeiro potencial dos possíveis materiais pozolânicos estudados.

No estudo de Hoppe filho et al. (2017), foi avaliada a atividade pozolânica por meio de ensaios normalizados e não normalizados para vários materiais, e os autores concluíram que o ensaio normalizado regido pela NBR 5751 (ABNT, 2015) abria possibilidade para geração de grandes distorções nos resultados reais, tendo em vista que permitia uma variação grande da relação água/aglomerante, fixando a consistência. De tal maneira que a quantidade de água pode influenciar mais do que a própria reação pozolânica.

Assim, Torres et al. (2020) avaliaram a pozolanicidade da cinza do bagaço da cana-de-açúcar, além dos ensaios normalizados, por meio da difração de raios-X e análise termogravimétrica de pastas com cal hidratada para avaliação do consumo de Ca(OH)_2 . Os resultados de microestrutura apresentaram uma boa correlação com os ensaios normalizados.

Dessa maneira, percebe-se que esses estudos mostram que é fundamental a realização de ensaios químicos e de microestrutura para melhor entendimento do material. Métodos analíticos, como a difração de raios-X e termogravimetria são exemplos de ensaios diretos que podem fornecer essa compreensão. No primeiro método é feita a avaliação da estrutura cristalina do material, podendo ser conferida a reatividade pela distinção entre as fases amorfa e cristalina da sílica presente na pozolana ou mesmo identificando-se os produtos hidratados de pastas de cimento, por exemplo. No segundo, por meio da avaliação da perda de massa de amostras de pastas de cimento e pozolana com o aumento da temperatura, e a atividade pozolânica pode ser observada com a diminuição do pico referente ao hidróxido de cálcio, em virtude do consumo deste pela combinação com a pozolana com o avanço da idade de cura, além de ser possível determinar o teor de água quimicamente combinada (NAKANISHI, 2013)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será explanado o programa experimental no qual a pesquisa foi baseada, assim como os materiais utilizados, a metodologia adotada para o preparo das amostras e os procedimentos de ensaios empregados.

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

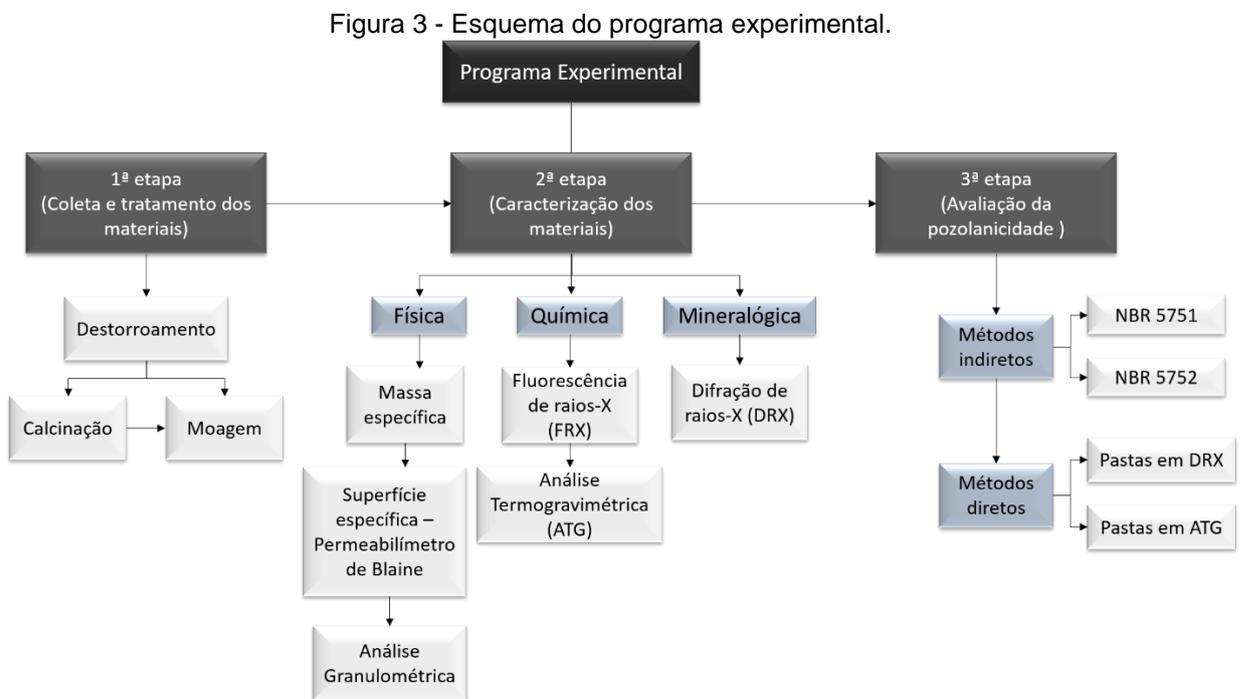
O programa experimental buscou verificar a pozolanicidade tanto do lodo têxtil (LOTex) *in natura* quanto das suas cinzas, avaliar a influência da temperatura de calcinação e da superfície específica nas suas propriedades pozolânicas e características físicas, químicas e mineralógicas. Contudo, avaliar a possibilidade de utilização da amostra com melhores resultados como material cimentício suplementar.

A primeira etapa foi o beneficiamento do material objeto de estudo, com realização de moagem para se obter três faixas de finuras diferentes, além daquelas referentes às amostras apenas destorroadas, e a calcinação em três temperaturas diferentes, escolhidas de acordo com os estudos da literatura acerca de trabalhos que utilizaram lodos. Poucos são os estudos que abordam acerca da influência da calcinação do lodo têxtil, em específico, no seu potencial pozolânico, portanto, atentou-se as informações obtidas com trabalhos referentes também a outros tipos de lodos, como os de estação de tratamento de água (ETA) e de esgoto (ETE).

Em seguida, buscou-se caracterizar os materiais, descritos nos próximos itens, utilizados durante a pesquisa, são estes: o lodo têxtil *in natura*, as cinzas de lodo têxtil (CLT), o hidróxido de cálcio, o cimento Portland e o agregado miúdo. Inicialmente, realizaram-se caracterizações físicas, no Laboratório de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco (DECIV/UFPE), com a determinação da massa específica real dos materiais aglomerantes, por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier, segundo a NBR 16605 (ABNT, 2017), da massa específica do agregado miúdo por meio do método do picnômetro, seguindo as determinações da NM 52 (ABNT, 2009), e superfície específica por meio do método do permeabilímetro de Blaine, de acordo com a NBR 16372 (ABNT, 2015).

Após os ensaios prévios, foram realizadas também caracterizações químicas, por meio da fluorescência de raios-X (FRX), caracterizações mineralógicas, através da difração de raios-X (DRX), bem como análise termogravimétrica (ATG) e da composição granulométrica pelo ensaio de granulometria a laser, tanto do LOTex *in natura* como das cinzas de lodo têxtil.

Por fim, procederam-se os ensaios da análise do potencial pozolânico das amostras de LOTex através dos métodos de determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias (ABNT NBR 5751:2015), com cimento Portland aos 28 dias (ABNT NBR 5752:2014) e dos ensaios em pastas de LOTex com cal, como DRX e ATG. A Figura 3 apresenta o esquema do programa experimental.



Fonte: O autor (2023)

3.2 MATERIAIS

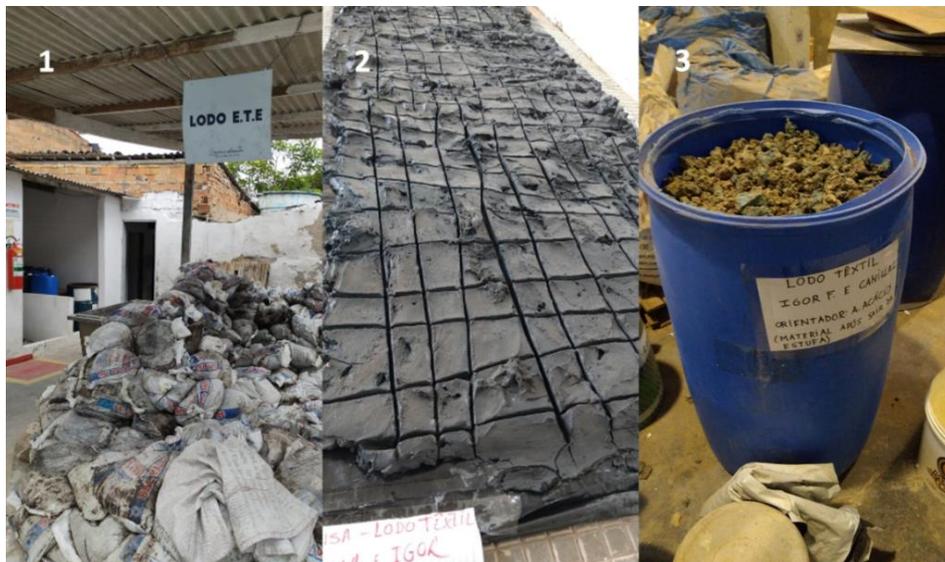
Os materiais foram escolhidos de forma a atender os objetivos deste trabalho e são descritos a seguir.

3.2.1 Lodo têxtil *in natura* e cinzas

O LOTex utilizado neste programa experimental foi obtido na Lavanderia Nossa Senhora do Carmo, localizada no Município de Caruaru – PE. Neste local, o lodo

permanece armazenado em sacos plásticos, enquanto é aguardada sua coleta para encaminhamento ao aterro sanitário. Então, coletou-se o lodo nesses sacos plásticos e o mesmo foi espalhado em lonas plásticas para que o excesso de água fosse removido com a exposição ao ambiente. Em seguida, o lodo foi seco em estufa a 100°C durante 24 horas, quando foi observado que cerca de 2/3 de sua massa era de água, e posteriormente armazenado em recipientes devidamente fechados. A Figura 4 ilustra esse procedimento inicial.

Figura 4 - Coleta e armazenamento do LOTex: 1) estoque de sacos plásticos com lodo na lavanderia; 2) exposição ao ar livre, em lonas, para retirada de excesso de umidade; 3) armazenamento, após secagem em estufa, em recipientes.



Fonte: O autor (2023)

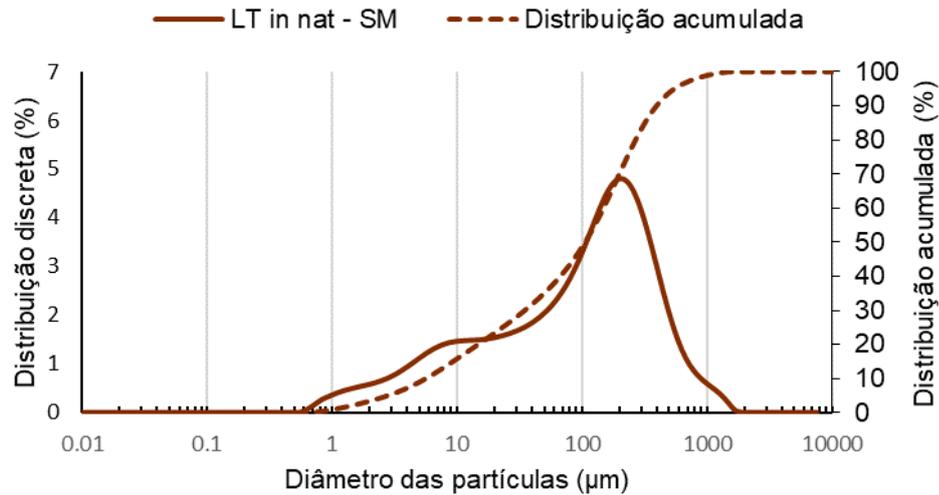
3.2.1.1 Beneficiamento: moagem e calcinação

Para obtenção do lodo *in natura*, a ser utilizado nas etapas seguintes do trabalho, seria necessário um material em forma de pó. Porém o lodo, após seco, se apresentava em aspecto de partículas sólidas grandes. Portanto, foi realizada uma moagem inicial rápida de amostras de 1kg por vez, durante 2 minutos em moinho de bolas, e em seguida o lodo têxtil foi passado em peneira com abertura igual a 0,6 mm. O material passante foi armazenado em sacos plásticos, devidamente fechados, para uso nas etapas seguintes.

Em seguida, o lodo têxtil *in natura* seco e destorroado foi caracterizado quanto à finura, massa específica, distribuição granulométrica e composição química e mineralógica. Os valores obtidos para massa específica e superfície específica do

mesmo foram, respectivamente, 2,16 g/cm³ e 347,83 m²/kg. O tamanho médio das partículas medido pelo seu volume ($D_{[4,3]}$) foi de 164,78 μm e o diâmetro médio de partícula (D_{50}) de 104,97 μm . A Figura 5 traz as suas curvas de distribuição granulométrica discreta e acumulada.

Figura 5 – Curvas de distribuição granulométrica discreta e acumulada do lodo têxtil in natura destorroado.



Fonte: O autor (2023)

Na análise química, obtida através do ensaio de fluorescência de raios-X, foi constatado que o lodo é constituído majoritariamente por óxido de cálcio (CaO), óxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃), e óxido de magnésio (MgO), como mostrado na Tabela 3. A presença marcante dos três primeiros juntos pode contribuir para alguma atividade pozolânica (GOYAL *et al.*, 2019).

Tabela 3 - Composição química em quantidade de óxidos (%) para o lodo têxtil em seu estado bruto.

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	MgO	Cl	P ₂ O ₅	SO ₃	Cr ₂ O ₃	PF
LOTex in nat	15,71	7,11	1,21	16,81	2,16	0,73	0,93	0,16	8,02	2,62	2,69	1,85	0,02	39,79

Fonte: O autor (2023)

A presença do alumínio pode ser justificada porque a lavanderia utiliza de certos agentes coagulantes em seu processo de tratamento de efluentes, como o sulfato de alumínio (Al₂(SO₄)₃) ou o policloreto de alumínio (Al₂(OH)₃Cl₃) (ZAGONEL *et al.*, 2015; LELOUP, 2013). O sulfato de alumínio, por exemplo, é adicionado como coagulante no efluente e as reações desse composto com a água levam à uma solução muito ácida. Assim, a presença marcante de cálcio é justificada porque se torna necessária a adição de óxido de cálcio para corrigir o pH, o que leva à

formação de hidróxidos e aumento da alcalinidade do meio, permitindo a aglutinação das partículas, redução da turbidez e cor do efluente desejadas no processo. Além disso, há também o fato de que existe ocorrência de dificuldade de coagulação dos flocos formados, fazendo-se necessária a adição de coagulantes auxiliares para o processo de floculação, sendo utilizado, por exemplo, o bicarbonato de cálcio para acelerar a precipitação, ou mesmo o carbonato de cálcio para, em meio aquoso, reagir formando bicarbonato (SILVA, 2016; SOUTO, 2017).

A presença do magnésio se dá tanto porque a cal comercial utilizada para correção do pH também possui grande percentual de óxido de magnésio em sua composição, tendo em vista que no processo podem ser utilizadas cales consideradas dolomíticas, quanto em virtude de um dos tratamentos de melhora de solidez e fixação dos corantes, como citou Beltrame (2000), ser a realização de lavagem em água dura após o tingimento, na qual há formação de sais de cálcio ou magnésio, que são insolúveis e podem, portanto, estar presentes no lodo têxtil.

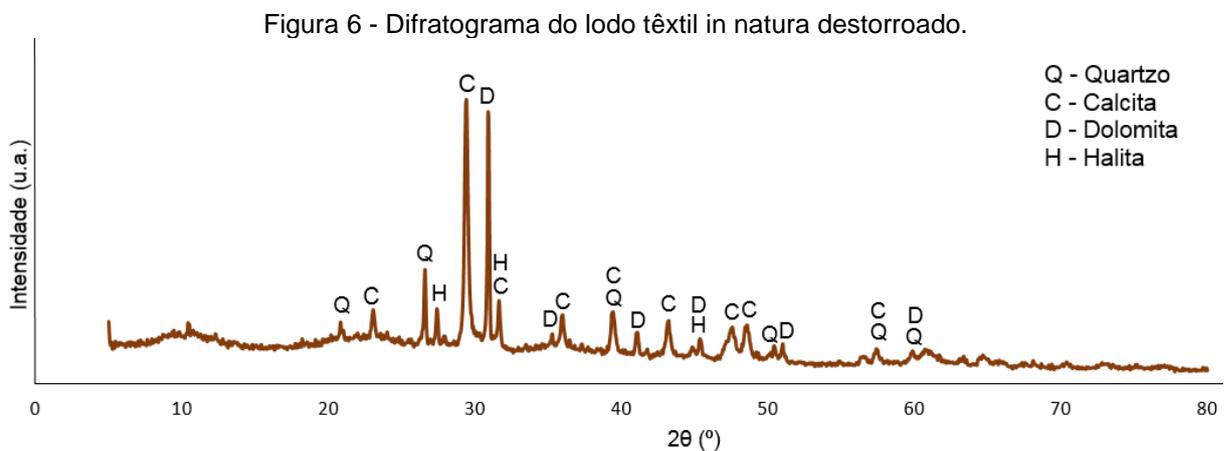
A elevada quantidade de silício se deve principalmente aos processos de estonagem, que são realizados com o intuito de promover característica envelhecida a certos tipos de jeans, seja com uso de pedras pomes, seja com materiais sintéticos como a argila expandida, ou mesmo com uso de pó ou granulados abrasivos. Estes são aplicados de forma inerte junto aos demais produtos químicos do processo, sem alterar a ação química, apenas para gerar certo grau de desgaste nas peças e obter a característica estética de “desbotada” ou preparar o tecido para receber os corantes e alvejantes (SOUTO, 2017; SILVA, 2016; FILHO, 2013).

O aparecimento de cloro pode ser justificado pelo uso de alvejantes, como o hipoclorito de sódio e o hipoclorito de cálcio, utilizados para retirada de cor ou limpeza de áreas brancas do tecido, dando a eles aspecto de brilho. Há também o uso de sais inorgânicos, como cloreto de sódio, para melhorar o processo de tingimento, em virtude de sua contribuição na fixação do corante. Ademais, é comum o uso de tensoativos (ou surfactantes) e de agentes oxidantes nas lavanderias, como o permanganato de potássio, e são utilizados alguns álcalis, como os hidróxidos de sódio e de potássio na fabricação desses produtos químicos. Ainda nesse contexto, vale ressaltar que, além do bicarbonato, o hidróxido de sódio (NaOH) também é utilizado como coagulante para impulsionar uma maior velocidade de sedimentação e também redução do pH (OLIVEIRA, 2008; SOUTO, 2017). Essas

informações justificam a presença de álcalis e manganês na composição química observada do lodo têxtil.

Em relação a perda ao fogo para o lodo *in natura*, percebe-se um percentual muito elevado, de cerca de 39,79%. Isso se dá principalmente em virtude da grande quantidade de material orgânico, que está associado tanto com os tecidos que foram beneficiados no processo, ou seja, as fibras têxteis naturais e sintéticas, quanto também com alguns corantes de origem orgânica empregados no decorrer da preparação das peças (SOUTO, 2017; GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, 2000).

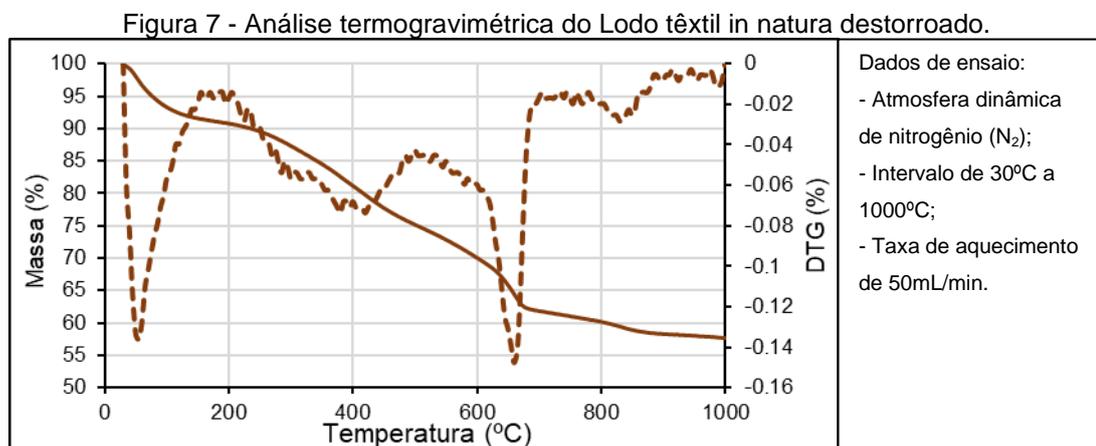
Na Figura 6 está apresentando o difratograma do Lodo têxtil *in natura*. Foram encontrados picos de calcita (CaCO_3), quartzo (SiO_2) e dolomita ($\text{Ca.Mg}(\text{CO}_3)_2$) majoritariamente, resultado este, já esperado, uma vez que o FRX indicou a predominância dos elementos químicos constituintes desses minerais. Vale ressaltar também a presença de picos que correspondem a Halita (NaCl), que deriva exatamente dos alvejantes e tensoativos utilizado no processo têxtil, como já explanado anteriormente.



Fonte: O autor (2023)

Outra forma de caracterizarmos o lodo, é por meio da realização da análise termogravimétrica, mostrada na Figura 7. Nela, observa-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.*, 2015b). 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%, com 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 (SATHIYA e SWAMINATHAN, 2022; SCRIVENER et al., 2016; RIBEIRO et al., 2021). Ademais, o quarto e último estágio, onde ainda há uma leve perda de massa de em torno 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 (SATHIYA e SWAMINATHAN, 2022; PENG et al., 2015). A perda de massa total foi de 42,38% na análise termogravimétrica do Lodo têxtil *in natura*.



Fonte: O autor (2023)

Com base em outras pesquisas (MARTÍNEZ-GARCÍA *et al.*, 2012; MOHAMMED, 2017; SABIR; WILD; BAI, 2001), sabe-se que o processo de perda completa da água quimicamente ligada com a calcinação, pode resultar em uma estrutura colapsada e desarranjada, ou seja, um estado amorfo e, conseqüentemente, pode aumentar a reatividade pozzolânica do material calcinado. Portanto, além do preparo inicial para obtenção do lodo seco *in natura*, foram realizadas calcinações em temperaturas específicas para produção de cinzas de lodo têxtil como forma de aumentar o potencial pozzolânico do mesmo. Optou-se neste estudo pelas temperaturas de 600°C, 700°C e 800°C, tendo em vista que se encontram acima de 550°C, para que haja a eliminação da maior parte dos compostos orgânicos macromoleculares e materiais voláteis indesejáveis. De modo a evitar a redução da amorficidade do material, optou-se por não ultrapassar a temperatura de 850°C e evitar possíveis cristalizações com a sinterização de lodos

e a cristalização da sílica amorfa (AGRA, 2022; BASTO, 2018; TORRES, 2019; XIE *et al.*, 2018; VASQUES MENDONÇA *et al.*, 2015). Este procedimento pode evitar a redução da amorficidade e, conseqüentemente, da reatividade do material pesquisado.

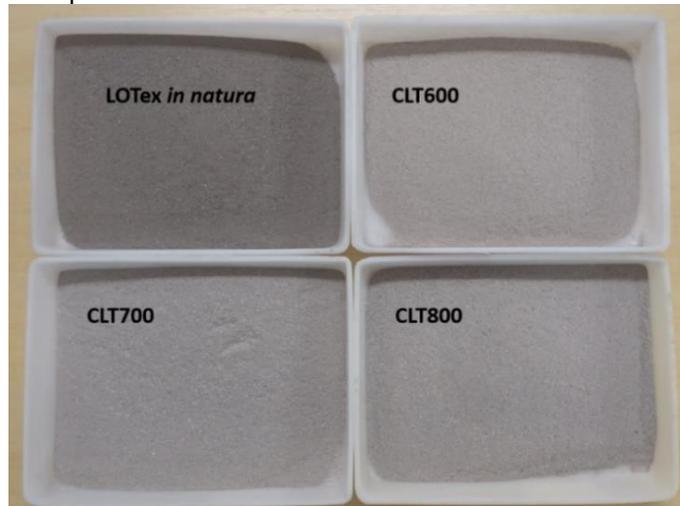
A calcinação do LOTex in natura foi realizada por meio da queima por 3 horas de permanência no patamar de queima e com taxa de aquecimento de 10°C/min nas temperaturas específicas escolhidas para o estudo, em mufla da Linn Elektro Therm de modelo CC405 (Figura 8). Vale salientar que com as calcinações a 600°C, 700°C e 800°C foram observadas perdas de massa médias de 26,85%, 32,25% e 34,65%, respectivamente. A aparência das amostras calcinadas e destorroadas está exposta na Figura 9.

Figura 8 - Calcinação do LOTex a 600, 700 e 800°C por 3 horas no forno



Fonte: O autor (2023)

Figura 9 - Aparência das amostras destorroadas in natura e calcinadas

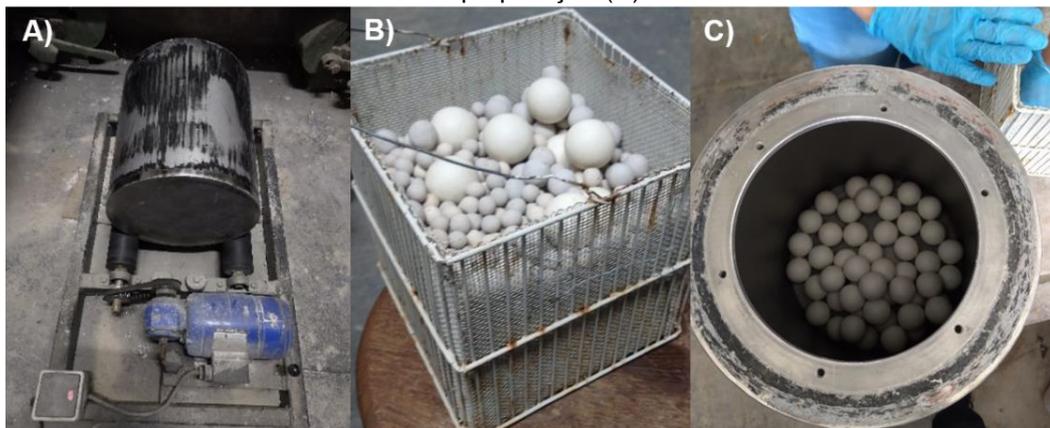


Fonte: O autor (2023)

Outro beneficiamento aplicado nesta pesquisa foi a cominuição do material em partículas menores. É consensual que moagem pode ser fundamental para que ocorra a elevação do potencial pozolânico do material por meio do aumento de sua área de superfície específica Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), os materiais pozolânicos possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas, quando são finamente fracionados e na presença da água, certamente reagirão com o hidróxido de cálcio em temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes

Tanto o LOTex *in natura* quanto o calcinado, nas três temperaturas mencionadas anteriormente, foram moídos durante determinados períodos de tempo no moinho de bolas, com o intuito de se obter mais 3 faixas de finura, além da obtida quando o lodo foi apenas destorroado. Estas foram separadas de acordo com os resultados obtidos pelo método de Blaine, em amostra sem moer (apenas destorroada), com superfície específica 600 m²/kg, 900 m²/kg e 1200 m²/kg. O moinho de bolas utilizado no trabalho foi um cilíndrico com dimensões 30 cm x 26 cm e volume 15,9 litros (Figura 10). Os corpos moedores são esferas de porcelanas com três diâmetros diferentes: 35 mm, 20 mm e 13 mm. Foi utilizado 3,32 kg de bolas menores, 2,16 kg de bolas médias e 3,12 kg das bolas maiores, totalizando 8,6 kg. Durante o processo, foi colocado 1 kg de amostra por moagem, com uma velocidade do moinho de 50 rpm.

Figura 10 - Moinho de bolas (A), corpos moedores utilizados (B) e inserção destes no moinho durante sua preparação (C).

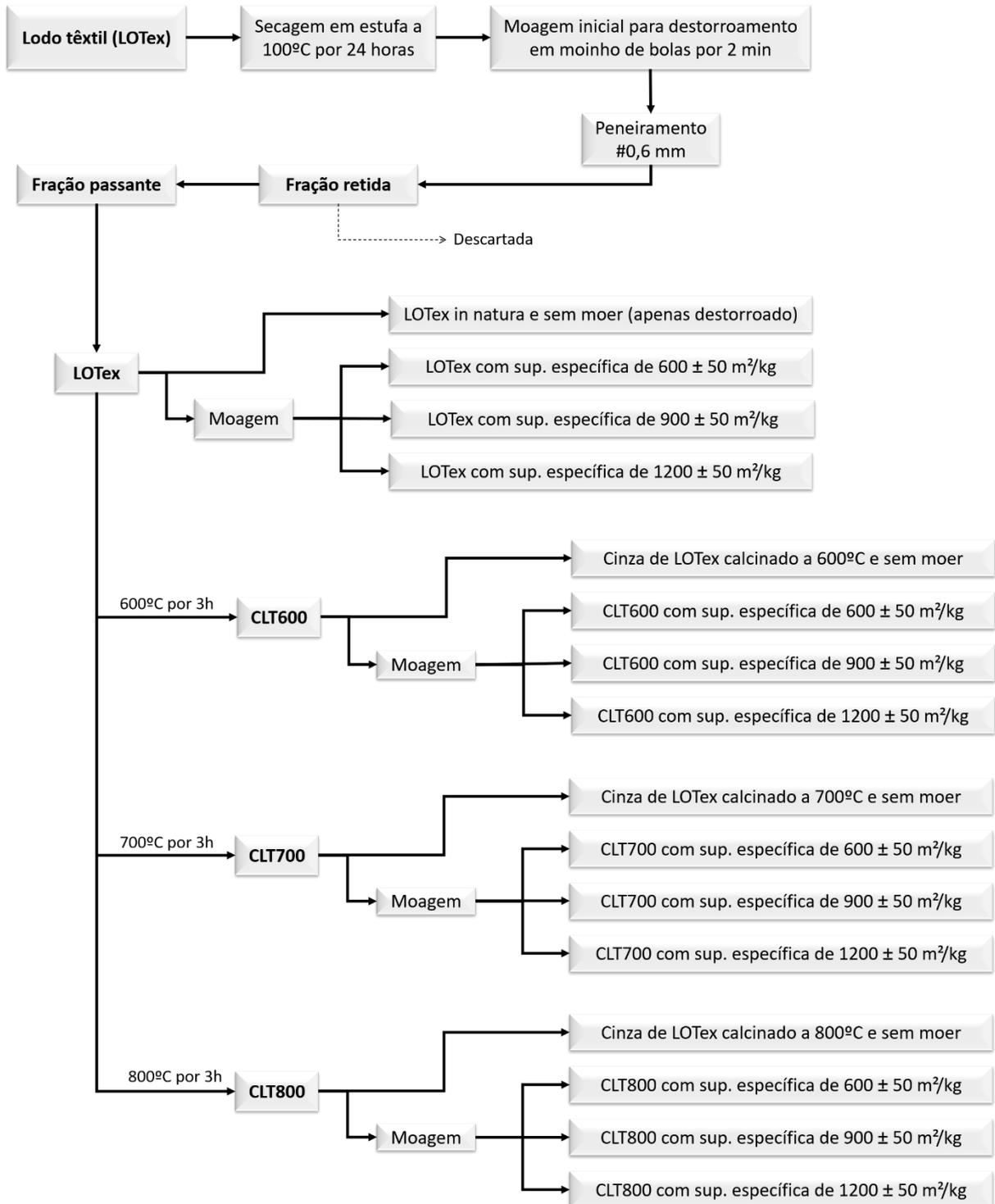


Fonte: O autor (2023)

Este procedimento foi realizado para cada uma das temperaturas de calcinação, totalizando 16 amostras a serem avaliadas, sendo 4 amostras *in natura*, e 4 amostras para cada temperatura de calcinação, como mostra em detalhes o

fluxograma esquemático de beneficiamento do Lodo têxtil coletado apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma esquemático do beneficiamento do Lodo têxtil



Fonte: O autor (2023)

É válido ressaltar que houve bastante dificuldade na obtenção da superfície específica de $1200 \pm 50 \text{ m}^2/\text{kg}$ para as cinzas com a moagem a seco. Isso porque por esse tipo de moagem foi observada bastante aglomeração das partículas. Com o andamento da moagem, sempre chegava em um determinado momento que ao invés de aumentar, ocorria redução da superfície específica. Este comportamento induzia a impressão de que as partículas haviam aumentado de tamanho, quando na verdade estava ocorrendo um processo de aglomeração. A possível explicação para esta aglomeração é que a ação mecânica da moagem em tempos prolongados pode gerar uma série de efeitos nas pequenas partículas processadas, resultando no aumento da energia superficial e formação de aglomerados. O processo de quebra de materiais frágeis está diretamente ligado à formação de microtrincas, e estas reduzem com a diminuição do tamanho das partículas. Assim, essa redução de microtrincas pode gerar uma mudança no mecanismo de dissipação de energia no interior do material sólido e provocar um aumento de tensões na estrutura cristalina dos minerais constituintes, o que pode levar a estagnação da taxa de fragmentação das partículas, levando a uma redução na eficiência de moagem (GUZZO et al., 2019; PALANIANDY et al, 2007; BOLDYREV, 2006).

Diante do exposto, apenas para obtenção das cinzas da faixa de finura mais elevada decidiu-se realizar processo de moagem a úmido em moinho de bolas. Este é o método mais tradicionalmente usado na produção de massas cerâmicas, em virtude de que por meio da moagem via úmida é possível atingir superfícies específicas mais altas em menos tempo. A moagem via úmida se mostrou eficiente neste trabalho e permitiu obter o grau de moagem mais elevado (finura Blaine de $1200 \text{ m}^2/\text{kg}$) como será apresentado na Tabela 12 do item 4.1.1. Na moagem via úmida, as matérias-primas são moídas na forma de suspensões aquosas e ocorre fundamentalmente através dos mecanismos de impacto e cisalhamento até que as distribuições de tamanhos de partículas desejadas sejam alcançadas (MELCHIADES, 2011; RIBEIRO e ABRANTES, 2001). Utilizou-se 1 kg de água deionizada para cada 1kg de amostra de lodo têxtil no processo de moagem úmida neste trabalho.

Em seguida, o LOTex *in natura* e as cinzas de lodo, tanto destorroados quanto moídos, foram caracterizados quanto à massa específica, finura, distribuição granulométrica e composição química e mineralógica. Os valores obtidos em toda essa caracterização serão apresentados e discutidos nos resultados deste estudo.

3.2.2 Hidróxido de cálcio

Para o ensaio de determinação da atividade pozolânica com cal, utilizou-se o hidróxido de cálcio P.A, fornecido pela empresa Química Moderna, com teor mínimo de 95%, por se tratar de um material com elevado grau de pureza, como indicado pela NBR 5751 (ABNT, 2015), a fim de garantir maior segurança na obtenção dos resultados. Através do ensaio utilizando o frasco de Le Chatelier (NBR 16605:2017), a massa específica determinada para este material foi de 2,24 g/cm³. Na análise química por fluorescência de raios-X, apresentada na Tabela 4, constatou-se que este material é constituído basicamente por óxido de cálcio (CaO).

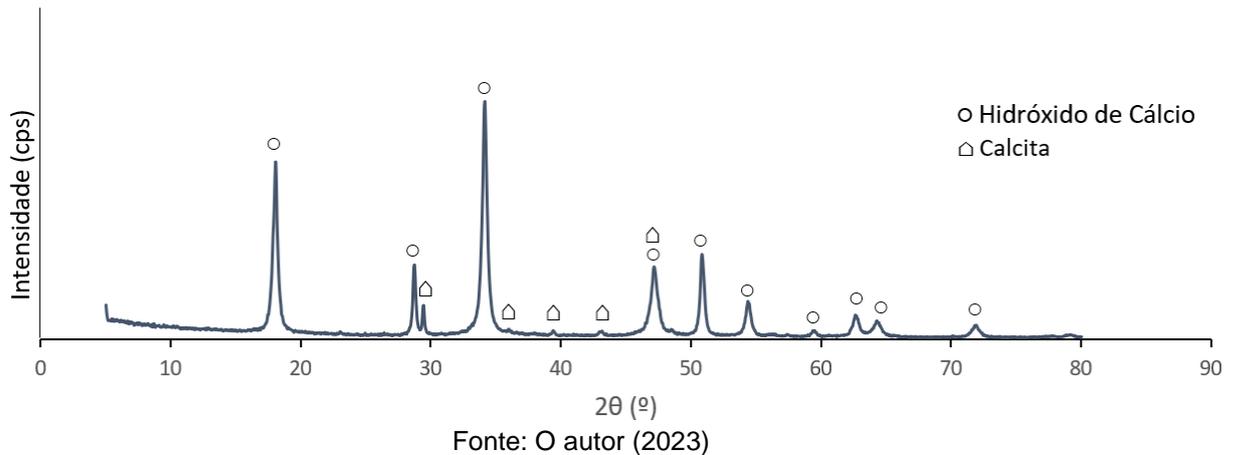
Tabela 4 - Composição química em quantidade de óxidos (%) do hidróxido de cálcio P.A

Óxido	Hidróxido de cálcio p.a.
SiO ₂	0,26
Al ₂ O ₃	0,1
Fe ₂ O ₃	0,08
CaO	72,98
K ₂ O	0,24
MgO	0,96
P ₂ O ₅	0,07
SO ₃	0,04
SrO	0,15
PF	25,13

Fonte: O autor (2023)

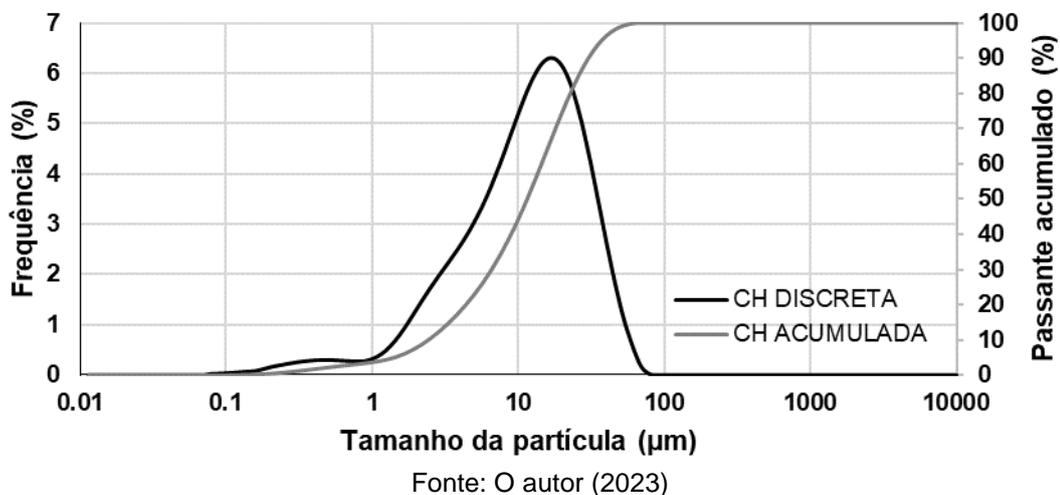
Na análise mineralógica, apresentada na Figura 12, foi identificado que o material é composto majoritariamente de hidróxido de cálcio e picos menores de calcita (CaCO₃), confirmando o elevado teor de Ca(OH)₂, o que favorece à sua reação com o material pozolânico.

Figura 12 - Difratoograma do hidróxido de cálcio P.A



A Figura 13, por sua vez, apresenta a distribuição granulométrica discreta e contínua das partículas do hidróxido de cálcio obtidas por granulometria a laser. Foi possível verificar um diâmetro superficial médio das partículas de 3,99 μm , confirmando-se a elevada finura deste material.

Figura 13 - Distribuição granulométrica discreta e acumulada do hidróxido de cálcio P.A

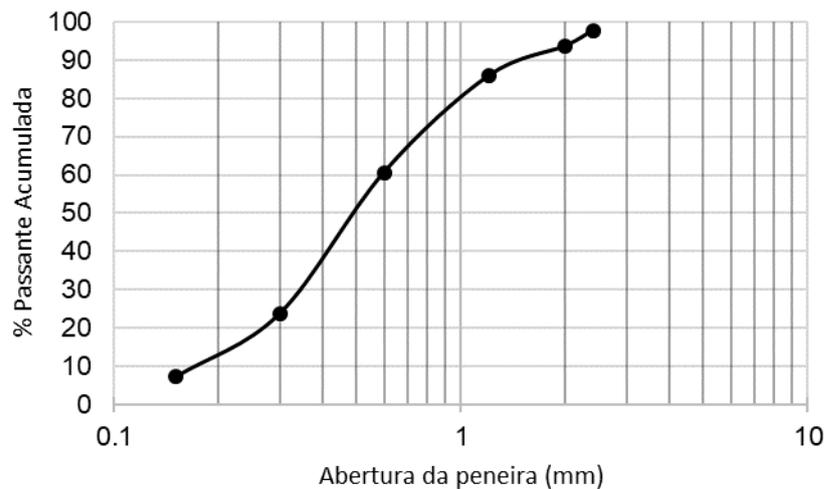


3.2.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado nas argamassas, tanto para os ensaios da NBR 5751 (ABNT, 2015) quanto para os da NBR 5752 (ABNT, 2014), foi uma areia quartzosa cuja composição granulométrica é apresentada na Figura 14. Possui módulo de finura de 2,25, dimensão máxima característica de 2,4 mm e massa específica de 2,47 g/cm^3 . Não foi possível utilizar areia normal, fornecida pelo

Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT-SP), em virtude dos custos elevados com a grande quantidade necessária para suprir todos os ensaios com as 16 amostras em estudo. Portanto, optou-se por um agregado miúdo que apresentasse uma composição granulométrica próxima da areia normatizada segundo a NBR 7214 (ABNT, 2015), assim como ocorreu nos trabalhos de Torres (2019) e Gonzaga (2022).

Figura 14 - Distribuição granulométrica discreta e acumulada do agregado miúdo



Fonte: O autor (2023)

3.2.4 Cimento Portland

O cimento utilizado para confecção das argamassas para determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias, referente à NBR 5752 (ABNT, 2014) foi o composto com fíler, CP II-F 40, da empresa Cimento Nacional. Sua composição química e suas características físicas e mecânicas encontram-se nas Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente.

Tabela 5 - Composição química do cimento CP II-F-40 obtida por FRX

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CuO	MnO	SO ₃	NiO	TiO ₂	PF*
CP II-F-40	15,73	3,87	3,26	63,51	0,64	1,72	1,26	0,22	0,03	0,02	3,98	0,01	0,27	5,28

Fonte: O autor (2023)

*PF: Perda ao fogo

Tabela 6 - Características físicas e mecânicas do cimento CP II-F-40

Ensaio		Resultados	Limites NBR
Finura	Resíduo na	0,06	≤ 10,0
	Blaine (cm ² /kg)	4.446	N.A.
Massa específica (g/cm ³)		3,1	N.A.
Início de pega (min)		170	≥ 60
Fim de pega (min)		230	≤ 600
Resíduo insolúvel		1,98	< 7,5
Expansibilidade a quente (mm)		0,1	≤ 5
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	24,1	N.A.
	3 dias	33,5	≥ 15,0
	7 dias	41,1	≥ 25,0
	28 dias	48,2	≥ 40,0

Fonte: Cimento Nacional (2021).

3.2.5 Aditivo

O aditivo utilizado foi o Sika Viscocrete 100HE, fornecido pela Sika Brasil. Este aditivo atua através da adsorção superficial e do efeito estérico, promovendo a separação das partículas de aglomerante, proporcionando uma melhoria na fluidez da mistura. Os dados técnicos estão mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados técnicos do aditivo superplastificante SIKA VISCOCRETE 100HE

Propriedade	Resultado
Base	Solução de policarboxilato em
Aspecto/Cor	Líquido castanho
Densidade	1,09 ± 0,02 kg/L
pH	5,0 ± 1,0

Fonte: Sika (2022).

A necessidade de utilização do aditivo, é importante salientar, se deu em virtude deste contribuir para um melhor adensamento das amostras, mas ao mesmo tempo manter a relação água/aglomerante fixa para todas as misturas nos ensaios de determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias (NBR 5751) e de determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (NBR 5752).

3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

Serão descritos a seguir os procedimentos adotados para os ensaios executados na pesquisa.

3.3.1 Caracterização física dos materiais anidros

As análises físicas foram feitas a partir dos ensaios de massa específica pelo método do frasco de Le Chatelier, superfície específica pelo método do permeabilímetro de Blaine e distribuição granulométrica pelo ensaio de difração a laser.

3.3.1.1 Massa específica real por meio do frasco de Le Chatelier

Os valores de massa específica dos materiais foram obtidos através do uso do frasco volumétrico de Le Chatelier. Adotou-se os procedimentos regidos pela norma NBR 16605 (ABNT, 2017).

Esse método consiste na determinação da relação entre a quantidade de massa do material e o volume por ela ocupado. Foi escolhido o álcool isopropílico para realização do procedimento, tendo em vista que é necessário apenas que o líquido não reaja quimicamente com o material a ser estudado e possua massa específica inferior ao mesmo, podendo, portanto, ser realizado também com outros líquidos que satisfaçam a esses requisitos, como é o caso do querosene, por exemplo.

O procedimento consiste em colocar no frasco volumétrico de Le Chatelier o líquido em quantidade suficiente para que seu volume esteja compreendido entre as marcas de 0 cm³ a 1 cm³. Em seguida, o mesmo foi submetido a um banho termorregulador por aproximadamente 30 minutos e o volume inicial (V1) foi registrado. Na sequência, pesou-se o conjunto (frasco mais líquido) para que, posteriormente, fosse possível mensurar a quantidade de amostra que foi ensaiada. A massa de material adicionada foi suficiente para provocar um deslocamento do líquido até um valor entre as marcas de 18 e 24cm³.

Após esse procedimento, submergiu-se novamente o frasco no banho termorregulador durante 30 minutos e registrou-se o volume final (V2). A massa

específica foi calculada através da variação de volume do álcool isopropílico no frasco (V2-V1) provocada pela massa da amostra ensaiada. A Figura 15 ilustra o procedimento de determinação da massa específica do LOTex *in natura*, os demais materiais ensaiados seguiram o mesmo padrão.

Figura 15 - Determinação da massa específica do LOTex utilizando o frasco de Le Chatelier



Fonte: O autor (2023)

3.3.1.2 Massa específica do agregado miúdo

A massa específica do agregado miúdo foi determinada por meio do método do picnômetro, regido pela NM 52 (ABNT, 2009). Para realização do ensaio, separou-se um quilograma de agregado miúdo e o colocou em um recipiente, coberto com água e deixado em repouso por 24 horas. Em seguida, a amostra foi estendida sobre uma superfície e submetida à uma secagem até que não houvesse mais umidade superficial. Para verificar se havia ou não umidade superficial, a amostra era colocada no molde tronco cônico e suavemente compactada com vinte e cinco golpes de haste de compactação. Quando o molde era levantado verticalmente, se ainda houvesse umidade superficial, o agregado conservava a forma do molde. Se isso acontecer, a secagem deve continuar até que o tronco cônico de agregado miúdo desmorone ao retirar o molde, pois, assim, ele estará na condição saturada superfície seca.

Depois de atingir essa condição, colocou-se 500 gramas da amostra (m_s) em um frasco e foi registrada a massa do conjunto (m_1). Preencheu-se o frasco (picnômetro) com água até a marca de 500 ml e decorrida uma hora, completou-se novamente com água até a marca de 500cm³ e pesou-se a massa total (m_2). Por fim,

o agregado miúdo foi retirado do frasco e levado à estufa, onde foi seco a 105°C até massa constante e pesado (m).

A equação 01 foi utilizada no cálculo da massa específica aparente do agregado seco:

$$d_1 = m / (V - V_a) \quad (01)$$

Sendo,

- d_1 , a massa específica aparente do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;
- m , a massa da amostra seca em estufa;
- V , o volume do frasco, em centímetros cúbicos;
- V_a , o volume de água adicionada ao frasco, em centímetros cúbicos.

Foi determinada ainda a massa específica do agregado saturado de superfície seca, conforme Equação 02.

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} \quad (02)$$

Onde,

- d_2 , é a massa específica do agregado saturado superfície seca, em gramas por centímetro cúbico;
- m_s , a massa da amostra na condição saturado superfície seca;
- V , o volume do frasco, em centímetros cúbicos;
- V_a , o volume de água adicionada ao frasco, em centímetros cúbicos.

Por fim, a massa específica do agregado foi calculada, de acordo com a Equação 03.

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{r_a}} \quad (03)$$

Sendo,

- d_3 , a massa específica, em gramas por centímetro cúbico;
- m , a massa da amostra seca em estufa;
- m_s , a massa da amostra na condição saturado superfície seca;
- V , o volume do frasco, em centímetros cúbicos;
- V_a , o volume de água adicionada ao frasco, em centímetros cúbicos.
- r_a , a massa específica da água, em gramas por centímetro cúbico.

3.3.1.3 Superfície específica pelo método de Blaine

A determinação da finura foi realizada pelo método de Blaine, conforme o procedimento da norma NBR 16372 (ABNT, 2015), que determina a área superficial específica por meio da medida da permeabilidade do material, isto é, do tempo gasto para um certo volume de ar, sob dada pressão, atravessar o material. Esta técnica utiliza o permeabilímetro de Blaine (Figura 16) e é amplamente utilizada para o cimento Portland e outros materiais pulverulentos.

Figura 16 - Permeabilímetro de Blaine



Fonte: O autor (2023)

A superfície específica foi calculada de acordo com a Equação 04.

$$S = \frac{K * \sqrt{\xi^3 * t}}{\rho * (1 - \xi) * \sqrt{0,1 * \eta}} \quad (04)$$

Onde,

- S é a superfície específica, em centímetros quadrados por grama;
- K é a constante do aparelho;
- ξ é a porosidade da camada;
- t é o tempo medido, em segundos;
- ρ é a massa específica do material, em gramas por centímetros cúbicos;

- η é a viscosidade do ar à temperatura do ensaio.

É válido salientar que a realização desse experimento tem grande importância, em virtude de que materiais com a mesma granulometria podem apresentar superfícies específicas diferentes em decorrência da forma e rugosidade das partículas e de vazios interiores (CORDEIRO, 2006).

3.3.1.4 Distribuição granulométrica por difração a laser

As curvas granulométricas discreta e acumulada dos materiais em pó foram obtidas através da granulometria a laser. Neste método a granulometria é determinada pela difração laser (low angle laser light scattering – LALLS ou espalhamento de luz laser de ângulo baixo) de um granulômetro. Esse equipamento é capaz de medir a distribuição de tamanho das partículas pela medição da variação angular na intensidade da luz difundida à medida que um feixe de laser interage com as partículas dispersas da amostra. Partículas grandes dispersam a luz em pequenos ângulos em relação ao feixe de laser e partículas pequenas dispersam a luz em ângulos grandes.

Esse método é muito utilizado por sua eficiência em relação à rapidez na geração de resultados, pelas respostas instantâneas, pelo grande número de partículas amostradas em cada medição, centenas de medições por dia e devido à ampla faixa de determinação de tamanho (MALVERN, 2017).

Neste trabalho utilizou-se o granulômetro a laser Mastersizer 2000, da Malvern Instruments, com a unidade de dispersão Hydro 2000MU, apresentado na Figura 17. O ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia Mineral – Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco. Além das curvas granulométricas discretas e acumuladas foi possível determinar o diâmetro médio das partículas pelo volume ($D_{4,3}$) e o diâmetro do grão correspondente a 50% do material passante (D_{50}). O dispersante utilizado nas amostras de materiais cimentícios suplementares foi a água.

Figura 17 - Granulômetro a laser Mastersizer 2000 utilizado neste trabalho.



Fonte: O autor (2023)

3.3.1.5 Distribuição granulométrica do agregado miúdo

Para determinação da composição granulométrica do agregado miúdo utilizou-se a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Uma 1 kg de areia foi colocada sob um conjunto de peneiras, que foi agitado manualmente e a massa retida em cada malha foi pesada e anotada. De posse das porcentagens retidas em cada peneira foi possível traçar o gráfico da distribuição granulométrica do material.

Assim, o módulo de finura, obtido através da soma das porcentagens retidas acumuladas em massa nas peneiras da série normal, dividida por 100, e a dimensão máxima característica, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa, e, também foram determinados.

3.3.2 Caracterização química e mineralógica

Foram realizados os ensaios de fluorescência de raios-X e análise termogravimétrica para avaliação química da amostra. Para análise mineralógica foi utilizada a difração de raios-X. A seguir, serão descritas as principais metodologias adotadas para realização de cada um deles.

3.3.2.1 Fluorescência de raios-X (FRX)

A espectrometria de fluorescência de raios-X é uma técnica não destrutiva que tem por objetivo identificar a composição de vários tipos de materiais, realizando uma análise qualitativa e quantitativa de cada elemento que se encontra na amostra.

Essa metodologia está baseada no princípio de que, quando são emanados raios-X, por um tubo operado em condições de alta voltagem, bombardeando um átomo, alguns de seus elétrons são ejetados do seu orbital atômico pela absorção de uma onda de luz (chamada de fóton) com energia suficiente. Isso ocorre quando a energia desse fóton é maior do que a energia de atração do elétron ao núcleo do átomo. Diante disso, uma vez que a diferença de energia entre dois orbitais específicos de um determinado elemento é sempre a mesma, sendo uma característica de um elemento particular, o fóton que é emitido quando um elétron se move entre esses dois níveis terá sempre a mesma energia. Dessa forma, conhecendo-se o comprimento de onda do raio-X emitido por um elemento particular, que nada mais é do que a energia do fóton emitido pelo mesmo, é possível determinar a identidade daquele elemento (RIBEIRO et al., 2021).

A composição química em porcentagem de óxidos foi obtida por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios-X modelo Rigaku modelo ZSX Primus II, realizada no Núcleo de Estudos Geoquímicos do Laboratório de Isótopos Estáveis (NEG-LABISE) da UFPE. Para realização do ensaio foram utilizadas amostras do material passante na peneira com abertura de malha de 75 μm (nº 200).

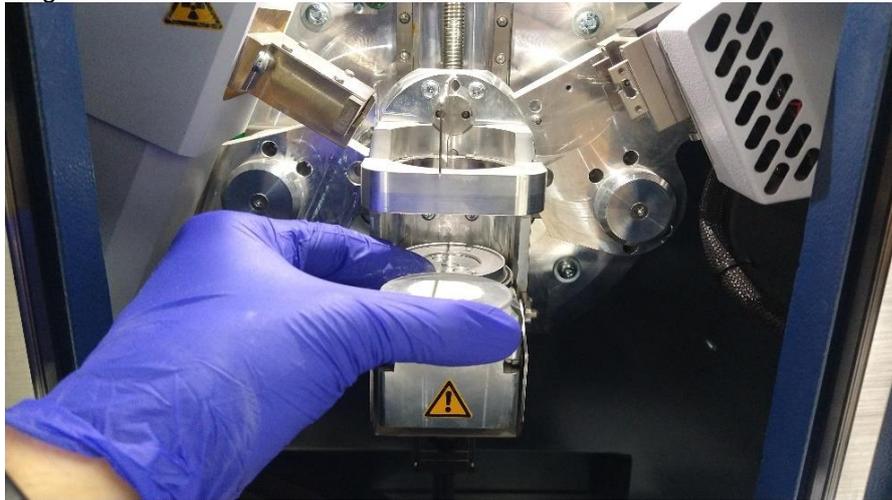
3.3.2.2 Difração de raios-X (DRX)

A difração de raios-X é um método também não destrutivo que permite o fornecimento de informações das fases mineralógicas de um material. Neste método um feixe de raios X incide na amostra, excitando os elétrons contidos nos seus átomos. Dependendo do ângulo que o feixe incide, a energia liberada pela mudança no nível de energia dos elétrons pode variar de acordo com a estrutura cristalográfica do mineral. Essa energia é captada por um detector, que consegue identificar sua intensidade a cada intervalo angular. Dessa forma, os picos do difratograma são produzidos quando, para um dado valor do ângulo de incidência e difração de um feixe de raios-X (θ), um dado plano atômico possui distância interplanar (d) que satisfaz a lei de Bragg, representada por $n\lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta$, sendo λ o comprimento de onda. Dessa forma, a altura dos picos é proporcional às intensidades dos efeitos da difração (CPMTC, 2015).

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LabTag) da UFPE, utilizando um difratômetro da Bruker modelo D2 Phaser. Os parâmetros do ensaio foram: intervalo de varredura (2θ) de 5 a 80° ; passo angular = $0,05^\circ$; 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 $1,54 \text{ \AA}$.

No procedimento adotado, inicialmente as amostras foram peneiradas na malha nº 200 ($75 \mu\text{m}$). O material passante foi colocado no porta amostras e prensado com lâmina de vidro, para, em seguida ser inserido no difratômetro, conforme Figura 18. A identificação das fases cristalinas resultantes do DRX foi realizada por comparação do difratograma obtido pela amostra com aqueles dos minerais disponíveis no banco de dados PDF-2 do International Center for Diffraction Data (ICDD).

Figura 18 - Amostra sendo inserida no difratômetro D2 Phaser da Bruker



Fonte: O autor (2023)

3.3.2.3 Análise Termogravimétrica (ATG)

Na análise termogravimétrica, a amostra é calcinada em um ambiente inerte e controlado, o que é importante em virtude de que gases presentes no momento da análise podem reagir com a amostra e provocar efeitos diretos nos resultados, e a perda de massa é aferida instantaneamente por uma balança ultrassensível. Dessa forma, permite-se relacionar a perda de massa em um determinado intervalo de temperatura para um mineral correspondente.

A análise termogravimétrica (ATG/DTG) foi realizada no Laboratório de Petroquímica, 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.

3.3.3 Análise da pozolanicidade

Foram realizadas análises de pozolanicidade a partir de ensaios normatizados e não normatizados. Dentre os primeiros, estão os métodos indiretos de determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias e determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Já para os ensaios não normatizados, estão tanto os de microestrutura, que são métodos diretos que envolvem a moldagem de pastas para análise de difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (ATG).

3.3.3.1 Determinação da atividade pozolânica com cal – NBR 5751:2015 – Modificada

Primeiramente, foram realizados os procedimentos estabelecidos pela NBR 5751 (ABNT, 2015), que trata da determinação da atividade pozolânica com hidróxido de cálcio. A vantagem principal desse método é que, além do comportamento do consumo de hidróxido de cálcio pelo material pozolânico tender a ser mais rápido e, ao mesmo tempo, similar ao de argamassas de cimento com pozolana, o fato dele não utilizar cimentos Portland contribui para eliminar variações decorrentes dos diferentes desempenhos dos mesmos, tendo em vista que a uniformidade e a pureza do hidróxido de cálcio são mais facilmente controladas, permitindo, assim, que haja uma comparação mais fidedigna dos resultados com outros estudos (SCRIVENER et al., 2016; CORDEIRO, 2006).

O procedimento consiste na confecção de uma argamassa contendo o material pozolânico, no caso, a amostra de lodo têxtil, juntamente com hidróxido de cálcio, areia e água. A norma determina que para a moldagem de três corpos de prova cilíndricos de dimensões 5x10 cm sejam utilizados 104 g de hidróxido de cálcio, 234 g de cada uma das quatro frações de areia normal e uma quantidade em massa de material possivelmente pozolânico, que corresponde ao dobro do volume

de hidróxido de cálcio, expressa pela equação 05, na qual δ_{poz} é a massa específica do material pozolânico, δ_{cal} é a massa específica do hidróxido de cálcio e m é a massa do material pozolânico que se quer utilizar na mistura.

$$m = 2 * \frac{\delta_{poz}}{\delta_{cal}} * 104 \quad (05)$$

Em relação à quantidade de água, a norma orienta levar em conta o ensaio da mesa de consistência, descrito pela NBR 7215 (ABNT, 2019), no qual recomenda-se adicionar água à mistura até que se obtenha um espalhamento de 225 ± 5 mm. Assim, para fixar a consistência neste valor, seria necessário variar a relação água/aglomerante. Por um lado, do ponto de vista comercial, realmente esse aspecto é bastante importante, tendo em vista que fornece uma ideia da quantidade de água que o material pozolânico irá demandar. Porém, por outro lado, do ponto de vista científico, pode acabar prejudicando uma análise, em virtude da dificuldade de realizar adequada comparação entre misturas com relações água/aglomerante diferentes. A quantidade de água nesses casos pode acabar influenciando mais do que a reação pozolânica nos resultados de resistência à compressão, como já mencionado em vários trabalhos acadêmicos (KASANIYA, et al., 2019; FILHO, et al., 2017; MEDEIROS, et al., 2015; GAVA, 1999).

Ademais, é válido ressaltar que Taylor (1997) relatou que informações muito mais detalhadas podem ser obtidas em estudos com pastas. Diante disso, em suas investigações acerca do processo de hidratação do cimento e formação de produtos em concretos, indica que a relação água/cimento nos estudos relacionados às pastas a 15 - 25°C deve ser entre 0,45 e 0,65. Taylor (1997) considera que a alita e a belita em um cimento Portland hidratam mais rapidamente com $a/c = 0,65$ do que com 0,35. O autor também conclui que, com dados de calor de hidratação, a taxa de hidratação nas pastas de cimento Portland é maior em $a/c = 0,60$ do que em $a/c = 0,40$, em todas as idades, de 1 a 6,5 anos.

Diante do exposto, e tendo em vista a experiência de trabalhos anteriores no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (BASTO, 2018; TORRES et al., 2020; AGRA, 2022), foi fixada a relação água/ligante de 0,65 para ser utilizada neste estudo, a fim de que a análise das variações dos resultados de índice de atividade pozolânica seja atribuída à reatividade das amostras de lodo têxtil, sem que haja

interferência da variação da quantidade de água. Quanto ao uso de aditivo superplastificante, apenas as amostras mais finas de superfície específica de 1200 m²/kg apresentaram problemas de adensamento e para permitir uma correta moldagem utilizou-se 0,7% de aditivo superplastificante Sika Viscocrete 100HE em relação à massa total de aglomerantes (hidróxido de cálcio e material pozolânico). A Tabela 8 mostra os quantitativos utilizados nas misturas.

Tabela 8 - Quantidade de material, em massa (g), utilizada em cada traço, com a/agl = 0,65

Mistura	Código da amostra	δ (g/cm ³)	Ca(OH) ₂	Areia (g)	Lodo (g)	Água (g)	lc médio (mm)
1	LT in nat - SM	2,16	104,00	936,00	200,57	197,97	134,00
2	LT in nat - B600	2,12	104,00	936,00	196,86	195,56	135,00
3	LT in nat - B900	2,12	104,00	936,00	196,86	195,56	134,33
4	LT in nat - B1200	2,03	104,00	936,00	188,50	190,13	133,67
5	CLT600 - SM	2,73	104,00	936,00	253,50	232,38	133,33
6	CLT600 - B600	2,70	104,00	936,00	250,71	230,56	135,33
7	CLT600 - B900	2,69	104,00	936,00	249,79	229,96	136,67
8	CLT600 - B1200	2,65	104,00	936,00	246,07	227,55	134,00
9	CLT700 - SM	2,85	104,00	936,00	264,64	239,62	136,00
10	CLT700 - B600	2,83	104,00	936,00	262,79	238,41	138,33
11	CLT700 - B900	2,79	104,00	936,00	259,07	236,00	141,33
12	CLT700 - B1200	2,70	104,00	936,00	250,71	230,56	136,33
13	CLT800 - SM	2,84	104,00	936,00	263,71	239,01	145,33
14	CLT800 - B600	2,84	104,00	936,00	263,71	239,01	172,67
15	CLT800 - B900	2,80	104,00	936,00	260,00	236,60	213,33
16	CLT800 - B1200	2,72	104,00	936,00	252,57	231,77	197,67

Fonte: O autor (2023)

O procedimento de moldagem se deu misturando inicialmente a amostra de lodo têxtil com o hidróxido de cálcio em um recipiente fechado por 2 minutos, para, em seguida, a mistura ser vertida na água de amassamento já presente na cuba do misturador mecânico. Seguiu-se, então, o procedimento recomendando pela NBR 7215 (ABNT, 2019), no qual a pasta foi misturada inicialmente, por 30 segundos em velocidade baixa. Posteriormente, foi acrescentada a areia gradualmente durante 30 segundos, e logo após, todos os materiais foram misturados em velocidade alta durante esse mesmo intervalo de tempo. Em seguida, o misturador foi desligado por 1 minuto e 30 segundos. Nos primeiros 15 segundos, a argamassa que ficou aderida nas paredes da cuba e na pá foi retirada com auxílio de espátula e colocada no

fundo, e a mistura permaneceu em repouso no tempo restante (1 minuto e 15 segundos). Por fim, os materiais foram misturados em velocidade alta por 1 minuto.

Depois de finalizada a mistura, foi realizado o ensaio da mesa de consistência e foram moldados os corpos de prova, como ilustrado na Figura 19. A cura foi realizada nos próprios moldes metálicos de tampas inferiores e superiores rosqueáveis, durante sete dias, sendo que, durante as primeiras 24 ± 1 h, os mesmos permaneceram em ambiente à temperatura de 23 ± 2 °C, e durante as demais horas, mantidos em estufa à temperatura de 55 ± 2 °C. Decorrido o tempo de cura térmica, os corpos de prova foram retirados da estufa e mantidos ainda dentro dos moldes por 2 horas, em temperatura ambiente, para resfriamento. Em seguida, foram desmoldados, capeados e rompidos em uma prensa elétrica do tipo AGV-X Shimadzu com capacidade para 300kN.

Figura 19 - Ensaio de consistência e moldagem dos corpos de prova



Fonte: O autor (2023)

Depois da realização do ensaio, para avaliar se o material é considerado pozolânico, ele deve atender aos requisitos físicos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014), em que, no que diz respeito a NBR 5751:2015, a resistência obtida deve ser igual ou superior a 6 MPa.

3.3.3.2 Determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias – NBR 5752:2015 – Modificada

Também foi avaliada a pozolanicidade pelo método proposto pela NBR 5752 (ABNT, 2014). Nesta é avaliada a atividade pozolânica com cimento aos 28 dias. Assim como na NBR 5751 (ABNT, 2015), no presente método também é utilizada a resistência à compressão como parâmetro para identificar o índice de desempenho

de pozolanas, no entanto, ao invés de cal, as argamassas são compostas de cimento Portland. A execução do ensaio se dá pela preparação de duas argamassas com dosagens diferentes, as argamassas A e B. A norma recomenda a utilização de cimento da classe CP II-F-32, areia normal, material possivelmente pozolânico e aditivo superplastificante sempre que for necessária sua utilização. A argamassa A deve ser constituída por cimento, areia e água, enquanto a B deve conter esses materiais mais a substituição de 25% em massa do cimento pelo material cuja pozolanicidade está sendo avaliada. As quantidades de água e areia são fixas e a dosagem para 6 corpos de prova cilíndricos de 50x100mm está disposta na Tabela 9.

Tabela 9 - Dosagem em massa para moldagem de seis corpos de prova cilíndricos - 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

Fonte: NBR 5752 (ABNT, 2014).

A norma determina ainda que a consistência da argamassa B seja igual a ± 10 mm do obtido na argamassa de referência. Neste caso, como a relação água/ligante é fixa, a norma recomenda que, quando necessário, deve-se acrescentar aditivo superplastificante à mistura para manter o índice de consistência dentro do intervalo permitido. Porém, foi observado em ensaios preliminares que a quantidade variável de aditivo acabava interferindo de forma considerável nos resultados para as amostras de lodo têxtil e poderia prejudicar a comparabilidade entre eles. Diante disso, seguindo o exemplo dos trabalhos de Torres (2020) e de Agra (AGRA, 2022), optou-se por manter fixa a quantidade de aditivo superplastificante, com o intuito de não ocorrer interferência da variação deste nos resultados. Foi utilizado para todas as amostras 0,7% de aditivo superplastificante Sika Viscocrete 100HE em relação à massa total de aglomerantes (cimento Portland e material pozolânico). Vale salientar que, mesmo sem obedecer aos valores de índice de consistência recomendados por norma, foram registrados os valores para verificar a trabalhabilidade que o material estudado é capaz de fornecer nas

circunstancias estudadas. A Tabela 10 mostra os índices de consistência obtidos para as misturas.

Tabela 10 - Índices de consistência médios (I_c médio) obtidos na moldagem dos corpos de prova

Mistura	Código da amostra	I_c médio (mm)
REF	Amostra A	187,50
1	LT in nat - SM	140,67
2	LT in nat - B600	177,67
3	LT in nat - B900	182,65
4	LT in nat - B1200	150,33
5	CLT600 - SM	142,35
6	CLT600 - B600	158,67
7	CLT600 - B900	164,67
8	CLT600 - B1200	183,33
9	CLT700 - SM	152,33
10	CLT700 - B600	170,67
11	CLT700 - B900	191,67
12	CLT700 - B1200	200,33
13	CLT800 - SM	152,35
14	CLT800 - B600	186,00
15	CLT800 - B900	202,33
16	CLT800 - B1200	248,67

Fonte: O autor (2023)

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 em uma prensa elétrica do tipo AGV-X Shimadzu com capacidade para 300kN.

O índice de desempenho das pozolanas com o cimento Portland ($I_{cimento}$) 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_{cB}) e a resistência média da argamassa de referência (f_{cA}), conforme Equação 06.

$$I_{cimento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} * 100 \quad (06)$$

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), o índice de desempenho (I_{cimento}) deve ser maior ou igual a 90% para que o material seja considerado pozolânico.

3.3.3.3 Pastas com hidróxido de cálcio

Nesta etapa da pesquisa, foram preparadas pastas com as mesmas proporções e considerações do ensaio de atividade pozolânica com cal, seguindo as recomendações da NBR 5751 (ABNT, 2015), contendo hidróxido de cálcio e pozolana, preservando a relação água/aglomerante constante de 0,65 e com a única diferença, obviamente, de não haver o agregado miúdo. A avaliação da atividade pozolânica neste momento foi realizada a partir da quantificação do consumo de hidróxido de cálcio tanto no ensaio de difração de raios-X como na termogravimetria. Na Tabela 11, estão apresentadas as proporções de mistura das pastas, em massa, para cada uma das amostras estudadas. Vale salientar que para execução de todas as pastas, utilizou-se uma massa fixa de hidróxido de cálcio de 17,34 g, pois é uma medida equivalente ao necessário para a moldagem de metade de um corpo de prova da NBR 5751:2015, tendo em vista que essa quantidade é mais do que suficiente quando se trata de moldagem de pastas.

Tabela 11 - Quantidades de material, em massa (g), utilizadas nas pastas com cal

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
2	LT in nat - B600	2,12	32,82	32,61
3	LT in nat - B900	2,12	32,82	32,61
4	LT in nat - B1200	2,03	31,43	31,70
9	CLT600 - SM	2,73	42,27	38,74
10	CLT600 - B600	2,70	41,80	38,44
11	CLT600 - B900	2,69	41,65	38,34
12	CLT600 - B1200	2,65	41,03	37,94
13	CLT700 - SM	2,85	44,12	39,95
14	CLT700 - B600	2,83	43,81	39,75
15	CLT700 - B900	2,79	43,20	39,35
16	CLT700 - B1200	2,70	41,80	38,44
17	CLT800 - SM	2,84	43,97	39,85
18	CLT800 - B600	2,84	43,97	39,85
19	CLT800 - B900	2,80	43,35	39,45
20	CLT800 - B1200	2,72	42,11	38,64
21	Hidróxido de Cálcio	2,24	34,68	33,81

Fonte: O autor (2023)

O procedimento de preparo das pastas com hidróxido de cálcio P.A. e a adição se deu, após completa adição dos materiais sólidos à água, por meio de mistura durante 2 minutos em agitador mecânico, na velocidade de 1600 rpm. Após a homogeneização, a pasta foi lançada em recipientes cilíndricos com tampa, de dimensões 3,5 cm x 5 cm. Com o objetivo de minimizar a evaporação de água na cura térmica e também a carbonatação, foi utilizado plástico filme tanto entre a tampa e o recipiente quanto envolvendo-o completamente.

A cura das pastas ocorreu da mesma forma que nas argamassas confeccionadas conforme prescrito pela NBR 5751, em que durante as primeiras 24 ± 1 h, os moldes permaneceram em ambiente à temperatura de 23 ± 2 °C, valendo salientar que, neste período, foram armazenadas sob vácuo em dessecador. Foram mantidos 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, no dessecador. Durante os 6 dias seguintes de cura, foram mantidos em estufa à temperatura de 55 ± 2 °C. A Figura 20 ilustra o dessecador e a estufa que foram utilizados na pesquisa.

Figura 20 - Dessecador (a) e estufa (b) a 55°C com pastas de hidróxido de cálcio e lodo têxtil



Fonte: O autor (2023)

Completada a idade de 7 dias, os corpos de prova foram imersos em nitrogênio líquido ($\cong -180$ °C) para o congelamento instantâneo da água livre, interrompendo a hidratação. Posteriormente, as amostras foram fragmentadas em

pedaços, com auxílio de um martelo, acondicionadas em novos recipientes poliméricos e estocadas em refrigerador com temperatura aproximada de -30°C até o momento da liofilização. A Figura 21 mostram os dois equipamentos referentes aos procedimentos citados.

Figura 21 - Container de nitrogênio líquido utilizado para interromper a hidratação (a) e refrigerador com temperatura de -30°C (b).



Fonte: O autor (2023)

Após o congelamento, adotou-se o método da liofilização, que tem como objetivo retirar a água livre e a água congelada da estrutura da pasta, deixando apenas a água quimicamente combinada e parte da água adsorvida na estrutura dos compostos hidratados formados. O procedimento permite a água transformada em gelo, seja sublimada, ou seja, passe diretamente do estado sólido para o estado gasoso. Isso é muito importante, pois garante que a água não passe para o estado líquido antes de evaporar e permite que a amostra não hidrate durante a secagem.

O método da liofilização consiste na aplicação de uma baixa pressão, que deve ser sempre inferior a $500\ \mu\text{Hg}$ (podendo chegar até $50\ \mu\text{Hg}$ ou menos no final do processo) e baixa temperatura (inferior a -30°C preferencialmente), seguida de um aumento gradual e lento da temperatura durante 24 horas, que irá proporcionar a secagem da amostra por meio da sublimação. O liofilizado utilizado foi da marca Liotop, modelo L101 (Figura 22).

Figura 22 - Liofilizador L101 da Liotop utilizado na pesquisa



Fonte: O autor (2023)

Após a liofilização, as amostras foram finamente moídas em almofariz de ágata com pistilo até que o material suficiente para preparo da amostra passasse completamente na peneira de abertura de malha 75 μm . O restante do material foi acondicionado em eppendorfs e estocado em dessecador. Assim, o pó passante na peneira foi utilizado nos ensaios de difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (ATG).

Em relação ao ensaio de difração de raios-X, o consumo de hidróxido de cálcio, que é resultado da reação pozolânica, foi determinado com base nos picos de 18° e 34°, que são os de maior intensidade da pasta de cal hidratada. Diante disso, calculou-se a intensidade final nos picos de 18° e 34°, subtraindo a intensidade bruta pela intensidade do background no respectivo ângulo. Então, foram calculados para os ângulos de 18° e 34° tanto o decréscimo relativo da intensidade do pico ($DRIP_{18}$ e $DRIP_{34}$), como o consumo de hidróxido de cálcio ($Cons.CH_{\theta}$), assim como realizado em outros trabalhos (TORRES et al., 2020; AGRA et al., 2023). Os valores de DRIP foram obtidos de acordo com a equação 07:

$$DRIP_{\theta} = 100 \times \frac{I_{CH,\theta} - I_{poz,\theta}}{I_{CH,\theta}} \quad (\text{Eq. 07})$$

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

Os valores do consumo de hidróxido de cálcio propriamente dito a partir dos difratogramas, foram determinados levando em consideração não a intensidade dos

picos da pasta de hidróxido de cálcio puro em si, mas essa intensidade corrigida pela razão mássica de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e pozolana na pasta, como segue na Eq. 08. Isso foi feito tendo em vista que as intensidades dos picos são consideravelmente reduzidas pelas substituições volumétricas de 2/3 de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por amostras de lodo têxtil, sendo necessária essa correção para representar mais fidedignamente a quantidade consumida. O consumo foi então calculado seguindo a equação 09.

$$ACH_{puro} = I_{CH,\theta} \times \frac{m_{CH}}{m_{CH} + m_{poz}} \quad (\text{Eq. 08})$$

$$Cons. CH_{\theta} = 100 \times \frac{ACH_{puro} - I_{poz,\theta}}{ACH_{puro}} \quad (\text{Eq. 09})$$

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.

Vale salientar que também se optou, visando a realização de correlações para uma maior quantidade de métodos diferentes, pela obtenção dos valores de consumo de CH por meio do RIR (*Relative Intensity Ratio*), que é uma técnica do software Diffrac.Eva 4.3, que fornece uma taxa de intensidade relativa, ou seja, uma medida semiquantitativa baseada na relação entre as intensidades dos picos de difração das fases, identificadas primeiro qualitativamente, que compõem a amostra. O mesmo raciocínio aplicado para os valores de DRIP, para obtenção do consumo de CH, foram aplicados para os valores fornecidos pelo RIR, aplicando-se o percentual fornecido pelo software no lugar das intensidades de pico nas equações 08 e 09.

Já em relação à termogravimetria, o consumo de hidróxido de cálcio foi mensurado com base nas perdas de massa da pasta pura de hidróxido de cálcio. No ensaio de ATG para a pasta pura de hidróxido de cálcio, observou-se que a desidratação do mesmo ocorreu no intervalo de temperatura de 380 a 450°C, que ocorreu devido à saída de uma molécula de água, segundo a reação $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$. Diante disso, a água que foi liberada nesta reação foi quantificada e,

com o cálculo estequiométrico, foi possível determinar a quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. O consumo neste caso foi calculado a partir das equações 10 e 11.

$$Am_{CH,ATG} = m_{CH,ATG} \times \frac{m_{CH}}{m_{CH} + m_{poz}} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$Cons. CH_g = 100 \times \frac{Am_{CH,ATG} - m_{poz,ATG}}{Am_{CH,ATG}} \quad (\text{Eq. 11})$$

É válido ressaltar que da mesma maneira que necessitou-se fazer o ajuste da intensidade da pasta pura de hidróxido de cálcio para os valores de DRX, também é importante que a quantidade obtida de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no ensaio de ATG para a pasta pura seja ajustada com a relação mássica. 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.

3.3.3.4 Correlação dos resultados por análise estatística

Após realização dos ensaios de determinação da pozolanicidade, optou-se por fazer aplicação do coeficiente de correlação de Pearson, utilizando-o como uma forma de discussão da associação entre os métodos realizados. Esse coeficiente nada mais é do que uma técnica estatística para procurar entender como uma variável se comporta em um cenário no qual outra está variando, buscando identificar se existe relação entre a variabilidade das duas (BARBETTA et al., 2010).

O coeficiente de correlação de Pearson pode ter um intervalo de valores de +1,0 a -1,0. Um valor de zero indica que não existe associação entre as duas variáveis. Valores maiores que zero, indicam associação positiva, ou seja, as variáveis são diretamente proporcionais, enquanto valores menores que zero indicam associação negativa, em que as variáveis são inversamente proporcionais. Quanto mais distantes de zero forem os coeficientes de Pearson, mais fortes são

consideradas as correlações (BARBETTA et al., 2010). Para cada dois métodos foram aplicados os conjuntos de seus resultados na equação 12, a fim de avaliar a correlação entre eles.

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{Eq. 12})$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

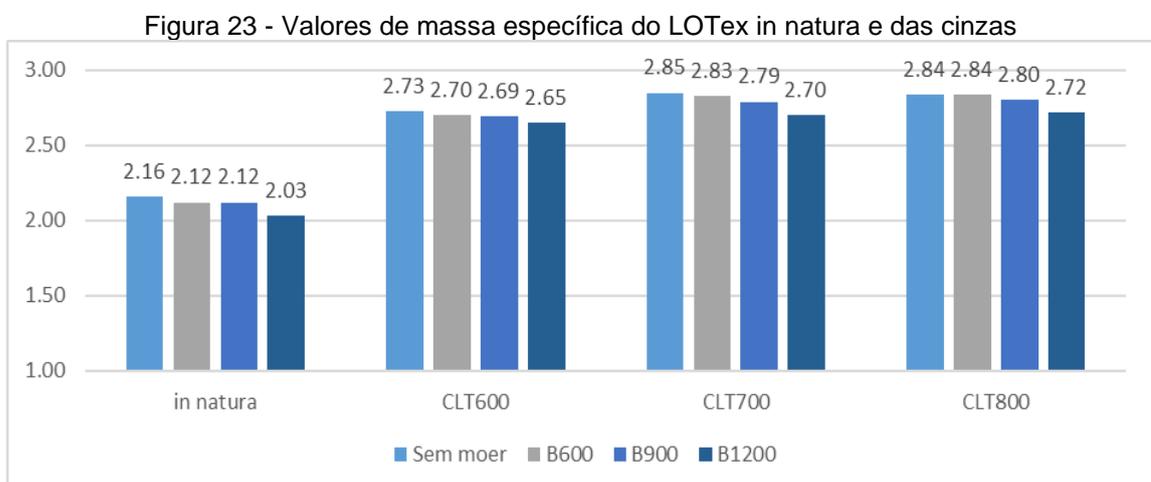
Nesta seção, serão abordados e discutidos os resultados referentes a caracterização do lodo objeto de estudo e relacionados às análises do potencial pozolânico por métodos padronizados, os testes indiretos de compressão em argamassas, e não padronizados, os ensaios de microestrutura em pastas de lodo e hidróxido de cálcio.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Foram avaliadas as características físicas, químicas e mineralógicas de todas as amostras de LOTex *in natura* e cinzas. A seguir, serão descritos os resultados de cada uma detalhadamente.

4.1.1 Análises físicas

A Figura 23 apresenta os valores de massa específica obtidos pelo método de Le Chatelier do LOTex *in natura* e das cinzas de lodo, tanto para as amostras sem moer como para aquelas nas três faixas de finura estudadas. Os resultados de massa específica foram utilizados no ensaio de superfície específica pelo método de Blaine, nos cálculos dos quantitativos de materiais para os ensaios de determinação da atividade pozolânica com cal hidratada aos sete dias, com cimento Portland aos 28 dias e para as pastas utilizadas na análise da pozolanicidade por difração de raios-X e termogravimetria.



Fonte: O autor (2023)

É possível observar 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. Com isso, percebe-se que a calcinação promoveu um aumento na massa específica. Isso se dá, como já explicou Agra et al. (2023), devido à remoção de quase toda a matéria orgânica do lodo, que possui material carbonáceo de massa específica menor. Ademais, percebe-se também a redução da massa específica com o aumento da finura Blaine. Este comportamento pode ser explicado pelo fato 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 (BAUER, 2019; NEVILLE; 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

Os valores de superfície específica obtidos pelo método de Blaine, bem como o tipo de moagem realizada para todas as amostras objetos de estudo, estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Superfície específica e moagem adotada para cada uma das amostras estudadas.

Mistura	Amostras	Faixa de superfície específica (m ² /kg)	Superfície específica (m ² /kg)	Tempo de moagem (min)	Tipo de moagem
1	LT in nat - SM	300 ± 50	347,83	2,00	destorroamento
2	LT in nat - B600	600 ± 50	625,54	10,00	moagem a seco
3	LT in nat - B900	900 ± 50	881,25	22,00	moagem a seco
4	LT in nat - B1200	1200 ± 50	1249,06	35,00	moagem a seco
5	CLT600 - SM	300 ± 50	290,65	2,00	destorroamento
6	CLT600 - B600	600 ± 50	644,22	10,00	moagem a seco
7	CLT600 - B900	900 ± 50	902,19	15,00	moagem a seco
8	CLT600 - B1200	1200 ± 50	1244,60	5,00	moagem úmida
9	CLT700 - SM	250 ± 50	245,40	2,00	destorroamento
10	CLT700 - B600	600 ± 50	635,78	15,00	moagem a seco
11	CLT700 - B900	900 ± 50	924,67	20,00	moagem a seco
12	CLT700 - B1200	1200 ± 50	1214,84	10,00	moagem úmida
13	CLT800 - SM	200 ± 50	184,64	2,00	destorroamento
14	CLT800 - B600	600 ± 50	552,54	20,00	moagem a seco
15	CLT800 - B900	900 ± 50	878,27	40,00	moagem a seco
16	CLT800 - B1200	1200 ± 50	1154,64	20,00	moagem úmida

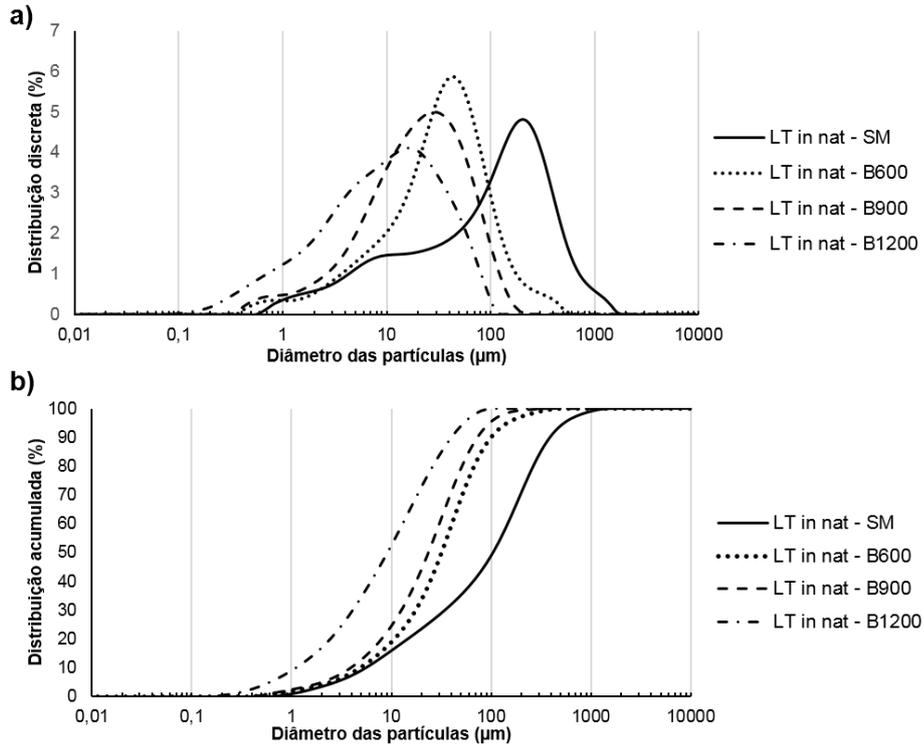
Fonte: O autor (2023)

De maneira geral, percebe-se que para as amostras sem moer, apenas destorroadas, o aumento da temperatura de calcinação resultou em diminuição da superfície específica. Enquanto, por exemplo, o LOTex *in natura* apresentou valor de 347,83 m²/kg, a cinza calcinada a 800°C obteve superfície específica de somente 184,64 m²/kg. Dentro do mesmo contexto, observa-se que o tempo de moagem variou dentre as amostras calcinadas, para que atingissem valores de superfície específica para uma mesma faixa de finura. Enquanto apenas 15 min de moagem a seco foi suficiente para que a cinza de lodo calcinado a 600°C atingisse um valor de 902,19 m²/kg, foram necessários 20 minutos para que a amostra calcinada a 700°C atingisse 924,67 m²/kg e 40 minutos de moagem para que a calcinada a 800°C atingisse um valor de 878,27 m²/kg, por exemplo. Esse comportamento também ocorreu para as outras faixas de finura, evidenciando que quanto maior a temperatura de calcinação, maior é a dificuldade na moagem.

Esses fatos ocorrem, como explicado em outros trabalhos (BASTO, 2018; TORRES, 2019; AGRA et al., 2023), em decorrência de que quanto mais elevada a temperatura de calcinação das cinzas, maior é a tendência de recristalização da sílica amorfa presente na amostra. Como também devido ao fenômeno de sinterização do resíduo, bastante comum em argilas, no qual as ligações iônicas aumentam e elevam a resistência do material à moagem.

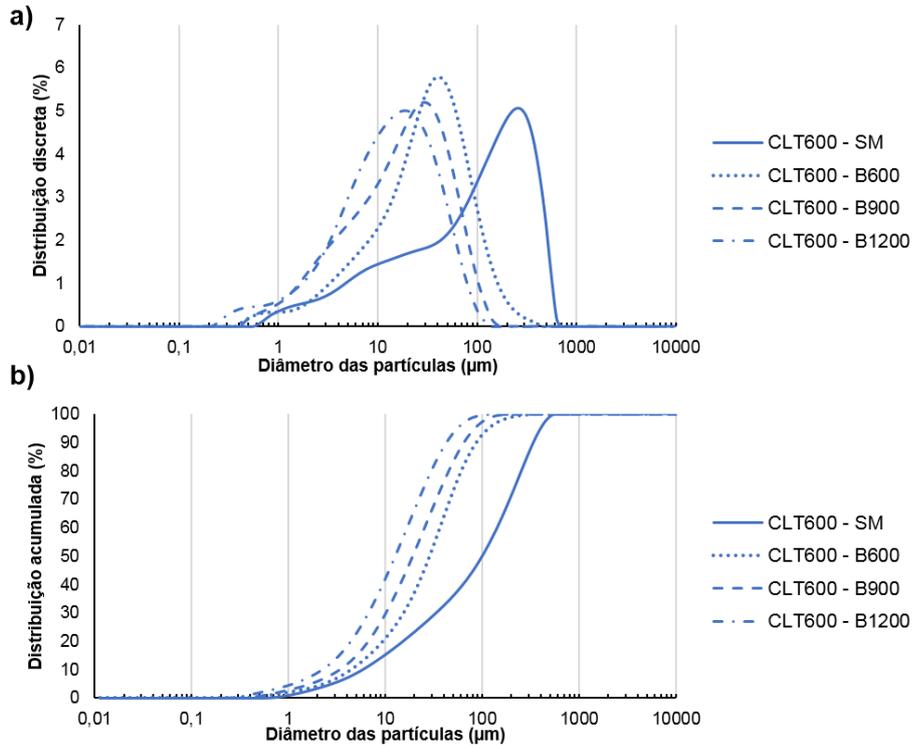
Também foram avaliadas as distribuições de tamanho de partículas por granulometria a laser para todas as amostras estudadas. Da Figura 24 até a Figura 27 estão apresentadas as curvas granulométricas discretas e acumuladas das amostras *in natura* e calcinadas a 600, 700 e 800°C, respectivamente. A partir desses gráficos, verifica-se que, em geral, todas as amostras apresentaram uma granulometria bem graduada, com a grande maioria das partículas possuindo tamanho entre 0,1 µm e 1 mm. Além disso, pode-se perceber a concordância com os dados obtidos pelo método de Blaine. Quando uma amostra faz parte de uma faixa de finura Blaine mais elevada do que outra, ela tende a apresentar uma distribuição granulométrica mais afastada para esquerda do que a outra amostra, e isso é observado com facilidade em todos os gráficos, confirmando a coerência dos valores obtidos.

Figura 24 - Distribuições granulométricas discretas (a) e acumuladas (b) das amostras de LOTex *in natura*.



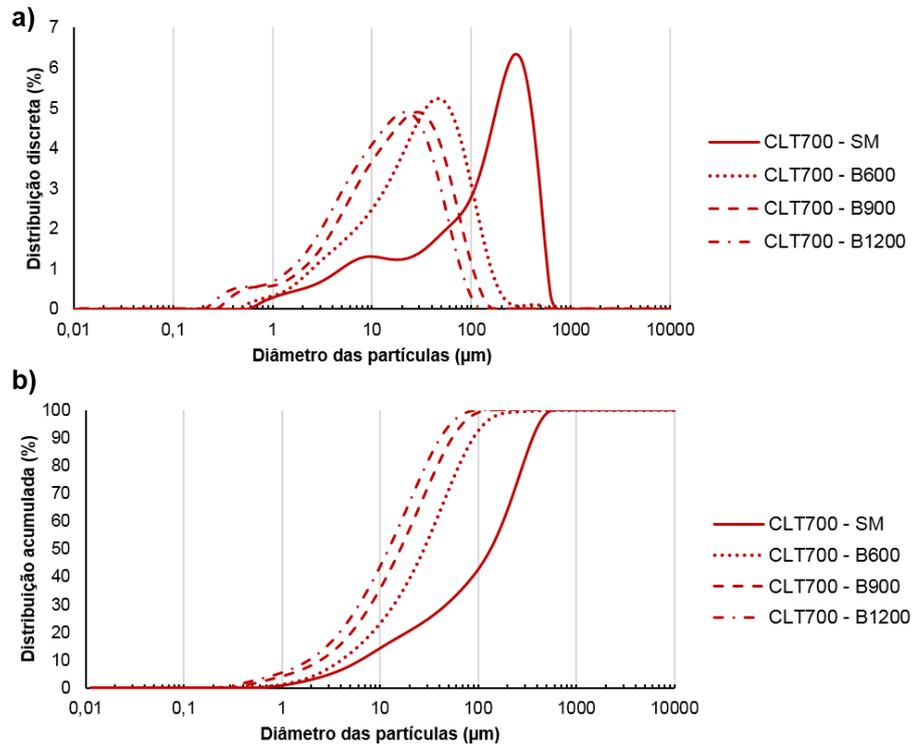
Fonte: O autor (2023)

Figura 25 - Distribuições granulométricas discretas (a) e acumuladas (b) das amostras calcinadas a 600°C.



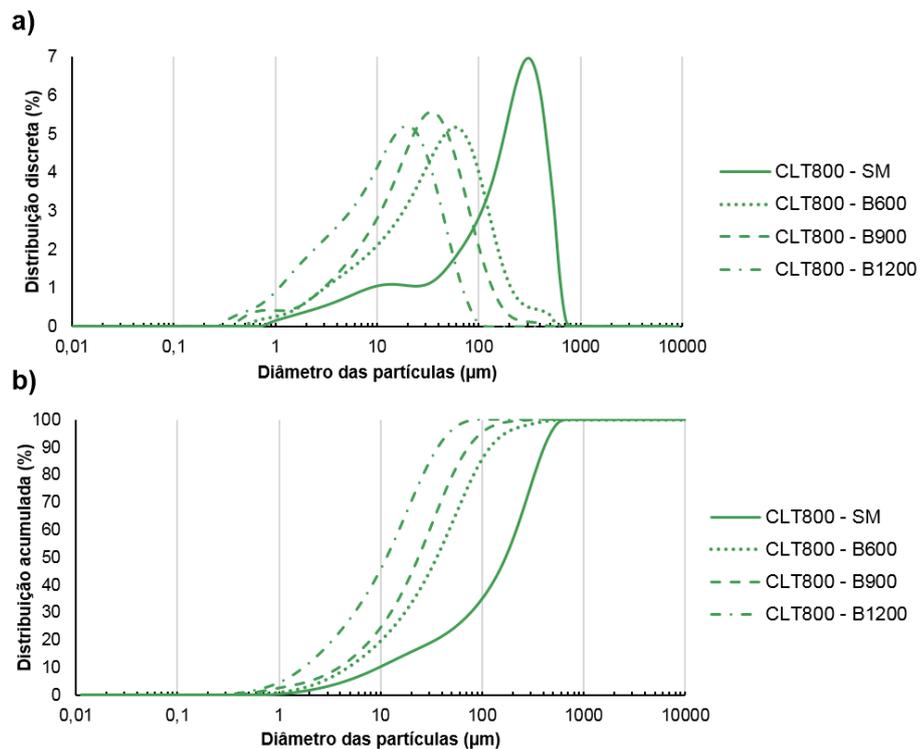
Fonte: O autor (2023)

Figura 26 - Distribuições granulométricas discretas (a) e acumuladas (b) das amostras calcinadas a 700°C.



Fonte: O autor (2023)

Figura 27 - Distribuições granulométricas discretas (a) e acumuladas (b) das amostras calcinadas a 800°C.



Fonte: O autor (2023)

Seus diâmetros característicos ($D_{[4,3]}$, D_{10} , D_{50} , D_{90}) estão indicados na Tabela 13. Percebe-se que as amostras de uma mesma faixa de finura apresentam valores de diâmetros próximos, como já esperado. Ademais, um dos requisitos físicos propostos pela NBR 12653 (ABNT, 2014) para que o material seja considerado pozolânico, é que ele apresente uma porcentagem retida na peneira de abertura 45 μm menor do que 20%. Diante disso, é possível, a partir dos dados de granulometria a laser, determinar as frações do material retido nessa peneira, conforme também é apresentado na Tabela 13. Dentro desse aspecto, observa-se que, com exceção da cinza calcinada a 800°C com Blaine de 900 m^3/kg , as demais amostras das faixas de finura Blaine de 900 e 1200 m^2/kg poderiam ser, por apresentarem granulometria adequada, consideradas pozolanas.

Tabela 13 - Diâmetros característicos e percentuais retidos na peneira 45 μm para as amostras estudadas.

Amostra	$D_{[4,3]}$	D_{10}	D_{50}	D_{90}	Retido na peneira 45 μm
LT in nat - SM	164,78	5,57	104,97	392,91	68,08
LT in nat - B600	47,72	4,89	32,10	100,96	40,93
LT in nat - B900	27,54	3,36	19,05	64,21	19,79
LT in nat - B1200	15,64	1,11	9,21	40,31	7,90
CLT600 - SM	137,11	5,80	99,48	336,37	67,46
CLT600 - B600	40,17	4,51	28,86	87,70	36,67
CLT600 - B900	24,14	2,67	17,39	55,87	16,00
CLT600 - B1200	18,19	2,22	12,59	42,43	8,61
CLT700 - SM	159,88	6,42	135,06	361,39	72,43
CLT700 - B600	39,83	3,98	27,92	88,81	37,08
CLT700 - B900	23,40	2,53	16,30	55,06	15,43
CLT700 - B1200	17,75	1,92	12,37	41,76	8,20
CLT800 - SM	190,50	9,75	170,24	407,90	78,85
CLT800 - B600	54,72	4,75	35,76	119,87	46,28
CLT800 - B900	33,67	3,93	23,67	73,86	24,71
CLT800 - B1200	15,95	1,76	11,49	36,91	5,68

Fonte: O autor (2023)

Legenda:

$D_{[4,3]}$: Média da distribuição do tamanho de partículas medida pelo seu volume;

D_{10} : Diâmetro que representa na curva de distribuição a quantidade acumulada em 10%;

D_{50} : Diâmetro que representa na curva de distribuição a quantidade acumulada em 50%;

D_{90} : Diâmetro que representa na curva de distribuição a quantidade acumulada em 90%;

4.1.2 Análises químicas

Nas análises químicas de todas as cinzas de LOTex avaliadas, obtidas por fluorescência de raios-X, apresentadas na Tabela 14, constatou-se que as cinzas apresentam composição similar ao lodo *in natura*, constituídos majoritariamente por óxido de cálcio (CaO), óxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃), e óxido de magnésio (MgO). Porém, elas apresentam percentual de perda ao fogo consideravelmente menor, em virtude de que após a calcinação grande parte dos compostos orgânicos macromoleculares e materiais voláteis são eliminados.

Como já mencionado anteriormente, no item 3.2.1, as presenças consideráveis de cálcio e magnésio são justificadas pela adição de cales (que podem ser cálcicas, dolomíticas ou magnesianas) para corrigir o pH e pelo uso de coagulantes auxiliares, como o carbonato de cálcio, para o processo de floculação no tratamento de efluentes. A quantidade de silício se deve aos processos de estonagem, no qual são utilizadas pedras pomes, argila expandida ou mesmo outros granulados abrasivos para desgastar as peças e preparar o tecido para receber corantes e alvejantes. O alumínio presente se dá em virtude das lavanderias utilizarem sulfato de alumínio (Al₂(SO₄)₃), ou o policloreto de alumínio (Al₂(OH)₃Cl₃), como principal agente coagulante em seu processo de tratamento de efluentes. O cloro presente pode ser devido sua presença na composição de alvejantes ou mesmo pelo uso de sais inorgânicos a base de cloro na fixação de corantes no processo de tingimento. E a presença de sódio pode ser justificada pelo uso de hidróxido de sódio tanto como insumo na fabricação de tensoativos e agentes oxidantes utilizados nas lavanderias, como também pelo seu uso como um dos coagulantes auxiliares no processo.

Tabela 14 - Composição química semiquantitativa em óxidos e perda ao fogo para o LOTex *in natura* e para as cinzas de lodo

Óxidos	LT in nat	CLT600	CLT700	CLT800
SiO ₂	15,71	19,94	19,45	19,62
Al ₂ O ₃	7,11	9,43	10,08	10,93
Fe ₂ O ₃	1,21	1,37	1,31	1,30
CaO	16,81	24,32	31,31	32,05
Na ₂ O	2,16	3,02	2,26	1,97
K ₂ O	0,73	0,81	0,81	0,79
MnO	0,93	1,07	1,14	1,21
TiO ₂	0,16	0,15	0,16	0,11
MgO	8,02	13,21	15,18	15,43
Cl	2,62	4,13	3,37	2,96
P ₂ O ₅	2,69	3,42	3,76	4,01
SO ₃	1,85	2,99	2,64	2,59
Cr ₂ O ₃	0,02	0,02	0,04	0,08
PF	39,79	15,90	8,26	6,72

Fonte: O autor (2023)

Contudo, é válido perceber que se fossem levadas em consideração apenas as determinações da NBR 12653 (ABNT, 2014) para materiais pozolânicos, o lodo têxtil e suas cinzas seriam descartados imediatamente e nem seriam realizadas maiores investigações, pois alguns requisitos químicos não são obedecidos. Por exemplo, o somatório SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ não atinge o valor mínimo de 50% e nem o percentual máximo de 1,5% de álcalis, caracterizado pela presença de Na₂O, é satisfeito. Nesse contexto, é preciso primeiro levar em consideração que alguns requisitos desse normativo acabam se tornando limitadores e inibidores da utilização de certos materiais, tendo em vista que não expressam uma relação direta com o desempenho real de pozolanas em concretos e argamassas. Um exemplo que demonstra isso, é o de estudiosos que ainda na década de 90 já afirmavam que a soma SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ não era um parâmetro capaz de detectar significativas diferenças no desempenho de materiais pozolânicos quando incorporados em concretos (GAVA, 1999; SWAMY, 1993).

Em segundo aspecto, é importante perceber que, embora não haja um percentual significativo dessa soma na análise química por FRX, apresenta quantidades consideráveis de SiO₂ (que em estado amorfo é bastante reativo com hidróxido de cálcio, formando silicatos de cálcio hidratados), possui certa quantidade de Al₂O₃ (que, quando reativo, também pode se combinar com o hidróxido de cálcio, dando origem a compostos cimentantes, como o aluminato de cálcio hidratado)

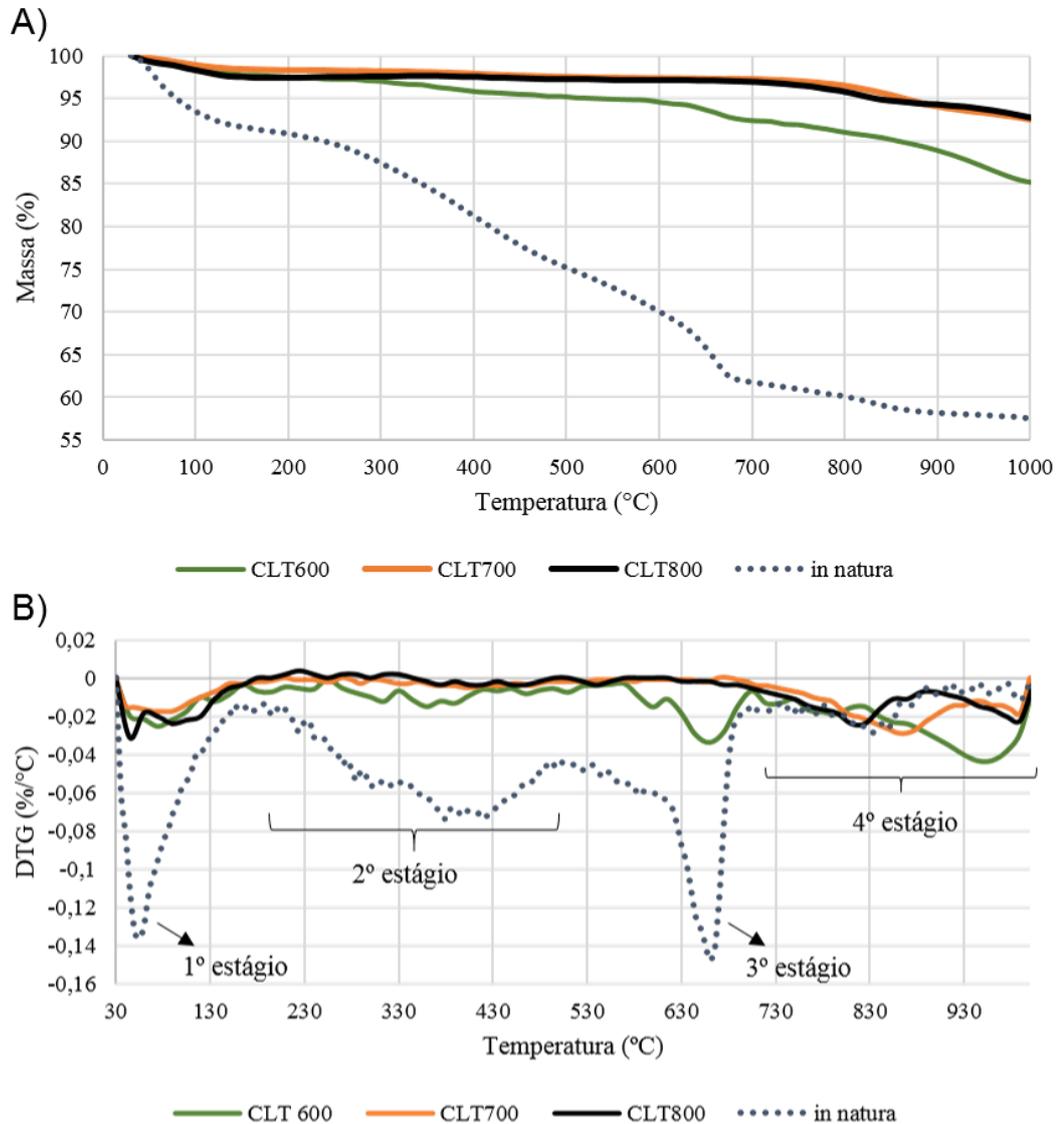
(MEHTA e MONTEIRO, 2014; TIRONI et al., 2013) e apresentam teores marcantes de CaO, que também está sempre presente em quantidades significativas na composição química em óxidos de cimentos Portland. Diante disso, pode-se raciocinar que, embora as análises químicas por FRX das amostras de lodo têxtil não satisfaçam esse requisito químico da NBR 12653 (ABNT, 2014), como as presenças de SiO₂ e Al₂O₃ ocorrem juntamente com quantidades significativas de CaO, possa ser que todos juntos contribuam para algum tipo de atividade pozolânica (GOYAL et al., 2019). E, caso não aconteça, ainda poderão ser feitas discussões acerca do seu potencial como adição inerte. Contudo, é importante perceber que, para avaliação desse lodo como material cimentício suplementar, o primeiro passo seria avaliar sua possível pozolanidade.

Em relação à quantidade de álcalis, e compreendendo a importância dos cuidados quanto à reação álcali-agregado, deve-se primeiro levar em consideração que a presença do gel álcali-sílica, resultado dessa reação, não caracteriza necessariamente a fissuração do concreto, mas a resposta físico-química às reações (NEVILLE e CREMONINI, 2016). Alguns estudiosos, por exemplo, abordaram acerca do mecanismo da reação como sendo um processo no qual os íons Ca⁺², Na⁺, K⁺ e OH⁻ da pasta de cimento seriam adsorvidos pela sílica. Nesse processo ocorreria dissolução da superfície da sílica por meio das hidroxilas e, para formação dos produtos de hidratação, a adsorção de íons Ca⁺², em virtude destes serem mais reativos. Essa dissolução aconteceria até que a taxa de cristalização de produtos de hidratação fosse maior do que a taxa de dissolução da superfície da sílica, de tal forma que poderia ocorrer formação de produtos de hidratação na sua superfície, como o C-S-H. Caso contrário, a dissolução continuaria até que os íons Na⁺ e K⁺ conseguissem penetrar e provocar a formação do gel expansivo. Em outras palavras, se a concentração de cálcio fosse superior à de álcalis, provavelmente haveria formação apenas de gel de cal-álcali-sílica não expansivo, mas, caso contrário, se a concentração de álcalis fosse maior, um gel expansivo de álcali-sílica se formaria (URHAN, 1987; FORUM, 1965). Nesse contexto, o fato das amostras de lodo têxtil apresentarem quantidades de álcalis pouco maior que o permitido na NBR 12653 (ABNT, 2014) não representaria grandes danos, em virtude de que possuem quantidades marcantes de cálcio, que favoreceria a formação do gel não expansivo ao invés do expansivo.

Porém, por outro lado, é importante salientar que outros estudos já passaram a considerar que o gel formado inicialmente já seria bastante danoso e constituído de íons Na^+ e K^+ , e só posteriormente os álcalis seriam trocados por íons Ca^{+2} . Assim, a presença de íons cálcio livres iria na verdade favorecer a formação do gel danoso, em virtude de que, por serem mais reativos, eles substituiriam os íons Na^+ e K^+ , deixando-os livres para produção de mais produtos expansivos (THOMAS et al., 1991; CHATTERJI, 1979; WANG, H.; GILLOT, 1991). Dessa forma, considerando essa perspectiva, maiores investigações acerca desse assunto, abordando as amostras deste estudo, seriam realmente muito importantes. Como o estudo da reação álcali-agregado não é o foco deste trabalho, seria uma sugestão para novos trabalhos acerca da investigação do uso do lodo têxtil como material cimentício suplementar.

Outra forma de avaliação química realizada foi a análise termogravimétrica. A Figura 28 apresenta as curvas de termogravimetria das cinzas e do próprio lodo *in natura*, a fim de tornar clara a comparação entre eles. 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.

Figura 28 - Termogravimetria (A) e Termogravimetria Derivada (B) do LOTex in natura e das cinzas de lodo



Fonte: O autor (2023)

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., 2015b). 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

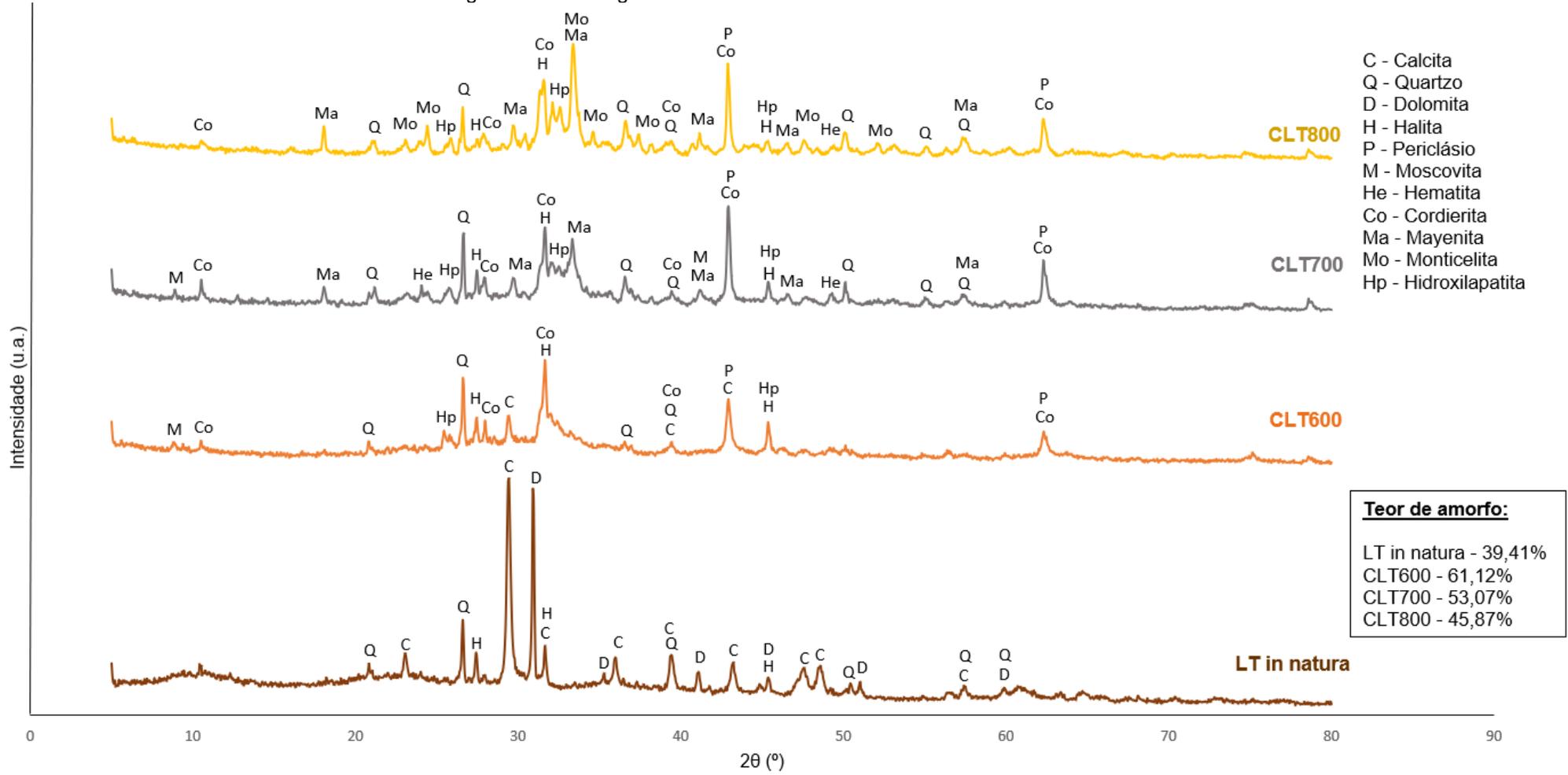
é observado o mesmo pico evidente do gráfico de DTG para as amostras calcinadas a 700 e 800°C (SATHIYA e SWAMINATHAN, 2022). Para o quarto e último estágio, percebe-se uma perda de massa mais evidente para a amostra CLT600 e menor para as amostras CLT700 e CLT800, em virtude de nesta temperatura ainda existirem alguns minerais inorgânicos, provavelmente polimorfos cristalinos dos carbonatos, como calcita, que se decompõem termicamente somente entre 600°C e 800° (SCRIVENER et al., 2016; RIBEIRO et al., 2021). 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.

4.1.3 Análise mineralógica

A Figura 29 apresenta os difratogramas do LOTex in natura e das cinzas de lodo. Em relação a amostra *in natura*, como já mencionado no item 3.2.1, foram encontrados picos de calcita (CaCO_3), quartzo (SiO_2), dolomita ($\text{Ca.Mg}(\text{CO}_3)_2$) e halita (NaCl).

Quanto às cinzas, só foram observados picos de calcita (CaCO_3) no CLT600, em virtude da decomposição térmica dessa fase mineral se iniciar em temperaturas um pouco mais elevadas que 600°C (SCRIVENER et al., 2016). Dentro do mesmo contexto, percebe-se que não foi observada dolomita nas cinzas, apenas no lodo in natura. Isso ocorre em virtude dela ser uma mistura de carbonatos de cálcio e magnésio, de tal forma que em temperaturas mais baixas ocorre primeiro a decomposição do carbonato de magnésio (MgCO_3), formando óxido de magnésio (MgO), e, por isso, observamos a presença de picos referentes ao periclásio (MgO) (ILGEN, 2011; RIBEIRO et al., 2021). Com o processo de sinterização do material, foi possível observar picos de moscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$) apenas nas 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 (MACKENZIE, 1957).

Figura 29 - Difratomogramas do lodo têxtil in natura e das cinzas.



Fonte: O autor (2023)

Em todas as cinzas foram observados também picos referentes à fase cordierita ($Mg_2Al_4Si_5O_{18}$), que é um mineral formado por metamorfismo térmico regional de baixa pressão e de contato sobre material aluminoso (NAVARRO *agra.*, 2017). A presença da fase mineral mayenita ($Ca_{12}Al_{14}O_{33}$), se justifica por que ela é comumente encontrada em calcários impuros que tenham sofrido algum metamorfismo térmico (DELGADO *et al.*, 2010). Também foram encontrados picos referentes, provavelmente, à hidroxilapatita ($Ca_5(PO_4)_3(OH)_2$) e, para compreender o porquê, basta avaliar o que ocorreu no trabalho de Chen *et al.* (2020), no qual a hidroxilapatita foi obtida a partir da pirólise de um lodo de esgoto com utilização de aditivos à base de cálcio. Portanto, como no processo de tratamento do efluente têxtil é utilizado bastante CaO para correção do pH, pode-se inferir a possibilidade de processo similar com a calcinação do lodo têxtil deste trabalho.

Na amostra CLT800, onde ocorre um processo de sinterização mais aprofundado, observou-se a possível formação de monticellita ($CaMgSiO_4$), que embora não seja muito comum, sua presença pode ser justificada pelo fato dessa fase se formar por metamorfismo de alta temperatura e baixa pressão em dolomitos silicosos. Ademais, na Figura 29 também são apresentados os conteúdos amorfos de cada amostra, obtidos por integração no software OriginPro 8.5. Embora não sejam considerados dados de elevada precisão, podem ser usados para efeito de comparabilidade entre as próprias amostras estudadas. Diante disso, percebeu-se que as cinzas calcinadas a $600^\circ C$ apresentaram maior conteúdo amorfo, tendendo a ser, então, a amostra de maior reatividade.

4.2 TESTES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

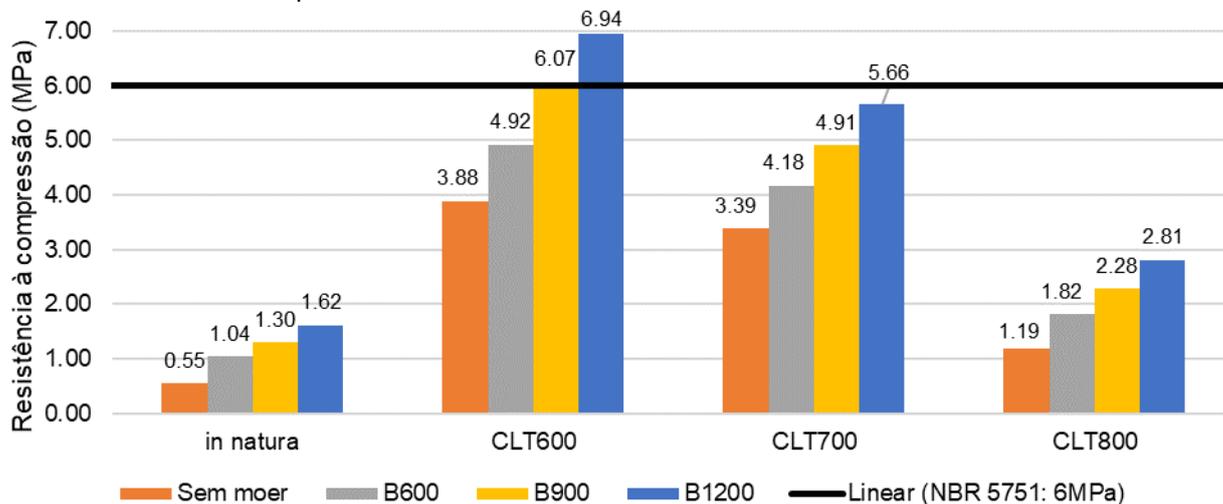
Serão descritos e discutidos a seguir os resultados referentes aos índices de atividade pozolânica com cal aos 7 dias e com cimento Portland aos 28 dias.

4.2.1 Índice de atividade pozolânica com cal (ABNT NBR 5751: 2015 – modificada)

Na Figura 30 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão para verificação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias dos corpos

de prova de argamassas confeccionadas usando como adição amostras tanto de LOTex *in natura* quanto de cinzas de lodo, calcinadas em cada umas das três temperaturas avaliadas, e o hidróxido de cálcio.

Figura 30 - Resistência à Compressão (MPa) aos 7 dias das argamassas de LOTex *in natura* e cinzas para as várias faixas de finura Blaine avaliadas.



Fonte: O autor (2023)

Antes de avaliar os dados apresentados, é importante compreender primeiro que os valores obtidos para a resistência à compressão nesse ensaio são provenientes, predominantemente, do efeito pozolânico do material utilizado como adição. Isso ocorre porque a resistência da argamassa é obtida através dos produtos hidratados oriundos da reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio. Nesse contexto, mesmo que o material apresente um efeito fíler considerável, ainda assim sua contribuição na resistência mecânica não seria suficiente a ponto de obter o índice mínimo exigido por norma (TORRES et al., 2020; BASTOS et al, 2019).

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), para um material ser considerado pozolânico, deve apresentar, no mínimo, um índice de atividade pozolânica com cal aos sete dias, ou seja, uma resistência à compressão nesta idade, de 6 MPa. Então, de acordo com esse requisito apenas as amostras CLT600 de finura Blaine 900 m²/kg e 1200 m²/kg podem ser consideradas pozolanas.

Ainda nesse aspecto, é válido ressaltar que isso não impede completamente o uso de outras amostras deste estudo como pozolanas, pois existem algumas convencionais no mercado atual que apresentam resistências um pouco abaixo do que estabelece a NBR 12653 (ABNT, 2014). Foi apresentado por Agra et al. (2023), por exemplo, uma pozolana comercial de basalto com média de apenas 4,78 Mpa.

Isto mostra que, mesmo com valores de resistência ligeiramente menores do que as exigências normativas, não impede o uso de amostras que alcançam valores não muito distantes, como, por exemplo, as cinzas calcinadas a 700°C com finuras Blaines mais elevadas.

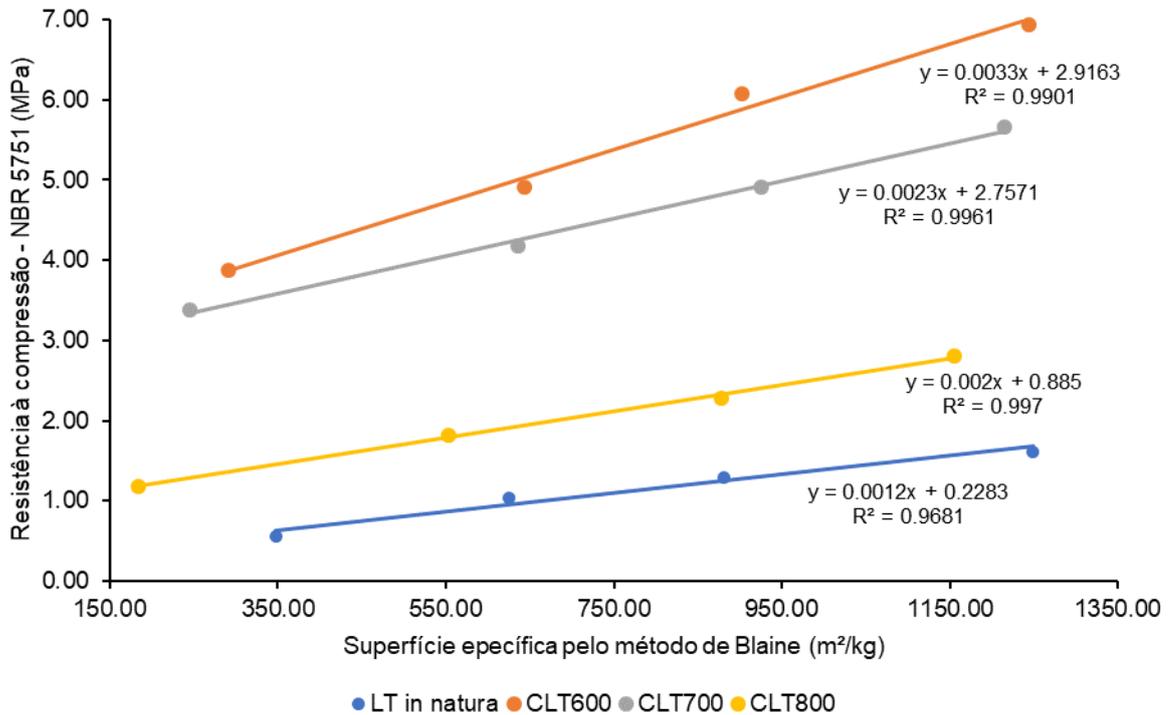
Ao se analisar os resultados, é perceptível que a calcinação se mostra eficiente para o desenvolvimento da atividade pozolânica do material, tendo em vista que em uma mesma faixa de finura, independente da temperatura de calcinação, as cinzas apresentam valores maiores de resistência mecânica do que as amostras de LOTex *in natura*. Isso ocorre, como já mencionado anteriormente neste estudo, porque a realização da calcinação leva à remoção completa da água quimicamente ligada e, com a perda de hidroxilas, acaba resultando em uma estrutura colapsada e desarranjada, que confere ao material calcinado um estado amorfo, aumentando sua reatividade (MARTÍNEZ-GARCÍA et al., 2012; MOHAMMED, 2017; SABIR et al., 2001).

Foi observado também que com o aumento da temperatura de calcinação há uma redução dos valores de resistência. Isso pode ser justificado pelo fato de que quanto maior essa temperatura, maiores tendem a ser tanto a recristalização da sílica amorfa quanto os fenômenos de sinterização do resíduo, que contribuem para redução da reatividade (BASTO et al., 2019; TORRES et al., 2020; AGRA et al., 2023). Essa sinterização é caracterizada por ser um processo físico termicamente ativado, que leva um conjunto de partículas, inicialmente em contato mútuo, a adquirir resistência mecânica, o que acaba reduzindo a amorficidade e, conseqüentemente, a reatividade pozolânica dessas partículas (SILVA e JÚNIOR, 1998).

Ademais, outro ponto a ser destacado com a análise dos resultados, é que quanto maior a superfície específica da amostra, maiores foram os valores de resistência mecânica. A Figura 31 mostra que os dois parâmetros são diretamente proporcionais, com tendência linear. Isso já era esperado, já que é essencial que a pozolana apresente determinada finura para que reaja quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes, ou seja, quanto mais finamente moída, maior tende a ser sua reatividade (NEVILLE e CREMONINI, 2016). Em uma análise similar feita das correlações entre características físicas e avaliação pozolânica com hidróxido de cálcio aos 7 dias, realizada em estudo com lodo de estação de tratamento de esgoto, desenvolvido por Basto et al. (2019), os autores

também perceberam comportamentos lineares entre os valores de resistência à compressão e os parâmetros físicos.

Figura 31 - Correlação entre a Resistência à compressão (MPa) da NBR 5751 e a superfície específica (m²/kg) do LOTex in natura e das cinzas



Fonte: O autor (2023)

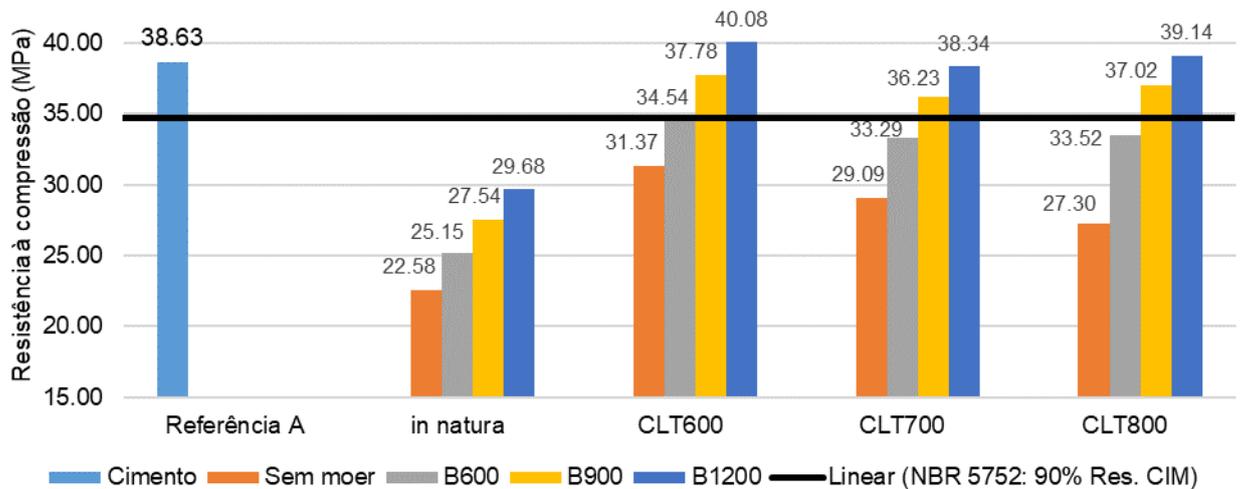
Contudo, conclui-se que a calcinação é eficiente no desenvolvimento da atividade pozolânica, e o fato de os melhores resultados serem alcançados pelas temperaturas de calcinação mais baixas, acaba sendo positivo do ponto de vista econômico, pois menos gasto energético seria necessário para produção do material. Além disso, o aumento da finura também se mostrou de grande importância para intensificar a atividade pozolânica das amostras de LOTex, tornando-as mais reativas.

4.2.2 Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (ABNT NBR 5752: 2014 – modificada)

Conforme apontado no item 3.3.3.2, para avaliar o índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias, seguiu-se os procedimentos determinados pela NBR 5752 (ABNT, 2014) tanto para o LOTex *in natura* quanto

para as cinzas. Para o corpo de prova de referência, foi utilizado apenas o cimento Portland do tipo CP II-F 40, e para os demais, as amostras estudadas substituíram 25% dele. Todos os resultados de resistência à compressão estão apresentados na Figura 32.

Figura 32 - Resistência à Compressão (MPa) aos 28 dias das argamassas de referência, LOTex in natura e cinzas para as várias faixas de finura Blaine avaliadas.



Fonte: O autor (2023)

Neste caso, para avaliar os resultados mostrados, é importante compreender primeiro que na avaliação da atividade pozolânica em argamassas com cimento pode-se perceber de forma muito mais evidente o efeito fíler do que nas argamassas com cal. Isso porque, enquanto nas misturas com o hidróxido de cálcio, este é o mais fino no sistema, nas misturas da NBR 5752 (ABNT, 2014) as amostras avaliadas de LOTex são, em sua grande maioria, mais finas do que o cimento, de tal forma que elas quem proporcionam, como explicado por Scrivener et al. (2015) e também por Neville e Cremonini (2016), o efeito de “preenchimento de vazios” entre as partículas de cimento e o processo de nucleação heterogênea. Sendo assim, nas misturas com cimento Portland, é perceptível a combinação dos dois efeitos, pozolânico e fíler.

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), o material pode ser considerado pozolânico para uso em cimento Portland caso apresente índice de atividade pozolânica (IAP), ou seja, o percentual em relação a argamassa de referência, igual ou superior a 90%, aos 28 dias. A Tabela 15 apresenta os valores de IAP para todas as amostras. Pode-se observar, então, que as cinzas calcinadas nas três faixas de

temperatura estudadas e com finuras Blaine de 900 m²/kg e 1200 m²/kg podem ser consideradas pozolanas de acordo com esse normativo.

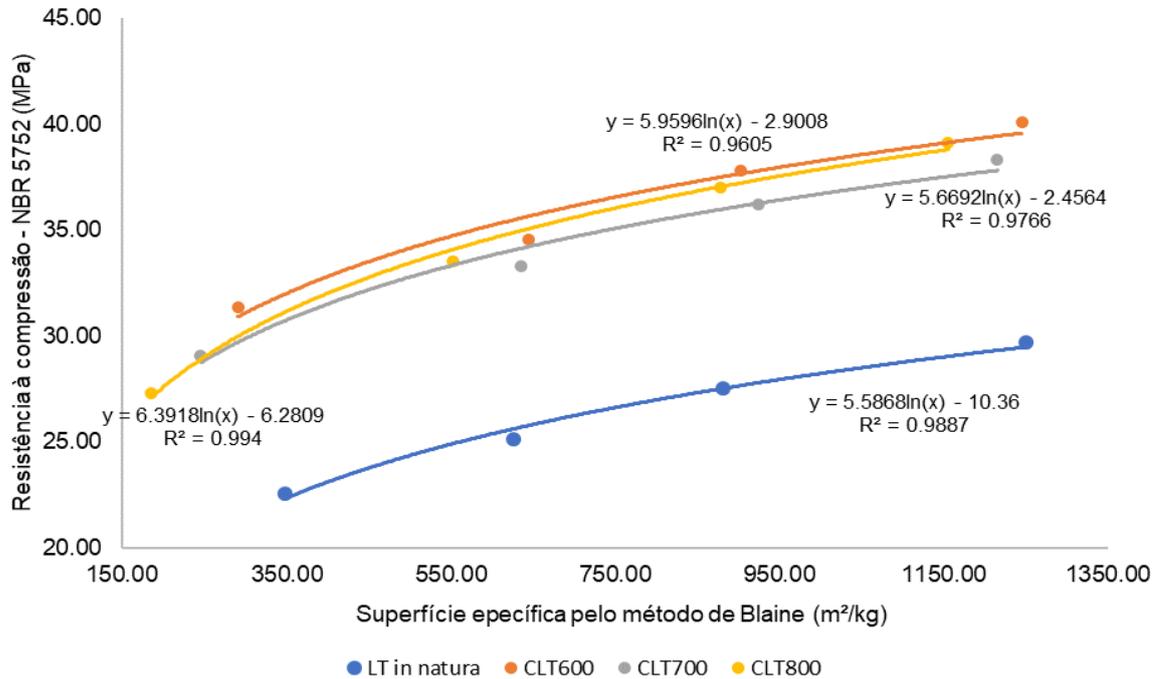
Tabela 15 - Índice de atividade pozolânica (IAP) para todas as amostras de LOTex *in natura* e cinzas.

Amostra de LOTex	Resistência à Compressão (MPa)	IAP (%)
In natura - SM	22,580	58,46%
In natura - B600	25,146	65,10%
In natura - B900	27,543	71,31%
In natura - B1200	29,677	76,83%
CLT600 - SM	31,374	81,23%
CLT600 - B600	34,544	89,43%
CLT600 - B900	37,776	97,80%
CLT600 - B1200	40,078	103,76%
CLT700 - SM	29,090	75,31%
CLT700 - B600	33,289	86,18%
CLT700 - B900	36,227	93,79%
CLT700 - B1200	38,342	99,27%
CLT800 - SM	27,301	70,68%
CLT800 - B600	33,523	86,79%
CLT800 - B900	37,020	95,84%
CLT800 - B1200	39,143	101,34%

Fonte: O autor (2023)

De maneira geral, foi observado que houve comportamento semelhante no teste de atividade pozolânica de argamassas com cimento em relação aos resultados obtidos com o ensaio da NBR 5751 (ABNT, 2015) modificada. Nesta etapa, a calcinação também influenciou positivamente, visto que as cinzas apresentaram valores de resistência muito superiores às amostras *in natura*, e o aumento da superfície específica provocou um aumento na resistência à compressão para todas as amostras. Pode-se visualizar isso mais claramente na Figura 33, que mostra que finura Blaine e resistência são diretamente proporcionais, com uma tendência aproximadamente logarítmica.

Figura 33 - Correlação entre a Resistência à compressão (MPa) da NBR 5752 e a superfície específica (m^2/kg) do LOTex in natura e das cinzas



Fonte: O autor (2023)

As amostras in natura, tanto destorroada quanto moídas nas três faixas de finura, apresentaram resistências mais baixas, muito provavelmente por possuírem elevada quantidade de matéria orgânica que, como já relatado na literatura, atrapalha as reações de hidratação do cimento. Os orgânicos podem ser absorvidos pela superfície tanto dos grãos de cimento hidratantes quanto dos produtos de hidratação, o que leva a formação de uma camada protetora temporária, atrasando a hidratação do cimento (GOYAL et al., 2019; ZHAN; POON, 2015; LIU et al., 2020). As amostras calcinadas, por sua vez, tendo em vista que a eliminação dos orgânicos e materiais voláteis ocorrem geralmente entre 200°C e 550°C , como retratado por Vasques et al. (2015), acabam apresentando valores maiores de resistência.

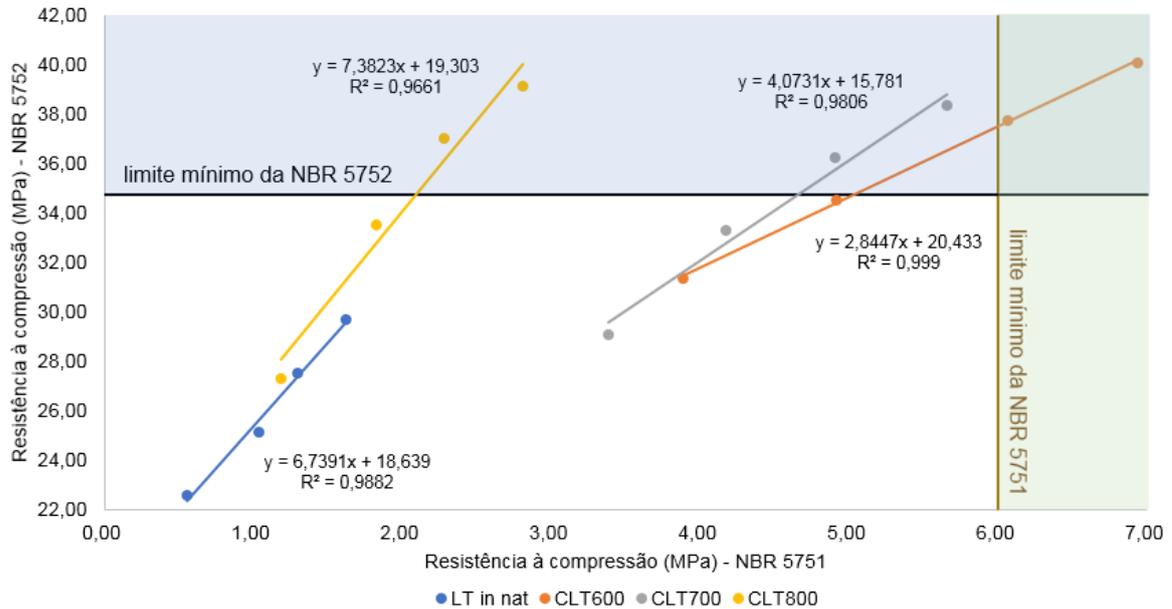
Porém, diferentemente dos resultados observados na NBR 5751 modificada, observa-se que as cinzas calcinadas a 700°C e 800°C apresentaram resistências similares àsquelas observadas nas amostras calcinadas a 600°C . Ressalta-se que este comportamento difere do observado nos testes de resistência com hidróxido de cálcio, no qual a reatividade pozolânica das CLT800 é significativamente menor do que as demais amostras calcinadas. Este comportamento observado nas misturas com cimento Portland pode ser justificado pela soma do efeito pozolânico com o efeito fíler. Dentro desse contexto, os fenômenos de sinterização podem provocar

nas partículas o processo de esferoidização, que acaba tornando as partículas mais arredondadas (MARCHI, 1999). Este possível fenômeno de esferoidização, em conjunto com a diminuição dos tamanhos das partículas com a moagem, podem ter aumentado o potencial efeito fíler nessas amostras com maior temperatura de calcinação. Assim, com partículas mais finas e esféricas, foram capazes de melhorar o empacotamento granulométrico e aumentar a quantidade de pontos de nucleação. Isto incorre na intensificação da hidratação do cimento e colabora diretamente para os bons valores de resistência à compressão observados.

Outro ponto importante a ser discutido é acerca dos índices de consistência das argamassas com cimento Portland, mostrados na Tabela 10 do item 3.3.3.2. Para as amostras *in natura* e para cada temperatura de calcinação, o índice de consistência tendeu a aumentar quanto maior era a finura Blaine da amostra. É possível explicar isso por meio da provável melhora do empacotamento de partículas obtido pelo sistema à medida que a amostra de LOTex se torna cada vez mais fina. Para melhor compreender, basta observar o discutido no trabalho de Damineli et al. (2017), que tratou da influência do empacotamento e dispersão de partículas no consumo de cimento de concretos. Os autores explicam que no caso de uma suspensão, onde há a inserção de um fluido entre os vazios para afastar as partículas e fazê-las se moverem, um bom empacotamento das partículas irá reduzir consideravelmente os vazios e permitir que a fluidez da suspensão seja atingida com quantidades bem menores do fluido. Dessa forma, como a granulometria do LOTex vai se tornando muito pequena com o aumento da finura Blaine, os grãos do mesmo podem preencher os vazios deixados pelo cimento e pela areia e gerar um bom empacotamento, contribuindo para atingir a consistência desejada com uma menor quantidade de água. Assim, como a relação água/aglomerante foi mantida constante, provavelmente o índice de consistência cresceu à medida que o empacotamento melhorava com a adição de uma amostra cada vez mais fina.

Por fim, quando se analisa os resultados de ambos os ensaios de resistência à compressão em argamassas, constata-se que as amostras que foram classificadas como pozolanas pela NBR 5751 (ABNT, 2015) modificada também foram pela NBR 5752 (ABNT, 2014) modificada, mas o contrário não ocorreu. A Figura 34 traz a correlação entre os resultados obtidos nos ensaios dessas duas normas.

Figura 34 - Correlação entre as resistências à compressão da NBR 5752 modificada e NBR 5751 modificada.



Fonte: O autor (2023)

As amostras CLT700 e CLT800 de finuras Blaine 900 m²/kg e 1200 m²/kg não se enquadraram nos requisitos de pozolanicidade pela NBR 5751 modificada, porém, enquadram-se nos requisitos da NBR 5752 modificada. Nesta, como já discutido, o efeito fíler do LOTex se soma às reações pozolânicas de forma considerável, aumentando notadamente as resistências das argamassas e justificando, então, o maior número de amostras que obedecem aos requisitos normativos da NBR 5752 do que pela NBR 5751 modificada.

4.3 TESTES EM PASTAS DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO

Os resultados referentes aos ensaios de microestrutura em pastas serão apresentados e discutidos a seguir.

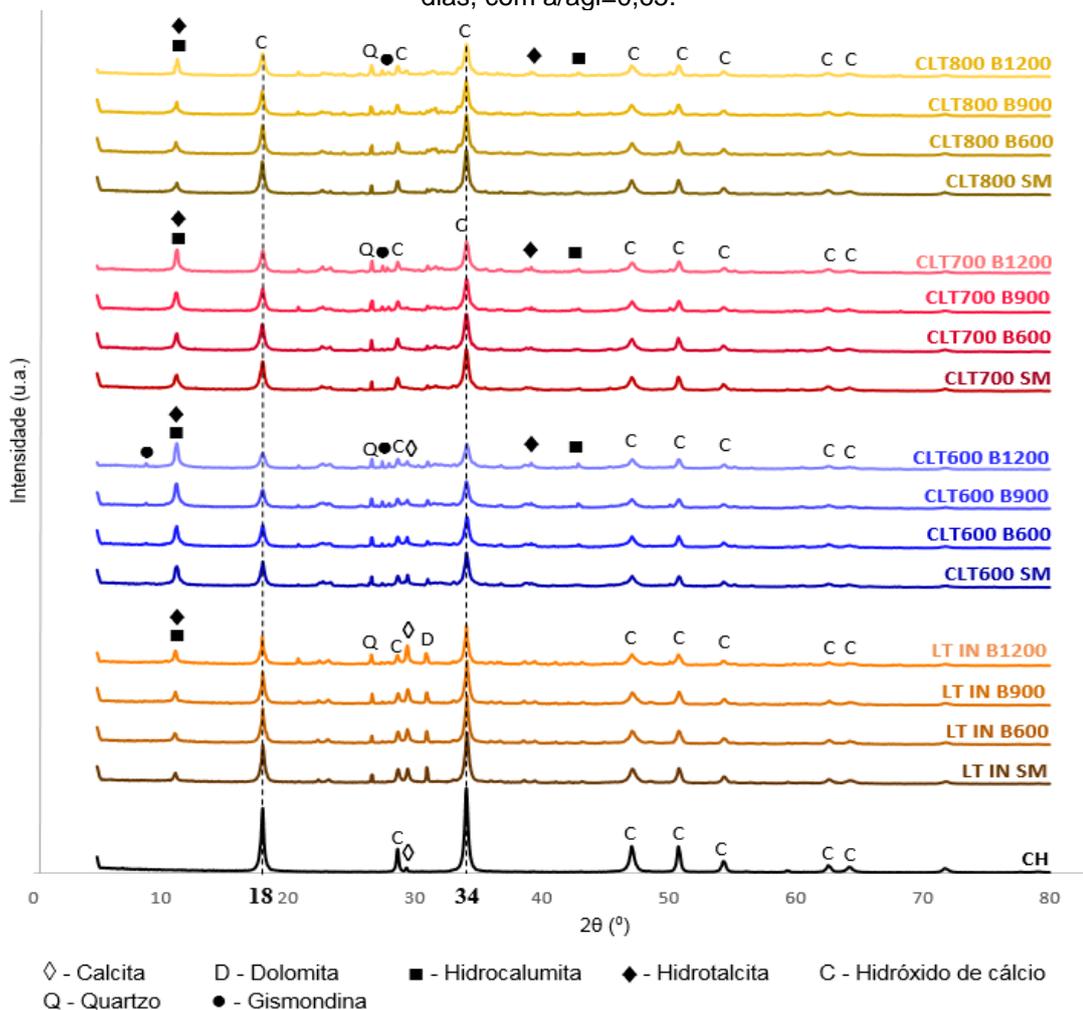
4.3.1 Difração de raios-X

A DRX em pastas foi realizada em virtude de permitir uma melhor compreensão da atividade pozolânica. Isso porque toma por base as intensidades de picos de hidróxido de cálcio (CH) de uma pasta pura, contendo apenas hidróxido de cálcio. Ademais, com o andamento da reação pozolânica, ocorre consumo de

CH, permitindo-se observar a conseqüente diminuição de seus picos. Com isso, é possível, estimar a reatividade do material por meio de uma análise semiquantitativa de comparação da intensidade dos principais picos observados nos difratogramas. Além disso, nesse caso não existem problemas de adensamento inadequado, pois além de não haver utilização de areia, ao invés de um misturador mecânico planetário (argamassadeira), se utiliza um agitador mecânico, numa velocidade de 1600 rpm, o que torna possível um melhor acompanhamento da reação e uma investigação mais adequada de seus produtos de hidratação.

A identificação dos picos foi realizada por meio da comparação do difratograma da amostra com o banco de dados do Internacional Centre of Diffraction Data (ICDD), por meio do software X'Pert HighScore Plus. Na Figura 35 estão apresentados os difratogramas de todas as pastas estudadas, obtidos após 7 dias de cura, conforme as orientações de NBR 5751 modificada.

Figura 35 - Difratogramas das pastas de hidróxido de cálcio p.a. com amostras de lodo têxtil aos 7 dias, com $a/agl=0,65$.



Fonte: O autor (2023)

Analisando os difratogramas das pastas moldadas com hidróxido de cálcio p.a. e a amostra de LOTex, percebe-se a presença de picos referentes a fases oriundas dos próprios materiais anidros, como o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e o quartzo em todas elas (SiO_2), e a calcita (CaCO_3) e a dolomita ($\text{CaMg(CO}_3)_2$) apenas nas amostras *in natura* e calcinadas a 600°C . Porém, avaliando a presença de produtos de hidratação, é possível visualizar picos de hidrotalcita ($(\text{Mg}_{0,667}\text{Al}_{0,333})(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_{0,167}(\text{H}_2\text{O})_{0,5}$), gismondina ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_9 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) e de hidrocalumita ($\text{Ca}_8\text{Al}_4(\text{OH})_{24}(\text{CO}_3)\text{Cl}_2(\text{H}_2\text{O})_{1,6}(\text{H}_2\text{O})_8$).

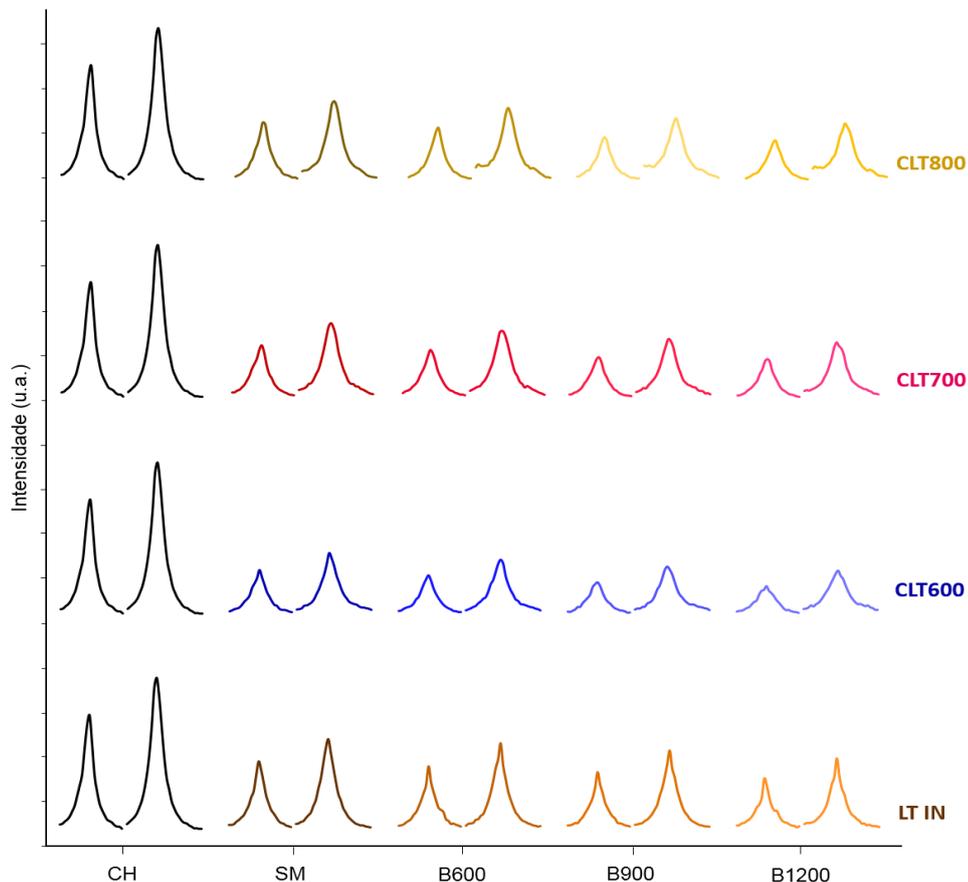
Para melhor compreensão da formação desses produtos, deve-se avaliar as reações de hidratação. Aquelas entre compostos como óxidos de alumínio e silício com o hidróxido de cálcio levam ao consumo deste e à formação de silicoaluminato de cálcio hidratado (SACH), correspondente à fase gismondina (MELLO, 2019), justificando sua presença nos difratogramas das pastas. Já nas reações em que, na estrutura da brucita, que nada mais é do que hidróxido de magnésio oriundo da hidratação dos compostos magnesianos, cátions de alumínio (Al^{+3}) substituem parcialmente cátions de magnésio (Mg^{+2}), levam à formação do composto conhecido como hidrotalcita (SALOMÃO et al., 2010). Isso é de certo modo positivo, já que a brucita (Mg(OH)_2) e o periclásio (MgO), que possuem efeito expansivo, não foram observados nas pastas constituídas por amostras de LOTex e hidróxido de cálcio, pois os íons de magnésio dos compostos do lodo provavelmente não foram convertidos em hidróxido de magnésio e na verdade reagiram com os íons de alumínio, formando hidrotalcita.

Ainda nesse contexto, sabe-se pela literatura que as reações de hidratação contendo compostos de cálcio, alumínio e cloro (bastante presentes nas amostras de LOTex deste estudo) podem dar origem ao cloroaluminato de cálcio hidratado, composto este conhecido como Sal de Friedel, correspondente à fase hidrocalumita. Um exemplo é o caso da reação entre a halita (NaCl) e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) que leva à formação de cloreto de cálcio (CaCl_2) e este, por sua vez, reage com os compostos de alumínio do LOTex, como a mayenita ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$), dando origem a hidrocalumita (SOUSA, 2019; ZAGO, 2019; DAI, Y. et al., 2009; RAPIN et al., 2002). A presença desse composto depois da reação de hidratação é positiva, tendo em vista que mostra existir boa capacidade dos produtos da reação em ligar íons cloreto, deixando maior quantidade de cloreto quimicamente combinado e menor quantidade de cloreto livre. O primeiro não é solúvel na solução

de poros do material, não tendo efeito direto em processos corrosivos, enquanto que o cloreto livre existe nessa solução de poros e aumenta o potencial de corrosão (ZHANG e SHAO, 2016). Dessa maneira, caso o LOTex proporcionasse certa presença de cloretos livres, sua aplicação em concreto armado, por exemplo, seria muito negativa. Porém, com a considerável formação de hidrocalumita, mostra que há maior quantidade de cloreto ligado, o que reduz o favorecimento aos processos corrosivos e justifica, inclusive, o porquê de não ter sido observada a fase halita (NaCl) nas pastas como existia nas amostras de LOTex anidras.

Contudo, através dos difratogramas da Figura 35, verifica-se um claro decréscimo dos picos característicos do hidróxido de cálcio nas pastas com LOTex. A fim de melhor visualizar o fenômeno, a Figura 36 traz os dois principais picos de CH (a 18° e 34°) para cada amostra e denota claramente o seu consumo em virtude da reação pozolânica. Embora sem escalas numéricas, mas em dimensões proporcionais, são comparados os dois principais picos de CH na pasta pura com os mesmos picos presentes nos difratogramas das pastas contendo LOTex.

Figura 36 - Comparação entre os picos de 18° e 34° do hidróxido de cálcio de pastas contendo as amostras de LOTex in natura e cinzas.



Fonte: O autor (2023)

Essa redução da intensidade dos picos de CH fica mais acentuada quanto maior for a finura Blaine da amostra e também com a calcinação, e percebe-se que isso ocorre juntamente com o aparecimento de produtos da reação, que não estavam inicialmente presentes nos difratogramas dos materiais anidros. Esse comportamento era esperado e concorda com os resultados obtidos dos outros ensaios. Isso porque, como já mencionado, o aumento da superfície específica e a calcinação aumentam a reatividade. Na Tabela 16, pode-se observar os valores numéricos de intensidade dos picos de CH, do percentual de decréscimo relativo da intensidade dos picos (DRIP), do consumo de CH por meio da taxa de intensidade relativa (*Relative Intensity Ratio* - RIR) e do consumo de hidróxido de cálcio a 18° e a 34° através do ajuste dos valores de DRIP pela razão mássica.

Tabela 16 - Valores de intensidades de pico de hidróxido de cálcio, consumo de CH por RIR, decréscimo relativo da intensidade dos picos (DRIP) e consumo de CH a 18° e 34° por DRIP para as pastas em estudo.

Amostra	Consumo de CH por RIR (%)	Intensidade do pico		DRIP (%)		Consumo de CH por DRIP (%)	
		18°	34°	18°	34°	18°	34°
LT IN - SM	8,59%	3737,00	4963,00	40,83%	41,18%	2,80%	3,37%
LT IN - B600	17,14%	3425,00	4684,00	45,77%	44,49%	11,56%	9,46%
LT IN - B900	28,53%	3109,00	4290,00	50,78%	49,16%	19,72%	17,08%
LT IN - B1200	38,49%	2746,00	3834,00	56,52%	54,56%	30,26%	27,11%
CLT600 - SM	33,42%	2406,00	3274,00	61,91%	61,20%	30,96%	29,67%
CLT600 - B600	40,33%	2118,00	2900,00	66,47%	65,63%	39,52%	38,01%
CLT600 - B900	48,17%	1716,00	2480,00	72,83%	70,61%	51,08%	47,08%
CLT600 - B1200	61,19%	1542,00	2315,00	75,59%	72,56%	56,33%	50,93%
CLT700 - SM	17,81%	2840,00	4031,00	55,03%	52,23%	16,89%	11,71%
CLT700 - B600	25,40%	2601,00	3610,00	58,82%	57,22%	24,13%	21,18%
CLT700 - B900	41,02%	2196,00	3125,00	65,23%	62,97%	36,36%	32,21%
CLT700 - B1200	49,44%	2119,00	2953,00	66,45%	65,00%	39,49%	36,88%
CLT800 - SM	11,60%	3171,00	4299,00	49,79%	49,05%	7,36%	5,99%
CLT800 - B600	20,13%	2873,00	3879,00	54,51%	54,03%	16,06%	15,17%
CLT800 - B900	35,41%	2347,00	3320,00	62,84%	60,65%	31,87%	27,87%
CLT800 - B1200	43,44%	2222,00	3027,00	64,82%	64,13%	36,34%	35,09%

Fonte: O autor (2023)

É importante perceber, como já discutiram Torres et al. (2020), que o DRIP, embora mensure o aumento do consumo do hidróxido de cálcio nas pastas com LOTex, a partir da redução da intensidade dos seus principais picos e considerando como referência de intensidade máxima inicial os picos da pasta pura de hidróxido

de cálcio p.a., não pode ser considerado uma medida exata da ocorrência da reação pozolânica. Isso em virtude de se tratar apenas de uma análise semiquantitativa da pozolanidade das amostras através da comparabilidade de seus valores. Diante disso, para obtenção do consumo de hidróxido de cálcio, levando em consideração que há redução do pico também em virtude da substituição do hidróxido de cálcio p.a. por LOTex em cerca de 2/3 de seu volume, houve a correção da intensidade dos picos da pasta pura de CH pela razão mássica de CH e pozolana na pasta analisada (como explicado no item 3.3.3.3), pois isso torna mais próximo do valor real de CH consumido.

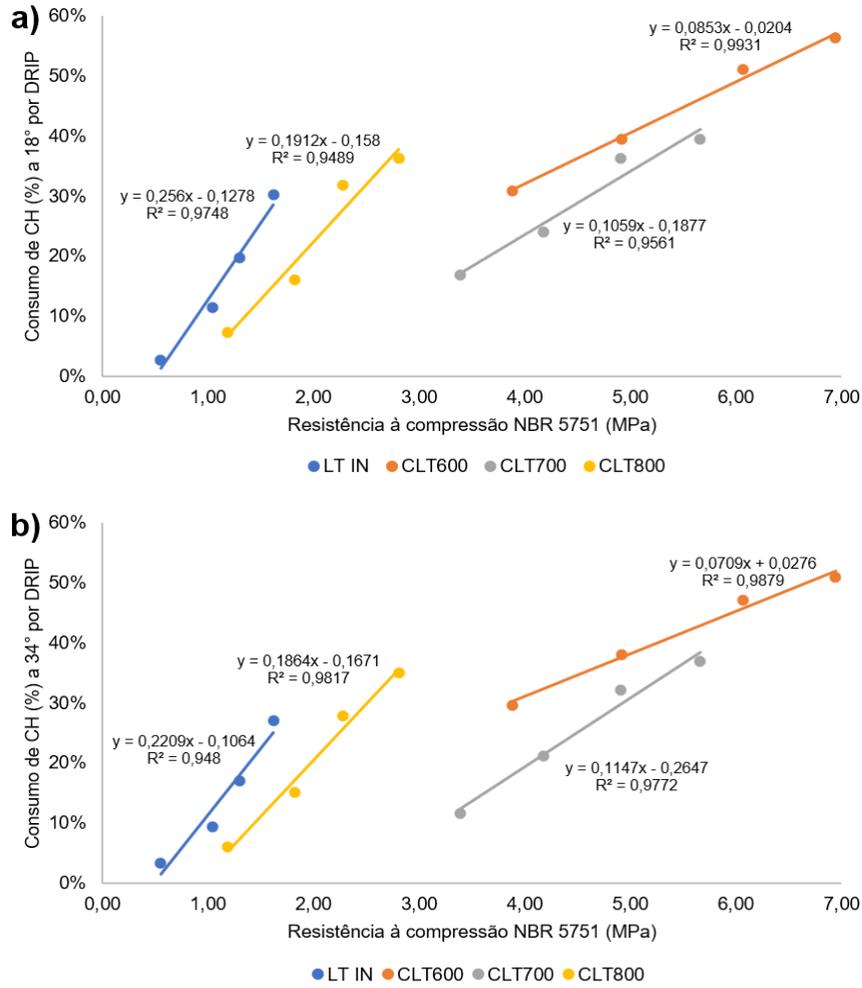
Observa-se, então, que as amostras de maior destaque, ou seja, aquelas que apresentam maior consumo de CH com a reação pozolânica, são as calcinadas a 600°C, todas elas apresentando percentuais de consumo de CH por correção dos valores de DRIP acima de 29% e por RIR superiores 33%. E as de piores resultados, as amostras *in natura*, com percentuais de consumo de CH por DRIP a partir de 2,8% e por RIR de 8,59% em diante. Vale salientar que, para uma mesma faixa de finura, quando a temperatura de calcinação aumentava, a tendência era ocorrer um menor consumo de CH, ou seja, menor era a reatividade da amostra. Todas amostras calcinadas a 700°C tiveram percentuais de consumo de CH por DRIP superiores a 10% e por RIR acima de 17%, enquanto que todas as calcinadas a 800°C atingiram valores por DRIP superiores a 5% e por RIR acima de 11%. Valores esses que concordam com os resultados dos demais ensaios, pois, além de comprovar que as amostras *in natura* são menos reativas e a calcinação aumenta a reatividade do material, atestam que à medida que há aumento da temperatura de calcinação, para uma mesma faixa de finura, passa a haver, em virtude dos fenômenos de sinterização já discutidos, redução da reatividade das mesmas.

Nesta etapa do trabalho, foi possível observar também que à medida que a finura da amostra de LOTex aumentava, havia uma diminuição gradual nos dois principais picos de CH, referindo-se à evolução de seu consumo. Em outras palavras, comprovou-se que a reação pozolânica se intensificava com o aumento da superfície específica da amostra. Aquelas de maior finura Blaine, 1200 m²/kg, apresentaram os maiores valores de consumo de hidróxido de cálcio por DRIP e por RIR. A LT IN- B1200, com os piores resultados, ainda chegou a ultrapassar 30% de consumo de CH por DRIP e 38% por RIR. A CLT600-B1200, com os melhores resultados, superou os 55% de consumo de CH e atingiu 61,19% pela técnica RIR.

Tendo em vista que as pastas foram moldadas seguindo as orientações da NBR 5751, foram feitas também correlações entre os consumos de hidróxido de cálcio por DRIP e pela técnica RIR com os valores de resistência obtidos nos testes de compressão, conforme mostrando nas Figuras Figura 37 e Figura 38. A partir dos resultados, percebeu-se uma proporcionalidade dos valores de consumo de CH tanto por DRIP como por RIR em relação à resistência à compressão da NBR 5751, obedecendo uma tendência linear no primeiro caso e exponencial no segundo caso. Para este, sustentou-se essa decisão tendo em vista que o coeficiente de determinação (R^2) foi maior para o ajuste matemático exponencial ao invés do linear. Diante disso, embora o consumo de CH por DRIP e por RIR sejam considerados métodos pouco precisos, a forte correlação deles com um método já assentado, indica que podem ser utilizados como ferramentas rápidas e práticas de avaliação da pozolanicidade.

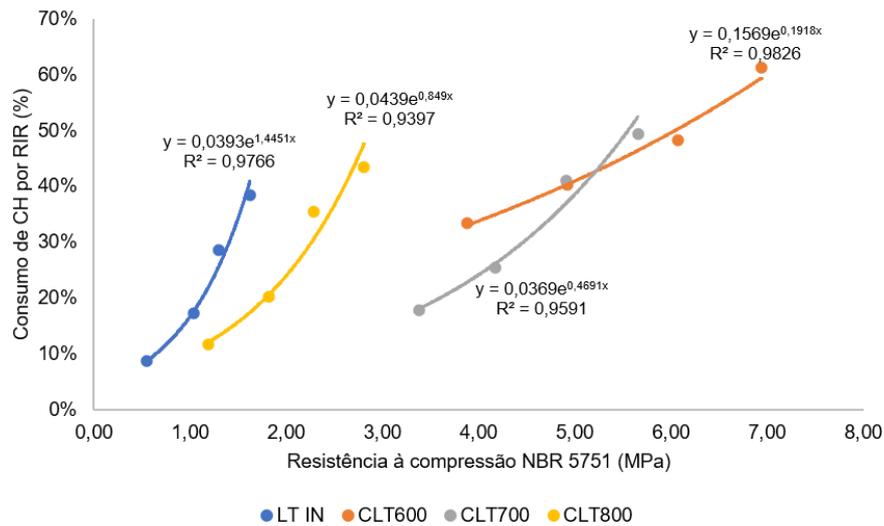
Consegue-se perceber, com a análise dessas correlações, que as amostras de LOTex que satisfazem ao requisito sugerido pela NBR 5751 para serem consideradas pozolanas, obtiveram um consumo de CH de no mínimo 51,08% para o pico a 18° e 47,08% para o pico a 34° . Enquanto que para a técnica RIR, os valores foram de no mínimo 48,17%. É interessante notar também que os valores pela técnica RIR se apresentaram geralmente maiores que os obtidos a partir do DRIP. Isso provavelmente pode ser justificado pelo fato de que o software Diffrac.Eva 3.4 leva em consideração apenas as fases mineralógicas selecionadas pelo usuário em sua análise qualitativa do difratograma e, como eventualmente pode ocorrer do pesquisador escolher fases principais e acabar desconsiderando algumas fases de menor impacto, presentes em menores quantidades, pode resultar em superestimação dos percentuais cedidos pelo software para as fases selecionadas.

Figura 37 - Correlação entre consumo de CH (%) por DRIP a 18° (a) e a 34° (b) e a resistência à compressão obtida pela NBR 5751 modificada (MPa).



Fonte: O autor (2023)

Figura 38 - Correlação entre consumo de CH por RIR (%) e a resistência à compressão obtida pela NBR 5751 modificada (MPa).

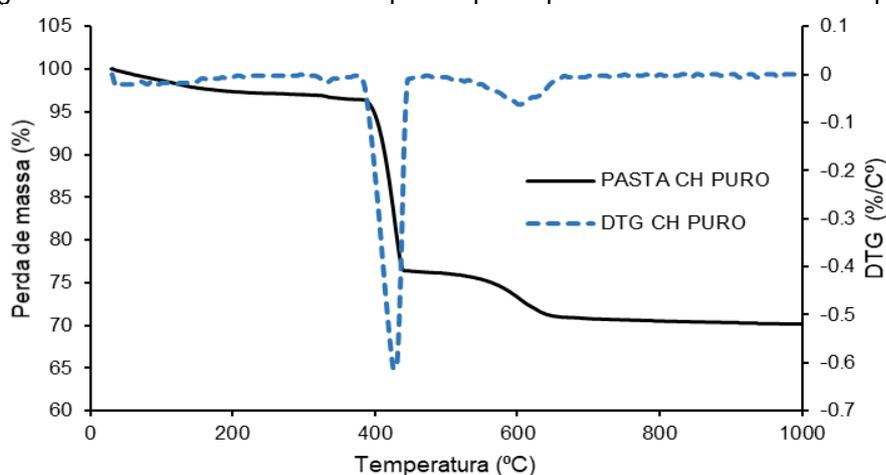


Fonte: O autor (2023)

4.3.2 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica foi outra técnica utilizada para determinar o consumo de hidróxido de cálcio (CH). Esta análise foi conduzida com o propósito de avaliar tal consumo baseado na perda de massa da pasta pura de CH, semelhante ao processo realizado com difração de raios-X. O pico de desidratação do CH foi identificado na faixa de 380 a 450°C, conforme ilustrado na Figura 39, que traz as curvas de ATG e DTG da pasta pura de hidróxido de cálcio p.a.

Figura 39 - Curvas de ATG e DTG para a pasta pura de hidróxido de cálcio p.a.



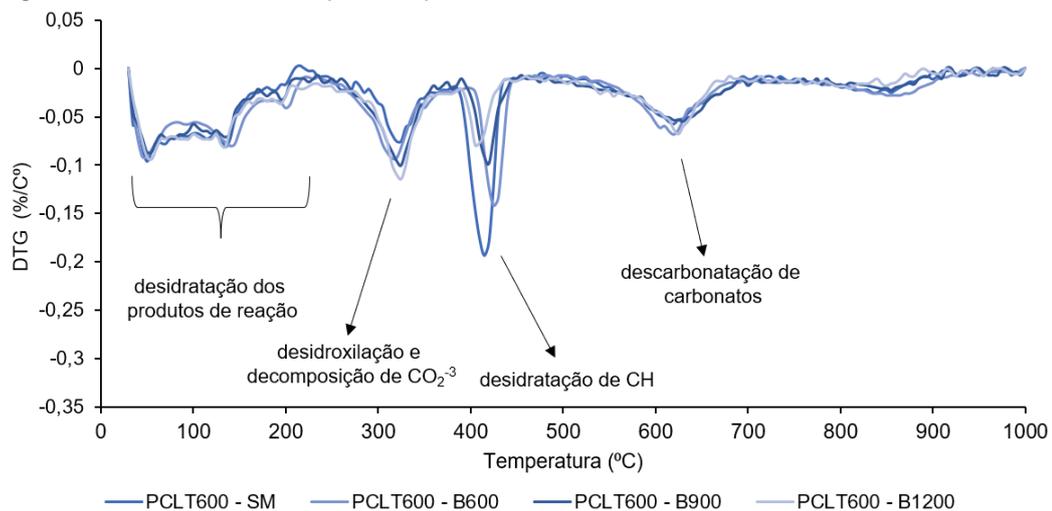
Fonte: O autor (2023)

Da Figura 40 até a Figura 43 estão apresentadas as curvas de termogravimetria derivada para cada grupo de pastas de hidróxido de cálcio e amostra de LOTex, seja esta calcinada ou *in natura* em umas das três faixas de temperatura deste estudo.

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 (SOUZA, 2019; ROSSET, 2017; SCRIVENER et al., 2016; BORGES, 2015). O terceiro estágio, por sua vez, indo de 380°C a 450°C, é o principal foco de análise do

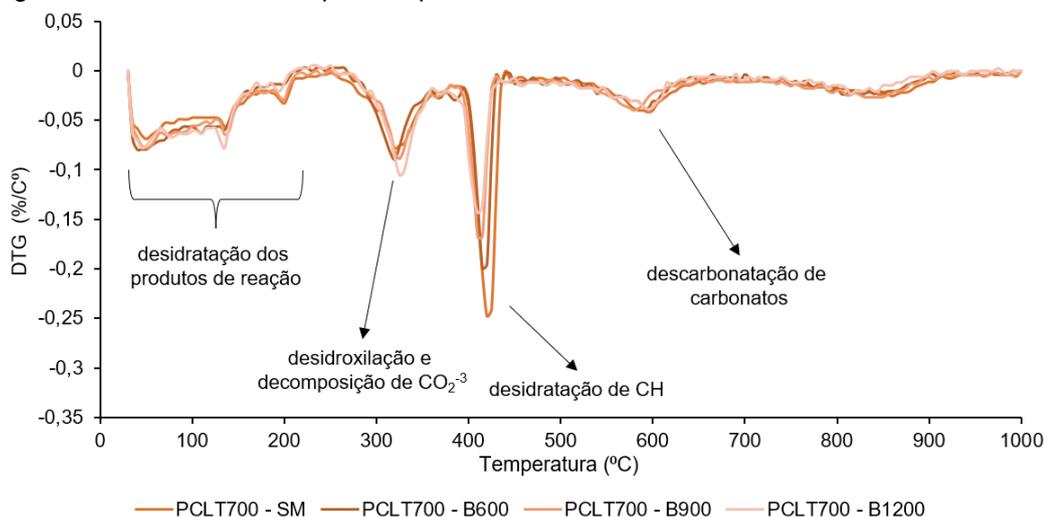
andamento da reação pozolânica neste trabalho, tendo em vista que se refere, como já mencionado, ao pico característico de perda de água do CH e onde pode-se observar seu consumo. O quarto estágio, que vai em torno de 550°C até 700°C, pode corresponder tanto à decomposição de matéria orgânica de difícil degradação, quanto, principalmente, à descarbonatação de carbonatos (SATHIYA e SWAMINATHAN, 2022; RIBEIRO et al., 2021; 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).

Figura 40 - Curvas de DTG para as pastas de hidróxido de cálcio e amostras de CLT600.



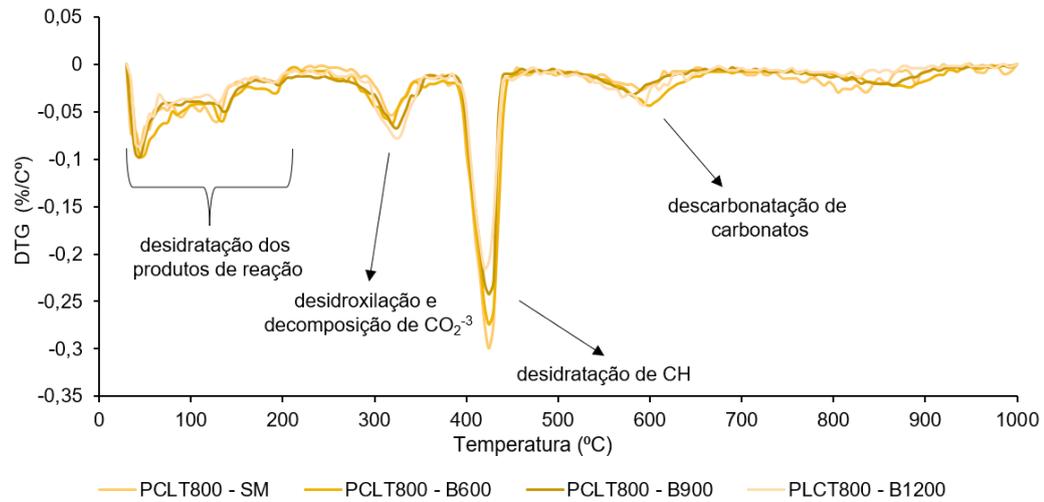
Fonte: O autor (2023)

Figura 41 - Curvas de DTG para as pastas de hidróxido de cálcio e amostras de CLT700.



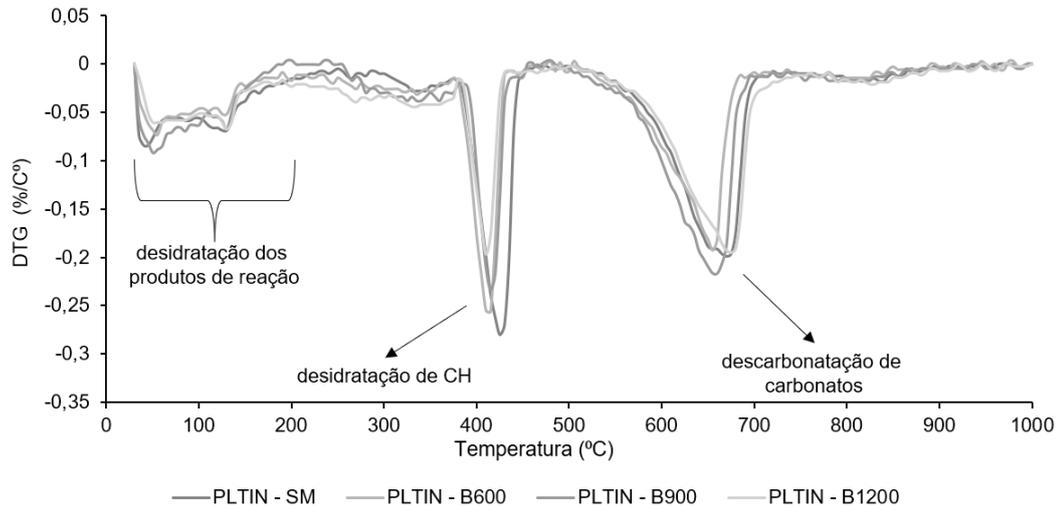
Fonte: O autor (2023)

Figura 42 - Curvas de DTG para as pastas de hidróxido de cálcio e amostras de CLT800.



Fonte: O autor (2023)

Figura 43 - Curvas de DTG para as pastas de hidróxido de cálcio e amostras de LT in natura



Fonte: O autor (2023)

A Tabela 17 apresenta os valores numéricos calculados a partir da análise quantitativa das curvas de termogravimetria das pastas. O consumo de CH foi calculado levando em consideração o ajuste da perda de massa da pasta pura de CH por meio da relação mássica, conforme explicado no item 3.3.3.3. Ao analisar esses dados, percebe-se que foram consistentes com os apresentados nos ensaios de pasta em DRX, tendo em vista que os efeitos tanto da calcinação quanto da moagem seguiram o mesmo raciocínio. As amostras calcinadas a 600°C novamente 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 também contribuiu para

aumentar a reatividade, pois, majoritariamente, para uma mesma finura, as pastas com cinzas apresentaram menor teor de CH em relação as pastas com LOTex *in natura*. 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 das amostras não calcinadas possuírem um elevado valor 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 se tornou 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 de maior finura (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, na generalidade, à medida que a finura das amostras de LOTex aumentava, o teor de CH diminuía, resultando em uma redução do pico característico de desidratação do mesmo.

Tabela 17 - H₂O medido a partir da perda de massa, CH medido estequiometricamente e consumo de CH calculado para as pastas de CH-LOTex por ATG.

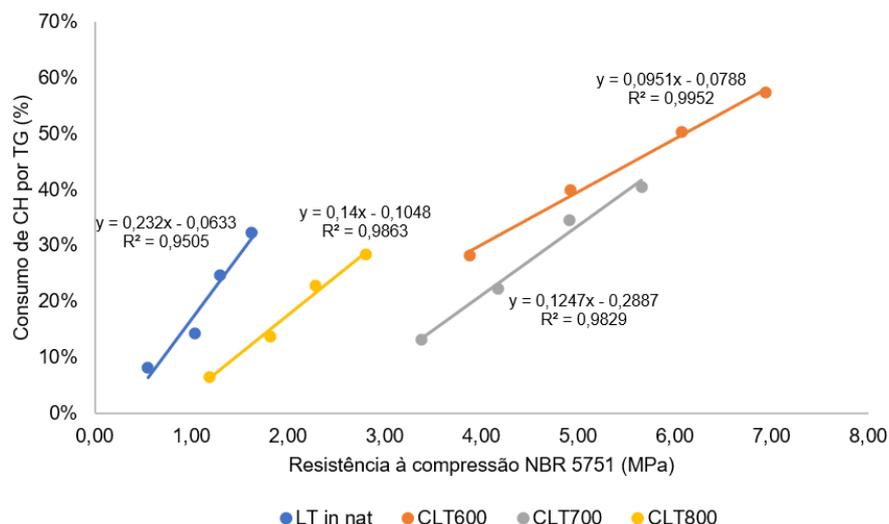
Amostra	Perda de massa entre 380 e 450 (%)	H ₂ O medido (mg)	CH medido (mg)	CH consumido (%)
LT IN - SM	7,70	0,38	1,55	8,16%
LT IN - B600	8,39	0,35	1,46	14,24%
LT IN - B900	6,50	0,31	1,28	24,59%
LT IN - B1200	5,02	0,28	1,17	32,33%
CLT600 - SM	5,67	0,27	1,10	28,24%
CLT600 - B600	3,95	0,23	0,93	39,87%
CLT600 - B900	3,01	0,19	0,77	50,26%
CLT600 - B1200	2,92	0,16	0,66	57,44%
CLT700 - SM	5,73	0,32	1,30	13,26%
CLT700 - B600	3,66	0,29	1,17	22,18%
CLT700 - B900	3,11	0,24	0,99	34,59%
CLT700 - B1200	3,05	0,22	0,92	40,51%
CLT800 - SM	10,37	0,34	1,41	6,42%
CLT800 - B600	7,99	0,32	1,30	13,78%
CLT800 - B900	7,22	0,28	1,17	22,87%
CLT800 - B1200	6,93	0,27	1,10	28,39%

Fonte: O autor (2023)

As correlações entre os resultados obtidos para consumo de CH por termogravimetria e os demais métodos de ensaios que também utilizaram misturas com cal e com os mesmos quantitativos de materiais, ou seja, resistência à compressão da NBR 5751 (ABNT, 2015) e avaliação desse consumo por difração de raios-X para os dois principais picos de CH, foram realizadas. Como era de se esperar, a Figura 44 mostra que com o aumento do consumo de CH por ATG, a resistência à compressão das argamassas também aumentou, em virtude da reação pozolânica, estabelecendo uma relação de proporcionalidade com tendência linear, tendo em vista que para este ajuste se obteve o maior coeficiente de determinação (R^2). Dessa forma, foi possível perceber que, embora a técnica de ATG avalie apenas a ação química das amostras de LOTex, por meio do consumo de CH, e o teste de resistência permita verificar tanto a ação química quanto física das amostras nas argamassas com hidróxido de cálcio, os métodos apresentam resultados que se correlacionam linearmente, indicando que possuem um comportamento similar na avaliação da pozolanicidade.

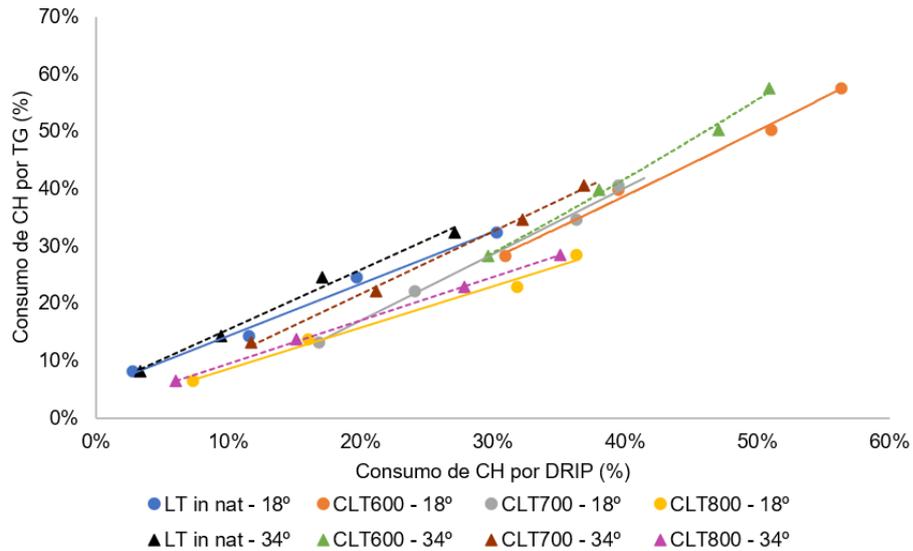
Figura 45, por sua vez, mostra o quão similar é o comportamento da avaliação do consumo de CH por ATG em relação ao determinado por DRIP, pois, além de apresentarem valores muito próximos para todas as amostras, independente de qual pico característico esteja sendo levado em consideração, estabelecem, como já se suspeitava, uma proporcionalidade entre as duas técnicas, que também se mostrou melhor expressa por uma relação linear.

Figura 44 - Correlação entre consumo de CH (%) determinado por ATG e a resistência à compressão obtida conforme a NBR 5751 (MPa).



Fonte: O autor (2023)

Figura 45 - Correlação entre consumo de CH (%) por ATG e por DRIP a 18° e a 34°.



Fonte: O autor (2023)

4.3.3 Correlação entre métodos por análise estatística

Além das correlações gráficas apresentadas anteriormente entre os métodos de avaliação da atividade pozolânica, notou-se a importância da realização de uma análise estatística para correlacionar todos os métodos, inclusive relacionar o índice de atividade pozolânica (PAI) da NBR 5752 (ABNT, 2014) com os métodos diretos, o que ainda não foi feito até aqui. Diante disso, seguiu-se a metodologia indicada no item 3.3.3.4 para aplicação do coeficiente de correlação de Pearson.

O PAI com cimento Portland é considerado um método indireto, porém como os testes pozolânicos visam avaliar o uso de LOTex como substituto parcial do cimento, o uso deste aumenta a relevância do método, sendo, portanto, fundamental a correlação do mesmo com os demais testes que envolvem misturas com hidróxido de cálcio. A Tabela 18 traz os valores do coeficiente de Pearson quando aplicado para cada dois conjuntos de resultados de métodos diferentes.

Tabela 18 – Valores dos coeficientes de correlação de Pearson aplicados entre os diferentes métodos de avaliação da atividade pozolânica.

Correlação de Pearson	Resistência - NBR 5751	Resistência - NBR 5752	Consumo CH - DRIP - 18°	Consumo CH - DRIP - 34°	Consumo CH - RIR	Consumo CH - ATG
Resistência - NBR 5751	1,000					
Resistência - NBR 5752	0,780	1,000				
Consumo CH - DRIP - 18°	0,869	0,875	1,000			
Consumo CH - DRIP - 34°	0,856	0,874	0,985	1,000		
Consumo CH - RIR	0,803	0,858	0,975	0,974	1,000	
Consumo CH - ATG	0,855	0,875	0,966	0,964	0,958	1,000

Fonte: O autor (2023)

A partir dos coeficientes resultantes, observou-se que, no geral, foram obtidas correlações consideradas fortes entre os métodos. Vale salientar que aqueles que envolvem a NBR 5752 (ABNT, 2014) se apresentaram geralmente menor do que as demais. Fato que pode ser justificado por conta de se observar no ensaio em questão, além da reação pozolânica, uma influência muito forte do efeito fíler, e, como este não é observado nos demais, aumenta um pouco a discrepância dos resultados e os coeficientes de correlação que o envolvem geralmente apresentam valores um pouco menores, porém ainda com uma correlação bastante forte. Dentro desse contexto, o menor coeficiente ocorreu entre os dois testes de resistência à compressão, que são os dois métodos indiretos deste estudo.

Ao se analisar os métodos de quantificação considerados de precisão baixa, como DRIP e RIR, percebeu-se que ambos tiveram correlações bastante fortes com os demais métodos, com valores superiores a 0,80, demonstrando boa confiabilidade. Os dois maiores coeficientes foram referentes às correlações entre os valores de DRIP a 18° e a 34° e entre eles e o RIR, valores esperados tendo em vista que os dois primeiros são referentes à mesma metodologia, alterando apenas o pico de análise, e o RIR, embora utilize uma técnica semiquantitativa diferente, também é obtido pelo mesmo ensaio, a análise por difração de raios-X.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, a atividade pozolânica das amostras, *in natura* e calcinadas, moídas e não moídas, de lodo proveniente de estação de tratamento de efluentes da indústria têxtil, foi avaliada, com o intuito principal de analisar a viabilidade de sua utilização como material cimentício suplementar. Para isso, foi realizada uma completa caracterização dos materiais no estado anidro e conduzidos ensaios de compressão normalizados e ensaios não normalizados utilizando métodos químicos e microestruturais. Diante disso, serão apresentadas a seguir tanto as conclusões obtidas com o desenvolvimento da dissertação, como também as propostas para pesquisas futuras que prossigam no estudo do tema.

5.1.1 Conclusões

Em relação às análises físicas, percebeu-se que a calcinação provocou um aumento da massa específica, devido à remoção de quase toda a matéria orgânica do lodo, que possui material carbonáceo de massa específica menor, e notou-se a redução dessa propriedade com o aumento da superfície específica das amostras. Além disso, observou-se que quanto maior era a temperatura de calcinação, maior se tornava a dificuldade de moagem, em virtude da recristalização da sílica amorfa e dos fenômenos de sinterização. Todas as amostras apresentaram uma granulometria bem graduada, com a grande maioria das partículas possuindo tamanho entre 0,1 μm e 1 mm.

Quanto à caracterização química, a fluorescência de raios-X mostrou que todas as amostras de LOTex são constituídas majoritariamente por óxido de cálcio (CaO), óxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃), e óxido de magnésio (MgO). As amostras em geral não satisfazem as determinações da NBR 12653 (ABNT, 2014), mas apresentaram boas quantidades de SiO₂ e Al₂O₃, que juntamente com quantidades significativas de CaO, todas juntas apresentaram determinada atividade pozolânica. Ademais, não foi observado nenhum prejuízo em virtude da presença de álcalis em quantidade pouco maior que o permitido por esse normativo, mas é importante a realização de maiores investigações.

Com a análise mineralógica por difração de raios-X, verificou-se que a amostra de LOTex *in natura* é constituída majoritariamente por calcita e dolomita, que não aparecem nas cinzas calcinadas a temperaturas mais elevadas, por conta da decomposição térmica das mesmas, dando lugar a outras fases originadas por metamorfismo térmico e processos de sinterização. Também foi observado que a amostra com maior quantidade de conteúdo amorfo foi a CLT600, o que foi coerente com os resultados de avaliação da atividade pozolânica, tendo em vista que em todos eles as cinzas calcinadas a 600°C se mostraram as mais reativas.

A partir dos ensaios de índice de atividade pozolânica com cal aos 7 dias, constatou-se que apenas as amostras CLT600 – B900 e CLT600 – B1200 podem ser consideradas pozolanas, visto que atingiram valores de resistência à compressão superiores a 6 MPa, conforme exigido por norma. Diante dos resultados obtidos, observou-se claramente o crescimento da resistência tanto com o processo de calcinação como à medida que ocorria o aumento da superfície específica das amostras.

Já diante dos resultados obtidos para o índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias, as cinzas calcinadas nas três faixas de temperatura estudadas e com finuras Blaine de 900 m²/kg e 1200 m²/kg podem ser consideradas pozolanas, pois seguem o critério normativo de possuir no mínimo 90% da resistência à compressão alcançada pela argamassa de referência. Percebeu-se, então, que também, para o ensaio da NBR 5752 modificada, tanto a calcinação como o aumento da finura influenciaram positivamente, provocando crescimento da resistência.

Ademais, diferentemente dos ensaios da NBR 5751 modificada, verificou-se que os valores de resistência das amostras calcinadas em temperaturas mais altas, como as CLT800, se mostraram satisfatórios como os obtidos para as CLT600, por conta da significativa participação do efeito fíler nesse caso. E enquanto foram observadas relações lineares entre os ensaios de finura Blaine e a resistência à compressão nas argamassas com cal, a correlação entre finura e resistência das argamassas com cimento não apresentaram comportamento linear.

Em relação aos estudos com pastas, a partir dos difratogramas foi possível observar tanto a presença de fases oriundas dos próprios materiais anidros (como quartzo, hidróxido de cálcio, calcita e dolomita) como também picos referentes aos produtos de hidratação hidrocalumita, hidrotalcita e gismondina. Diante disso,

verificou-se o consumo de hidróxido de cálcio por meio do decréscimo da intensidade dos seus picos característicos e a formação dos compostos hidratados, evidenciando a ocorrência da reação pozolânica. A redução dos picos foi mais acentuada à medida que a finura das amostras aumentava, e as amostras calcinadas apresentaram menores picos do que as amostras não calcinadas, mostrando melhor desempenho para as cinzas calcinadas a 600°C. Além disso, verificou-se uma correlação linear entre DRIP e resistência à compressão da NBR 5751 e uma relação não linear entre esta e a técnica RIR.

No ensaio termogravimétrico das pastas, foi possível quantificar o teor de hidróxido de cálcio estequiometricamente e, assim, obter uma quantificação da reação pozolânica. Verificou-se que o teor de CH diminuía 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. Ademais, foram observadas relações lineares tanto entre o consumo por TG e a resistência da NBR 5751, quanto entre consumo por TG e consumo por DRIP.

Com a correlação entre os métodos por análise estatística, verificou-se que, enquanto os que possuem relação mais fraca são os testes indiretos de resistência à compressão, os de correlação mais forte são os métodos utilizados a partir da difração de raios-X. Porém, foram observadas, em geral, correlações fortes entre todos os métodos.

Contudo, este estudo mostrou que o LOTex, com tratamento térmico e moagem adequada, pode ser considerado um material alternativo para ser utilizado como adição ao cimento Portland. Porém, é válido ressaltar que os resultados obtidos são específicos do lodo estudado, oriundo de determinada coleta e de certa localidade. É, portanto, necessária a avaliação deste tipo de resíduo a partir de coletas sazonais e de diferentes localidades, além de realizar estudos mais aprofundados com o intuito de verificar a viabilidade técnica e econômica para seu emprego como material de construção.

5.1.2 Sugestões para trabalhos futuros

Algumas questões relevantes para continuidade do tema são descritas a seguir como propostas para trabalhos futuros:

- Caracterização química, física e mineralógica do lodo têxtil proveniente das principais estações de tratamento de efluentes do APL da confecção do agreste pernambucano, em diferentes períodos do ano, como forma de avaliar a variabilidade desse resíduo com a sazonalidade e o processo de tratamento;
- Estudo mais aprofundado do processo de moagem e calcinação do LOTex, tendo em vista que se mostraram como fatores preponderantes no desempenho da atividade pozolânica;
- Avaliar o potencial pozolânico do LOTex calcinado e não calcinado utilizando outros métodos normalizados e não normalizados, diretos e indiretos, como análise de pastas por FTIR, estudo da condutividade elétrica, aplicação do método R³, entre outros;
- Realização de estudo em pastas com cimento Portland, simulando a NBR 5752, para observar tanto o consumo de hidróxido de cálcio como a formação dos produtos de reação com o próprio cimento;
- Aplicação da microscopia eletrônica de varredura para identificação dos produtos de hidratação das pastas com lodo, impossibilitada neste estudo;
- Realização de análise quantitativa do consumo de CH por DRX utilizando o método de Rietveld, que também não foi possível neste estudo;
- Aplicação das cinzas de LOTex como substituto parcial do cimento em concretos e argamassas;
- Avaliação da reação álcali-agregado em compósitos cimentícios com a utilização de lodo têxtil como adição;
- Verificar se existe viabilidade econômica para produção comercial.

REFERÊNCIAS

ABNT, NM 52. Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. **Associação Mercosul de Normalização**, [s. l.], p. 6, 2009.

ABNT, NBR 5751. Materiais pozolânicos — Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias Pozzolanic. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, [s. l.], p. 4, 2015.

ABNT, NBR 5752. Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias Pozzolanic. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, [s. l.], p. 4, 2014.

ABNT, NBR 5753. **Cimento Portland - Ensaio de pozolanidade para cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

ABNT NBR 7214. Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, 2015. p. 4.

ABNT, NBR 7215. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, [s. l.], p. 8, 2019.

ABNT, NBR 10004. Resíduos sólidos - Classificação. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, [s. l.], 2004. p. 77.

ABNT, NBR 12653. Materiais pozolânicos - Requisitos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, [s. l.], p. 5, 2014a.

ABNT, NBR 15895. **Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chapelle modificado**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2010.

ABNT, NBR 16372. **Cimento Portland e outros materiais em pó- Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**. [S. l.: s. n.], 2015.

ABNT, NBR 16605. Cimento portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. [s. l.], p. 4, 2017.

ACI 116R-00. ACI 116-R-00: Cement and Concrete Terminology. **American Concrete Institute**, Michigan - EUA, 2005.

AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE (CPRH). **Lavando Limpo**. Recife: [s. n.], 2018.

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**, [s. l.], v. 236, n. February, p. 106870, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.106870>.

AGRA, Tiago Manoel da Silva. **Avaliação da pozolanicidade da cinza de lodo proveniente de estação de tratamento de água (ETA)**. 2022. 82 f. - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2022.

ALMEIDA, P. H.S.; FRANCO, J. D.M.; TAVARES, C. R.G. Influência do tipo de argila no processo de solidificação/estabilização de lodo têxtil. **Cerâmica**, [s. l.], v. 61, n. 357, p. 137–144, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/ce/a/MwRk7xp9xPWHM5sVL9SZgnx/?lang=pt>. Acesso em: 29 out. 2022.

ALTIDIS, M. E.D. *et al.* Influence of heating rate and burning temperature on the thermal decomposition of textile sludge. **Materials Science Forum**, [s. l.], v. 727–728, p. 1005–1009, 2012.

ALTIDIS, M. E.D. *et al.* Study of Mechanical Properties and Development of Concrete Using Sludge from Textile Industry. **Materials Science Forum**, [s. l.], v. 798–799, p. 554–557, 2014. Disponível em: <https://www.scientific.net/MSF.798-799.554>. Acesso em: 29 out. 2022.

AMARAL E SILVA, M. V.; SILVA, A. L.; BRITO, D. J. M.; BRANCO, D. K. S.; FERREIRA, M. O. A questão ambiental no polo de confecções de Caruaru: um primeiro ensaio à luz dos instrumentos econômicos de proteção ambiental. **Revista Estudos do CEPE**, [s. l.], v. 1, p. 108–132, 2012.

ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production. **Earth System Science Data Discussions**, [s. l.], p. 1–25, 2017.

ANWAR, T B; BEHROSE, B; AHMED, S. Utilization of textile sludge and public health risk assessment in Bangladesh. **Sustainable Environment Research**, Department of Chemical Engineering, Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka, 1000, Bangladesh, v. 28, n. 5, p. 228–233, 2017.

AQUINO, R. C. Adição de resíduo de lodo da indústria têxtil na produção de blocos cerâmicos de vedação. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 29–35, 2015.

ARAÚJO, W. C.; FONTANA, M. E. Análise do gerenciamento dos resíduos de tecidos gerados pela indústria de confecções do agreste de Pernambuco. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 6, p. 101, 2017.

ARULPANDIAN, V. *et al.* Feasibility Study on Paver Blocks blended with Textile Effluent Sludge and M-Sand. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 1006, n. 1, p. 012040, 2020. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1006/1/012040>. Acesso em: 9 ago. 2022.

AVELAR, N. V. **Potencial dos resíduos sólidos da indústria têxtil para fins energéticos**. 2012. 71 f. - Universidade Federal de Viçosa, [s. l.], 2012.

BALASUBRAMANIAN, J *et al.* Reuse of textile effluent treatment plant sludge in building materials. **Waste Management**, Department of Civil Engineering, Vellore Institute of Technology (Deemed University), Vellore 632014, Tamilnadu, India, v. 26, n. 1, p. 22–28, 2006.

BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. **Estatística para cursos de engenharia e informática**. 3ª edição. [S. l.]: Atlas, 2010.

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**, [s. l.], v. 104, p. 103410, 2019.

BASTO, Priscilla Elisa de Azevedo. Determinação da pozolanicidade por condutividade elétrica do lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) para adição ao cimento Portland. [s. l.], p. 1–100, 2018. Disponível em: <https://attena.ufpe.br/handle/123456789/29683>.

BAUER, L.A. F. **Materiais de construção**. Volume 1.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BELTRAME, T.C. **Caracterização de efluente têxtil e proposta de tratamento**. 2000. 161 f. - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [s. l.], 2000.

BELTRAME, L. T. C. **Caracterização de Efluente Têxtil e Proposta de Tratamento**. 2000. 161 f. - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [s. l.], 2000.

BESHAH, D A; TIRUYE, G A; MEKONNEN, Y S. Characterization and recycling of textile sludge for energy-efficient brick production in Ethiopia. **Environmental Science and Pollution Research**, Addis Ababa Univ, Ctr Environm Sci, Coll Nat & Computat Sci, POB 1176, Addis Ababa, Ethiopia, v. 28, n. 13, p. 16272–16281, 2021.

BOLDYREV, V. V. Mechanochemistry and mechanical activation of solids. **Russian Chemical Reviews**, [s. l.], v. 75, n. 3, p. 177–189, 2006.

BORGES, R. P. **Síntese e caracterização de precursores do tipo Hidrotalcita e suas aplicações na reação de reforma a vapor do ácido acético**. 2015. 90 f. - Universidade Federal de Uberlândia, [s. l.], 2015.

BRITO, C. **Governo fornece instruções para Polo Têxtil do Agreste produzir EPIs**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.folhape.com.br/colunistas/blogdafolha/governo-fornece-instrucoes-para-polo-textil-do-agreste-produzir-epis/15342/>.

CABRAL, Romilson. **Relações possíveis entre empreendedorismo, arranjos organizacionais e institucionais: estudo de casos múltiplos no Pólo de Confecções do Agreste Pernambucano**. 2007. - UFBA, [s. l.], 2007.

CHATTERJI, S. The role of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the breakdown of Portland cement concrete due to alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 185–188, 1979.

CHAUAN, A. S.; CHOPRA, A. Incorporation of textile mill sludge and fly ash in burnt clay brick manufacturing. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, [s. l.], v. 8, n. 7, p. 97–104, 2017.

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

CHEN, Chuihan; WU, Hongjuan. Lightweight bricks manufactured from ground soil, textile sludge, and coal ash. **Environmental Technology (United Kingdom)**, [s. l.], v. 39, n. 11, p. 1359–1367, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1329353>.

CHENG, X *et al.* Solidification/Stabilization of Textile Sludge as Subgrade: Usage of Binders and Skeleton Material. **Advances in Civil Engineering**, Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098, China, v. 2020, 2020.

COMETTI, J. L. S.; SILVA, F. L.; SANTOS, F. J. H.; LIMA, V. A. Diagnóstico ambiental comparativo entre 2014 e 2015 das indústrias têxteis do município de Toritama-PE. *In*: , 2016, Campina Grande. **VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental (ConGeA)**. Campina Grande: [s. n.], 2016. p. 6.

CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D. T.; FAIRBAIRN, E. M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 82–86, 2009.

CORDEIRO, Guilherme Chagas. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. 488 f. - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [s. l.], 2006.

CPMTC. **Difração de Raios-X**. Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <http://www.cpmtc-igc-ufmg.org/laboratorios2.htm>. Acesso em: 8 out. 2022.

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**, [s. l.], v. 170, p. 1086–1092, 2009.

DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Influence of packing and dispersion of particles on the cement content of concretes. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 10, p. 998–1024, 2017.

DE CASTRO, Thiago Morais *et al.* Characterization of acoustic ceramic blocks produced with incorporating textile laundry sludge. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 47–54, 2015.

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 mineralogía**, [s. l.], v. 13, p. 115–116, 2010.

DONATELLO, S.; TYRER, M.; CHEESEMAN, C. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 121–127, 2010.

EBRAHIM, R. **Polo de Confeções do Agreste: da Sulanca à industrialização**. [S. l.], 2014. Disponível em: <https://jc.ne10.uol.com.br/canal/economia/pernambuco/noticia/2014/12/14/polo-de-%0Aconfeccoes-do-agreste-da-sulanca-a-industrializacao-160371.php>. Acesso em: 10 jul. 2022.

ESTEVES, E. **Polo de confeções do Agreste, um potencial ainda pouco conhecido**. [S. l.], 2019. Disponível em: <http://especiais.leiaja.com/descosturandoacrise/materia1.html#:~:text=Polo%20de%20Confec%C3%A7%C3%B5es%20do%20Agreste%2C%20um%20potencial%20ainda%20pouco%20conhecido,-Distante%20dos%20holofotes&text=%C3%89%20no%20Agreste%20de%20Pernambuco,per%C3%ADodo%20de%20crise%20no%20Brasil>. Acesso em: 15 jul. 2022.

FERREIRA, M. N. **Incorporação de Lodo de Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de Lavanderia Industrial em Cerâmica Vermelha**. 2018. 93 f. - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, [s. l.], 2018.

FILHO, J.H.; GOBBI, A.; PEREIRA, E. QUARCIONI, V. A. DE 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)**, [s. l.], v. 22, n. 3, 2017.

FILHO, A. R. A. DA. **Desenvolvimento de Sistema Simplificado de Gestão Ambiental Aplicado a Micro e Pequenas Empresas de Beneficiamento de Jeans**. 2013. 222 f. - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2013.

FORUM, C. S. Alkali-Reaktion der Zuschlagstoffe im Beton. **Beton und Stahlbetonbau**, [s. l.], n. 7, p. 163–168, 1965.

GAVA, G. P.; PRUDÊNCIO, L. R. Pozzolanic activity tests as a measure of pozzolans performance. **Magazine of Concrete Research**, [s. l.], v. 59, n. 10, p. 729–734, 2007.

GAVA, G. P. **Estudo comparativo de Diferentes Metodologias para a Avaliação de Atividade Pozolânica**. 1999. 118 f. - Universidade Federal de Santa Catarina, [s. l.], 1999.

GIRONDI DELAQUA, Geovana Carla *et al.* Incorporation of sludge from effluent treatment plant of an industrial laundry into heavy clay ceramics. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 47, n. March 2021, p. 1–15, 2022.

GONZAGA, Nathália Lins. **Desenvolvimento de um método acelerado para avaliação da pozolicidade de materiais cimentícios suplementares com base na nbr 5751**. 2022. 104 f. - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2022.

GONZAGA DE OLIVEIRA, Alice *et al.* Evaluation of calcined textile sludge as a stabilizing material for highway soil. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, [s. l.], v. 7, n. 5, p. 688–699, 2020.

GOYAL, Shweta *et al.* Reutilization of textile sludge stabilized with low grade-MgO as a replacement of cement in mortars. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 338, p. 127643, 2022.

GOYAL, S *et al.* Utilization of textile sludge in cement mortar and paste. **Construction and Building Materials**, Thapar Inst Engn & Technol, Dept Civil Engn, Patiala, Punjab, India NR - 32 PU - ELSEVIER SCI LTD PI - OXFORD PA - THE BOULEVARD, LANGFORD LANE, KIDLINGTON, OXFORD OX5 1GB, OXON, ENGLAND, v. 214, p. 169–177, 2019.

GROUP, Febratex. **Entenda a influência do polo têxtil no Agreste Pernambucano**. [S. l.], 2019.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. N. B. Corantes têxteis. **Quím. Nova**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 71–78, 2000.

GUNAVEL, M *et al.* Experimental Study on Strength of Brick Using ETP Sludge and Cement. [s. l.], v. 6, n. 4, p. 1–3, 2019.

GUZZO, P. L.; BARROS, F. B. M.; TINO, A. A. A. Effect of prolonged dry grinding on size distribution, crystal structure and thermal decomposition of ultrafine particles of dolostone. **Powder Technology**, [s. l.], v. 342, p. 141–148, 2019.

HEREK, L. C. S.; HORI, C. E.; REIS, M. H. M.; MORA, N. D.; TAVARES, C. R. G.; BERGAMASCO, R. Characterization of ceramic bricks incorporated with textile laundry sludge. [s. l.], v. 38, n. 2, p. 951–959, 2012.

HOSSAIN, M S *et al.* Reuse of textile mill ETP sludge in environmental friendly bricks – effect of gamma radiation. **Radiation Physics and Chemistry**, Atomic Energy Research Establishment, Bangladesh Atomic Energy Commission, Savar, Dhaka, Bangladesh, v. 151, p. 77–83, 2018.

ILGEN, O. Dolomite as a heterogeneous catalyst for transesterification of canola oil. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 92, p. 452–455, 2011.

KANMANI, S. *et al.* A novel approach on usage of waste sludge from textile dyeing units in paver block manufacturing. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], v. 52, p. 1952–1958, 2022.

KARTHIKEYAN, E. S.; VINOTHKUMAR, R. Experimental study on stabilization of black cotton soil using textile sludge waste treated with hydrated lime. **Pakistan Journal of Biotechnology**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 411–415, 2017.

KASANIYA, M.; THOMAS, M.; MOFFATT, E. G. Development of a rapid and reliable Pozzolanic reactivity test method. **ACI Materials Journal**, [s. l.], v. 116, n. 4, p. 145–154, 2019.

KASAW, E *et al.* Incineration of Textile Sludge for Partial Replacement of Cement in Concrete Production: A Case of Ethiopian Textile Industries. **Advances in Materials Science and Engineering**, Bahir Dar Univ, Ethiopian Inst Text & Fash Technol, Text Chem Res & Innovat Ctr, Bahir Dar, Ethiopia, v. 2021, 2021.

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. - Universidade Federal de Pernambuco - Centro Acadêmico do Agreste, [s. l.], 2013.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 4ª edição. Campinas: Átomo, 2010.

LIMA, L. **Custos ambientais e a externalidade negativa das lavanderias têxteis do Polo de confecções do Agreste de Pernambuco**. 2014. 134 f. - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2014.

LIRA, Sonia. Os aglomerados de micro e pequenas indústrias de confecções do Agreste/PE: um espaço construído na luta pela sobrevivência. **Revista de Geografia**, Recife, 2006.

LIU, Y *et al.* Utilization of drinking water treatment sludge in concrete paving blocks: Microstructural analysis, durability and leaching properties. **Journal of Environmental Management**, Natural and Built Environments Research Centre, School of Natural and Built Environment, University of South Australia, Adelaide, Australia, v. 262, 2020.

LÚXAN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 63–68, 1989.

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

MALVERN INSTRUMENTS. **Difração laser: Distribuição de tamanho de partículas desde nanômetros até milímetros**. [S. l.], 2017.

MARCHI, J. **Estudo de sinterização de cerâmicas à base de Nitreto de Silício utilizando-se como aditivos óxidos de cério e alumínio**. 1999. 139 f. - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Autarquia associada à Universidade de São Paulo, [s. l.], 1999.

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

MARTINS, MARIA; ANDRADE, ELISABETH; CÂNDIDO, Gesinaldo. **Caracterização e contribuição das redes informacionais para o desenvolvimento dos Arranjos Produtivos Locais no Setor de Confeções do Agreste Pernambucano**. *In*: REVISTA ELETRÔNICA DE GESTÃO EMPRESARIAL. Recife: PROPAD/UFPE, 2009. p. 27–46.

MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. *In*: LEA'S CHEMISTRY OF CEMENT AND CONCRETE. 4ª edição. New York: Elsevier, 2003. p. 471–635.
MEDEIROS, M. H. F.; FILHO, J. H.; GOBBI, A.; PEREIRA, E. Pozolanas de elevada reatividade: uma avaliação crítica do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal usando difração de raios X. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 19–29, 2015.

MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E. Pozolanas de elevada reatividade: uma avaliação crítica do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal usando Difração de Raios X. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 19–29, 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. 4ª edição. [S. l.]: MC Graw Hill Education, 2014.

MELCHIADES, F. G. **Estudo comparativo entre as tecnologias via úmida e via seca para a preparação de massas de porcelanatos**. 2011. 214 f. - Universidade Federal de São Carlos, [s. l.], 2011.

MELLO, L. C. A. **Efeitos das elevadas temperaturas em concretos autoadensáveis com altos teores de resíduo da biomassa dacana-de-açúcar e metacaulim**. 2019. 73 f. - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [s. l.], 2019.

MODA, Comunidade de. **Lavanderia de Jeans/ tudo sobre os processos de lavagem**. [S. l.], 2015.

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

MOURA, L. S. **Utilização de lodo de tratamento têxtil em revestimentos asfálticos: uma análise mecânica, microscópica e ambiental**. 2021. 193 f. - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2021.

NAKANISHI, E. Y. **Cinza residual da queima de biomassa do capim elefante (Pennisetum purpureum) como material pozolânico substituto do cimento Portland**. 2013. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2013.

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

NEVILLE, A. M.; CREMONINI, R. **Propriedades do Concreto**. 5ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OLIVEIRA, G. J. **Jeans, a alquimia da moda**. Edição Inded. Espírito Santo: American Association of Textile Chemists and Colorists, 2008.

OLIVEIRA, R. V. O Polo de Confecções do Agreste Pernambucano: ensaiando uma perspectiva de abordagem. *In: FORMAS DE TRABALHO NO CAPITALISMO ATUAL*. 1ª edição. São Paulo: Annablume, 2011. p. 40.

PALANIANDY, S.; AZIZLI, K. A.; HUSSIN, H.; HASHIM, S. F. S. Study on mechanochemical effect of silica for short grinding period. **International Journal of Mineral Processing**, [s. l.], v. 82, n. 4, p. 195–202, 2007.

PATEL, H; PANDEY, S. Exploring the reuse potential of chemical sludge from textile wastewater treatment plants in india-a hazardous waste. **American Journal of Environmental Sciences**, India Habitat Centre, TERI University, Lodhi Road, New Delhi, India, v. 5, n. 1, p. 106–110, 2009.

PAYÁ, J.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J.; PERIS-MORA, E., AMAHJOUR, F. Enhanced conductivity measurement techniques for evaluation of fly ash pozzolanic activity. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 41–49, 2001.

PENG, Xiaowei; MA, Xiaoqian; XU, Zhibin. Thermogravimetric analysis of co-combustion between microalgae and textile dyeing sludge. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 180, p. 288–295, 2015.

PEZZOLO, Dinah Bueno. **Tecidos: histórias, tramas, tipos e usos**. Edição Pored. [S. l.]: Senac, 2007.

PIETROBON, C. L. R.; ANDRADE, C. M. G.; COLANZI, J.; BARROS, I. B.; BERGAMUSSO, R.; Pietrobon C. E. Lixiviação de contaminantes de compostos de lodo-cimento. **Acta Scientiarum - Technology**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 45–52, 2004.

PIETROBON, C. L. R.; BITENCOURT, M. P.; GIMENES, M. L.; COLANZI, J.; Pietrobon C. E. Estudos preliminares sobre estabilização/ solidificação – e/s – de lodo de tratamento de lavanderia têxtil para reutilização como argamassa de construção: exame de caso para Maringá, estado do Paraná. **Acta Scientiarum - Technology**, [s. l.], v. 24, p. 1659–1664, 2002.

PREMKUMAR, R. *et al.* Properties and environmental features of bricks made from textile waste sludge. **Journal of Physics: Conference Series**, [s. l.], v. 2070, n. 1, 2021.

PRIM, E. C. C. Reaproveitamento De Lodo Textil E Da Cinza Pesada Na Construção Civil: Aspectos Tecnológicos E Ambientais. [s. l.], 1998.

PRIYADHARSHINI, B; KAVISRI, M. Utilization of textile sludge in manufacturing e-bricks. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, Department of Civil Engineering, Sathyabama Institute of Science and Technology, Chennai,

Tamilnadu, India, v. 9, n. 11, p. 2266–2273, 2018.

RAHMAN, A *et al.* Effects of waste glass additions on quality of textile sludge-based bricks. **Environmental Technology**, Ryukoku Univ, Dept Environm Solut Technol, Otsu, Shiga 5202194, Japan NR - 30 PU - TAYLOR & FRANCIS LTD PI - ABINGDON PA - 2-4 PARK SQUARE, MILTON PARK, ABINGDON OR14 4RN, OXON, ENGLAND, v. 36, n. 19, p. 2443–2450, 2015.

RAHMAN, M M *et al.* Textile Effluent Treatment Plant Sludge: Characterization and Utilization in Building Materials. **Arabian Journal for Science and Engineering**, SUST, Dept Chem Engr & Polymer Sci, Sylhet 3114, Bangladesh, v. 42, n. 4, p. 1435–1442, 2017.

RAMYA, S; SHANTHAKUMAR, S. Investigation on potential reuse of textile sludge as fertiliser and for preparation of solid blocks. **International Journal of Environment and Waste Management**, Department of Environmental and Water Resources Engineering, School of Civil and Chemical Engineering, VIT University, Vellore, 632014, India, v. 19, n. 2, p. 105–116, 2017.

RAPIN, J. P.; RENAUDIN, G.; ELKAIMC, E.; FRANCOIS, M. Structural transition of Friedel's salt $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ studied by synchrotron powder diffraction. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 32, p. 513–519, 2002.

RAPOSO, MARIA; GOMES, Gustavo. **Estudo de caracterização econômica do Pólo de Confecções do Agreste Pernambucano**. Recife: [s. n.], 2003. Disponível em: [https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal Sebrae/Anexos/poloconfec2003.pdf](https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/Anexos/poloconfec2003.pdf).

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.

RIBEIRO, M.J.; ABRANTES, J.C.C. Moagem em moinho de bolas: estudo de algumas variáveis e otimização energética do processo. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 7–11, 2001.

ROSSET, M. **Síntese, caracterização e atividade de catalisadores tipo hidróxidos duplos lamelares**. 2017. 81 f. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2017.

SABIR, B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 23, n. 6, p. 441–454, 2001.

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**, [s. l.], v. 56, p. 135–140, 2010.

SAMPAIO, Z. L. M. **Análise do comportamento mecânico de concretos produzidos com incorporação de cinza do bagaço da cana-de-açúcar de variedades SP911049, RB92579 E SP816949**. 2013. 150 f f. - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [s. l.], 2013.

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**, [s. l.], v. 25, p. 102100, 2022.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. M. Advances in understanding hydration of Portland cement. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 78, p. 38–56, 2015.

SCRIVENER, K. L. Options for the future of cement. **The Indian Concrete Journal**, [s. l.], v. 88, p. 11–21, 2014.

SILVA, A. G. P.; JÚNIOR, C. A. A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização. **Cerâmica**, [s. l.], 1998.

SILVA, R. A. J. DA. **Modelo de Gestão Ambiental para Reuso de Águas de Lavanderias do Agreste de Pernambuco**. 2016. 129 f. - Universidade Federal Rural de Pernambuco, [s. l.], 2016.

SNIC. **Resultados Preliminares de Setembro 2020**. [S. l.], 2020. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=53>.

SOARES, K. F. **Incorporação do resíduo proveniente da estação de tratamento de efluente da indústria têxtil em massa cerâmica**. 2016. 89 f. - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [s. l.], 2016.

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, [s. l.], 2019.

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, [s. l.], 2017.

SOUZA, F. P.; AREAS, S. M. R.; PERTEL, M. Análise da viabilidade técnica de reutilização do efluente de uma lavanderia industrial. **Perspectivas online**, Campos dos Goytacazes, ano 3, n. 7, 2013. p. 1–16.

SOUZA, J. S. C. **A influência do metacaulim na cristalização das hidrogranadas nas pastas de cal.** 2019. 276 f. - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2019.

STRÖHER, A. P.; MENEZES, M. L. DE; CAMACHO, F. P.; PEREIRA, N. C. Tratamento de efluente têxtil por ultrafiltração em membrana cerâmica. **E-xacta**, Belo Horizonte, ano 5, n. 1, 2012. p. 39–44.

SUDHEESH, C.; KUMAR, T. R. P.; KUMAR, S. S. Effect of compressive strength on concrete by partial replacement of cement with textile sludge and polypropylene fibres. **International Journal of ChemTech Research**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 2219–2226, 2015.

SWAMY, R. N. Fly ash and slag: standards and specifications - help or hindrance?. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 26, p. 600–613, 1993.

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

THOMAS, M. D. A.; NIXON, P. J.; PETTIFER, K. The effect of pulverized-fuel ash with a high total alkali content on alkali-silica reaction in concrete containing natural UK aggregate. *In*: , 1991, Detroit. (V. M. Malhotra, Org.) **Proceedings of the Second CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete**. Detroit: American Concrete Institute, 1991. p. 919–940.

TIRONI, A.; TREZZA, M. A.; SCIAN, A. N.; IRASSAR, E. F. Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 37, p. 319–327, 2013.

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**, [s. l.], v. 264, p. 120684, 2020.

TORRES, Sara Martins. **Aplicação da difração de raios X na análise do potencial pozolânico da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para adição ao cimento Portland.** 2019. 102 f. - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2019.

UNIDAS, Nações. **Humanidade produz mais de 2 bilhões de toneladas de lixo por ano.** [S. l.], 2018. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/humanidade-produz-mais-de-2-bilhoes-de-toneladas-de-lixo-por-ano-diz-onu-em-dia-mundial/>.

URHAN, S. Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 1: Interpretation of published results and an hypothesis concerning the mechanism. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 141–152, 1987.

VASCONCELOS, M. C. A. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizando métodos físicos.** 2013. 134 f f. - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2013.

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**, [s. l.], v. 121, n. 2, p. 807–814, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-015-4551-y>. Acesso em: 28 set. 2022.

VELUMANI, P.; SENTHILKUMAR, S. Production of sludge-incorporated paver blocks for efficient waste management. **Journal of the Air and Waste Management Association**, [s. l.], v. 68, n. 6, p. 626–636, 2018.

WANG, H.; GILLOT, J. E. Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 647–654, 1991.

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

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, [s. l.], 2019.

ZAGONEL, J. T.; BUSS, M.V.;; MENEZES, J.C.S. Estudo sobre a influência do lodo têxtil gerado por uma lavanderia industrial, aplicado em argamassa de cimento Portland composto de fíler. **Revista de Engenharia Civil IMED**, [s. l.], v. 2, p. 5–14, 2015.

ZHAN, B J *et al.* Recycling hazardous textile effluent sludge in cement-based construction materials: Physicochemical interactions between sludge and cement. **Journal of Hazardous Materials**, Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, Hong Kong, v. 381, 2020. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85070921105&doi=10.1016%2Fj.jhazmat.2019.121034&partnerID=40&md5=ae4f2ba1900ec403f6475093a8bda4e1>.

ZHAN, Bao Jian; POON, Chi Sun. Study on feasibility of reutilizing textile effluent sludge for producing concrete blocks. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 101, p. 174–179, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.083>.

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

**APÊNDICE A – VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO OBTIDOS PARA OS CORPOS DE PROVA NOS ENSAIOS DA
NBR 5751 E ANÁLISE ESTATÍSTICA BÁSICA**

Resistência à Compressão (MPa) – NBR 5751																
Nº de amostras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Lodo têxtil	In nat - SM	In nat - B600	In nat - B900	In nat - B1200	CLT600 - SM	CLT600 - B600	CLT600 - B900	CLT600 - B1200	CLT700 - SM	CLT700 - B600	CLT700 - B900	CLT700 - B1200	CLT800 - SM	CLT800 - B600	CLT800 - B900	CLT800 - B1200
CP1	0,528	1,024	1,283	1,670	3,871	4,828	5,936	6,721	3,359	4,185	4,790	5,445	1,224	1,861	2,209	2,750
CP2	0,566	1,041	1,304	1,620	3,845	5,020	6,340	7,151	3,395	4,200	5,025	5,880	1,132	1,806	2,350	2,856
CP3	0,560	1,052	1,313	1,568	3,934	4,901	5,929	6,950	3,403	4,142	4,901	5,650	1,200	1,800	2,284	2,820
Média	0,551	1,039	1,300	1,619	3,883	4,916	6,068	6,941	3,386	4,176	4,905	5,658	1,185	1,822	2,281	2,809
DR1	4,23%	1,44%	1,31%	3,13%	0,32%	1,80%	2,18%	3,16%	0,79%	0,22%	2,35%	3,77%	3,26%	2,12%	3,16%	2,09%
DR2	2,66%	0,19%	0,31%	0,04%	0,99%	2,11%	4,48%	3,03%	0,28%	0,58%	2,44%	3,92%	4,50%	0,90%	3,02%	1,69%
DR3	1,57%	1,25%	1,00%	3,17%	1,30%	0,31%	2,30%	0,13%	0,51%	0,81%	0,09%	0,15%	1,24%	1,23%	0,13%	0,40%
Desvio Relativo Máximo	4,23%	1,44%	1,31%	3,17%	1,30%	2,11%	4,48%	3,16%	0,79%	0,81%	2,44%	3,92%	4,50%	2,12%	3,16%	2,09%
Desvio Padrão	0,020	0,014	0,015	0,051	0,046	0,097	0,235	0,215	0,023	0,030	0,118	0,218	0,048	0,034	0,071	0,054
Coefficiente de variação	0,037	0,014	0,012	0,031	0,012	0,020	0,039	0,031	0,007	0,007	0,024	0,038	0,040	0,018	0,031	0,019
Intervalo de confiança	0,051	0,035	0,038	0,127	0,114	0,241	0,585	0,534	0,058	0,075	0,292	0,541	0,119	0,084	0,175	0,134

**APÊNDICE B – VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO OBTIDOS PARA OS CORPOS DE PROVA NOS ENSAIOS DA
NBR 5752 E ANÁLISE ESTATÍSTICA BÁSICA**

Resistência à Compressão (MPa) - 5752																	
Nº de amostras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Lodo têxtil	REF A	In natura - SM	In natura - B600	In natura - B900	In natura - B1200	CLT600 - SM	CLT600 - B600	CLT600 - B900	CLT600 - B1200	CLT700 - SM	CLT700 - B600	CLT700 - B900	CLT700 - B1200	CLT800 - SM	CLT800 - B600	CLT800 - B900	CLT800 - B1200
CP1	39,153	22,915	25,233	27,062	29,062	30,094	34,628	38,215	40,898	29,291	33,940	36,946	37,897	26,598	32,818	37,251	40,404
CP2	38,124	23,246	24,506	27,103	30,503	32,563	35,542	36,689	40,084	29,731	32,069	36,459	38,897	27,513	34,628	36,958	38,971
CP3	38,601	21,579	25,700	28,465	29,465	31,466	33,463	38,425	39,251	28,249	33,857	35,276	38,233	27,793	33,124	36,850	38,055
Média	38,626	22,580	25,146	27,543	29,677	31,374	34,544	37,776	40,078	29,090	33,289	36,227	38,342	27,301	33,523	37,020	39,143
DR1	1,36%	1,48%	0,34%	1,75%	2,07%	4,08%	0,24%	1,16%	2,05%	0,69%	1,96%	1,98%	1,16%	2,58%	2,10%	0,62%	3,22%
DR2	1,30%	2,95%	2,55%	1,60%	2,78%	3,79%	2,89%	2,88%	0,02%	2,20%	3,66%	0,64%	1,45%	0,78%	3,30%	0,17%	0,44%
DR3	0,06%	4,43%	2,20%	3,35%	0,71%	0,29%	3,13%	1,72%	2,06%	2,89%	1,71%	2,63%	0,29%	1,80%	1,19%	0,46%	2,78%
Desvio Relativo Máximo	1,36%	4,43%	2,55%	3,35%	2,78%	4,08%	3,13%	2,88%	2,06%	2,89%	3,66%	2,63%	1,45%	2,58%	3,30%	0,62%	3%
Desvio Padrão	0,515	0,883	0,602	0,798	0,743	1,237	1,042	0,947	0,824	0,761	1,057	0,859	0,509	0,625	0,969	0,207	1,184
Coefficiente de variação	0,013	0,039	0,024	0,029	0,025	0,039	0,030	0,025	0,021	0,026	0,032	0,024	0,013	0,023	0,029	0,006	0,030
Intervalo de confiança	1,279	2,192	1,495	1,983	1,847	3,073	2,589	2,354	2,046	1,891	2,626	2,133	1,264	1,553	2,407	0,515	2,941