



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**LEILA SOARES VIEGAS BARRETO CHAGAS**

**ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESGOTO CALCINADO EM  
ARGAMASSAS COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND**

**Recife  
2019**

**LEILA SOARES VIEGAS BARRETO CHAGAS**

**ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESGOTO CALCINADO EM  
ARGAMASSAS COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de doutora em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

**Recife**

**2019**

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

C433e Chagas, Leila Soares Viegas Barreto.  
Estudo da incorporação de lodo de esgoto calcinado em argamassas como substituto parcial do cimento Portland / Leila Soares Viegas Barreto Chagas. - 2019.  
166 folhas, il., gráfs., tabs.  
  
Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.  
  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.  
Inclui Referências.  
  
1. Engenharia Civil. 2. Argamassas. 3. Lodo de esgoto calcinado. 4. Desempenho. 5. Durabilidade. I. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira. (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-410

**LEILA SOARES VIEGAS BARRETO CHAGAS**

**ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESGOTO CALCINADO EM  
ARGAMASSAS COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de doutora em Engenharia Civil.

Aprovada em: 15 / 05 / 2019.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Yêda Vieira Póvoas Tavares (Examinador Externo)  
Universidade de Pernambuco

---

Profa. Dra. Aline Figueirêdo Nóbrega de Azerêdo (Examinadora Externa)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

---

Prof. Dr. Givanildo Alves de Azerêdo (Examinador Externo)  
Universidade Federal da Paraíba

A minha mãe, que durante o tempo que esteve entre nós muitas vezes sacrificou seus sonhos para que os meus fossem realizados; ao meu marido, companheiro de todas as horas, ao meu filho Davi, luz dos meus dias, **DEDICO**.

## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS, por não me deixar desanimar diante das dificuldades.

Ao Professor Dr. Arnaldo Carneiro por toda a contribuição para a realização deste trabalho.

À Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA, que permitiu meu acesso à ETE para a realização das coletas.

Ao Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da Universidade Federal de Goiás, à Universidade Federal do Vale do São Francisco Campus Juazeiro da Bahia, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais da Universidade Federal de Campina Grande, ao Instituto Federal da Paraíba Campus Campina Grande, ao Instituto Federal do Sertão Pernambucano Campus Petrolina, que abriram as portas de seus laboratórios para execução dos ensaios.

A João Victor, ex-aluno que me ensinou muito sobre otimismo e perseverança, um grande ajudador na execução dos ensaios laboratoriais.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE, em especial à Claudiana e Andrea pelo eficiente trabalho na coordenação.

Aos amigos e companheiros de trabalho do Instituto Federal do Sertão Pernambucano Campus Salgueiro.

Ao meu esposo e melhor amigo Thiago, meu maior apoiador.

A Davi, meu filho, maior combustível diário.

A todos que de alguma forma se dedicaram e contribuíram para a elaboração desta tese.

## RESUMO

Um grande desafio para construção civil é o ingresso de técnicas inovadoras que não apenas reduzam o custo de construção, mas que ao mesmo tempo reduzam também os impactos ambientais. Nesta pesquisa, avalia-se o desempenho e a durabilidade de argamassas de revestimento produzidas em proporções distintas incorporando lodo de esgoto calcinado em percentuais distintos substituindo parcialmente o cimento Portland. Para tanto, o lodo de esgoto foi calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C e caracterizado mediante ensaios físicos, químicos, mecânicos, ambientais e morfológicos. Após estudo das caracterizações, optou-se por utilizar o lodo calcinado a 800°C para produzir as argamassas por ter apresentado reatividade pozolânica. As argamassas foram produzidas nas proporções 1:3, 1:4,5 e 1:6 e caracterizadas no estado fresco através do índice de consistência, densidade, teor de ar incorporado e retenção de água. No estado endurecido foram caracterizadas através da resistência à tração na flexão, resistência à compressão e densidade de massa. Objetivando avaliar a durabilidade das argamassas produzidas, realizou-se ensaios de absorção de água por capilaridade, coeficiente de capilaridade, resistência de aderência à tração, envelhecimento acelerado por ciclos de molhagem e secagem e análise de resistência à carbonatação. Realizou-se análise termogravimétrica, bem como a microestrutural final das argamassas. Argamassas de referência foram produzidas possibilitando a comparação dos resultados. Em consonância com os estudos realizados mundialmente sobre a incorporação do lodo de esgoto calcinado como material cimentício e mediante a comparação dos resultados obtidos comparando-os com as argamassas de referência, concluiu-se que a incorporação de lodo de esgoto calcinado a 800°C não prejudicou o desempenho nem a durabilidade das argamassas estudadas, sendo 10% e 20% os percentuais de incorporação mais viáveis tecnicamente produzidos nas proporções 1:3 e 1:4.5.

**Palavras-chave:** Argamassas. Lodo de esgoto calcinado. Desempenho. Durabilidade.

## ABSTRACT

A major challenge for civil construction is the ingress of innovative techniques that do not only reduce the cost of construction, but at the same time also reduce the environmental impacts. In this research, we evaluated the performance and durability of coating mortars produced in different proportions incorporating calcined sewage sludge in distinct percentages partially replacing the Portland cement. For this purpose, sewage sludge was calcined at temperatures 600°C, 700°C, 800°C and 900°C and characterized by physical, chemical, mechanical, environmental and morphological assays. After a study of the characterizations, we opted to use the calcined sludge at 800°C to produce the mortars for having presented pozzolanic reactivity. The mortars were produced in proportions 1:3, 1:4.5 and 1:6 and characterized in the fresh state through the index of consistency, density, incorporated air content and water retention. In the hardened state they were characterized by tensile strength in flexion, compressive strength and mass density. Aiming to evaluate the durability of the mortar produced, water absorption assays were carried out by capillarity, capillary coefficient, tensile adhesion resistance, accelerated aging by wetness cycles and drying and analysis of carbonation resistance. Thermogravimetric analysis was performed, as well as the final microstructural of mortars. Reference mortars were produced allowing the comparison of the results. In line with the studies already conducted worldwide on the incorporation of calcined sewage sludge as cementitious material and by comparing the results obtained with the reference mortars, it was concluded that the incorporation of sewage sludge Calcined at 800°C did not impair the performance or durability of the studied mortars, being 10% and 20% the most viable incorporation percentages technically produced in proportions 1:3 and 1:4.5.

**Keywords:** Mortars. Calcined sewage sludge. Performance. Durability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Ensaio para caracterização dos materiais utilizados.....	49
Figura 2 –	Descargas de lodo por meio dos reatores UASB.....	51
Figura 3 –	Lodo in natura preparado para estufa.....	52
Figura 4 –	Mufla utilizada para a calcinação.....	52
Figura 5 –	Lodo calcinado na temperatura 900°C .....	53
Figura 6 –	Moinho de bolas e lodo calcinado a 900° C após moagem ...	53
Figura 7 –	Granulometria por difração à laser do Cimento .....	57
Figura 8 –	Granulometria à laser da areia utilizada .....	58
Figura 9 –	Granulometria à laser do lodo de esgoto in natura .....	59
Figura 10 –	Distribuição granulométrica de lodo de esgoto calcinado nas temperaturas a)600°C, b)700°C, c)800°C e d)900°C.....	60
Figura 11 –	Difratogramas de raios X dos lodos de esgotos in natura e calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C...	64
Figura 12 –	Termogravimetria e análise térmica diferencial do lodo in natura.....	67
Figura 13 –	Termogravimetria e análise térmica diferencial do lodo calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C...	68
Figura 14 –	Microscopia eletrônica de varredura do lodo in natura .....	73
Figura 15 –	MEV do lodo calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C.....	74
Figura 16 –	Lodo de esgoto calcinado a 800°C.....	76
Figura 17 –	Metodologia utilizada para cumprimento da pesquisa.....	79
Figura 18 –	Determinação do tempo de pega da pasta de cimento Portland com substituição de 10% de lodo de esgoto calcinado.....	82
Figura 19 –	Procedimento de ensaio de avaliação de resistência à tração na flexão para amostras de referência.....	83
Figura 20 –	Resistência à compressão com incorporação de 10% de lodo.....	84
Figura 21 –	Ensaio referentes à absorção por capilaridade das argamassas com lodo calcinado na temperatura 800°C	

	proporção 1:4,5.....	86
Figura 22 –	Ciclos de molhagem e secagem dos corpos de prova estudados.....	87
Figura 23 –	Identificação do processo de degradação nos corpos de prova.....	88
Figura 24 –	Ciclo do processo de envelhecimento acelerado	89
Figura 25 –	Consistência da argamassa na proporção 1:6 utilizando 20% de lodo de esgoto calcinado a 800°C.....	91
Figura 26 –	Determinação do índice de consistência.....	92
Figura 27 –	Densidade de massa no estado fresco.....	94
Figura 28 –	Determinação de teor de ar nas argamassas.....	96
Figura 29 –	Determinação da retenção de água das argamassas estudadas.....	97
Figura 30 –	Tempo de início e fim de endurecimento das argamassas estudadas.....	99
Figura 31 –	Ensaio referente à determinação de resistência à tração na flexão das argamassas.....	101
Figura 32 –	Resistência à compressão axial.....	104
Figura 33 –	Densidade da massa de argamassas no estado endurecido.....	108
Figura 34 –	Absorção por capilaridade medida aos 10 e aos 90 minutos.....	110
Figura 35 –	Arrancamento do corpo de prova.....	114
Figura 36 –	Resistência de aderência à tração das argamassas.....	114
Figura 37 –	Frente de carbonatação das argamassas.....	117
Figura 38 –	Argamassas após 28 dias de ciclos envelhecimento acelerado produzidas na proporção 1:3.....	119
Figura 39 –	Amostras Após 63 dias de ciclos produzidas na proporção 1:3.....	123
Figura 40 –	Perda de massa em todas as etapas de decomposição de cada amostra analisada.....	127
Figura 41 –	Amostras 63 dias de ciclos de molhagem e secagem produzidas na proporção 1:4,5.....	130

Figura 42 –	Amostras após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem na proporção traço.....	132
Figura 43 –	Amostras após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem produzidas na proporção.....	135
Figura 44 –	Micrografia das amostras produzidas na proporção 1:3 após ciclos de 28 e 63 dias de ciclos.....	139
Figura 45 –	Micrografia das amostras de lodo após 28 e 63 dias de ciclos de molhagem e secagem.....	142
Figura 46 –	Micrografia das amostras após 28 dias e após 63 dias de molhagem e secagem.....	145

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Resumo das pesquisas com lodo de esgoto apresentadas.....	39
Tabela 2 –	Massa específica dos materiais utilizados.....	55
Tabela 3 –	Massa unitária da areia e do lodo calcinado.....	56
Tabela 4 –	Diâmetros das partículas das amostras de lodo em diferentes condições.....	61
Tabela 5 –	Determinação da superfície específica.....	62
Tabela 6 –	Classificação ambiental: Solubilização.....	63
Tabela 7 –	Classificação ambiental: Lixiviação.....	63
Tabela 8 –	Cristalinidade e tamanho médio de cristalito do lodo em diferentes condições.....	65
Tabela 9 –	Perdas de massa das amostras de lodo calcinado a 600°C, 700°C, 800°C e 900°C .....	70
Tabela 10 –	Fluorescência do lodo calcinado a 600°C, 700°C, 800°C e 900°C.....	71
Tabela 11 –	Tamanho das partículas do lodo calcinado.....	75
Tabela 12 –	Índice de atividade pozolânica proporção 1:3.....	77
Tabela 13 –	Índice de atividade pozolânica proporção 1:4,5.....	77
Tabela 14 –	Índice de atividade proporção 1:6.....	78
Tabela 15 –	Formulações para a fabricação das argamassas de referência e com lodo de esgoto.....	81
Tabela 16 –	Resumo dos ensaios das argamassas no estado fresco.....	83
Tabela 17 –	Resumo dos ensaios das argamassas no estado endurecido.....	85
Tabela 18 –	Resumo dos ensaios de durabilidade das argamassas.....	90
Tabela 19 –	Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco.....	95
Tabela 20 –	Classificação das argamassas quanto à retenção de água.....	98
Tabela 21 –	Tempo de início e fim de pega.....	100
Tabela 22 –	Classificação das argamassas de acordo com a Resistência à tração na flexão.....	103

Tabela 23 – Classificação das argamassas de acordo com a Resistência à compressão.....	107
Tabela 24 – Densidade de massa aparente no estado endurecido: requisitos da NBR 13281/2005.....	109
Tabela 25 – Classificação das argamassas quanto ao coeficiente de capilaridade.....	112
Tabela 26 – Limites de resistência de aderência à tração para revestimento..	115
Tabela 27 – Resumo das perdas de massa em todas as etapas de decomposição das argamassas.....	122
Tabela 28 – Teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio presentes nas argamassas produzidas na proporção 1:3 após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem.....	123
Tabela 29 – Perda de massa em todas as etapas de decomposição de cada amostra analisada.....	125
Tabela 30 – Teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio presentes nas argamassas produzidas na proporção 1:3 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem.....	126
Tabela 31 – Resumo das perdas de massa em todas as etapas de decomposição de cada amostra analisada traço 1:4,5 28 dias de ciclos.....	128
Tabela 32 – Teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio presentes nas argamassas produzidas na proporção 1:4,5 após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem.....	129
Tabela 33 – Resumo das perdas de massa em todas as etapas de decomposição de cada amostra analisada traço 1:4,5 (63 de ciclos de molhagem e secagem).....	131
Tabela 34 – Teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio presentes nas argamassas produzidas na proporção 1:4,5 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem.....	132
Tabela 35 – Perda de massa em todas as etapas de decomposição de cada amostra analisada na proporção 1:6 28 dias de ciclos.....	133
Tabela 36 – Teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio presentes nas argamassas produzidas na proporção 1:6 após 28 dias de	135

	ciclos de molhagem e secagem.....	
Tabela 37 –	Perda de massa em todas as etapas de decomposição de cada amostra analisada proporção 1:6 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem.....	137
Tabela 38 –	Teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio presentes nas argamassas produzidas na proporção 1:6 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem.....	137

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	19
1.2	OBJETIVOS.....	21
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>21</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>21</b>
<b>1.2.3</b>	<b>Hipóteses.....</b>	<b>21</b>
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>23</b>
2.1	CIMENTO PORTLAND.....	23
<b>2.1.1</b>	<b>Processo de fabricação e sua relação com o meio ambiente.....</b>	<b>23</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Estudos objetivando a redução dos impactos ambientais.....</b>	<b>24</b>
2.2	RESÍDUOS.....	25
<b>2.2.1</b>	<b>Resíduos sólidos.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Resíduo de ETE.....</b>	<b>27</b>
2.3	LODO DE ESGOTO.....	28
<b>2.3.1</b>	<b>Tratamento do lodo de esgoto.....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.2</b>	<b>A problemática do lodo de esgoto.....</b>	<b>32</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Necessidade de caracterização do lodo quando utilizado.....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Estudos sobre a utilização de lodo de esgoto na indústria da construção Civil.....</b>	<b>34</b>
2.4	ARGAMASSAS.....	40
<b>2.4.1</b>	<b>Propriedades de argamassas com incorporação de lodo de esgoto.....</b>	<b>41</b>
2.5	DURABILIDADE DE ARGAMASSAS.....	42
<b>2.5.1</b>	<b>Estudo da durabilidade.....</b>	<b>43</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Ensaio de durabilidade.....</b>	<b>44</b>
2.5.2.1	Absorção de água e coeficiente de capilaridade.....	44
2.5.2.2	Resistência de aderência à tração.....	45
2.5.2.3	Ensaio de durabilidade: envelhecimento acelerado.....	46
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>49</b>
3.1	MATERIAIS.....	50
3.2	CARACTERIZAÇÃO.....	54
<b>3.2.1</b>	<b>Massa específica.....</b>	<b>55</b>

3.2.2	<b>Massa unitária.....</b>	<b>56</b>
3.2.3	<b>Análise Granulométrica.....</b>	<b>57</b>
3.2.4	<b>Determinação da Finura pelo Método de Permeabilidade ao Ar (Método de Blaine) .....</b>	<b>62</b>
3.2.5	<b>Classificação Ambiental.....</b>	<b>62</b>
3.2.6	<b>Difração de Raio X do lodo de esgoto.....</b>	<b>64</b>
3.2.7	<b>Termogravimetria e análise térmica diferencial (TGA/DTA) .....</b>	<b>66</b>
3.2.8	<b>Fluorescência de Raio X.....</b>	<b>71</b>
3.2.9	<b>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....</b>	<b>73</b>
3.2.10	<b>Atividade pozolânica.....</b>	<b>76</b>
3.3	<b>DEFINIÇÃO DAS PROPORÇÕES PARA O PREPARO DAS ARGAMASSAS.....</b>	<b>80</b>
3.3.1	<b>Ensaio das argamassas no estado fresco.....</b>	<b>81</b>
3.3.2	<b>Ensaio de argamassas no estado endurecido.....</b>	<b>83</b>
3.3.3	<b>Ensaio de durabilidade de argamassa.....</b>	<b>85</b>
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>91</b>
4.1	<b>ENSAIOS DE ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO.....</b>	<b>91</b>
4.1.1	<b>Índice de consistência.....</b>	<b>91</b>
4.1.2	<b>Densidade.....</b>	<b>94</b>
4.1.3	<b>Teor de ar incorporado.....</b>	<b>96</b>
4.1.4	<b>Retenção de água.....</b>	<b>97</b>
4.1.5	<b>Tempo de endurecimento.....</b>	<b>99</b>
4.2	<b>ENSAIOS DE ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO.....</b>	<b>101</b>
4.2.1	<b>Determinação de Resistência à tração na flexão.....</b>	<b>101</b>
4.2.2	<b>Determinação da Resistência à compressão.....</b>	<b>103</b>
4.2.3	<b>Densidade de massa aparente.....</b>	<b>107</b>
4.3	<b>ENSAIOS DE DURABILIDADE DE ARGAMASSA.....</b>	<b>109</b>
4.3.1	<b>Absorção de água e coeficiente de capilaridade.....</b>	<b>109</b>
4.3.2	<b>Resistência de Aderência à Tração.....</b>	<b>113</b>
4.3.3	<b>Envelhecimento acelerado e Resistência à carbonatação.....</b>	<b>116</b>
4.3.4	<b>Termogravimetria das argamassas.....</b>	<b>119</b>
4.3.4.1	Termogravimetria das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:3 após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem .....	119
4.3.4.2	Termogravimetria das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:3 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem .....	123

4.3.4.3	Termogravimetria das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:4,5 após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem .....	126
4.3.4.4	Termogravimetria das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:4,5 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem.....	129
4.3.4.5	Termogravimetria das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:6 após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem.....	132
4.3.4.6	Termogravimetria das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:6 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem.....	135
<b>4.3.5</b>	<b>Microscopia das argamassas.....</b>	<b>138</b>
4.3.5.1	Microscopia das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:3 após 28 dias e 63 dias de ciclos de molhagem e secagem.....	139
4.3.5.2	Microscopia das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:4,5 após 28 e 63 dias de ciclos de molhagem e secagem .....	142
4.3.5.3	Microscopia das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:6 após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem.....	145
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>151</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>154</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desafiador cenário globalizado estimula a padronização das diretrizes de desenvolvimento para o futuro de todas as indústrias do país, principalmente a construção civil. Além da importância econômica, as atividades do setor construtivo têm relevante papel social devido à geração de empregos que proporcionam, portanto a construção civil influencia diretamente no crescimento econômico de uma nação.

É de conhecimento que o crescimento deste mercado é marcado pelo aumento do impacto ambiental que é gerado pela extração de recursos naturais e geração de CO<sub>2</sub> na produção de vários insumos, como por exemplo a produção do cimento, sendo a utilização de tecnologias que agreguem inovação e sustentabilidade ao processo construtivo uma das principais alternativas para conciliar crescimento econômico e redução do impacto ambiental por parte da construção civil.

Durante a última década tem havido uma crescente preocupação por parte da sociedade acerca do desenvolvimento sustentável, com foco na conservação do meio ambiente, bem-estar e segurança do indivíduo e, ao mesmo tempo, a melhor alocação de recursos naturais disponíveis (FABER e STEWART, 2003).

Com a busca pela eficiência para diminuir o consumo de recursos naturais e o consequente impacto ambiental, o mercado está crescente e competitivo no tocante aos produtos considerados sustentáveis, abrindo espaço para as organizações criarem um sistema de certificação baseado em selos de qualidade para padronizar e quantificar os níveis de sustentabilidade de uma edificação (JUNIOR e ROMANEL, 2013).

A reutilização de resíduos é importante sob diferentes pontos de vista, visto que, além de economizar e sustentar recursos naturais que não são reabastecidos, também proporciona a redução da poluição do meio ambiente. Resíduos e subprodutos industriais devem ser considerados como recursos potencialmente valiosos, meramente aguardando tratamento e aplicação apropriados (ISMAIL e AL-HASHMI, 2008).

As atividades humanas na terra produzem uma quantidade considerável de resíduos, onde inclui-se resíduos industriais e agrícolas das populações rurais e

urbanas (AGRAWAL et al., 2014). Os resíduos gerados pelas atividades industriais também crescem em importância no cenário ambiental, visto que todos os setores industriais geram resíduos.

Um dos grandes problemas enfrentados pela humanidade no século XXI é a produção de resíduos e seu gerenciamento (DEBAPRIYA, SUKUMAR e ADHIKARI, 1999).

A preocupação com o reuso dos resíduos em geral é muito recente, diferentemente dos países desenvolvidos. Porém, políticas públicas, novas tecnologias e a retenção destes sedimentos no decorrer das atividades de construção são abordadas corriqueiramente por especialistas e estudantes da área (SANTOS et al., 2014).

O ingresso de técnicas inovadoras que não apenas reduzam o custo de construção, mas que ao mesmo tempo reduzam também os impactos ambientais ainda é um grande desafio para a indústria da construção civil, visto que seus processos construtivos utilizam grande quantidade de insumos materiais.

De acordo com Capros, Kouvaritakis e Mantzos (2001), o setor de materiais de construção é o terceiro maior emissor de CO<sub>2</sub> em nível mundial e na União Europeia. Este setor representa 10% do total de emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub>, sendo a maior parte referente à fabricação de concreto.

Dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento - SNIC (2018), apontam que no Brasil o consumo de cimento superou a marca de 52,7 milhões de toneladas. Arelado à produção e ao consumo, estima-se que 5% das emissões globais de dióxido de carbono produzidas pelo homem são originárias da produção de cimento (MISHRA e SIDDIQUI, 2014).

Desta forma, qualquer medida que vise a redução do consumo de cimento será de grande auxílio ao meio ambiente, de modo a reduzir os possíveis impactos que lhe são gerados. Diante deste contexto, pesquisas em diversos setores estão sendo desenvolvidas buscando soluções que minimizem impactos projetuais e ambientais e maximizem a conservação dos recursos naturais decorrentes do uso e da produção de materiais e componentes utilizados nas diversas etapas da construção civil.

Para tanto, o uso de pozolanas e finos alternativos pode ser considerada uma prática para a sustentabilidade na construção civil, sendo o uso de lodo de esgoto

calcinado oriundo de estações de tratamento de esgotos - ETEs, uma alternativa para a destinação final deste resíduo que no meio urbano se constitui hoje em um problema ambiental enfrentado pela engenharia sanitária, pois são gerados diariamente e em grande volume.

O lodo de esgoto é o principal subproduto sólido do tratamento de esgotos sanitários que pode conter qualquer produto que tenha sido utilizado nas áreas de drenagem das ETEs, sendo esta característica o que o torna um material de natureza complexa (BRUCE, PIKE e FISHER, 1990).

Os lodos gerados em ETEs, em muitas cidades do Brasil, têm sido dispostos em cursos de água sem nenhum tratamento, ocasionando possíveis riscos à saúde pública. O sistema de coleta e tratamento de esgotos domésticos é um dos pressupostos básicos para um ambiente saudável, garantindo qualidade de vida e preservação do meio ambiente (LOPES, et al., 2005).

O gerenciamento do lodo de esgoto proveniente de estações de tratamento é uma atividade de grande complexidade e alto custo, que, se for mal executada, pode comprometer os benefícios ambientais e sanitários esperados destes sistemas (LUDUVICE, 2001).

A utilização de lodo de ETE na indústria da construção civil seria uma forma de se atender às diretrizes, critérios e procedimentos estabelecidos na Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, sendo algumas delas, o reaproveitamento dos resíduos, destinação correta dos mesmos com a viabilização de possibilidades consideradas viáveis e seguras de reutilização e reintegração em um ciclo produtivo.

Busca-se neste trabalho, enfocar a incorporação do lodo de ETE calcinado em argamassas mediante a substituição parcial do cimento Portland (grande emissor de CO<sub>2</sub>) como forma de propiciar um destino ambientalmente correto para este resíduo. O estudo tem como objetivo principal avaliar o desempenho e a durabilidade das argamassas produzidas, substituindo parcialmente o cimento Portland por lodo de esgoto calcinado em percentuais distintos, avaliando-o como material suplementar para sua produção, através de comparativo dos resultados com argamassas de referência.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Atualmente, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, é o maior e mais importante sistema de informações sobre o diagnóstico de saneamento do Brasil, pois apresenta informações de caráter operacional, gerencial, financeiro e de qualidade sobre a prestação de serviços de água e de esgotos, bem como de manejo de resíduos sólidos urbanos, no qual é dividido em dois componentes: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento de Água e Esgotos - SNIS-AE e Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento de Resíduos Sólidos - SNIS-RS.

Os dados do SNIS referentes ao ano de 2016 indicam que apenas 44,9% do esgoto gerado no Brasil passa por tratamento. Isso quer dizer que os outros 55,1% são despejados diretamente na natureza, o que corresponde a 5,2 bilhões de metros cúbicos por ano ou quase 6 mil piscinas olímpicas de esgoto por dia.

A disposição do lodo mais utilizada dava-se em aterros sanitários e a maioria das cidades brasileiras jogava seu esgoto diretamente nas coleções hídricas, poluindo-as e resultando em situações caóticas, como por exemplo, a do rio Tietê em São Paulo, Canal da Agamenon Magalhães em Recife, etc.

De acordo com Yang, Zhang e Wang (2015) 80% do lodo de ETE produzido na China é descartado de forma inadequada, sendo o percentual destinado de forma adequada disposto em aterros sanitários. Em Hong Kong, conforme Lo, Zhou e Lee (2002), a maior parte do lodo de ETE produzido é enviada para aterros sanitários.

A introdução em aterros sanitários de quantidades crescentes de lodo de esgoto pode causar instabilidade de taludes, comprometendo a segurança operacional durante sua incorporação (LO, ZHOU e LEE, 2002; BOSCOV, 2008; JIANGUO et al., 2010). No Brasil, para amenizar o problema, foram criadas políticas de incentivo ao saneamento básico e políticas de incentivo à instalação de estações de tratamento de esgotos nas cidades.

Com a instalação das ETEs nas cidades, um novo problema ambiental é gerado: a disposição do lodo de esgoto. O tratamento de esgoto, bem como coleta, ainda são atividades precárias no Brasil, visto que diversos projetos de tratamento de esgotos não contemplam sequer o destino final do lodo produzido (BETTIOL e CAMARGO, 2006).

Como um método de disposição final do lodo de esgoto tem-se a incineração, que tornou-se uma opção crescente, especialmente para grandes cidades (NAAMANE, RAIS e TALEB, 2016). A incineração é amplamente utilizada em países desenvolvidos, como Japão, Estados Unidos e Continente Europeu. No Brasil a prática ainda é considerada tímida devido ao alto custo de implantação.

Tem-se como um método de destino final para o lodo de esgoto no Brasil, a aplicação de lodo de esgoto em áreas agrícolas que está restrita a poucos estados, como São Paulo, Paraná, Rio Grande do Sul e Distrito Federal (SAMPAIO, 2013). Rico em nutrientes como nitrogênio e fósforo, o lodo de esgoto contém matéria orgânica valiosa que é útil quando os solos estão esgotados ou sujeitos a erosão (SHARPE, 2001). Para tanto, as opções atuais mais viáveis, para o uso do lodo de esgoto sob os aspectos ambientais, econômicos, técnicos e operacionais, são em uso agrícola (GODOY, 2013).

Para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto, é necessário o conhecimento do impacto causado no meio biótico e abiótico pela sua utilização, bem como o estudo e aprimoramento de tecnologias que permitam a sua inserção nos sistemas agrícolas (ANDREOLI et al., 1997).

Mesmo com essa opção de reaproveitamento do lodo, observa-se que tal utilização não pode ser identificada como sendo uma solução única para o tratamento e disposição final, visto que o volume produzido é de grande proporção. No Brasil, estima-se que a produção de lodo esteja entre 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano, considerando que apenas 30% da população urbana tem seu esgoto devidamente coletado e tratado (PEDROZA et al., 2010). Diante da realidade de que nem toda população tem acesso à saneamento básico, é de se esperar que a geração de lodo supere os números mencionados, caso todos os esgotos do país fossem devidamente tratados.

Uma das maneiras de reduzir os impactos ambientais decorrentes da disposição do lodo de esgoto é a ampliação das potencialidades de uso do mesmo. Então é neste contexto que este trabalho objetiva buscar alternativas capazes de auxiliar na discussão da disposição final do lodo através de seu uso na indústria da construção civil.

## 1.2 OBJETIVOS

Como forma de alcançar as metas dos procedimentos metodológicos tem-se os objetivos geral e específicos.

### 1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a durabilidade e o desempenho de argamassas de revestimento produzidas em proporções distintas incorporando lodo de esgoto calcinado em percentuais distintos substituindo parcialmente o cimento Portland.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Como forma de alcançar o objetivo geral, como objetivos específicos tem-se:

-analisar a durabilidade das argamassas produzidas comparando os resultados dos parâmetros estudados com as argamassas produzidas de forma convencional (argamassas de referência);

-analisar o desempenho das argamassas produzidas no estado fresco e endurecido formuladas com proporções distintas e com diferentes percentuais de incorporação de lodo de esgoto calcinado realizando o comparativo com argamassas de referência.

### 1.2.3 Hipóteses

A partir dos objetivos (geral e específicos) e da justificativa do presente trabalho, as seguintes hipóteses são apresentadas:

- a) a utilização do lodo de esgoto calcinado incorporado em argamassas de revestimento pode ser uma alternativa para a disposição final deste resíduo;
- b) o lodo de esgoto após calcinado pode apresentar potencial para ser considerado material pozolânico;
- c) o cimento Portland pode ser substituído pelo lodo de esgoto calcinado para a produção de argamassas de revestimento nas proporções de 10%, 20% e 30%;
- d) o cimento Portland quando substituído pelo lodo de esgoto calcinado para a produção de argamassas nas proporções de 10%, 20% e 30% de incorporação pode apresentar durabilidade e desempenho semelhantes às argamassas de referências produzidas com materiais convencionais.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho encontra-se subdividida em cinco capítulos conforme segue:

O Capítulo 1, apresentado anteriormente, descreve a introdução, ressaltando a justificativa, com o objetivo geral e com os objetivos específicos que foram estabelecidos.

O Capítulo 2 aborda conceitos relacionados à revisão bibliográfica dos temas relevantes para a pesquisa tais como, processo de fabricação de cimento Portland e sua relação com o meio ambiente; resíduos sólidos: classificação e destinação final adequada; estudos realizados sobre a utilização de resíduos na indústria da construção; lodo de esgoto e a problemática acerca da sua produção e destino final; argamassas e suas propriedades estudadas/analísadas na pesquisa.

O Capítulo 3 descreve o programa experimental acerca dos materiais utilizados e sobre os métodos executados para o desenvolvimento da pesquisa.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e as análises dos ensaios propostos no programa experimental.

No Capítulo 5 são relatadas as discussões e considerações finais do trabalho, mencionando as conclusões obtidas.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Com o intuito de realizar uma síntese da literatura, neste capítulo serão apresentados pressupostos teóricos referentes aos temas que se encontram diretamente ligados ao objeto de estudo da pesquisa.

### **2.1 CIMENTO PORTLAND**

Como forma de identificar os malefícios ambientais no tocante ao processo de fabricação do cimento Portland é preciso estudar sua relação com o meio ambiente, abordando a redução dos impactos ambientais oriundos de estudos que objetivam a redução do seu uso.

#### **2.1.1 Processo de fabricação e sua relação com o meio ambiente**

De acordo com Marcondes (1999), as grandes cidades passam por muitos problemas urbanos e nos países considerados de terceiro mundo a situação é mais agravante. Dentre os problemas mais marcantes destaca-se a degradação do meio ambiente.

O processo produtivo do cimento tem sido apontado como gerador de impactos tanto ambientais, quanto sociais. A indústria cimenteira não só consome muita energia, mas é uma das principais indústrias emissoras de gases que produzem efeito de estufa, em especial o CO<sub>2</sub> (MEHTA, 2002).

É impossível imaginar uma vida moderna sem cimento. O cimento é um material de construção extremamente importante usado para o desenvolvimento de moradias e infraestrutura e uma chave para o crescimento econômico (MISHRA e SIDDIQUI, 2014).

Cembureau (2014) afirma que na Europa a produção de cimento vem se mantendo constante nos últimos anos, em torno de 160 milhões de toneladas/ano.

No Brasil, segundo dados levantados pelo SNIC (2018), as vendas internas de cimento no Brasil totalizaram 4,3 milhões de toneladas em janeiro de 2018, com queda de 0,1% em relação a janeiro de 2017 e nos últimos 12 meses (fevereiro de 2017 a janeiro 2018), as vendas acumuladas totalizaram 53,8 milhões de toneladas, 6,2% menor do que nos 12 meses anteriores (fevereiro 2016 a janeiro de 2017).

Mesmo diante da queda apresentada acerca da produção e consumo do cimento Portland, os impactos causados em seu processo produtivo são preocupantes, visto que para a produção de uma tonelada de clínquer, mundialmente são gerados de 700 kg a 1100 kg de CO<sub>2</sub> (LIMA, 2010).

Wang (2013) afirma que a indústria do cimento é também uma fonte de emissões de outros compostos perigosos, como o monóxido de carbono e metais pesados.

De acordo com Huntzinger e Eatmon (2009), o processo de fabricação de cimento produz milhões de toneladas de resíduos oriundos da coqueificação em fornos de cimento, causando riscos respiratórios e poluição.

Dessa forma, há um grande interesse na otimização do processo de produção de cimento (UTLU et al., 2006).

### **2.1.2 Estudos objetivando a redução dos impactos ambientais**

Os impactos ambientais oriundos da produção de cimento tem sido extensivamente estudados em países considerados desenvolvidos devido à preocupação com os impactos ambientais causados durante o processo de produção.

Hong e Li (2011) realizaram uma avaliação do ciclo de vida para estimar o impacto ambiental do lodo de esgoto como matéria-prima na produção de cimento. Os resultados mostraram que o uso do lodo de esgoto como matéria-prima secundária nesta produção possui viabilidade, sendo uma boa escolha para reduzir o impacto ambiental sobre o meio ambiente reduzindo o quantitativo de lodo sem destino final adequado.

Chen et al. (2010) avaliou o impacto ambiental da produção de cimento usando a avaliação de impacto do ciclo de vida e investigou detalhes do processo de produção do cimento, a fim de mostrar a respectiva parte da preparação de matérias-primas e produção de clínquer objetivando o cálculo dos impactos ambientais. O estudo realizado mostrou que o processo de produção de clínquer é o principal contribuinte no tocante à impactos ambientais e que os demais processos não possuem grandes impactos em comparação com a produção de clínquer.

Navia et al. (2006) estudou que o solo vulcânico pode ser usado para remover metais das águas residuais e que uma vez utilizado, ele é descartado em aterros

sanitários e avaliou a utilização deste material na indústria cimenteira como matéria-prima alternativa, comprovando ser vantajosa, pois além de ser resíduo de outros sistemas técnicos, permite o desenvolvimento da produção de cimento de forma mais sustentável, melhorando ligeiramente a economia do processo.

Segundo Teixeira (2013), o cenário ambiental, não só brasileiro como mundial, encontra-se em um processo de percepções e mudanças que estão em constante busca pela integração entre economia, sociedade e meio ambiente, bases do desenvolvimento sustentável.

Muitas aplicações simplesmente usam o lodo de esgoto calcinado como substituto direto de matérias-primas como argila ou areia. Outra aplicação potencial do lodo de esgoto calcinado é usá-lo como um material de suplemento cimentício (como pozolana), tendo em vista os benefícios significativos relacionados à redução de impacto ambiental obtidos com a substituição de cimento (CHEN e POON, 2017).

De acordo com Gonçalves, Toledo Filho e Fairbairn (2006), a incorporação de resíduos na produção de materiais cimentícios pode reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> e o consumo de energia, bem como contribuir para a redução do impacto ambiental relacionado com a sua destinação.

## 2.2 RESÍDUOS

A preocupação com os resíduos vem sendo discutida há algumas décadas nas esferas nacional e internacional, devido à expansão da consciência coletiva com relação ao meio ambiente, para tanto, a abordagem sobre o conhecimento da produção de resíduos sólidos, bem como os resíduos de ETE é necessária para a conscientização da reutilização dos mesmos.

### 2.2.1 Resíduos sólidos

Conforme a NBR 10004/2004, resíduos sólidos são os que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola. Nesta definição estão incluídos os lodos, tanto os provenientes de sistemas de tratamento, quanto aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle

de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento em rede pública de esgotos e corpos d'água, ou exijam para isso solução técnica e economicamente inviável em face à melhor tecnologia disponível.

Sobre a geração de resíduos sólidos urbanos - RSU, os modos de consumo e produção da população, por passarem por alterações constantes devido à revolução tecnológica, ao excessivo crescimento populacional e ao desenvolvimento econômico acelerado, influenciam diretamente na quantidade e na sua diversidade.

No tocante à geração de resíduos sólidos urbanos, cada brasileiro gerou 378kg de resíduos no ano de 2017 e o volume de lixo depositado em lixões seria o suficiente para encher 160 estádios de futebol do tamanho do Maracanã (ABRELPE, 2017).

A geração total de resíduos sólidos urbanos no Brasil foi de 78,4 milhões de toneladas, o que representa crescimento de 1% em relação a 2016, passando de 212.753 toneladas por dia para 214.868 toneladas por dia (ABRELPE, 2017).

A proporção dos resíduos gerados está diretamente ligada ao crescimento econômico de uma população, e embora seja de extrema importância a destinação correta dos resíduos produzidos, um ponto importante para se analisar é a redução direta da fonte geradora, com possíveis medidas mitigadoras que enxuguem a emissão de poluentes (TESSARO, SÁ e SCREMIN, 2012).

A destinação adequada dos resíduos sólidos urbanos coletados pelos municípios permaneceu estagnada, com 59,1% do volume coletado encaminhado para aterros sanitários. Por outro lado, a destinação irregular aumentou 1%, com mais de 29 milhões de toneladas depositadas em lixões e aterros controlados no ano, o que seria suficiente para cobrir uma área equivalente a 600 Parques do Ibirapuera (ABRELPE, 2017).

É de fundamental importância a realização do gerenciamento de resíduos para que se possa firmar um correto direcionamento ao destino final de cada tipo de poluente, impedindo uma possível passivação à degradação ambiental (CAETANO, DEPIZZOL e REIS, 2017).

Para a redução do quantitativo de resíduos, os processos de gestão são necessários, pois é preciso preencher a lacuna entre os pontos de geração de resíduos e os limites das tecnologias de reciclagem (FEHR, 2002).

### 2.2.2 Resíduo de ETE

O tratamento de esgotos urbanos gera um subproduto denominado lodo de esgoto, considerado como o resíduo produzido pelo processo de tratamento de águas residuais, durante o qual líquidos e sólidos vão sendo separados. Os líquidos vão sendo descarregados para o meio aquoso enquanto os sólidos são removidos para tratamento adicional e disposição final (FYTILI e ZABANIOTOU, 2008).

No tocante à classificação, os lodos são classificados conforme o grau de umidade: *in natura* (lodos que possuem teor de umidade aproximados em 98% e são retirados logo após o processo de tratamento realizado pelas ETEs); podem ser parcialmente desidratados (os lodos que passam por redução do volume por meio da redução de teor de água que pode ser mediante processo mecânico ou natural) e seco (os lodos obtidos mediante secagem em estufas, por meio de incineração ou mediante processo de calcinação) (DMAE, 1978).

Cassini (2003) afirma que o lodo é classificado de acordo com sua natureza e origem em lodo primário; lodo secundário ou biológico; lodo misto que é a mistura do lodo primário com o lodo secundário; e por fim, o lodo químico, que é oriundo dos processos físico-químicos.

O lodo de esgoto, mesmo sendo rico em resíduos orgânicos, necessita de tratamento específico e de aterros adequados para o seu descarte. De acordo com Sperling e Andreoli (2007), o lodo de esgoto possui uma composição bastante diversa, bem mais do que o lodo produzido nas Estações de Tratamento de Água – ETAs, pois é composto por grande proporção de matéria orgânica e possivelmente metais, organismos patogênicos, contaminantes orgânicos e emergentes, além de partículas minerais.

Já o lodo doméstico, conforme Metcalf e Eddy (2002), é uma mistura heterogênea, complexa de materiais orgânicos e inorgânicos. Segundo Eckenfelder (2000), os materiais orgânicos que se encontram presentes no lodo de esgoto são compostos de 20% à 30% de proteína bruta, 6% à 35% de gorduras e 8% à 15% de carboidratos.

O lodo de esgoto é considerado um resíduo com disposição final problemática no processo operacional das estações de tratamento (WEBBER e SHAMESS,

1984), sendo atualmente, um dos desafios para as empresas de saneamento, a adoção de alternativas adequadas para a destinação final do lodo gerado nas ETEs.

Segundo Cornwell (1999), o tipo e a qualidade dos lodos gerados em ETEs, bem como os custos que envolvem seu tratamento e encaminhamento, influenciam consideravelmente a escolha da alternativa de disposição mais adequada, sendo necessário que se promova uma vasta investigação das possibilidades de mercado existentes que possam viabilizar a utilização dos lodos como insumos, verificando a geração de benefícios, tanto para as prestadoras de serviços de saneamento, quanto para os possíveis interessados em utilizar esses lodos.

## 2.3 LODO DE ESGOTO

Dos resíduos urbanos que são gerados pela população, um dos mais problemáticos é o gerado nos processos de tratamento de esgotos sanitários domésticos que é o lodo de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários, seu tratamento é complexo e a quantidade gerada é um problema para a gestão pública.

### 2.3.1 Tratamento do lodo de esgoto

Conforme Moraes (2005), o tratamento do lodo de esgoto visa corrigir características do resíduo tais como: instabilidade biológica (redução do teor de material orgânico); baixa qualidade higiênica (grande variedade de vírus, bactérias, protozoários); grande volume (como a concentração de sólidos é baixa, seu volume é grande, sendo necessária a redução do teor de água).

As etapas de tratamento do lodo de esgoto são: adensamento (objetiva a redução de seu volume); estabilização (remoção da matéria orgânica objetivando inibir o potencial de putrefação do lodo e seu potencial de produção de odores reduzindo a quantidade de microrganismos patogênicos); condicionamento (processo de preparo para desidratação); desaguamento (remoção da umidade); higienização (remoção de organismo patogênico considerada imprescindível para o uso agrícola) e disposição final (destinação final dos subprodutos) (ANDREOLI et al., 2001).

Os níveis de tratamento de lodo de esgoto mais utilizados são o tratamento preliminar, o primário e secundário (tratamento do lodo de esgoto utilizado na

presente pesquisa). Conforme Sperling (2005), no tratamento preliminar ocorre a sedimentação das partículas em suspensão, onde os mecanismos básicos de remoção são de ordem física; é a primeira etapa do tratamento cuja finalidade é a remoção de sólidos grosseiros e areia, a fim de que estes não danifiquem as tubulações e os sistemas de bombeamento, protegendo, dessa forma, as próximas etapas do processo sendo que o fluxo típico do esgoto nesse nível de tratamento corresponde à passagem do efluente em uma grade (para remover sólidos grosseiros), em um desarenador (para remover areia, através do processo de sedimentação) e por um medidor de vazão. Existem as lagoas anaeróbias/reatores anaeróbios, que utilizam das bactérias para a decomposição da matéria orgânica presentes no esgoto. Vale ressaltar que alguns autores classificam as lagoas anaeróbias ou reatores anaeróbios como tratamento secundário.

No caso do tratamento primário, envolve unidades de tratamento que adotam decantadores primários, processos exclusivamente de ação física. A finalidade deste nível de tratamento é a remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis e de sólidos flutuantes. Ambos os sólidos são removidos, basicamente, em um decantador, onde o líquido passa vagarosamente, permitindo que os sólidos em suspensão se depositem paulatinamente no fundo. A massa de sólidos que se forma é chamada de lodo primário bruto. Ao mesmo tempo, os sólidos flutuantes, como graxas e óleos, sobem para a superfície dos decantadores. Dessa forma, estes são coletados e removidos do tanque para posterior tratamento.

A principal ênfase tem sido dada ao nível de tratamento secundário, pois dentre os citados é o único capaz de cumprir a legislação relativa aos padrões de lançamento (SPERLING, 1995). O tratamento secundário destina-se à remoção de matéria orgânica dissolvida e matéria orgânica em suspensão. A principal característica do tratamento secundário é a inclusão de uma fase biológica, uma vez que a remoção da matéria orgânica ocorre em função de reações bioquímicas, realizadas por microrganismos (bactérias, fungos, entre outros).

Em nível secundário, os principais tipos de tratamento são: sistemas de lagoa de estabilização que são unidades de tratamento de esgoto cuja construção é simples, baseando-se, principalmente, em movimentos de terra (corte e aterro) e preparação dos taludes. Há diversas variantes de tal unidade como Lagoa Facultativa; Lagoa Anaeróbia; Lagoa Aerada-Facultativa; Lagoa Aerada de Mistura

Completa; Lagoa de Decantação; entre outros; sistemas de filtros biológicos que são unidades de tratamento aeróbio que consistem em um tanque preenchido com material grosseiro (pedras, ripas, materiais plásticos, entre outros), sobre o qual o esgoto é aplicado. Na superfície de tal material cresce biomassa, formando uma película microbiana. Dessa forma, conforme o esgoto entra em contato com tal película, a matéria orgânica fica retida tempo suficiente para a sua estabilização. Algumas variantes são: filtros biológicos de baixa carga; entre outros e sistemas anaeróbios que em tratamentos anaeróbios são gerados gases como o metano e o gás carbônico.

A opção pelo nível de tratamento que será aplicado é uma questão complexa de engenharia de projeto e deve ser feita de forma que venha garantir no mínimo os padrões de lançamento permitidos para assegurar a proteção da saúde pública e do meio ambiente, e requer uma análise detalhada das condições e necessidades locais, aplicação de conhecimento científico e julgamento por parte da engenharia baseado em experiências anteriores; e consideração das leis federais, estaduais e municipais (METCALF e EDDY, 2003).

A tecnologia anaeróbia (mesma tecnologia aplicada ao tratamento do lodo de esgoto utilizado na presente pesquisa) é a mais consolidada e resulta, dentre outras vantagens, em grandes economias de área, a reduzida utilização de energia elétrica e a facilidade de operação em regiões de clima tropical, pois as altas temperaturas favorecem o processo de digestão da matéria orgânica. Entretanto, esse sistema apresenta capacidade limitada de remoção de matéria orgânica, de remoção de nutrientes e patógenos, em geral demandando pós-tratamento, seja para o lançamento em corpos receptores, seja para o reuso (CHERNICHARO, 2006).

Um dos avanços mais notáveis na tecnologia do processo de tratamento anaeróbio foi o reator do tipo Upflow Anaerobic Sludge Blanket - UASB ou Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente -RAFA, que consiste de um fluxo ascendente de esgotos através de um leito de lodo denso e de elevada atividade, desenvolvido no final de 1970 na Holanda por Gatzke Lettinga e Vinken na Universidade de Wageningen (LETTINGA e VINKEN 1980).

Sob condições adequadas, o reator UASB é bastante notável para tratamentos de esgoto. De acordo com Van Haandel e Leetinga (1994) e Campos (1999), em regiões de clima quente uma eficiência bastante alta de remoção de

matéria orgânica pode ser obtida (65 a 80%) em reatores UASB com baixo tempo de detenção (4 a 6 horas).

Entre as principais vantagens da utilização do reator UASB em ETEs pode-se citar: sistema compacto, com baixa demanda de área e podendo atender inclusive regiões muito urbanizadas.

O reator UASB ocupa uma área até 500 vezes menor que as lagoas de estabilização; sistema de fácil construção, simples operação e manutenção e baixo consumo de energia, que se limita apenas a elevatórias de chegada de esgoto, quando se fazem necessárias (VIEIRA, 1994).

As principais desvantagens oriundas do sistema de tratamento anaeróbio com utilização do reator UASB em ETEs são: a bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia, que são complexas e ainda precisam ser mais estudadas; possibilidade de distúrbios devido a choques de carga orgânica e hidráulica e presença de compostos tóxicos (CHERNICHARO, 2008).

Conforme Sperling e Gonçalves (2001), alguns componentes das águas residuárias, ao passarem pelo sistema de tratamento, concentram-se em proporções variadas no lodo. Parte destes componentes são materiais orgânicos e minerais e conferem características fertilizantes ao lodo. No entanto, outros componentes, pelo seu risco sanitário e ambiental, são indesejáveis.

Devido aos processos físico-químicos que envolvem o processo de tratamento das águas residuais, há no lodo de esgoto presença de metais pesados (HSIAU e LO, 1998).

O acúmulo de substâncias indesejáveis, como por exemplo, metais pesados, patógenos e poluentes orgânicos que potencialmente passam para a cadeia alimentar são fatores pelos quais o uso do lodo de esgoto na agricultura é restringido, sendo seu uso cada vez mais considerado como rota de manuseio inseguro (FYTILI, ZABANIOTOU, 2008). Os metais pesados existentes no lodo justificam a necessidade de licenciamento, frequência de monitoramento, elaboração de projeto agrônomo e condições de manuseio, transporte e aplicação para seu uso na agricultura.

### 2.3.2 A problemática do lodo de esgoto

A resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (1986) conceitua impacto ambiental como sendo qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causadas por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas (atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos ambientais) que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem-estar da população.

De acordo com Metcalf e Eddy (2003), a destinação de lodo residual que é gerado nas estações de tratamento de esgoto é um grande problema ambiental para as empresas de saneamento, sem distinção se são públicas ou privadas.

O planejamento da disposição final de lodo de esgoto oriundo de ETEs requer conhecimento técnico, ambiental e há questões econômicas que norteiam a ausência desta prática. De acordo com Von Aperling (2001), o processamento e a disposição final do lodo podem representar até 60% do custo operacional de uma ETE.

No Brasil, só recentemente foram publicados estudos no intuito de estimular o debate acadêmico e chamar a atenção para a necessidade de se estabelecer e difundir metodologias de aferição e de análise dos custos econômicos e sociais oriundos do saneamento inadequado (SACRAMENTO et al., 2014).

Conforme Halley e Miller (1991), o tratamento e disposição de lodo devem ser geridos para minimizar problemas ambientais relacionados ao lançamento no ambiente de contaminantes e patógenos. Como forma de minimização dos impactos causados, é preciso que haja não apenas uma gestão que proporcione um destino correto dos resíduos de lodo de esgoto que são oriundos de ETEs, mas também que proporcione a reutilização do lodo gerado, objetivando reintegrá-lo em um ciclo produtivo, sendo este ainda um grande desafio proposto para os municípios.

O reaproveitamento do lodo de esgoto está proposto na Lei nº 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS. São objetivos da PNRS: proteção da saúde pública e da qualidade ambiental; não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos; estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços; adoção, desenvolvimento

e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais; articulação entre as diferentes esferas do poder público, e destas com o setor empresarial, com vistas à cooperação técnica e financeira para a gestão integrada de resíduos sólidos; incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético e estímulo à rotulagem ambiental e ao consumo sustentável.

De acordo com o PNRS, cabe ao titular dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos implantar sistema de compostagem para resíduos sólidos orgânicos e articular com os agentes econômicos e sociais formas de utilização do composto produzido e dar disposição final ambientalmente adequada aos resíduos e rejeitos oriundos dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

O uso do lodo de esgoto em materiais, componentes ou em processos construtivos minimizaria impactos ambientais. Assim, as alternativas de uso e aplicação dos lodos no setor construtivo, transformando-os em insumos, devem ser investigadas com o objetivo de mitigar o problema da disposição final, reduzindo o volume a ser disposto em aterro e aplicando os conceitos de reciclagem, minimizando os resíduos das ETEs, obtendo, como benefício maior, a preservação do meio ambiente e a aplicação de princípios que são voltados para a sustentabilidade.

### **2.3.3 Necessidade de caracterização do lodo quando utilizado**

É importante a caracterização dos materiais para conhecer suas propriedades e características químicas e físicas, assim sua utilização não fica limitada. Outros objetivos que preconizam a caracterização de materiais é o conhecimento de propriedades que contribuam para a estimativa de desempenho, bem como durabilidade.

Das formas de caracterização química, física e mecânica dos materiais convencionais (cimento e areia) e dos materiais considerados não convencionais, como o lodo de esgoto, por exemplo, utiliza-se ensaios referentes à classificação ambiental, granulometria por difração a laser, massa específica, massa unitária,

fluorescência de raio X (FRX), difração de raio X (DRX), termogravimetria e análise térmica diferencial (TGA/DTA), microscopia eletrônica de varredura (MEV), ensaios referentes à atividade pozolânica, etc.

Devido à possibilidade da presença de grande quantidade de metais pesados, para o uso de forma segura do lodo de esgoto, faz-se necessário o conhecimento de seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública para que possam ser gerenciados adequadamente. A NBR 10004 (2004) classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, não apenas para que possam ser gerenciados adequadamente, mas que em caso de sua reutilização seus riscos sejam conhecidos.

Para tanto é necessário que o material seja caracterizado mediante a classificação ambiental do resíduo, que refere-se à quantificação dos elementos presentes nas amostras coletadas com o objetivo de classificá-lo como um resíduo pertencente à classe IIA – não inerte ou pertencente à classe IIB – inerte segundo a NBR 10004 (2004).

A quantificação desses constituintes é realizada através de uma espectrometria por absorção atômica, sendo uma análise química que consiste na quantificação de elementos de uma amostra que é obtida através da absorção e emissão de radiação por parte dos elétrons de cada elemento, sendo possível desta forma, identificar e quantificar os metais presentes na amostra.

Mesmo diante da importância deste método de caracterização, principalmente mediante o uso de resíduos que apresentem algum risco devido à sua composição (como o lodo de esgoto), a bibliografia apresenta uma grande lacuna quanto à sua execução. Neste trabalho a classificação ambiental do lodo de esgoto foi realizada conforme os procedimentos descritos na NBR 1000 (2004).

#### **2.3.4 Estudos sobre a utilização de lodo de esgoto na indústria da construção Civil**

Segundo Menezes et al. (2009), a reciclagem e a reutilização de resíduos estão entre as principais alternativas na busca pelo desenvolvimento sustentável, possibilitando a economia de matérias-primas não renováveis e de energia, e a redução dos impactos ambientais dos resíduos na sociedade moderna.

Considerando na indústria da construção civil o consumo energético e de recursos naturais em larga escala e a grande quantidade de resíduos gerados até que uma edificação seja concluída, é inegável a ligação entre meio ambiente e processo construtivo e o quanto tal relação afeta a qualidade de vida do indivíduo.

Incontáveis são os resíduos provenientes de atividades urbanas que ainda não foram estudados para uso na indústria da construção civil e que possuem um grande potencial de reaproveitamento/reciclagem minimizando seus descartes na natureza, um deles é o lodo de esgoto gerado em ETEs, mas para viabilização de uso na indústria da construção civil, os estudos precisam ser ampliados.

Diante de inúmeros problemas ambientais vividos, é preciso que cientistas e pesquisadores promovam o desenvolvimento acerca da utilização de materiais e componentes que sejam facilmente reincorporados pela natureza e que reduzam a poluição. Neste tópico, serão brevemente abordados estudos desenvolvidos sobre a utilização de lodo de esgoto na indústria da construção civil.

Tay e Show (1992) avaliaram a viabilidade do uso de lodo desidratado misturado com cal para produzir um material semelhante a cimento após a incineração. Estudaram a resistência à compressão do cimento feito a partir do lodo seco em estufa a 105°C para obter uma secagem uniforme de pelo menos 95% de teor de sólidos. Na avaliação das propriedades de resistência à compressão, três diferentes proporções de mistura de lodo e cal foram utilizadas: (1:3), (1:1) e (3:1). Os resultados mostraram que o cimento feito a partir de misturas de lodo e calcário em quantidades iguais incinerados a 1000°C durante o período de 4 horas sob queima controlada, pode ser usado como aglomerante em alvenarias. Os autores concluíram que a avaliação da resistência à compressão indicou que é possível produzir cimento a partir de lodo, satisfazendo os requisitos de resistências normativos. Os autores recomendaram que antes do uso de lodo como aglomerante se torne comercialmente viável, é necessário realizar mais estudos adicionais sobre mais propriedades e também estudos voltados para a durabilidade.

Hoppen et al.(2005) em seus estudos, propôs a codisposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água em matriz de concreto como método alternativo de preservação ambiental substituindo parcialmente seus insumos: agregados miúdos e o cimento, cuja extração e emprego também causam impacto ambiental. O lodo não passou por processo de incineração ou calcinação e

foram adicionados polímeros com a finalidade de aumentar a eficiência da centrífuga utilizada no processo de adensamento do lodo e foram fabricados quatro concretos incorporando o lodo in natura, em teores de 3%, 5%, 7% e 10%. No estudo, além de caracterizar a matéria-prima, foi realizada a avaliação das propriedades das misturas no estado fresco (medida do slump, massa unitária, teor de ar incorporado) e o desempenho dos concretos no estado endurecido (resistência à compressão axial simples).

No estudo, considerando-se, unicamente, o critério fluidez, a conclusão foi de que podem-se direcionar as misturas com até 5% de lodo para aplicação em blocos, peças e artefatos de concreto, inclusive de geometrias mais complexas, pois não há necessidade de vibradores mecânicos. Acima desse teor, o concreto é mais indicado para aplicações que não dependam de adensamento manual e cujo formato não apresente complexidade. Em relação à resistência à compressão houve um decréscimo substancial no valor resultante com o incremento da quantidade de lodo. Pelos coeficientes angulares das curvas, a maior perda de resistência, em relação ao concreto-referência, foi obtida para a proporção com 10% de lodo.

A análise dos resultados permitiu concluir que, nas condições e parâmetros adotados, as proporções de concreto contendo até 5% de lodo podem ser aplicadas em situações que vão desde a fabricação de artefatos, blocos e peças de concreto (como placas de estai para redes de distribuição de energia elétrica, tampas de concreto para coberturas de fossas e caixas de passagem, e pedestais para apoio de equipamentos) até a construção de pavimentos em concreto de cimento Portland (pavimento rígido).

Areias et al. (2017) estudaram a incorporação de lodo de esgoto calcinado na temperatura 950°C em cerâmica vermelha. Avaliaram as formulações de proporções de incorporação de 0%, 2%, 5%, 10% e 15% em massa do lodo de ETE incorporados na massa cerâmica. Constataram que o resíduo de ETE tende a reduzir a resistência à compressão e aumentar a absorção de água, causando superfícies rugosas que sugerem porosidade aberta. Concluíram que é possível indicar uma destinação final do lodo de ETE como incorporação em cerâmica vermelha, ressaltando, no entanto, que a incorporação deste resíduo à massa cerâmica deve ser realizada em torno de 2,5% em massa.

Fontes, Toledo Filho e Barbosa (2016) analisaram o aproveitamento do lodo de esgoto, após processo de calcinação nas temperaturas 550°C e 650°C, como substituto parcial ao cimento Portland nos teores de 5% e 10% para a produção de concretos de alto desempenho na proporção 1:1, 42:1, 49:0,31 (em massa). O comportamento da cinza foi avaliado através de ensaios de resistência à compressão axial nas idades de 1, 3, 7, 28, 91, 180 e 365 dias, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, penetração acelerada por íons cloreto e porosimetria por intrusão de mercúrio, na idade de 28 dias. Os resultados obtidos no estudo mostraram que a presença do lodo de esgoto mudou a microestrutura dos poros do concreto reduzindo sua conectividade; em relação à resistência à compressão, a incorporação de 5% e 10% de lodo nas idades de 1, 28, 91 e 365 dias apresentaram desempenho inferior quando os resultados são comparados às misturas de referência e isso foi atribuído ao aumento no volume de poros. Os testes referentes à absorção de água por imersão e índice de vazios do concreto produzidos com o lodo obtiveram desempenho inferior aos resultados obtidos com o concreto produzido sem a incorporação de lodo (referência).

Pérez-Carrión et al. (2014) calcinou lodo de esgoto a 800 °C e verificou que a incorporação de lodo de esgoto em concreto, usado para fabricação de blocos curados por 28 dias, forneceu densidades e resistências semelhantes à amostra de controle e que sem a cinza do lodo de esgoto há redução significativamente da absorção de água. A amostra com 10% de substituição de areia pela cinza do lodo de esgoto mostrou o melhor desempenho em termos de densidade, absorção e capilaridade. O desempenho foi comparado em três famílias de blocos, com 0%, 10% e 20% de incorporação da cinza do lodo de esgoto. As análises provaram que a cinza é adequada para a fabricação de blocos de concreto pré-moldado e que, além dos benefícios econômicos e ambientais proporcionados, seu uso melhoraria algumas das propriedades do bloco convencional. A absorção foi considerada em relação ao quesito durabilidade.

Silva, Chinelatto e Chinelatto (2015) avaliaram a viabilidade da incorporação do lodo de esgoto para a produção de blocos. O lodo foi submetido a um processo de higienização para reduzir a concentração de patógenos no resíduo. No processo de tratamento, o esgoto foi canalizado até a ETE, onde foi bombeado até o sistema

de gradeamento e desaneradores (caixas de areia) para a separação da matéria sólida grosseira e, em seguida, o esgoto passou por um medidor de vazão (calha Parshal) e então foi lançado nas unidades de reatores sofrendo um processo de tratamento biológico natural, decompondo e estabilizando a matéria orgânica pela ação de microrganismos anaeróbios. Depois de tratado, o lodo gerado foi higienizado e depositado no leito de secagem e o efluente lançado na lagoa de estabilização. As argilas foram misturadas em moinhos de bolas com a adição de 2% em massa de silicato de sódio, como defloculante, por 6 h, em seguida foram secas em estufa por 24 h a 110 °C. A mistura seca foi destorroada em almofariz de porcelana e passada em peneira com abertura 0,180 mm (# 80 ABNT). A essa mistura foi adicionada diferentes quantidades de lodo, nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 50%. A incorporação de lodo acarretou uma alta absorção de água, mas os resultados obtidos no estudo mostraram que é viável a utilização do lodo de ETE incorporado até 25%.

Pan et al. (2003) para melhorarem as propriedades da argamassa pesquisa utilizaram a moagem mecânica para ajustar a finura do lodo de esgoto incinerado. Argamassas foram produzidas objetivando substituir 20% do cimento Portland por lodo de esgoto incinerado na temperatura 700°C. Devido ao efeito lubrificante e melhoria da morfologia, a fluidez da argamassa produzida com lodo aumentou quando a finura do lodo aumentou. Além disso, a atividade pozolânica e a resistência à compressão da argamassa com incorporação de lodo de esgoto aumentaram com o aumento da finura do lodo devido à moagem. Os resultados mostraram que a aplicação de moagem mecânica para ajustar a finura do lodo de esgoto é eficiente para melhorar as propriedades das argamassas com ele produzidas.

A Tabela 1 apresenta um resumo das pesquisas com lodo de esgoto apresentadas anteriormente.

Tabela 1- Resumo das pesquisas com lodo de esgoto apresentadas

<b>Pesquisador</b>	<b>Tratamento do lodo</b>	<b>Percentual de incorporação</b>	<b>Conclusões</b>
Tay e Show (1992)	Incineração	10% a 40%	É possível produzir cimento a partir de lodo, satisfazendo os requisitos de resistências normativas.
Hoppen et al.(2005)	In natura (processo de centrifugação)	3%, 5%, 7% e 10%	5% de incorporação de lodo podem ser aplicados em situações que vão desde a fabricação de artefatos, blocos e peças de concreto.
Areias et al. (2017)	Calcinação	0%, 2%, 5%, 10% e 15%	É possível indicar uma destinação final do lodo de ETE como incorporação em cerâmica vermelha.
Fontes, Toledo Filho e Barbosa (2016)	Calcinação	5% e 10%	A presença do lodo de esgoto mudou a microestrutura dos poros do concreto reduzindo sua conectividade.
Pérez-Carrión et al. (2014)	Calcinação	10% e 20%	A incorporação do lodo é adequada para a fabricação de blocos de concreto pré-moldado.
Silva, Chinelatto e Chinelatto (2015)	Estufa a 110 °C	5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 50%	A incorporação de lodo acarretou uma alta absorção de água nos blocos produzidos, mas é viável a utilização do lodo de ETE incorporado até 25%.
Pan et al. (2003)	Incineração	20%	A moagem mecânica para ajustar a finura do lodo de esgoto é eficiente para melhorar as propriedades das argamassas com ele produzidas.

Fonte: A Autora (2019).

De acordo com os resultados, a aplicação da moagem mecânica para ajustar a finura do lodo incinerado foi uma modificação eficaz para melhorar as propriedades da argamassa produzida, incluindo a fluidez e a resistência à compressão. A moagem mecânica aumentou a finura e atividade pozolânica da do lodo incinerado, mas não alterou sua atividade cristalina.

Malhotra e Mehta (1996) afirmam que o uso de adições que são consideradas minerais, seja em concretos ou em cimentos proporcionam benefícios não apenas ambientais, mas também econômicos.

A utilização de resíduos em processos construtivos é um método de inserção da prática da sustentabilidade que proporciona viabilidade ambiental, econômica e social. Mas, especificamente em canteiros de obras, existem muitos entraves em se aplicar tecnologias que promovam qualquer forma de execução na construção civil que seja diferenciada dos sistemas construtivos tradicionais.

Devido às dificuldades para a aceitação de novos produtos nas etapas construtivas, em 1992 foi criada a International Society for the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials - ISCOWA, que é uma organização internacional sem fins lucrativos, cujo objetivo é promover e coordenar o intercâmbio de informações sobre os aspectos ambientais e técnicos da construção civil de subprodutos industriais que incluem resíduos de processos industriais, tais como escórias metalúrgicas, cinzas volantes, resíduos urbanos e perigosos, rejeitos de minas, bem como resíduos de construção e demolição, solos contaminados por atividades industriais etc. Os membros da ISCOWA estão envolvidos em pesquisas e estudos com a utilização desses materiais alternativos objetivando sua aplicação na construção civil.

A inserção de um resíduo voltado para a fabricação de um novo produto para a indústria da construção, além de evitar que sejam extraídos mais recursos da natureza, promove uma nova postura voltada para a redução do desperdício e uso racional de materiais e componentes gerando impactos financeiros positivos sem abandonar o crescimento e a competitividade de mercado por parte das empresas.

A construção civil é uma indústria que possui considerável potencial para a incorporação de resíduos em suas etapas construtivas com possibilidade de redução de custos e redução de danos ambientais.

## 2.4 ARGAMASSAS

Segundo a NBR 7200 (1998) argamassa é a mistura de aglomerantes, agregados e água, possuindo capacidade de endurecimento e aderência. A NBR 13281 (2001) prescreve que argamassa é a mistura homogênea de agregado(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos e adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalações próprias (argamassas industrializadas).

### **2.4.1 Propriedades de argamassas com incorporação de lodo de esgoto**

Segundo Recena (2012), as argamassas devem ser consideradas como um elemento de um sistema e não isoladamente como um material e devem apresentar características que possibilitem um bom acabamento, absorção das deformações naturais que a estrutura está sujeita e impermeabilização do substrato.

Ao propor a substituição parcial do cimento mediante a incorporação de lodo de esgoto, é necessário um estudo voltado para as propriedades da argamassa (fluidez, retenção de água, aderência, permeabilidade à água, resistência mecânica, etc) a fim de analisar como a incorporação do resíduo interfere em suas propriedades.

Quanto às propriedades, o estudo da densidade de massa no estado endurecido, quando há adições em argamassas é necessário, pois pode explicar o desempenho do revestimento quanto às propriedades mecânicas, influenciada, principalmente, pelo empacotamento das partículas dos agregados miúdos e, também, pelo empacotamento do conjunto agregado-aglomerantes (SILVA, 2006).

As argamassas devem possuir propriedades de modo a satisfazer as funções às quais se destinam, proporcionando qualidade e durabilidade e, ao inserir adições em argamassas, por exemplo, é necessário que a trabalhabilidade seja analisada, sendo essencial o estudo das dosagens a serem utilizadas.

Monzó et al. (2003) avaliaram a trabalhabilidade de argamassas contendo lodo de esgoto incinerado a 800°C sendo incorporado nas proporções 7,5% e 30% em substituição ao cimento, moldadas com diferentes percentuais de superplastificantes e quantidade de água na mistura. Constatou-se que à medida que o teor de superplastificante aumentava, a fluidez das misturas também aumentava para um mesmo teor de cinza de lodo de esgoto, mas para um menor teor de superplastificante, à medida que aumentava o teor de lodo de esgoto a trabalhabilidade foi reduzida. Concluiu que à medida que a quantidade de água aumentava e o teor do lodo de esgoto se mantinha constante, a fluidez aumentava.

Costa (2014) analisou a retenção de água de argamassas com lodo de esgoto incinerado em forno na temperatura de queima de 850°C e foi utilizado como incorporação em argamassas nas proporções de adições 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% em substituição ao cimento Portland. Como resultado, concluiu que se tem

uma pequena variação da retenção de água entre as argamassas de referência e com incorporação, sendo que a incorporação de lodo acarreta um aumento da retenção de água, com o menor valor para a argamassa de referência (0%), e o maior para a argamassa com 20% de lodo.

Segundo Baía e Sabbatini (2008), os fatores que influenciam na consistência e na retenção de água são as características e proporcionalidade dos materiais constituintes da argamassa.

No caso de adições ou incorporações em argamassas é necessário o estudo voltado para o tempo de pega, pois o processo de início e do fim da pega do cimento compreende a evolução das propriedades mecânicas da pasta no início do processo de endurecimento, propriedades essencialmente físicas. Em termos práticos, o tempo de início de pega dá uma ideia do tempo disponível de manuseio com aquele cimento (SILVA, 2007).

Pega é o termo empregado para designar o enrijecimento da pasta de cimento, embora seja arbitrária a definição do enrijecimento da pasta. Enrijecimento é a perda de consistência da pasta plástica de cimento. Segundo Mehta e Monteiro (1994), o que causa o enrijecimento da pasta, e finalmente, a pega e o endurecimento é a perda gradual da água livre devido às reações de hidratação, à adsorção física na superfície dos produtos de hidratação de baixa cristalinidade (como o C-S-H e a etringita) e à evaporação.

Estudos feitos por Cyr, Coutand e Clastres, (2007) indicaram que a incorporação de lodo incinerado a 850°C em argamassas nas proporções 25% e 50%, proporcionou um retardo no tempo de início e fim pega das argamassas, fator atribuído ao menor teor de cimento utilizado, devido à sua substituição em 25% e 50% pelo lodo de esgoto e também em virtude do zinco e do fósforo, elementos presentes no lodo de esgoto utilizado, que influenciaram no retardo apresentado. Os autores afirmam que os efeitos do lodo de esgoto em propriedades das argamassas dependem das características específicas do lodo de esgoto usado em cada estudo.

## 2.5 DURABILIDADE DE ARGAMASSAS

Partindo do princípio de que a durabilidade dos novos materiais de construção é uma das maiores preocupações com grande relevância na escolha do material a

ser empregado em dada aplicação, especialmente por conta da eventual degradação rápida sofrida por alguns, o estudo da durabilidade se faz necessário.

### **2.5.1 Estudo da durabilidade**

A durabilidade é um dos fatores mais importantes para o conhecimento dos novos materiais em desenvolvimento, visto que para que se haja confiabilidade nas características tecnológicas de um novo material e indicação deste como uma possibilidade técnica a ser disponibilizada no mercado é fundamental o conhecimento de suas condições de uso e de sua vida útil (SIDERIS, SAVVA e PAPAYIANNI, 2006).

O processo de constantes mudanças nas condições a que os materiais são submetidos (umidade, temperatura etc.) faz com que se desconheça a velocidade de deterioração, favorecendo o surgimento de manifestações patológicas prematuras e a necessidade de recuperações antecipadas.

A degradação prematura das edificações ou suas partes, e a consequente redução de desempenho, é um problema frequente em todo o mundo. Esta deterioração ocorre devido, sobretudo, ao seu envelhecimento precoce, o qual geralmente é desencadeado pela baixa qualidade dos materiais de construção empregados, por problemas de projeto e execução e falta de manutenção (POSSAN e DEMOLINER, 2013).

No Brasil, a Norma de Desempenho NBR 15575 (2013), constitui-se no principal documento normativo voltado ao desempenho com foco em uma maior durabilidade de edificações habitacionais. A NBR 15575 (2013) enfatiza que a utilização simultânea de normas prescritivas e de desempenho visam atender às exigências do usuário com soluções tecnicamente adequadas.

De acordo com Possan e Demoliner (2013), diante das constantes mudanças nas tecnologias e nos materiais utilizados na construção civil, percebeu-se que avaliar as exigências dos projetos para as argamassas e os concretos utilizando apenas o parâmetro de resistência seriam insuficientes. Assim, enfatiza-se que a durabilidade também deve ser analisada.

O conhecimento sobre a durabilidade de argamassas com adições ou incorporações consideradas alternativas possibilitará estabelecer a real relação

entre desempenho tecnológico e ecologia, contribuindo na busca por desenvolvimento sustentável, amparando-o em fundamentos científicos (FARIAS FILHO, 2007).

Conforme Isaia (1995), a durabilidade dos materiais à base de cimento está relacionada com a estabilidade dimensional, permeabilidade, porosidade, resistência mecânica e natureza das ligações entre os seus diversos componentes (inorgânicos, sólidos, líquidos, cristalinos, não cristalinos), onde se faz necessário o conhecimento no tocante à relação entre microestrutura e o desempenho dos materiais.

Morales (1997) estudou o aproveitamento do lodo de esgoto sanitário como matéria prima para a produção de pozolana e recomendou que estudos sobre a durabilidade dos componentes produzidos com esta lodo de esgoto calcinado ou incinerado fossem realizados, considerando-se fatores com o a lixivação, a carbonatação e o pH do meio, de forma a se avaliar a durabilidade destes componentes para posterior uso na indústria da construção civil.

No estudo da durabilidade dos materiais vários parâmetros podem ser avaliados, principalmente, as propriedades mecânicas através da resistência à compressão simples e é muito comum ocorrer processos de envelhecimento como forma de avaliação de durabilidade onde os mesmos são baseados na simulação de agentes predeterminados selecionados de acordo com a proposta do pesquisador.

## **2.5.2 Ensaio de durabilidade**

Nesta pesquisa, a absorção de água e coeficiente por capilaridade, resistência de aderência à tração, envelhecimento acelerado por meio de ciclos de molhagem e secagem e resistência à carbonatação foram utilizados como parâmetro para avaliação de durabilidade.

### **2.5.2.1 Absorção de água e coeficiente de capilaridade**

A sucção capilar é um dos mecanismos de transporte mais importantes para a entrada de agentes agressivos nos poros das argamassas, utilizou-se o ensaio como forma de estimar a maior ou menor susceptibilidade frente à degradação.

De acordo com Pinto (1998), a capilaridade é a propriedade de um material em promover a sucção de água quando em contato com ela e depende de vários

fatores, como as forças de tensão superficial água/material, a dimensão dos raios capilares, o ângulo de contato capilar.

A absorção de água por capilaridade tem relação com a durabilidade do material, pois os problemas gerados pela fixação da umidade apresentam consequências como prejuízos de caráter funcional para uma edificação através de manifestações patológicas, desconforto dos usuários e em casos extremos pode afetar a saúde dos moradores (ROQUE, 2009).

Ungericht e Piovesan (2011) afirmam que a absorção de água pode ser analisada através do empacotamento das partículas, na qual, quanto maior for a quantidade de partículas finas, maior será o fechamento dos poros, o que conseqüentemente reduzirá a absorção, pois evitará a passagem de água para o revestimento. A umidade pode ter algumas origens da natureza e atua nos materiais porosos através da ação capilar. Dessa maneira pode-se dizer que quanto mais lenta for essa absorção de água, melhor será o revestimento, pois evitará fissuras. (RATO,2006).

Na argamassa endurecida, o tamanho e a continuidade dos poros controlam a absorção de água e o coeficiente de capilaridade. A porosidade nas argamassas está relacionada à resistência mecânica de forma inversa (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

#### 2.5.2.2 Resistência de aderência à tração

Carasek, Cascudo e Scartezini (2001) definem aderência como sendo a resistência e a extensão de contato entre argamassa e uma base porosa.

Segundo Sabbatini; Baía (2000) A aderência depende das propriedades da argamassa no seu estado fresco, dos procedimentos de execução do revestimento, da natureza e características da base e da sua limpeza superficial.

A aderência no estado endurecido da argamassa ao substrato é um processo essencialmente mecânico, devido à penetração da própria argamassa nos poros ou entre as rugosidades da base de aplicação, visto que quando a argamassa entra em contato com o substrato, parte da água de amassamento que contém os componentes do aglomerante em estado coloidal, penetra nesses poros e rugosidades formando, no interior destes, géis de silicato do cimento e hidróxidos

provenientes da cal. Após a cura do revestimento esses precipitados ficam ancorados à base, aumentando a aderência do conjunto argamassa/substrato (CARASEK, 1996).

No que tange as argamassas de revestimento produzidas com cimento Portland, diversas manifestações patológicas são identificadas, em revestimentos internos e, de forma mais severa, em revestimentos externos. A principal delas está relacionada à aderência em decorrência do elevado grau de porosidade da argamassa que passa a ser responsável por um alto índice de destacamentos/desplacamentos das argamassas no seu contato com o substrato (COSTA; SILVA, 2001).

Para uma aderência adequada entre o revestimento e a base, a camada de revestimento necessita ter a maior extensão efetiva de contato possível com a base. Os principais mecanismos de aderência são: pela ancoragem da pasta aglomerante nos poros da base onde passa pelo processo de endurecimento, e também por efeito de ancoragem mecânica da argamassa nas concavidades e saliências macroscópicas da superfície a ser revestida. (ABCP, 2002).

A importância para o estudo da durabilidade de argamassas no tocante à avaliação da resistência da aderência à tração está relacionada com a capacidade do revestimento em resistir às tensões que se produzem na interface substrato/argamassa.

#### 2.5.2.3 Ensaio de durabilidade: envelhecimento acelerado

Envelhecimento pode ser genericamente definido como qualquer processo de degradação produzido pela interação entre o material e o ambiente, alterando sua estrutura e suas propriedades dimensionais, mecânicas, elétricas, químicas ou térmicas (LEVY, 2001).

Conforme John, Agopyan e Prado, (1997) ensaios de envelhecimento acelerado envolvem a exposição do material a elevadas concentrações do fator de degradação ou a temperaturas mais elevadas que favorecem a velocidade das reações químicas. Como na maioria das vezes a correlação destes resultados com os de envelhecimento natural é difícil, sua maior utilidade é comparativa.

Gram (1988) estudou argamassas reforçadas com fibra de sisal em componentes de cobertura executando ensaios de envelhecimento acelerado durante o período de 6 horas.

Marques (2015) desenvolveu um compósito cimentício reforçado com fibras de arumã com o intuito de agregar valor a uma planta típica da região Amazônica, denominada arumã, pertencente à espécie do gênero *Ischnosiphon arouma* (Aubl) Korn e originária da família Maranthaceae, de tal modo que possa ser obtido um Novo Material. Para avaliar a durabilidade do compósito, com relação às suas propriedades físicas e mecânicas, 14 corpos de prova de cada grupo estudado foram submetidos a 50 ciclos de envelhecimento acelerado de imersão e secagem, após o período de cura térmica. O objetivo dos ciclos foi simular a exposição do material a ataques naturais provocados pelos fenômenos climáticos, típicos de países tropicais.

Inúmeros são os estudos que enfocam a durabilidade em argamassas produzidas convencionalmente. Em relação à durabilidade de argamassas com incorporação de resíduos que sejam considerados recicláveis ou reutilizáveis, muitas pesquisas ainda precisam ser desenvolvidas de modo a se obter informações sobre o comportamento e as propriedades destes materiais ao longo do tempo para se ter informações precisas quanto à sua durabilidade.

Nos estudos que abordam o uso do lodo esgoto em argamassas, periódicos de divulgação de trabalhos científicos tais como Science Direct, Scielo, periódicos Capes, Scopus, etc, foram consultados e a bibliografia apresenta uma lacuna quanto ao estudo da durabilidade.

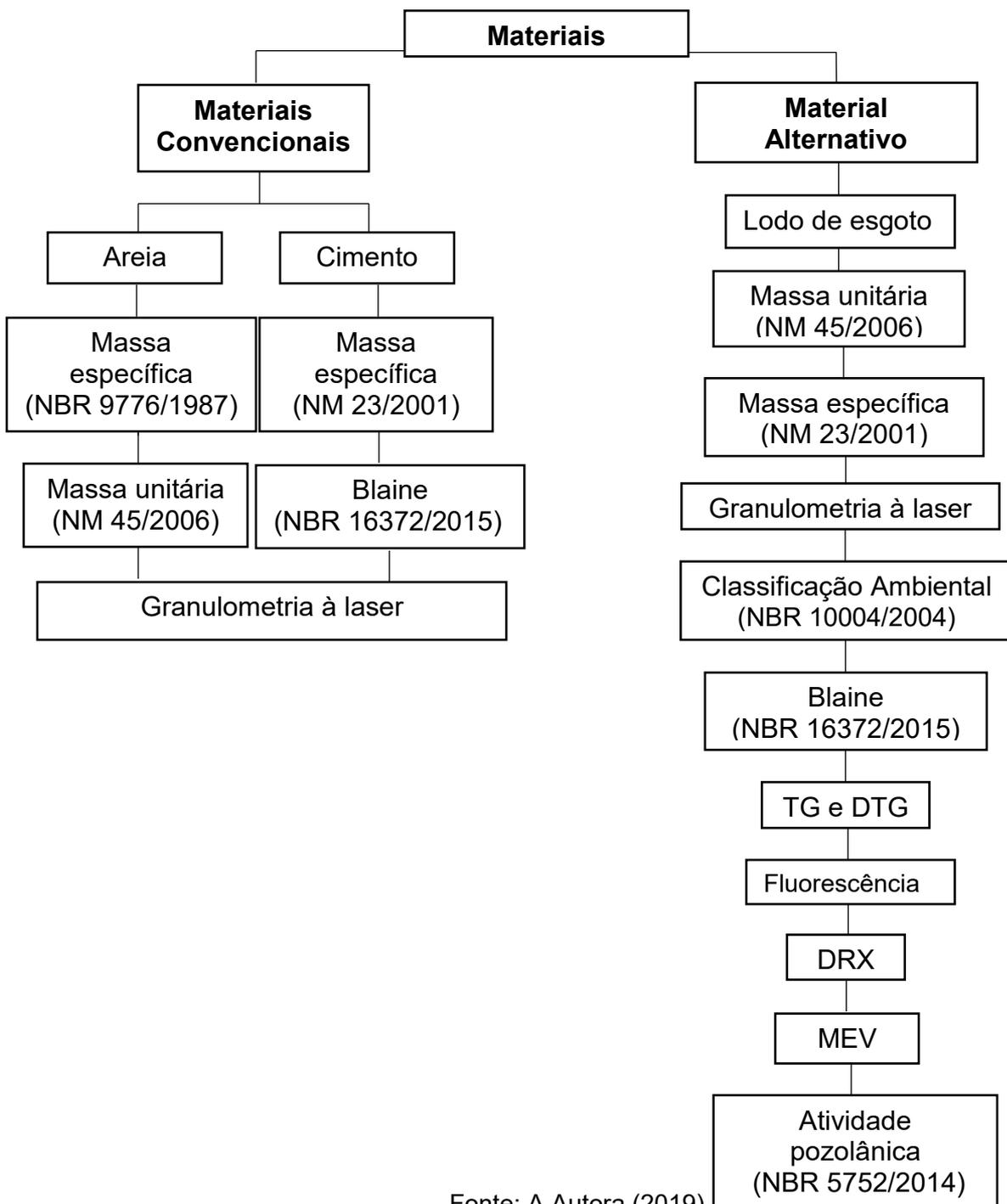
Acerca da revisão bibliográfica realizada, percebeu-se que os estudos voltados para o desempenho e durabilidade de materiais utilizados nas etapas da construção civil estão passando por avanços e ganhando cada vez mais espaço, principalmente os que são considerados não convencionais. Porém quando a referência está voltada para a produção de argamassas utilizando materiais não convencionais, objetivando a possibilidade de obtenção de resultados relacionados ao desempenho e principalmente à durabilidade quando comparadas com argamassas produzidas com materiais convencionais, as pesquisas ainda podem ser consideradas tímidas.

As pesquisas se encontram voltadas para a análise das propriedades de argamassas com incorporação de lodo de esgoto incinerado e não calcinado que pouco abrangem no mesmo estudo a análise das propriedades no estado fresco e endurecido, apresentando lacunas quanto ao estudo da incorporação do lodo calcinado com percentuais distintos e argamassas produzidas em proporções distintas. Este trabalho visa preencher estas lacunas.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A primeira fase do programa experimental consiste em caracterizar o lodo de esgoto e os materiais convencionais. A segunda fase corresponde à apresentação dos métodos utilizados para a produção das argamassas. O fluxograma representado na Figura 1 apresenta os ensaios realizados que objetivaram a caracterização dos materiais utilizados na presente pesquisa.

Figura 1-Ensaio para caracterização dos materiais utilizados



Fonte: A Autora (2019).

A partir dos resultados dos ensaios de caracterização realizados com o lodo de esgoto calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C apresentados na Figura 1, definiu-se a temperatura de calcinação do lodo para serem produzidas as argamassas experimentais, onde optou-se por utilizar o lodo calcinado na temperatura 800°C por ter correspondido aos critérios de pozolanicidade exigidos pela NBR 5752 (2014).

Apresentam-se os materiais empregados neste trabalho e a metodologia que foi utilizada.

### 3.1 MATERIAIS:

Os materiais utilizados foram:

a) **Cimento Portland:** O cimento utilizado foi o cimento do tipo CP II-F 40 (cimento Portland composto com filer calcário com resistência mecânica à compressão de 40 MPa, aos 28 dias após moldado). A opção por ele se deve ao fato de ser o único comercializado no Estado onde a pesquisa foi realizada produzido sem a existência de materiais pozolânicos em sua constituição.

b) **Água:** Utilizou-se água potável proveniente do fornecimento público.

c) **Agregado miúdo:** Como agregado miúdo utilizou-se areia natural oriunda da Cidade de Sobradinho –BA que foi seco em estufa a uma temperatura de 110°C, em seguida peneirado na peneira de abertura 4,8 mm sendo desprezado o material retido, objetivando, desta forma, diminuir a influência da zona de transição entre o agregado e a pasta.

d) **Lodo de esgoto:** As amostras de lodo de esgoto foram coletadas na forma líquida nas descargas dos reatores UASB da Estação de Tratamento de Esgotos - ETE Centro, da Companhia Pernambucana de Saneamento -COMPESA do município de Petrolina-PE (Figura 2) que usa o sistema de tratamento de nível anaeróbio utilizando-se reatores Upflow Anaerobic Sludge Blanket - UASB.

Figura 2-Descargas de lodo por meio dos reatores UASB



Fonte: A Autora (2019).

A estação de tratamento foi escolhida por ter sido a COMPESA a primeira empresa de saneamento do Brasil a conquistar a Certificação NBR 14001 (2015) - Sistemas de Gestão Ambiental, concedida pela empresa alemã BRT'UV-TUV Nord Group, em função das práticas sustentáveis e do comprometimento da Companhia em atender aos padrões internacionais de gestão ambiental, sendo a ETE Centro, a primeira a ser contemplada com a certificação.

Localizada em Petrolina-PE, a ETE Centro recebeu a certificação devido à adoção de práticas sustentáveis tanto em sua gestão, quanto na execução das operações, comportamentos, procedimentos e exigências para avaliação e controle dos impactos ambientais das suas atividades.

O objetivo da NBR 14001 (2015) é permitir que as organizações que a adotam respondam às necessidades cada vez mais exigentes de proteção ambiental, com a implementação de uma política ambiental que especifica competências que promovam o conceito da sustentabilidade.

A ETE Centro recebe a maior parte da vazão da Cidade de Petrolina e atende a uma população de aproximadamente 130 mil habitantes e opera em conformidade e de acordo com todos os parâmetros preconizados na Resolução n° 430/2011 do CONAMA que dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes.

No tocante à secagem e calcinação do lodo *in natura*, as amostras do lodo (Figura 3) foram mantidas na estufa aos 110°C durante o período de 24 horas até que ocorresse a evaporação da água de constituição, ficando apenas os sólidos.

Figura 3- Lodo *in natura* preparado para estufa



Fonte: A Autora (2019).

A cinza do lodo de esgoto foi obtida a partir da calcinação, utilizando-se uma mufla de marca Thermo Kiln, modelo KK260 SO 1060 (Figura 4).

Figura 4- Mufla utilizada para a calcinação



Fonte: A Autora (2019).

O lodo oriundo da ETE Centro foi calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C, pelo período de três horas. Definiu-se temperaturas distintas de calcinação devido à ausência de trabalhos na literatura com essa metodologia. A definição acerca do tempo de calcinação baseou-se na metodologia de Pan et al. (2003) que estudou a incorporação de 20% de lodo incinerado na temperatura 700°C

objetivando estudar as propriedades das argamassas quanto à resistência à compressão e trabalhabilidade em conformidade com a Sociedade Americana de Testes e Materiais -ASTM.

Figura 5- Lodo calcinado na temperatura 900 °C



Fonte: A Autora (2019).

Após a calcinação na mufla nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C, a cinza do lodo de esgoto passou pelo processo de moagem em um moinho de bolas de bancada a uma velocidade de 30 rpm (Figura 6), objetivando a redução de sua granulometria. A definição acerca do tempo de moagem baseou-se no trabalho de Pan et al. (2003).

Figura 6- Moinho de bolas e lodo calcinado a 900° C após moagem



Fonte: A Autora (2019).

Amostras do lodo calcinado passaram pelo processo de moagem pelo período de 6 horas e posteriormente foram encaminhadas para as análises de caracterização. O lodo calcinado passou pelo processo de peneiramento até obter-se o passante na malha #200 mesh (0,075 mm).

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO

A caracterização da areia utilizada foi executada por meio de massa específica NBR 9776 (1987), massa unitária NM 45 (2006) e granulometria por difração à laser (equipamento CILAS 1064 -Particle Size Analyzer).

O cimento foi caracterizado por meio de massa específica NM 23 (2001), granulometria por difração à laser e determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar -método de Blaine NM 16372 (2001).

O lodo de esgoto calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800 °C e 900 °C foi caracterizado por meio de massa unitária NBR 45 (2006), massa específica NM 23 (2001), e determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar -método de Blaine NM 16372 (2001), classificação ambiental, granulometria por difração à laser ( equipamento CILAS 1064 -Particle Size Analyzer e o Mastersizer 2000 da Malvern); difração de Raio X ( equipamento LAB XRay Diffractometer 6000 da Shimadzu, com radiação monocromática de cobre), termogravimetria e análise térmica diferencial -TGA/DTA (obtida por meio de curvas termogravimétricas em uma termobalança modelo SHIMADZU TGA-60 em atmosfera de nitrogênio com cadinho de alumina, fluxo de 50 ml/min e razão de aquecimento 10°C/min, em uma faixa de temperatura que variou da ambiente até 1000°C ).

O lodo foi caracterizado ainda por meio da técnica de análise química por fluorescência de raios X (análise semiquantitativa dos óxidos e elementos presentes nas amostras do sistema Ni<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> determinados por espectroscopia de fluorescência de raios X por energia dispersiva modelo EDX-720, da marca Shimadzu por energia dispersiva –EDX) e a atividade pozolânica NBR 5712 (2014).

As imagens do MEV foram obtidas com um microscópio eletrônico de varredura -MEV Jeol JSM-IT300 operado em baixo vácuo, com tensão de aceleração de elétrons de 15kV, no modo de elétrons retroespalhados -BED. As amostras foram fixadas sobre porta amostras de alumínio e não receberam recobrimento condutor.

A análise do tamanho de cristalito  $D_{hkl}$  para cada conjunto da família de planos  $\{hkl\}$  se dá conforme a equação de Scherrer (equação 1) (AZÁROFF, 1968).

$$D_{hkl} = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

Onde  $k$  é o coeficiente de forma do ponto da rede recíproca (0,9-1,0),  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação a ser utilizada (1,54Å),  $\beta$  é a largura a meia altura do pico (FWHM) e  $\theta$  o ângulo de difração. O parâmetro  $\beta$  deve ser corrigido utilizando a equação 2:

$$\beta = \sqrt{\beta_{\text{exp}}^2 - \beta_{\text{inst}}^2} \quad (2)$$

Onde  $\beta_{\text{inst}}$  é a largura instrumental extraída da amostra padrão que tenha um tamanho de partícula muito grande ( $\sim 6\mu\text{m}$ ), para este propósito foi usado LaB<sub>6</sub> (NIST), e  $\beta_{\text{exp}}$  é a largura experimental da amostra analisada.

A seguir, os resultados e discussões relativos às caracterizações dos materiais utilizados na presente pesquisa são apresentados.

### 3.2.1 Massa específica

A Tabela 2 apresenta a massa específica da areia, do cimento Portland e do lodo calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C.

Tabela 2- Massa específica dos materiais utilizados

<b>Amostras</b>	<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Areia	2,67
Cimento Portland	3,07
Lodo calcinado a 600°C	2,68
Lodo calcinado a 700°C	2,69
Lodo calcinado a 800°C	2,71
Lodo calcinado a 900°C	2,76

Fonte: A Autora (2019).

Das amostras de lodo, como mais denso, tem - se o lodo de esgoto calcinado na temperatura 900°C com 2,76 g/cm<sup>3</sup> de massa específica e o menos denso, o lodo calcinado a 600°C apresentando 2,68 g/cm<sup>3</sup> de massa específica. O aumento da temperatura de calcinação promoveu o aumento da massa específica do lodo de esgoto. Lynn et al, (2015) nos estudos sobre características das cinzas de lodo de esgoto e potencial para uso em concreto afirmaram que o aumento da densidade do lodo é diretamente proporcional à temperatura de incineração até os 1000°C.

Obedecendo às recomendações da NM 23 (2001), as amostras de cimento Portland e de lodo de esgoto calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e

900°C foram analisadas por duas vezes cada e não diferiram entre si em mais do que 0,01 g/cm<sup>3</sup> em relação à média.

Fontes, Toledo Filho e Barbosa (2016) utilizaram cinza de lodo de esgoto em concretos de alto desempenho, para tanto, o lodo in natura foi desidratado por centrifugação com a adição de polieletrólitos e calcinado a 550°C em forno mufla, com taxa de aquecimento de 10°C/min e tempo de residência de 3 horas. Ao analisarem a massa específica do lodo obtiveram como resultado 2,68 g/cm<sup>3</sup>. Mesmo com distinção dos métodos utilizados para obtenção da cinza, o valor obtido no estudo foi semelhante ao do lodo da presente pesquisa que foi calcinado na temperatura 600°C.

### 3.2.2 Massa unitária

A Tabela 3 apresenta a massa unitária da areia, do cimento e lodo calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C.

Tabela 3 - Massa unitária da areia e do lodo calcinado

<b>Amostras</b>	<b>Massa Unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Areia	1,53
Lodo calcinado a 600°C	0,82
Lodo calcinado a 700°C	0,78
Lodo calcinado a 800°C	0,75
Lodo calcinado a 900°C	0,76

Fonte: A Autora (2019).

O lodo de esgoto calcinado na temperatura 600°C apresentou maior massa unitária e o lodo calcinado a 800°C apresentou menor massa unitária. Os resultados das amostras analisadas não apresentaram desvio maior que 1% em relação à média conforme as recomendações da NBR NM 45 (2006).

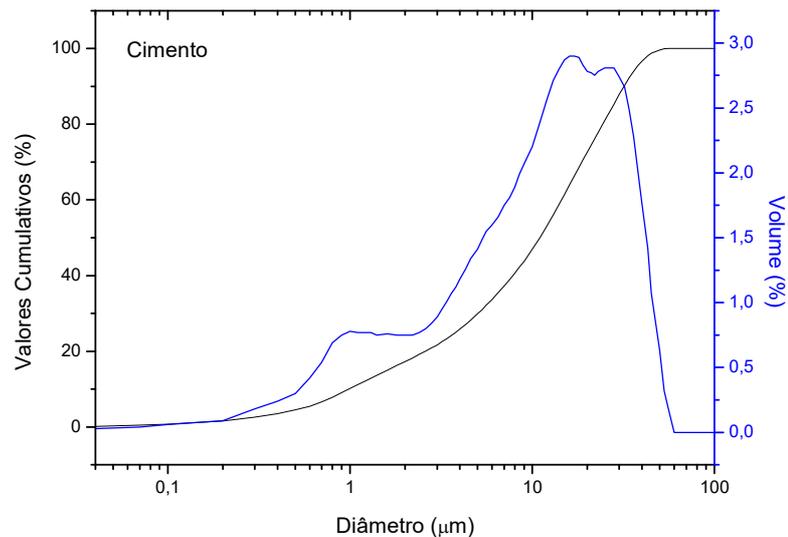
Morales (1997), em seu estudo objetivando o aproveitamento do lodo de esgoto sanitário como matéria-prima para a produção de material pozolânico, analisou a massa unitária do lodo de esgoto calcinado na temperatura 800°C e obteve como resultado 0,75 g/ cm<sup>3</sup>, mesmo valor da massa unitária do lodo calcinado na temperatura 800°C analisado neste trabalho.

### 3.2.3 Análise Granulométrica

#### A) Granulometria por difração à laser do cimento

Na Figura 7 têm-se a distribuição granulométrica do cimento.

Figura 7-Granulometria por difração à laser do Cimento



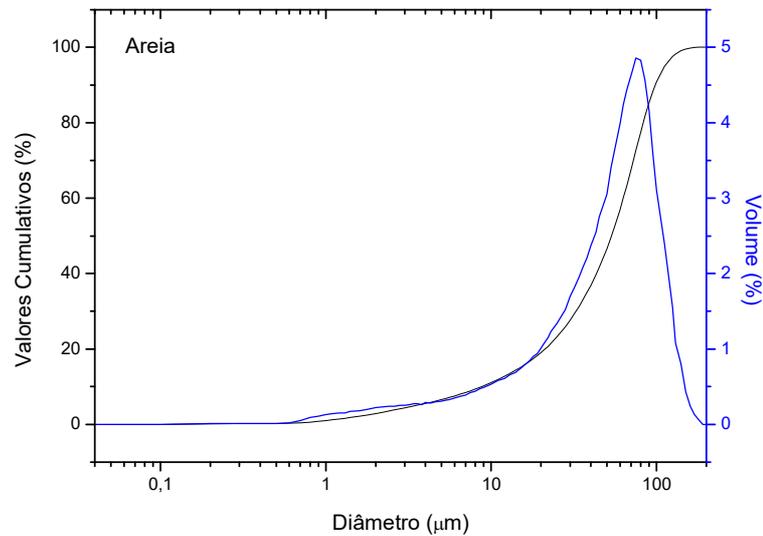
Fonte: A Autora (2019).

Na Figura 7 observa-se uma curva com distribuição larga, trimodal e assimétrica. Observa-se um tamanho de aglomerado médio 13,89  $\mu\text{m}$ , revelando que o mesmo apresenta 10% do seu volume em granulometria inferior a 0,98  $\mu\text{m}$  e 50% das partículas possuem valores menores que 10,99  $\mu\text{m}$  e 90% das partículas possuem valores menores que 31,85  $\mu\text{m}$ .

#### B) Granulometria por difração à laser da areia

Na Figura 8 têm-se a distribuição granulométrica para a areia.

Figura 8- Granulometria à laser da areia utilizada



Fonte: A Autora (2019).

Pode-se observar uma curva com distribuição estreita e monomodal, com um tamanho de aglomerado ( $D_{50}$ ) de 54,22  $\mu\text{m}$ . Observa-se que a areia apresenta 10% do seu volume em granulometria inferior a 8,79 $\mu\text{m}$  e 50% das partículas possuem valores menores que 53,36  $\mu\text{m}$  e 90% das partículas possuem valores menores que 98,36  $\mu\text{m}$ .

De acordo com Almeida et al. (2012) a textura do solo é definida pela proporção relativa das classes de tamanho de partículas de um solo. A fração areia pode ainda ser subdividida em cinco frações, usadas para a definição da classe de textura dos solos:

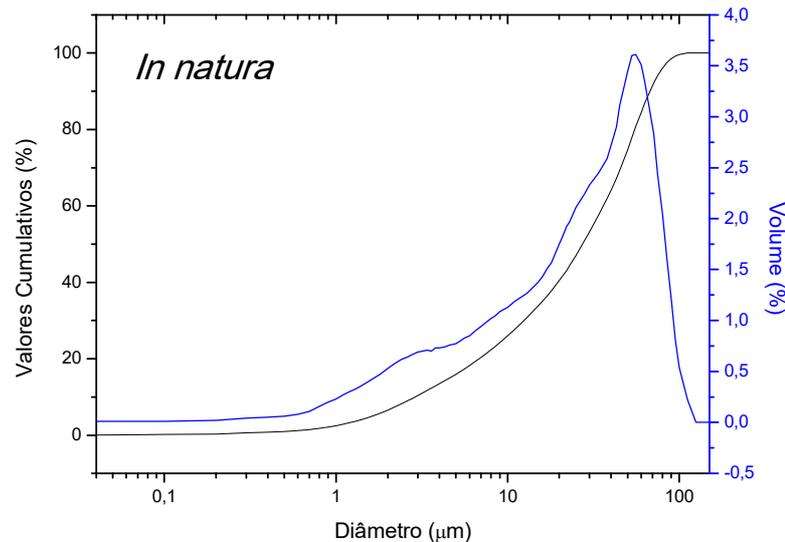
- a) Areia muito grossa – 2,00 a 1,00 mm ou 2000 a 1000  $\mu\text{m}$
- b) Areia grossa – 1 a 0,5 mm ou 1000 a 500  $\mu\text{m}$
- c) Areia Média - 0,5 a 0,21 mm ou 500 a 210  $\mu\text{m}$
- d) Areia fina – 0,21 a 0,10 mm ou 210 a 100  $\mu\text{m}$
- e) Areia muito fina – 0,10 – 0,05 mm ou 100 a 50  $\mu\text{m}$ .

Logo, de acordo com Almeida et al. (2012), a areia utilizada nesse trabalho é considerada uma areia fina.

### C) Granulometria por Difração à laser do lodo de esgoto *in natura*

A Figura 9 apresenta a análise granulométrica à laser do lodo de esgoto *in natura*, observa-se um volume tamanho médio de partícula ( $D_{50}$ ) de 27,32  $\mu\text{m}$ . Observa-se uma curva com distribuição estreita, bimodal e assimétrica.

Figura 9- Granulometria à laser do lodo de esgoto *in natura*



Fonte: A Autora (2019).

O lodo *in natura* apresenta 18% das partículas na faixa de tamanho fração argila ( $< 2 \mu\text{m}$ ), 52% de silte ( $2 \mu\text{m} \leq x < 63 \mu\text{m}$ ) e 30% de areia fina ( $63 \mu\text{m} \leq x < 150 \mu\text{m}$ ). A alta quantidade de partículas  $< 2 \mu\text{m}$  está fundamentalmente relacionada à presença de argilominerais, principalmente de caulinita.

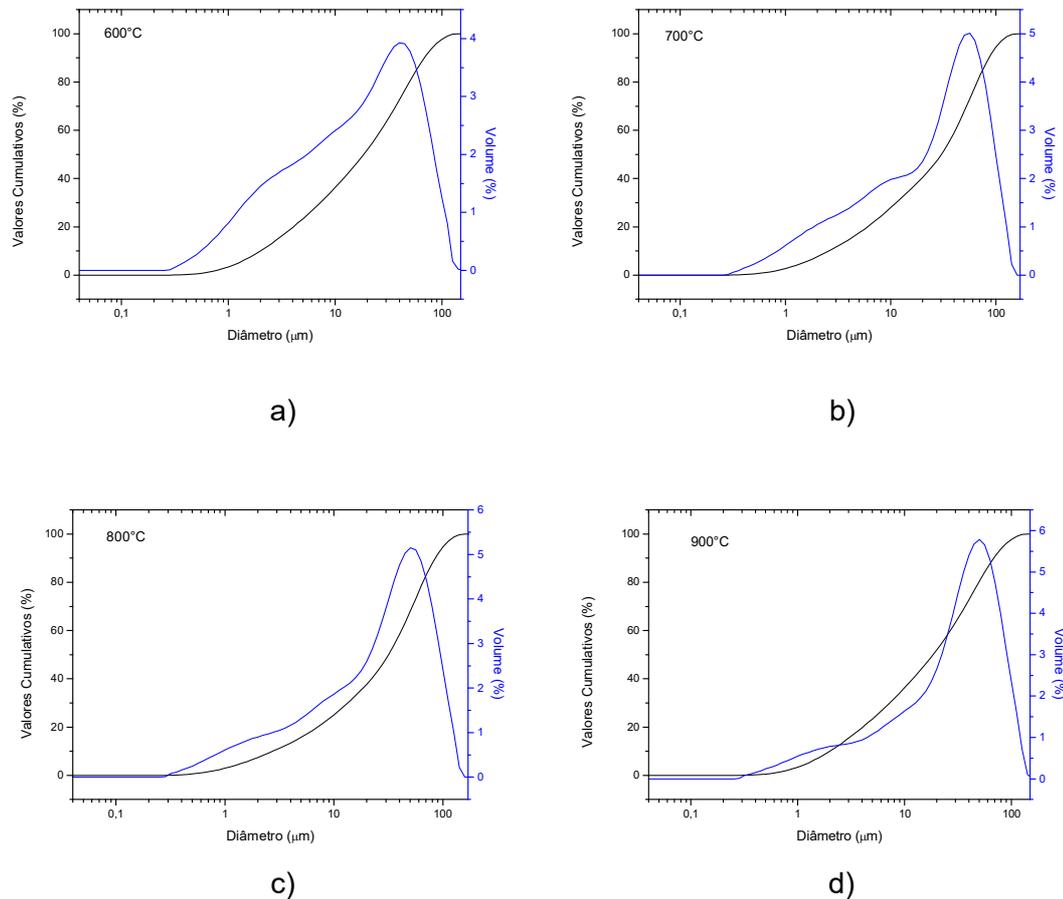
Este tamanho de partícula corresponde à fração argila em algumas escalas internacionais para classificação de solos (SANTOS, 1989).

### D) Granulometria por difração à laser do lodo de esgoto calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C

A Figura 10 apresenta a análise granulométrica por difração à laser do lodo de esgoto calcinado nas temperaturas a) 600° C, b) 700° C, c) 800° C e d) 900° C. Observa-se que o aumento na temperatura de calcinação resulta no estreitamento da curva de distribuição granulométrica, pois houve um aumento no tamanho das partículas com o aumento da temperatura de calcinação e as partículas tendem a crescer, formando aglomerados mais resistentes com menos porosidade

interpartícula. Isso faz com que a curva de distribuição granulométrica seja mais estreita e uniforme.

Figura 10- Distribuição granulométrica de lodo de esgoto calcinado nas temperaturas a)600°C, b)700°C, c)800°C e d)900°C



Fonte: A Autora (2019).

Para o lodo de esgoto calcinado a 600°C observa-se uma curva de distribuição granulométrica, com distribuição estreita, bimodal e assimétrica; para o lodo de esgoto calcinado a 700°C, a curva apresenta-se com distribuição estreita, bimodal e assimétrica; já o lodo de esgoto calcinado a 800°C, observa-se em seu resultado, uma curva com distribuição estreita, monomodal e assimétrica semelhante à do lodo de esgoto calcinado a 900°C.

O valor para o diâmetro esférico equivalente, obtidos a 50% de massa acumulada foi 18,46 μm para o lodo de esgoto calcinado a 600°C; 30,27 μm para o lodo de esgoto calcinado a 700°C; 31,72 μm para o lodo de esgoto calcinado a 800°C e 34,99 μm para o lodo de esgoto calcinado a 900°C.

O lodo de esgoto calcinado a 600°C apresenta 40% das partículas na faixa de tamanho fração argila ( $< 2 \mu\text{m}$ ), 30% de silte ( $2 \mu\text{m} \leq x < 63 \mu\text{m}$ ) e 18% de areia fina ( $63 \mu\text{m} \leq x < 160 \mu\text{m}$ ), onde a alta quantidade de partículas finas provoca a assimetria da curva de distribuição granulométrica; o calcinado a 700°C apresenta 40% das partículas na faixa de tamanho fração argila ( $< 2 \mu\text{m}$ ), 30% de silte ( $2 \mu\text{m} \leq x < 63 \mu\text{m}$ ) e 18% de areia fina ( $63 \mu\text{m} \leq x < 160 \mu\text{m}$ ); o calcinado a 800°C apresenta 40% das partículas na faixa de tamanho fração argila ( $< 2 \mu\text{m}$ ), 30% de silte ( $2 \mu\text{m} \leq x < 63 \mu\text{m}$ ) e 18% de areia fina ( $63 \mu\text{m} \leq x < 160 \mu\text{m}$ ) e o lodo de esgoto calcinado a 900°C apresenta 40% das partículas na faixa de tamanho fração argila ( $< 2 \mu\text{m}$ ), 30% de silte ( $2 \mu\text{m} \leq x < 63 \mu\text{m}$ ) e 18% de areia fina ( $63 \mu\text{m} \leq x < 160 \mu\text{m}$ ).

As amostras de lodo calcinado analisadas a 600°C, 700°C, 800°C e 900°C apresentam alta quantidade de partículas ( $\approx 40 \mu\text{m}$ ) menor que  $2 \mu\text{m}$ . De acordo com Vieira et al. (2007), este comportamento está fundamentalmente relacionado à presença de argilominerais, principalmente de caulinita, (com presença comprovada de caulinita conforme os resultados de difração raios X).

Resultados aproximados foram obtidos por Oliveira, Machado e Holanda (2004) que caracterizaram o lodo natural (bruto) submetendo-o a processo de secagem em estufa por 24 horas. Em seguida o resíduo seco foi destorroado e peneirado, constituindo-se na amostra de trabalho visando sua utilização em cerâmica vermelha. Os autores observaram uma alta quantidade de partículas ( $\approx 45 \mu\text{m}$ ) menor que  $2 \mu\text{m}$  tendo como conteúdo de silte ( $2 \leq x < 60 \mu\text{m}$ ) da ordem de 41% e o conteúdo da fração areia ( $60 \leq x < 600 \mu\text{m}$ ) apresentando cerca de 14%.

A tabela 4 reporta o tamanho dos diâmetros das partículas de acordo com os índices de distribuição de tamanho de partícula D10, D50 e D90, das amostras do lodo calcinado em estudo. Os parâmetros D10 e D90 estão relacionados aos diâmetros de corte da curva de distribuição acumulada em 10% e 90%, respectivamente, enquanto que, o parâmetro D50 está relacionado à mediana da distribuição e corresponde ao diâmetro médio de partícula.

Tabela 4- Diâmetros das partículas das amostras de lodo em diferentes condições

Amostras	D (10 %) ( $\mu\text{m}$ )	D (50 %) ( $\mu\text{m}$ )	D (90 %) ( $\mu\text{m}$ )
Lodo calcinado a 600°C	2,00	18,46	68,33
Lodo calcinado a 700°C	2,59	30,27	85,72
Lodo calcinado a 800°C	2,75	31,71	85,14
Lodo calcinado a 900°C	3,22	34,99	83,79

Fonte: A Autora (2019).

Para o tamanho médio de aglomerado, a amostra do lodo calcinado a 900°C apresentou um D50 maior em relação às demais amostras de lodo, ou seja, a temperatura de calcinação favoreceu o crescimento das partículas, pois há uma organização na estrutura do material, unindo as partículas umas às outras, sofrendo um processo de aglomeração, mediante o aumento da temperatura de calcinação (SILVA, CHINELATTO e CHINELATTO, 2015).

### 3.2.4 Determinação da Finura pelo Método de Permeabilidade ao Ar (Método de Blaine)

A Tabela 5 apresenta o resultado da determinação da finura de pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine) para o cimento Portland CP II-F 40 composto por filer calcário utilizado para a produção das argamassas com 4,120 m<sup>2</sup>/kg, estando dentro dos padrões estabelecidos pela NBR 16372 (2015).

Tabela 5- Determinação da superfície específica

<b>Amostras</b>	<b>Superfície específica (cm<sup>2</sup>/g)</b>
Cimento	4,120
Lodo calcinado a 600°C	3,450
Lodo calcinado a 700°C	3,670
Lodo calcinado a 800°C	3,730
Lodo calcinado a 900°C	3,810

Fonte: A Autora (2019).

O aumento da temperatura de calcinação ocasionou o aumento da superfície específica do lodo. O mesmo aumento foi verificado no tocante à massa específica. Lynn et al. (2015) em seus estudos sobre incorporação de lodo em concreto afirmou que a moagem e/ou peneiramento do material contribuem para o aumento da superfície específica e que o aumento da densidade de acordo com o aumento da temperatura de calcinação está relacionado a uma redução no espaço dos poros causada pelo processo de vitrificação.

### 3.2.5 Classificação Ambiental

A Tabela 6 apresenta os dados de solubilização, referentes ao ensaio de classificação ambiental.

Tabela 6- Classificação ambiental: Solubilização

Parâmetro/ Poluente	Calcinação 600°C	Calcinação 700°C	Calcinação 800°C	Calcinação 900°C	Limite máximo no extrato mg/l
Chumbo	0,01	0,01	-	-	0,01
Selênio	0,01	-	-	-	0,01
Prata	0,06	0,06	0,04	0,03	0,05
Fluoreto	1,6	1,5	1,4	1,4	1,5
Cádmio	0,04	-	-	-	0,005
Cromo	0,03	0,03	-	-	0,05
Mercúrio	0,001	-	-	-	0,001
Zinco	0,003	0,002	-	-	5,0

Fonte: A Autora (2019).

Em relação à classificação ambiental do lodo de ETE utilizado, no tocante ao extrato solubilizado, o mesmo não apresentou parâmetros superiores aos que constam no anexo G da NBR 10004 (2004) (Tabela 6). Logo, o lodo de esgoto utilizado nesta pesquisa classifica-se como resíduo II A – não inerte.

Acerca dos resultados do extrato lixiviado, o lodo de esgoto não apresentou parâmetros superiores aos que constam no anexo F da NBR 10004 (2004) (Tabela 7), sendo classificado o lodo como resíduo II – não perigoso.

Tabela 7- Classificação ambiental: Lixiviação

Parâmetro/ Poluente	Código de identificação	Calcinação 600°C	Calcinação 700°C	Calcinação 800°C	Calcinação 900°C	Limite máximo no extrato mg/l
Arsênio	D005	0,01	0,01	-	-	1,0
Bário	D006	0,01	-	-	-	70,0
Cádmio	D007	0,06	0,06	0,04	0,03	0,5
Chumbo	D008	1,6	1,5	1,4	1,4	1,0
Cromo total	D009	0,04	-	-	-	5,0
Fluoreto	D010	0,03	0,03	-	-	150,0
Mercúrio	D011	-	-	-	-	0,1
Prata	D012	0,001	-	-	-	5,0
Selênio	D013	0,02	0,02	-	-	1,0

Fonte: A Autora (2019).

Como resultados de pH do extrato lixiviado tem-se 5,68 e o pH do extrato solubilizado 7,28. Um resíduo é caracterizado como corrosivo (código de identificação D002) se sua amostra representativa, obtida segundo a NBR 10007 (2004), apresentar pH inferior ou igual a 2, ou, superior ou igual a 12,5. Desta

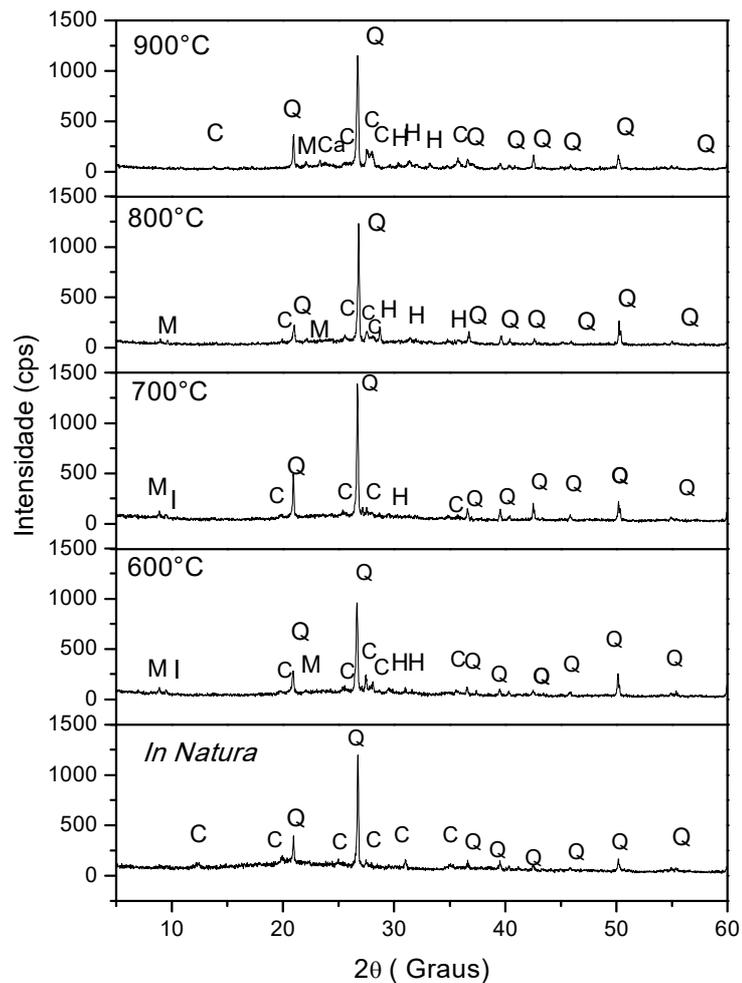
forma, pode-se afirmar que o lodo de ETE utilizado não pode ser classificado como tóxico e conseqüentemente, como perigoso (classe I).

### 3.2.6 Difração de Raio X do lodo de esgoto

As amostras do lodo de esgoto foram caracterizadas quanto à estrutura por difração de raios X. A partir dos dados de difração realizou-se a identificação das fases formadas, cálculo do tamanho de cristalito e cristalinidade.

A Figura 11 ilustra os difratogramas de raios X dos lodos de esgotos *in natura* e calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C.

Figura 11- Difratogramas de raios X dos lodos de esgotos *in natura* e calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C (M-Muscovita, H- Hematita, Q-Quartzo, C-Caulinita, I-Ilita, Ca-Silicato de Cálcio)



Fonte: A Autora (2019).

O difratograma do lodo *in natura* apresenta picos característicos de fase cristalina. Pode-se observar a predominância de caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) de acordo com a ficha JCPDS (79-1570) e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) de acordo com a ficha JCPDS (46-1045).

No difratograma de raios X do lodo calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C pode-se observar picos característicos de fase cristalina, e a predominância da fase cristalina quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) (46-1045), indicado pela fase majoritária. Observa-se ainda a ocorrência de caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) (79-1570), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (89-0599) e muscovita ( $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) (84-1306).

No caso do lodo calcinado nas temperaturas 600°C e 700°C, observou-se a presença de ilita ( $\text{KAl}_4(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{10}(\text{OH})_4$ ) (35-0652) e para o lodo calcinado a 900°C observou-se a presença de traços de Silicato de Cálcio ( $\text{CaSiO}_3$ ) (31-0300).

Lynn et al (2015) perceberam que nos estudos sobre características da cinza de lodo de esgoto seu potencial para uso em concreto, o quartzo e hematita foram identificados como os mais abundantes minerais presentes comprovando ser viável seu uso como componente do cimento. Seus resultados corroboram com os resultados obtidos nos difratogramas de raios X do lodo calcinado utilizado deste trabalho.

A Tabela 8 ilustra o tamanho médio de cristalito e cristalinidade obtido mediante os difratogramas de raios X obtidos a partir de um padrão interno de silício policristalino. A difração acontece nos cristais por que os átomos se ordenam periodicamente em planos cristalinos entre si por uma distância da mesma ordem de grandeza dos comprimentos da onda dos raios x (MOURA, 2015).

Tabela 8- Cristalinidade e tamanho médio de cristalito do lodo em diferentes condições

<b>Característica do lodo</b>	<b>Cristalinidade (%)</b>	<b>Tamanho médio de cristalito (nm)</b>
Lodo in natura	73,08	81
Lodo calcinado a 600°C	98,09	68
Lodo calcinado a 700°C	97,9	88
Lodo calcinado a 800°C	91,6	71,4
Lodo calcinado a 900°C	99,05	49,4

Fonte: A Autora (2019).

Observa-se que, a temperatura de calcinação induziu a um aumento da cristalinidade do material, visto que o lodo calcinado a 900°C apresentou o maior

aumento. Segundo Costa et al (2006), é sabido que temperaturas mais elevadas induzem a uma maior energia de ativação favorecendo a uma maior cristalinidade. Conforme Callister (2008), a intensidade difratada é dependente do número de elétrons no átomo; adicionalmente, os átomos são distribuídos no espaço de tal forma que os vários planos de uma estrutura cristalina possuem diferentes densidades de átomos ou elétrons, fazendo com que as intensidades difratadas sejam, por consequência, distintas para os diversos planos cristalinos.

Pode-se observar que os picos de reflexões basais são mais intensos para os lodos calcinados, indicando assim maior cristalinidade dos lodos calcinados quando comparados com o lodo *in natura*.

Observa-se através da Tabela 8 que o lodo calcinado a 800°C apresentou maior tamanho de cristalito e que os picos de difração são de intensidade elevada e estreitos, mostrando que trata-se de um material altamente cristalino. Esse mesmo comportamento é observado para o lodo *in natura*. Porém nota - se que o lodo calcinado a 600°C e 900°C apresentaram uma redução nas intensidades dos picos de difração, indicando assim a diminuição do tamanho de cristalito. O tamanho de cristalito médio foi calculado a partir do pico de reflexão basal de raios X, onde utilizou-se a largura a meia altura do pico de difração, então quanto mais alargado o pico reflexão basal de raios X, menor será o tamanho de cristalito.

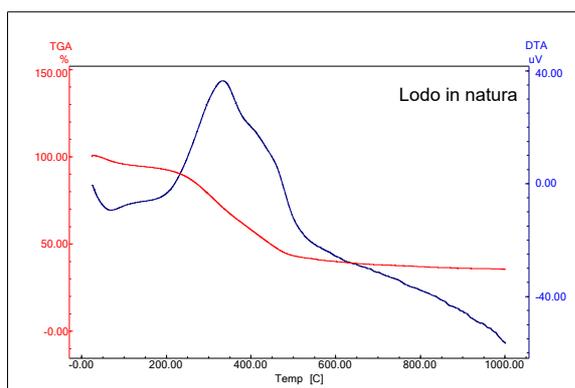
Esse comportamento também foi observado por Lula et al. (2005) quando estudaram catalisadores cerâmicos de  $ZnAl_{2-x}Fe_xO_4$ . Observaram que, o alargamento dos picos de reflexão basais indicam a diminuição do tamanho de cristalito.

### **3.2.7 Termogravimetria e análise térmica diferencial (TGA/DTA)**

#### **A) Lodo *In natura***

A Figura 12 apresenta a termogravimetria da amostra do lodo *in natura*.

Figura 12- Termogravimetria e análise térmica diferencial do lodo in natura



Fonte: A Autora (2019).

Para a amostra lodo *in natura* (Figura 12), pode-se observar uma perda de massa total equivalente à massa percentual de 64,44 % em três etapas de decomposição.

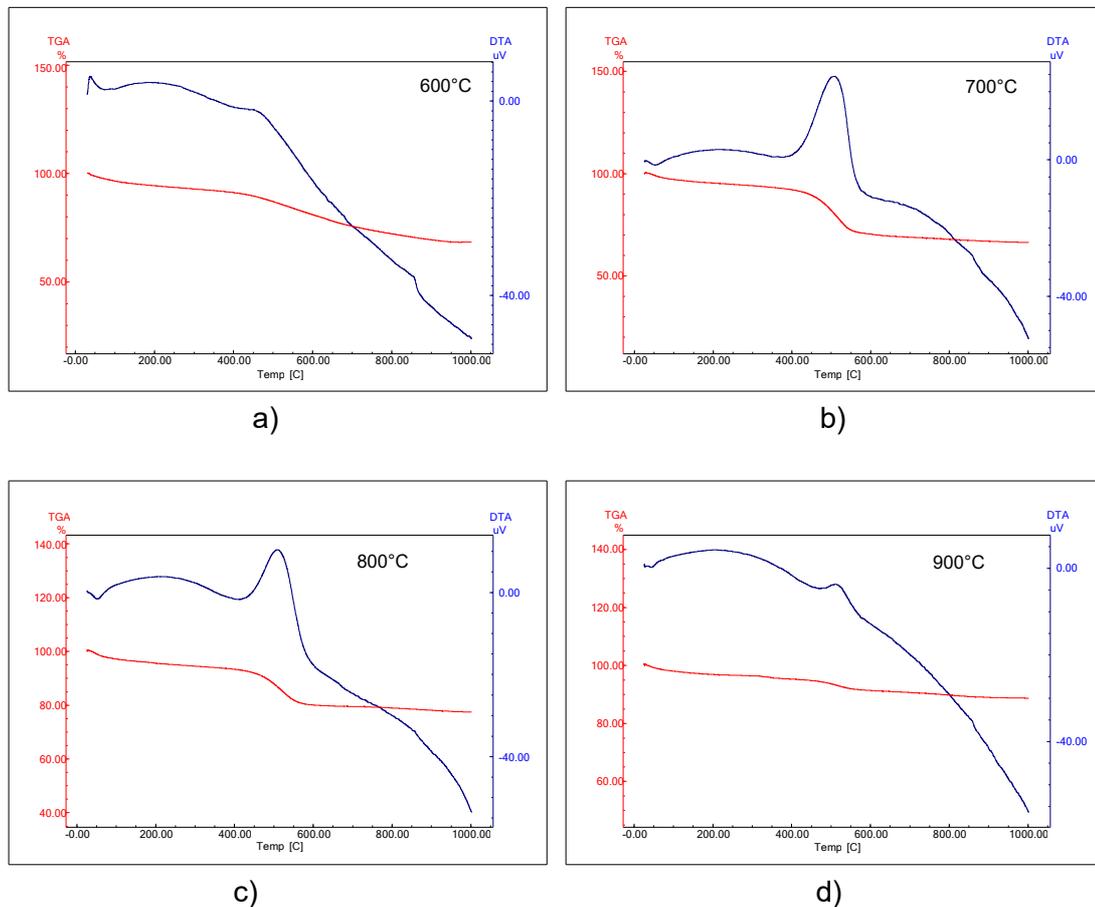
A primeira etapa da perda ocorreu na faixa de 26°C a 100°C com perda de massa de 5,04% associada à água e gases adsorvidos. A segunda etapa ocorre entre 100°C e 581°C com perda de 55,46% e a terceira etapa ocorre entre 581°C e 1000°C com a perda de 4,68%.

De acordo com Santos (1989), o vale endotérmico na temperatura de 491°C está associado principalmente à desidroxilação da caulinita, levando à formação de metacaulinita. Um pequeno pico exotérmico não associado à perda de massa foi observado em torno de 1000°C e deve-se fundamentalmente à quebra da estrutura da metacaulinita para a formação de novas fases cristalinas tais como  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e/ou mulita primária.

## B) Lodo calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C

Tem-se na Figura 13 a termogravimetria e análise térmica diferencial (TGA/DTA) do lodo calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C.

Figura 13- Termogravimetria e análise térmica diferencial do lodo calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C



Fonte: A Autora (2019).

Para a amostra lodo calcinado a 600°C pode-se observar uma perda de massa total equivalente a massa percentual de 31,58 %, em quatro etapas de decomposição. A primeira etapa ocorreu na faixa de 30°C a 65°C com perda de massa de 2,18%, correspondente à remoção de água fisicamente adsorvida, típico de materiais argilosos. A segunda etapa ocorre entre 65°C e 403°C com perda de 6,87%. Este evento pode estar relacionado à desidratação de hidróxidos existentes. A terceira etapa ocorre entre 403°C e 763°C com a perda de 17,79%, este evento pode estar relacionado à decomposição de matéria orgânica e está associado principalmente à desidroxilação da caulinita, levando à formação de metacaulinita. E a quarta etapa ocorre entre as temperaturas 763°C e 1000°C com perda de massa 5,03 %.

Cordeiro (2001), ao verificar a possibilidade de produção de concreto de alto desempenho utilizando materiais pozolânicos, observou que a desidroxilação da caulinita ocorre em torno de 500°C.

Para a amostra lodo calcinado a 700°C pode-se observar uma perda de massa total equivalente à massa percentual de 33,82 %, em quatro etapas de decomposição. A primeira etapa ocorreu na faixa de 25°C a 83°C com perda de massa de 2,53%, associada à água e gases adsorvidos. A segunda etapa ocorre entre 83°C e 389°C com perda de 5,35%, provavelmente associado ao composto sulfato de alumínio perder água quimicamente ligada por volta de 300°C. A terceira etapa ocorre entre 389°C e 591°C com a perda de 21,83%, representado por um pico exotérmico na curva DTA em 509°C; essa perda é associada à matéria orgânica e a desidroxilação da caulinita; e a quarta etapa ocorre entre as temperaturas 591°C e 1000°C com perda de massa 4,34 %.

Para o lodo calcinado a 800°C observa-se perda de massa total equivalente à massa percentual de 22,64%, em quatro etapas de decomposição. A primeira etapa ocorreu na faixa de 25°C e 94°C com perda de massa de 2,73%, representado por um pico endotérmico na curva DTA em 51,92°C, associada à água e gases adsorvidos. A segunda etapa ocorre entre 94°C a 421°C com perda de 4,42% provavelmente associado ao composto sulfato de alumínio perder água quimicamente ligada por volta de 300°C. A terceira etapa ocorre entre 421°C e 639°C com a perda de 13,17%, representado por um pico exotérmico na curva DTA em 508 °C, associada à matéria orgânica e à desidroxilação da caulinita; e a quarta etapa ocorre entre as temperaturas 639°C e 1000°C com perda de massa 2,32 %.

Para o lodo calcinado a 900°C observa-se perda de massa total equivalente à massa percentual de 11,37%, em três etapas de decomposição. A primeira etapa ocorreu na faixa de 26°C a 351°C com perda de massa de 4,57%, correspondente à remoção de água fisicamente adsorvida tipicamente observada em materiais argilosos e desidratação de hidróxidos. A segunda etapa ocorre entre 351°C a 555°C com perda de massa 3,81%, representando por pico exotérmico na curva DTA em 512°C e associada à desidroxilação da caulinita. A terceira etapa ocorre entre 555°C e 1000°C com a perda de massa 3,18%.

A Tabela 9 apresenta as perdas de massa do lodo calcinado a 600°C, 700°C, 800°C e 900°C que ocorreram em suas etapas de decomposição.

Tabela 9- Perdas de massa das amostras de lodo calcinado a 600°C, 700°C, 800°C e 900°C

<b>Amostra</b>	<b>Primeira etapa</b>	<b>Segunda etapa</b>	<b>Terceira etapa</b>	<b>Quarta etapa</b>
Lodo calcinado a 600°C	30°C a 65°C com perda de massa de 2,18%	65°C a 403°C com perda de 6,87%	403°C a 763°C com a perda de 17,79%	763°C e 1000°C com perda de massa 5,03 %
Lodo calcinado a 700°C	25°C a 83°C com perda de massa de 2,53%	83°C a 389°C com perda de 5,35%	389°C a 591°C com a perda de 21,83%	591°C e 1000°C com perda de massa 4,34 %
Lodo calcinado a 800°C	25°C a 94°C com perda de massa de 2,73%	94°C a 421°C com perda de 4,42%	421°C a 639°C com a perda de 13,17%	591°C e 1000°C com perda de massa 4,34 %
Lodo calcinado a 900°C	26°C a 351°C com perda de massa de 4,57%	351°C a 555°C com perda de massa 3,81%	555°C a 1000°C com a perda de massa 3,18%	-

Fonte: A Autora (2019).

A perda de massa ocorrida na primeira etapa de todas as temperaturas, corresponde à remoção de água fisicamente adsorvida, fenômeno típico de materiais argilosos.

Na segunda etapa, o percentual de perda está associado à presença de sulfatos, como por exemplo sulfato de alumínio, utilizado como floculante no processo de tratamento de águas. Segundo Reed (1995), o sulfato de alumínio perde água quimicamente ligada por volta de 300°C.

A perda ocorrida na terceira etapa pode estar relacionada à decomposição de matéria orgânica, associada principalmente à desidroxilação da caulinita, levando a formação de metacaulinita. A desidroxilação da caulinita ocorre em torno de 500°C e a fase metacaulinita, contendo sílica e alumina em elevado estado de desordem, é responsável pela atividade química.

O resultado que corrobora com o estudo de Tantawy (2014), onde o mesmo avaliou suas amostras através da Termogravimetria e análise térmica diferencial a fim de caracterizar o lodo calcinado a 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900°C objetivando estudar o índice de atividade pozolânica e observou através da TGA/DTA que a perda de massa de suas amostras corresponde à presença de sulfato de alumínio.

### 3.2.8 Fluorescência de Raio X do lodo in natura e do lodo calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C

Na Tabela 10 estão os resultados de composição química das amostras do lodo *in natura* e do lodo calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C.

Tabela 10- Fluorescência do lodo calcinado a 600°C, 700°C, 800°C e 900°C

Elementos	Lodo in Natura	Lodo calcinado a 600°C	Lodo calcinado a 700°C	Lodo calcinado a 800°C	Lodo calcinado a 900°C
SiO <sub>2</sub>	36,089	41,478	41,337	41,85	44,224
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,378	20,197	19,714	20,265	21,368
SO <sub>3</sub>	12,938	5,134	5,959	4,959	2,387
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,641	11,099	10,324	10,111	9,708
CaO	8,707	8,145	8,469	8,291	8,254
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7,181	7,798	7,792	7,999	7,74
K <sub>2</sub> O	1,991	1,959	2,01	1,994	2,055
TiO <sub>2</sub>	1,843	1,739	1,873	1,595	1,733
MgO	1,301	1,686	1,756	1,867	1,905
ZnO	0,511	0,411	0,408	0,404	0,278
MnO	0,124	0,101	0,096	0,088	0,084
CuO	0,121	0,093	0,095	0,087	0,081
ZrO <sub>2</sub>	0,081	0,08	0,082	0,074	0,077
SrO	0,045	0,037	0,037	0,37	0,037
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,036	0,036	0,036	0,036	0,041
Rb <sub>2</sub> O	0,012	-	0,011	0,011	0,011
MoO <sub>3</sub>	-	0,009	-	0,009	-
Ac	-	-	-	0,001	-
NiO	-	-	-	-	0,015
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	0,004
BaO	-	-	-	0,31	-
PbO	-	-	-	0,021	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	0,45	0,48	0,48	0,48	0,48
MgO	Traços	Traços	traços	traços	traços
Na <sub>2</sub> O	Traços	Traços	traços	traços	traços

Fonte: A Autora (2019).

Do ponto de vista químico, o resíduo *in natura* é constituído 65,11% basicamente por SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Observa-se para as amostras do lodo calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C, que do ponto de vista químico, o resíduo é constituído basicamente por SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. No caso do lodo calcinado a 600°C, a constituição equivale à 72,77%; para o lodo calcinado a 700°C, em torno de 71,37%; já o lodo calcinado a 800°C, 72,23%; e o lodo calcinado a 900°C, 75,3%.

Conforme a NBR 12653 (2012), os percentuais de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  apresentados por todas as amostras de lodo de esgoto calcinado analisadas os classificam como materiais pozolânicos.

De acordo com Callister (2008), a presença de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  é de interesse, pois proporciona excelente estabilidade térmica, resistência química e boa resistividade elétrica.

Conforme Lynn et al. (2015), quanto maior o teor  $\text{Al}_2\text{O}_3$  maior é o benefício em relação à durabilidade, visto que sua presença proporciona resistência ao ataque de cloretos devido à capacidade positiva da ligação química de cloretos com o teor de alumínio.

O aumento da temperatura de calcinação favorece o aumento das percentagens dos óxidos presentes nos argilominerais, ou seja, observa-se que com o aumento da temperatura de calcinação, as porcentagens de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aumentaram. Os teores de óxidos alcalinos ( $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ ) e alcalinos terrosos ( $\text{MgO}$  e  $\text{CaO}$ ) apresentam-se baixos, dificultando a possível ocorrência de reações álcalis-agregado.

Os elementos encontrados no lodo calcinado nas temperaturas  $600^\circ\text{C}$ ,  $700^\circ\text{C}$ ,  $800^\circ\text{C}$  e  $900^\circ\text{C}$  não apresentam total semelhança quando comparados com os elementos presentes em estudos feitos por Cyr, Coutand e Clastres (2007); Pan et al. (2003) e Pérez-Carrión et al. (2014), relacionados à lodo de esgoto calcinado onde foram executados em países considerados desenvolvidos, visto que o teores de óxidos alcalinos e alcalinos terrosos se apresentam de forma mais elevada (apresentando desvantagem acerca de sua aplicação em argamassas e concretos) e os demais elementos em percentuais distintos.

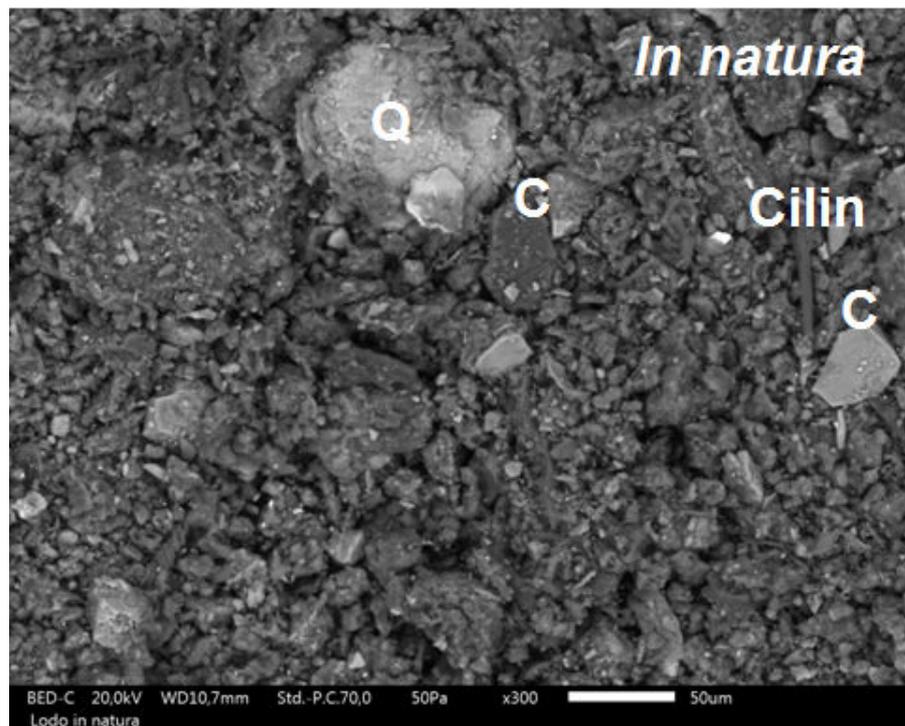
A variação no tocante aos elementos presentes no lodo de esgoto calcinado em estudos relacionados aos países desenvolvidos e subdesenvolvidos ou em desenvolvimento se justifica devido aos hábitos alimentares e ao nível de saneamento básico que está disponível para a população (SILVEIRA, ALLEONI e GUILHERME, 2003).

### 3.2.9 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

#### A) lodo *in natura*

A Figura 14 ilustra a micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura para o lodo *in natura*.

Figura 14- Microscopia eletrônica de varredura do lodo *in natura* na ampliação de 300 vezes.  
Q-Quartzo, C-Caulinita, Cilin- Cilindro



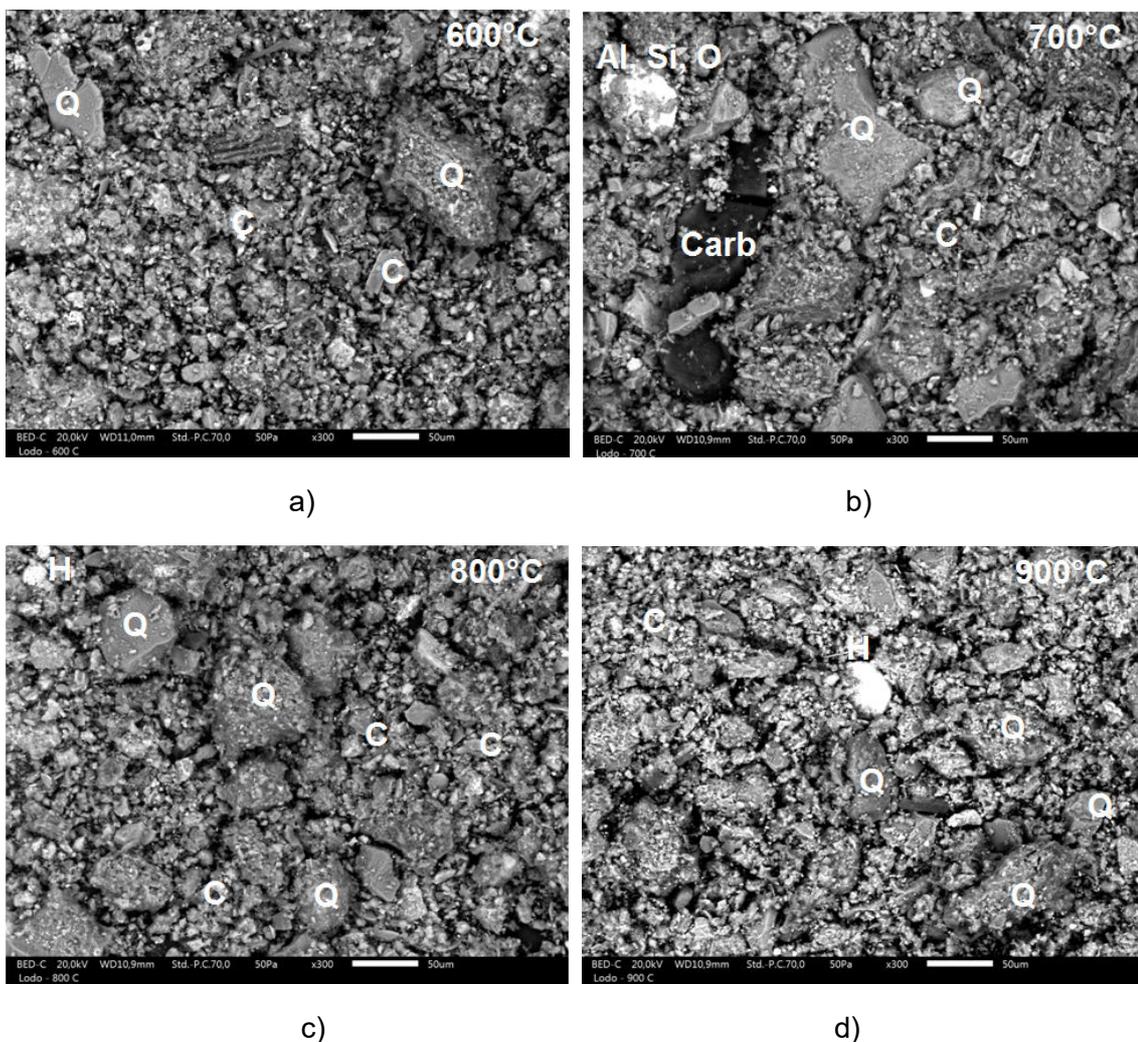
Fonte: A Autora (2019).

Observa-se que há a formação de aglomerados com formato de placas hexagonais, mostrando a presença de caulinita e quartzo (confirmando a fase encontrada na difração de raios x), de cilindros, de aspectos rígidos, de formato arredondado. Observa-se ainda aglomerados de aspectos denso, de formato irregular e tamanhos variáveis, provavelmente relacionado à matéria orgânica. Estes aglomerados são constituídos de partículas com tamanho variando de 14,8 a 100  $\mu\text{m}$  e tamanho médio de 34,8  $\mu\text{m}$ .

## B) Lodo de esgoto calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C, 900°C

A Figura 15 ilustra a micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura para o lodo de esgoto calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C.

Figura 15- MEV do lodo calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C



Fonte: A Autora (2019).

Sobre as micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura, observa-se que a morfologia do lodo quando calcinado a 600°C é uma morfologia heterogênea onde os aglomerados são de aspecto denso e rígido de tamanho e forma variados. Observa-se a presença de quartzo, caulinita e hematita. Os aglomerados de aspecto denso são associados à matéria orgânica presente no lodo *in natura*; com a calcinação desapareceram e surgiram aglomerados de formatos quase arredondados e de aspecto rígido.

Esse comportamento também foi observado por Tantawi et al. (2012), quando esclareceu o efeito da temperatura de calcinação sobre a microestrutura e pozolanicidade da cinza de lodo de esgoto, utilizando temperaturas de 500°C a 950°C durante a incineração. Os autores observaram que as matérias orgânicas que aparecem como agregados pequenos desaparecem após a calcinação a 500°C, eliminando matéria inorgânica que aparece como agregados esbranquiçados.

A calcinação de lodo de esgoto a 800°C preserva a natureza amorfa das cinzas resultantes devido à eliminação do carbono fixado capturado pela sílica. Para o lodo calcinado a 700°C é possível observar uma superfície bastante heterogênea, de aspecto rígido, de formato irregulares e tamanho variáveis; há a presença de aluminossilicatos, quartzo e carbono. No caso do lodo de esgoto calcinado a 800°C, observa-se que a constituição de partículas possuem superfícies planas e de formatos irregulares e tamanhos variáveis com a presença de aglomerados pequenos acumulados sobre o aglomerado maior. Observa-se a presença de quartzo, caulinita e hematita. O lodo de esgoto calcinado a 900°C é constituído da presença de partículas pequenas acumuladas sobre o aglomerado maior e há presença de quartzo, caulinita e hematita.

Para todas as amostras de lodo observa-se que é constituído de placas de lamelas com perfil irregular. Existe uma grande quantidade de placas < 2 nm, provavelmente de caulinita. Há uma diversidade na morfologia e no tamanho das partículas conforme a Tabela 11.

Tabela 11- Tamanho das partículas do lodo calcinado

<b>Temperatura de calcinação</b>	<b>Tamanho das partículas</b>	<b>Tamanho médio das partículas</b>
Lodo calcinado a 600°C	11,9 µm a 67,85 µm	26,40 µm
Lodo calcinado a 700°C	9,52 µm a 109,5 µm	36,55 µm
Lodo calcinado a 800°C	14,47 µm a 65,78 µm	29,73 µm
Lodo calcinado a 900°C	11,25 µm a 56,25 µm	28,50 µm

Fonte: A Autora (2019).

A micrografia obtida a partir da microscopia eletrônica de varredura mostrou que o lodo de esgoto calcinado a 700°C apresentou uma porosidade menor quando comparado ao lodo calcinado a 600°C.

No caso do lodo calcinado a 800°C, observa-se que as partículas estão agregadas umas sobre as outras, atribuindo-se o fato ao aumento do seu tamanho e

a uma provável mudança no seu estado de agregação, com aglomerados que oferecem maior resistência aos processos de densificação.

As partículas irregulares, com texturas de superfície áspera e uma microestrutura porosa apresentadas pelo lodo de esgoto, podem levar a uma alta absorção e a um aumento na demanda de água em argamassas e concretos.

Cyr, Coutand e Clastres (2006) em estudos sobre utilização de cinza de lodo de esgoto como aditivo mineral em argamassas, ao avaliarem a micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura do lodo de esgoto incinerado a 850°C, observaram que ela é formada por partículas irregulares, que geram uma alta demanda de água quando usada em argamassas.

### 3.2.10 Atividade pozolânica

Após o processo de moagem e peneiramento, o lodo apresentou-se como um pó fino, característico de pozolanas (Figura 16).

Figura 16- Lodo de esgoto calcinado a 800°C



Fonte: A Autora (2019).

#### a) Atividade pozolânica: proporção 1:3

A Tabela 12 apresenta o resultado obtido acerca do índice de atividade pozolânica referente às argamassas produzidas na proporção 1:3 utilizando lodo de esgoto calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C.

Tabela 12- Índice de atividade pozolânica proporção 1:3

<b>Amostras</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Índice de atividade pozolânica (%)</b>
Referência	26,2	
Lodo calcinado a 600°C	21,7	82,8
Lodo calcinado a 700°C	22,2	84,7
Lodo calcinado a 800°C	23,7	90,4
Lodo calcinado a 900°C	23	87,7

Fonte: A Autora (2019).

O lodo calcinado na temperatura 600°C apresentou o menor índice de atividade pozolânica; o lodo calcinado na temperatura 700°C teve um aumento de 2,29% no índice de atividade pozolânica quando comparado com a amostra de lodo calcinado a 600°C.

O lodo calcinado na temperatura 800°C foi a única amostra que apresentou índice de atividade pozolânica dentro dos padrões estabelecidos pela NBR 5752 (2015), tendo o lodo calcinado a 900°C apresentado valor aproximado relativo à um material pozolânico (90%).

#### **b) Atividade pozolânica: proporção 1:4,5**

A Tabela 13 apresenta o resultado obtido acerca do índice de atividade pozolânica referente às argamassas produzidas na proporção 1:4,5 utilizando o lodo de esgoto calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C.

Tabela 13- Índice de atividade pozolânica proporção 1:4,5

<b>Amostras</b>	<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>	<b>Índice de atividade pozolânica (%)</b>
Referência	25,7	
Lodo calcinado a 600°C	19,1	74,3
Lodo calcinado a 700°C	20,9	81,3
Lodo calcinado a 800°C	23,2	90,2
Lodo calcinado a 900°C	22,7	88,3

Fonte: A Autora (2019).

A amostra de lodo calcinado a 800°C apresentou índice de atividade pozolânica dentro dos padrões normativos propostos pela NBR 5752 (2015). O lodo de esgoto calcinado na temperatura 900°C apresentou resultados similares acerca

da pozolanicidade quando comparado com o lodo calcinado a 800°C. O lodo calcinado na temperatura 600°C apresentou desempenho inferior às demais amostras analisadas.

### c) Atividade pozolânica: proporção 1:6

A Tabela 14 apresenta o resultado obtido acerca do índice de atividade pozolânica referente às argamassas produzidas na proporção 1:6 utilizando o lodo de esgoto calcinado nas temperaturas 600°C e 700°C, 800°C e 900°C.

Tabela 14- Índice de atividade proporção 1:6

<b>Amostras</b>	<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>	<b>Índice de atividade pozolânica (%)</b>
Referência	23,4	
Lodo calcinado a 600°C	19,1	81,6
Lodo calcinado a 700°C	19,6	83,7
Lodo calcinado a 800°C	21	89,7
Lodo calcinado a 900°C	19,9	85

Fonte: A Autora (2019).

Observa-se através da Tabela 14 que, o lodo de esgoto calcinado a 800°C produzido na proporção 1:6 apresentou maior atividade pozolânica quando comparado com as demais amostras. O lodo calcinado a 600°C apresentou o índice mais baixo de todas as amostras analisadas, seguindo da amostra executada com lodo calcinado a 700°C. Nenhuma das temperaturas analisadas atingiu o limite mínimo de índice de atividade pozolânica.

Das amostras de lodo de esgoto analisadas nas três proporções (1:3, 1:4,5 e 1:6) objetivando a avaliação da pozolanicidade, considera-se para este estudo o uso do lodo de esgoto calcinado a 800°C como material pozolânico mais adequado, pois apresentou reatividade na proporção 1:3 e 1:4,5 e na proporção 1:6 obteve como resultado 89,7%, valor aproximado ao mínimo exigido pela NBR 5752 (2015) (90%). Desse modo, a temperatura de calcinação a ser utilizada nas argamassas produzidas e analisadas será de 800° C.

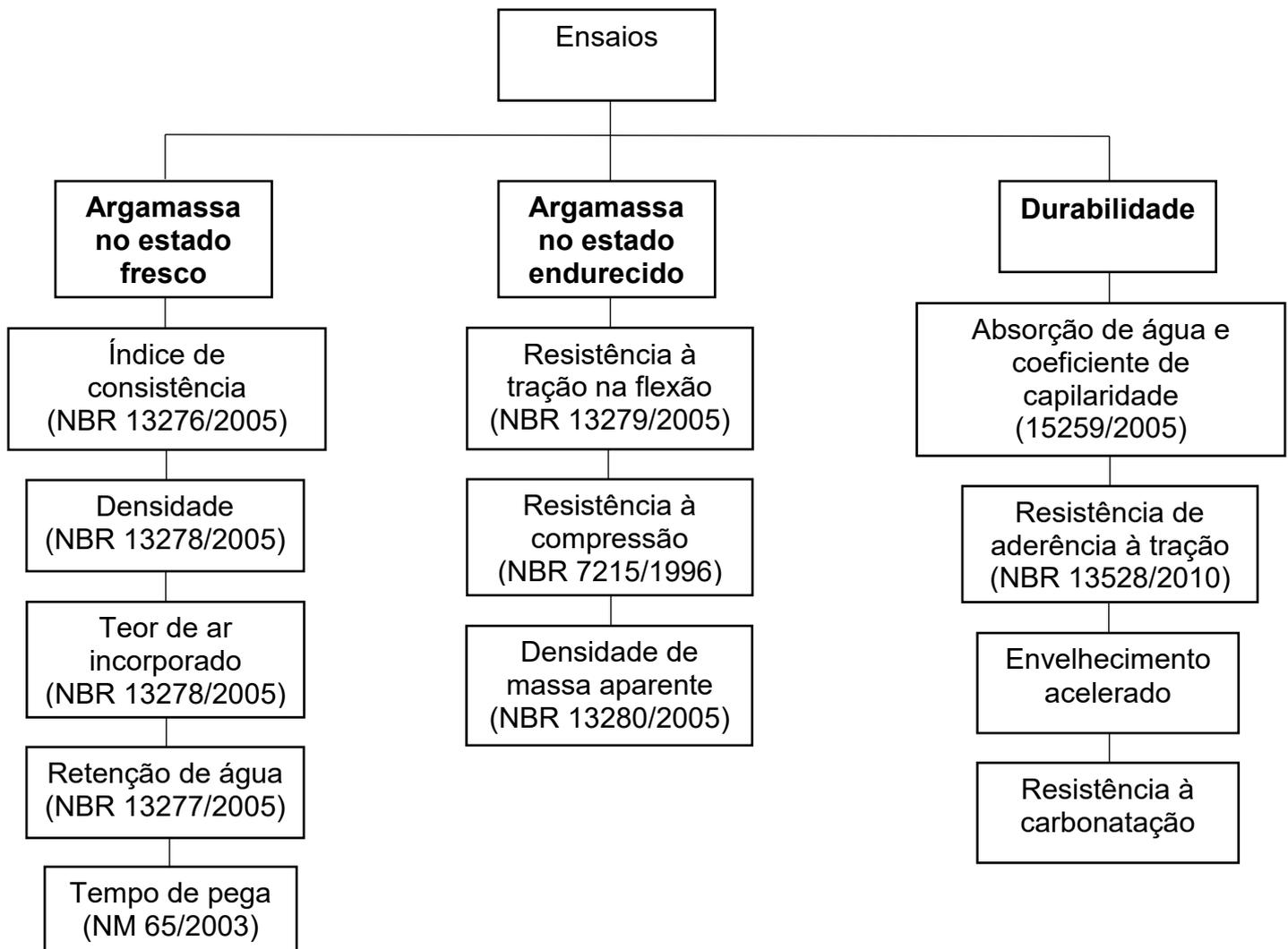
Naamane, Rais e Taleb (2016) estudaram a eficácia da incineração do lodo de esgoto na evolução das propriedades físico-químicas e mecânicas do cimento Portland, com o lodo de esgoto sendo calcinado nas temperaturas 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C e 800°C e avaliaram a atividade pozolânica das amostras. O

lodo de esgoto calcinado a 800°C apresentou-se com a maior atividade pozolânica; resultados que corroboram com o presente trabalho.

Havendo uma persistência na queima para temperaturas acima de 900°C ocorre formação de novos compostos cristalinos estáveis, de menor superfície específica, ocasionando, portanto, uma queda considerável na atividade pozolânica (CORDEIRO, 2001).

O fluxograma representado pela Figura 17 apresenta os ensaios realizados para a produção das argamassas com incorporação de lodo de esgoto calcinado na temperatura 800 °C substituindo parcialmente o cimento Portland.

Figura 17- Metodologia utilizada para cumprimento da pesquisa



Fonte: A Autora (2019).

### 3.3 DEFINIÇÃO DAS PROPORÇÕES PARA O PREPARO DAS ARGAMASSAS

Para o estudo experimental das argamassas de revestimento incorporando lodo de esgoto calcinado substituindo parcialmente o cimento Portland, optou-se por utilizar apenas o lodo de esgoto calcinado na temperatura 800°C, visto que foi a temperatura de calcinação que apresentou reatividade pozolânica nos ensaios realizados.

Para a produção das argamassas, três proporções (em massa) para o desenvolvimento laboratorial dos testes foram utilizadas: 1:3, 1:4,5 e 1:6, (cimento e areia). As proporções foram baseadas em Lessa (2005), sendo adotadas objetivando a obtenção de uma ampla faixa de resistência. A quantidade de água utilizada para cada proporção foi obtida a partir da produção de argamassas que permitiram uma consistência de espalhamento de  $(260 \pm 5)$  mm conforme preconiza a NBR 13276 (2005) e não se utilizou aditivos plastificantes.

Nas argamassas experimentais, o lodo calcinado a 800°C foi adicionado nas proporções de 10%, 20% e 30% substituindo de forma parcial o cimento Portland. A definição acerca da produção de argamassas de revestimento com proporções distintas incorporando percentuais distintos de lodo se deve à carência bibliográfica de trabalhos que apresentem tal proposta. Argamassas de referência foram produzidas objetivando a realização de um comparativo de desempenho.

As argamassas foram produzidas utilizando misturador mecânico (argamassadeira) com cuba em aço inox capacidade para 5 litros e batedor tipo raquete. A argamassadeira foi utilizada na velocidade alta; o tempo e a forma de adição dos materiais foram seguidos conforme preconiza a NBR 7215 (1996) - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.

As argamassas de referência (sem a incorporação do resíduo) foram produzidas até a obtenção de consistência de espalhamento no intervalo  $(260 \pm 5)$  mm, onde definiu-se a relação água /cimento, para posteriormente realizar-se as demais argamassas com incorporação de 10%, 20% e 30% do lodo calcinado a 800°C em substituição ao cimento Portland.

A Tabela 15 apresenta as proporções e a relação água/cimento das argamassas produzidas.

Tabela 15- Formulações para a fabricação das argamassas de referência e com lodo de esgoto

<b>Proporção</b>	<b>Relação água/cimento</b>
1:3,0	0,60
1:4,5	0,80
1:6,0	1,00

Fonte: A Autora (2019).

### **3.3.1 Ensaios das argamassas no estado fresco**

#### **A) Determinação do índice de consistência**

Avaliou-se a determinação do índice de consistência de acordo com o ensaio de índice de consistência estabelecido pela NBR 13276 (2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.

#### **B) Densidade de massa e teor de ar incorporado**

A NBR 13278 (2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado estabelece os métodos de ensaios para determinar a densidade e o teor de ar incorporado no estado fresco, onde após a preparação das argamassas nas proporções distintas utilizou-se um recipiente cilíndrico com capacidade de aproximadamente 400cm<sup>3</sup> com altura de 85mm e diâmetro de 20mm. A argamassa foi aplicada formando três camadas com alturas aproximadamente iguais e com a aplicação de 20 golpes em cada uma, o recipiente sofreu três quedas com altura de aproximadamente 3cm com a finalidade de eliminar os vazios entre a argamassa e a parede do recipiente.

#### **C) Retenção de água**

A NBR 13277 (2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da retenção de água é a norma que estabelece as diretrizes para o ensaio de verificação do potencial de retenção de água das argamassas.

#### D) Tempo de endurecimento

A NBR 65 (2003) Cimento portland - Determinação do tempo de pega, estabelece o método de determinação do tempo de pega da pasta de cimento Portland utilizando o aparelho de Vicat. A NBR 43 (2002) - Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal recomenda que a massa de cimento (mc) a ser utilizada na preparação da pasta deve ser de  $(500,0 \pm 0,5)$  g. O lodo foi inserido nos percentuais 0%; 10%, 20% e 30%.

A Figura 18 apresenta o ensaio de tempo de pega com substituição do cimento por 10% de lodo de esgoto calcinado a  $800^{\circ}\text{C}$  executado neste trabalho.

Figura 18- Determinação do tempo de pega da pasta de cimento Portland com substituição de 10% de lodo de esgoto calcinado



Fonte: A Autora (2019).

O tempo de início de pega foi contabilizado a partir do intervalo de tempo transcorrido desde a adição de água ao cimento até o momento em que a agulha de Vicat correspondente penetra na pasta até a distância de 3mm da placa base e o tempo de fim de pega foi contabilizado a partir do momento em que a agulha de Vicat penetrou 0,5 mm na pasta.

A Tabela 16 mostra o resumo dos ensaios das argamassas no estado fresco e a quantidade de análises de testes realizados por ensaio.

Tabela 16- Resumo dos ensaios das argamassas no estado fresco

Ensaio das argamassas no estado fresco					
Proporções /material	Ensaio	Incorporação de lodo calcinado 800°C	Quantidade de testes por percentual de substituição	Quantidade de testes por proporção	Quantidade total de testes por ensaio
1:3 1:4,5 1:6	Índice de consistência	0% 10% 20% 30%	1	8	24
	Densidade de massa		2	8	24
	Teor de ar incorporado		2	8	24
	Retenção de ar		2	8	24
500,0 ± 0,5 g de cimento	Tempo de pega		1	1	4

Fonte: A Autora (2019).

### 3.3.2 Ensaio de argamassas no estado endurecido

#### A) Determinação da resistência à tração na flexão

A NBR 13279 (2005) estabelece o método para determinação da resistência à tração na flexão de argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Os ensaios devem ser realizados em corpos de prova prismáticos de (4x4x16)cm em idade de 28 dias (Figura 19). Após a moldagem, a superfície exposta ao ar foi coberta com filme de PVC, objetivando que não ocorra a eliminação de água para o meio ambiente.

Figura 19- Procedimento de ensaio de avaliação de resistência à tração na flexão para amostras de referência



Fonte: A Autora (2019).

## **B) Determinação da resistência à compressão**

A execução dos ensaios de resistência à compressão axial seguiu as recomendações da NBR 7215 (1996) Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.

A Figura 20 apresenta os corpos de prova submetidos ao ensaio referente à resistência à compressão axial das argamassas com incorporação de 10% de lodo de esgoto calcinado na temperatura 800°C. Após a moldagem, a superfície exposta ao ar foi coberta com filme de PVC, objetivando que não seja eliminada água para o meio ambiente.

Figura 20- Resistência à compressão com incorporação de 10% de lodo



Fonte: A Autora (2019).

Os corpos de prova foram rompidos nas idades 7, 14 e 28 dias.

## **C) Determinação da densidade de massa aparente**

O ensaio de densidade de massa aparente de argamassas de revestimento é realizado seguindo a NBR 13280 (2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido, que estabelece os equipamentos e os métodos para execução do ensaio.

Após a cura, determinou-se através de um paquímetro, a altura, a largura e o comprimento de cada corpo de prova prismático (4x4x16) cm. Então determinou-se a massa (m) em gramas de cada corpo de prova realizando a média aritmética dos resultados obtidos.

A Tabela 17 mostra a quantidade de testes realizados por ensaio nas argamassas no estado endurecido.

Tabela 17- Resumo dos ensaios das argamassas no estado endurecido

<b>Ensaio das argamassas no estado endurecido</b>					
<b>Proporções</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Incorporação de lodo calcinado 800°C</b>	<b>Quantidade de testes por percentual de substituição</b>	<b>Quantidade de testes por proporção</b>	<b>Quantidade total de testes por ensaio</b>
1:3 1:4,5 1:6	Resistência à tração na flexão	0%	3	12	36
	Determinação da densidade de massa aparente	10% 20% 30%	3	12	36
	Resistência à compressão (7/14/28 dias)	0%, 10%,20% e 30% (7 dias) 0%, 10%,20% e 30% (14 dias) 0%, 10%,20% e 30% (28 dias)	3	36	108

Fonte: A Autora (2019).

### **3.3.3 Ensaio de durabilidade de argamassa**

#### **A) Absorção de água e coeficiente de capilaridade**

A NBR 15259 (2005) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade estabelece os equipamentos e procedimentos para a realização do ensaio.

Utilizou-se três corpos de prova cilíndricos (5x10) cm e o ensaio consistiu em, aos 28 dias, lixar a superfície do corpo de prova e determinar sua massa, posicionar os corpos de prova com a face redonda sobre os suportes no recipiente de ensaio, com nível de água constante a  $(5 \pm 1)$  mm acima da face em contato com a água. Após a colocação dos corpos de prova em contato com a água foram verificadas as massas de cada um aos 10 minutos e aos 90 minutos.

A Figura 21 apresenta o ensaio absorção de água por capilaridade em andamento sendo executado com os corpos de prova incorporados com lodo calcinado na temperatura 800°C após cura de 28 dias referentes a proporção 1:4,5.

Figura 21- Ensaio referente à absorção por capilaridade das argamassas com lodo calcinado na temperatura 800°C proporção 1:4,5



Fonte: A Autora (2019).

O coeficiente de capilaridade foi apresentado nos resultados do ensaio e foi obtido aproximadamente através da diferença entre as médias das massas aos 10 e aos 90 minutos.

## **B) Resistência de aderência à tração**

A norma NBR 13528 (2010) - Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: determinação da resistência de aderência à tração estabelece as condições para a realização deste ensaio. O ensaio objetiva a verificação da tensão máxima que uma argamassa pode suportar sem perder sua aderência diante dos esforços que atuam na interface com o substrato. Especificamente para revestimento deve-se atender adicionalmente às exigências da NBR 13749 (2013) que estabelece o limite de resistência de aderência à tração para argamassas de revestimento.

Cada ensaio foi composto por doze corpos de prova de mesmas características (tipo e preparo do substrato, argamassa de revestimento, forma de aplicação da argamassa, idade do revestimento). Os substratos executados consistiram em alvenarias (70x70)cm revestidas com uma camada de chapisco; em

cada lado da mesma executou-se uma faixa de argamassa e a distribuição dos corpos de prova no painel revestido foi feita de forma aleatória.

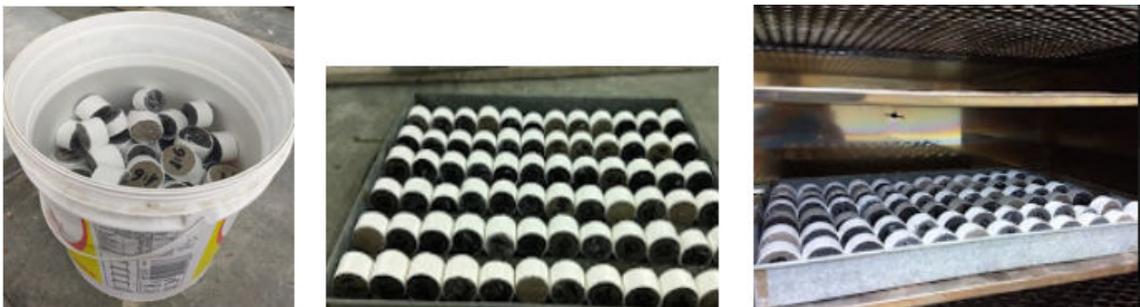
Os substratos revestidos com a argamassa sofreram um processo de cura de 28 dias para que fossem realizadas as rupturas. Cerca de três dias antes da idade desejada realizou-se as colagens e os cortes dos corpos de prova que sofreram o arrancamento. A colagem das peças metálicas (pastilhas) que serviram de apoio para o equipamento foi feita com cola epóxi e o corte foi realizado a seco em direção ao substrato. Após a realização do arrancamento foram registradas as cargas de ruptura.

### **C) Envelhecimento Acelerado por meio de ciclos de molhagem e secagem e Resistência à Carbonatação**

Acerca da realização dos ensaios referentes ao envelhecimento acelerado e resistência à carbonatação, adotou-se como condição de contorno os ciclos de molhagem e secagem em corpos de prova produzidos com argamassa de referência e com incorporação de lodo nos percentuais de 10%, 20% e 30%, utilizando água em temperatura ambiente e estufa com circulação de ar forçada para conceder as condições necessárias de desgaste ao compósito de matriz cimentícia.

Para estudar a durabilidade, mediante o envelhecimento acelerado por ciclos de molhagem e secagem, os corpos-de-prova produzidos com argamassas de referência e com argamassas com lodo de esgoto calcinado que foram substituídos pelo cimento nas proporções 10%, 20% e 30% passaram pelo ciclo de molhagem e secagem aos 28 e 63 dias (Figura 22).

Figura 22- Ciclos de molhagem e secagem dos corpos de prova estudados



Fonte: A Autora (2019).

Após o ciclo, os corpos de prova foram seccionados com o auxílio de serra circular para aspersão da fenolftaleína, identificando mediante a coloração rosa qual a zona que não sofreu o processo de degradação (Figura 23).

Figura 23- Identificação do processo de degradação nos corpos de prova



Fonte: A Autora (2019).

Foram produzidos 2 corpos de prova cilíndricos com dimensões (5x10) cm para cada percentual de substituição (0%, 10%, 20% e 30%) totalizando 24 corpos de prova, sendo 8 para cada proporção. Devido à possibilidade de dificuldade em identificar a zona carbonatada nos corpos de prova de (5x10)cm optou-se por fracioná-lo em 3 partes. Como mencionado anteriormente, foram priorizadas as idades de 28 e 63 dias para que os corpos de prova fracionados fossem submetidos respectivamente aos ciclos de molhagem e secagem.

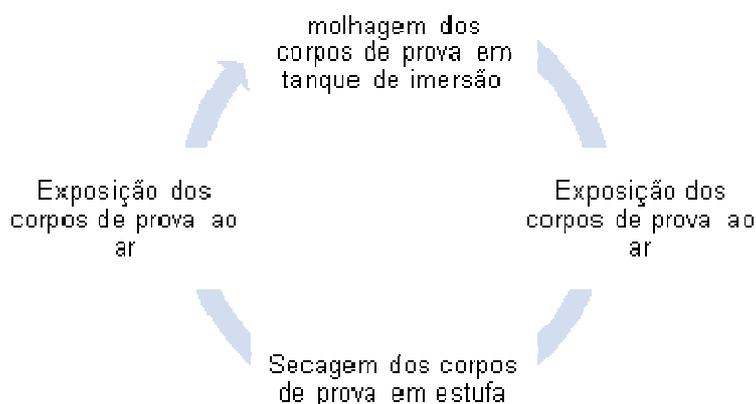
Aplicou-se nas superfícies laterais cilíndricas dos corpos de prova tinta base epóxi, para que o direcionamento da espessura da frente de carbonatação na base e no topo atingida pela deterioração forçada permanecesse equilibrada.

Depois de alcançar cada idade determinada, os moldes cilíndricos foram submetidos à quantidade de ciclos determinada, com cada ciclo perdurando por 24 horas conduzidos de maneira ininterrupta, sendo dividido da seguinte maneira.

- a) 13 horas em estufa à temperatura de 60 °C;
- b) 10 horas em tanque de imersão com água em temperatura ambiente;
- c) Intervalo de 30 minutos na mudança dos ambientes.

A Figura 24 ilustra as sequências do processo de molhagem e secagem dos corpos de prova.

Figura 24- Ciclo do processo de envelhecimento acelerado



Fonte: Fonte própria

Finalizados os ciclos dentro de cada faixa de idade adotada, após o ciclo de molhagem e secagem, os corpos de prova foram seccionados, com o auxílio de serra circular para aspergir-se fenolftaleína, identificando mediante a coloração rosa qual a zona que não sofreu o processo de degradação. Mensurou-se através de paquímetro digital a zona danificada pelos ciclos, verificando qual frente de degradação avançou de forma mais imediata ou paulatina mediante comparações das proporções distintas, observando se as diferentes substituições do lodo de esgoto calcinado corroboraram para uma melhor resistência ao avanço dos agentes deletérios, ou se houve majoração para facilitar o seu avanço.

Para cada proporção, a frente de carbonatação foi avaliada através de estudos em 48 corpos de prova seccionados para cada ciclo respectivamente (28 e 63 dias), sendo 12 para cada tipo de substituição (0, 10% 20% e 30%) realizando-se posteriormente a média aritmética, totalizando 96 corpos de prova com frente de carbonatação avaliada.

Preconizando o que a aspersão de fenolftaleína expôs, foi executada a coleta de amostras das áreas atingidas pela carbonatação para a realização de TG e MEV, objetivando avaliar a perda de massa das argamassas ao longo do estudo do envelhecimento acelerado, bem como verificar as transformações mineralógicas para estudar as influências pelo aumento da idade dos corpos de prova e a quantidade de ciclos aplicados, mensurando o efeito do envelhecimento acelerado para as argamassas produzidas, parâmetros esses inerentes ao teste de carbonatação do material.

A Tabela 18 mostra o resumo dos ensaios referentes à durabilidade das argamassas e a quantidade de testes realizados por percentual de substituição, por proporção, bem como a quantidade total.

Tabela 18- Resumo dos ensaios de durabilidade das argamassas

<b>Proporções</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Incorporação de lodo calcinado 800°C</b>	<b>Quantidade de testes por percentual de substituição</b>	<b>Quantidade de testes por proporção</b>	<b>Quantidade total de testes por ensaio</b>
1:3 1:4,5 1:6	Absorção de água e coeficiente de capilaridade	0% 10% 20% 30%	1	1	4
	Resistência de aderência à tração		1	1	4
	Envelhecimento acelerado		2	8	12 para ciclo de 28 dias + 12 para ciclo de 63= 24
	Resistência à carbonatação				96 leituras

Fonte: A Autora (2019).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os tópicos a seguir apresentam os resultados obtidos e suas respectivas discussões na seguinte sequência: o item 4.1 aborda os resultados obtidos referentes às argamassas no estado fresco, o tópico 4.2 mostra os resultados dos ensaios das argamassas no estado endurecido, e por fim, o item 4.3 apresenta os resultados referentes aos estudos sobre durabilidade das argamassas

### 4.1 ENSAIOS DE ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

Apresenta-se os resultados das argamassas produzidas no estado fresco.

#### 4.1.1 Índice de consistência

Realizou-se ensaios para verificar a consistência de cada proporção de argamassa produzida, em diferentes teores de percentuais de incorporação do lodo calcinado (0%, 10%, 20% e 30%).

A Figura 25 mostra a consistência da argamassa executada na proporção 1:6 utilizando 20% de lodo de esgoto calcinado.

Figura 25- Consistência da argamassa na proporção 1:6 utilizando 20% de lodo de esgoto calcinado a 800°C

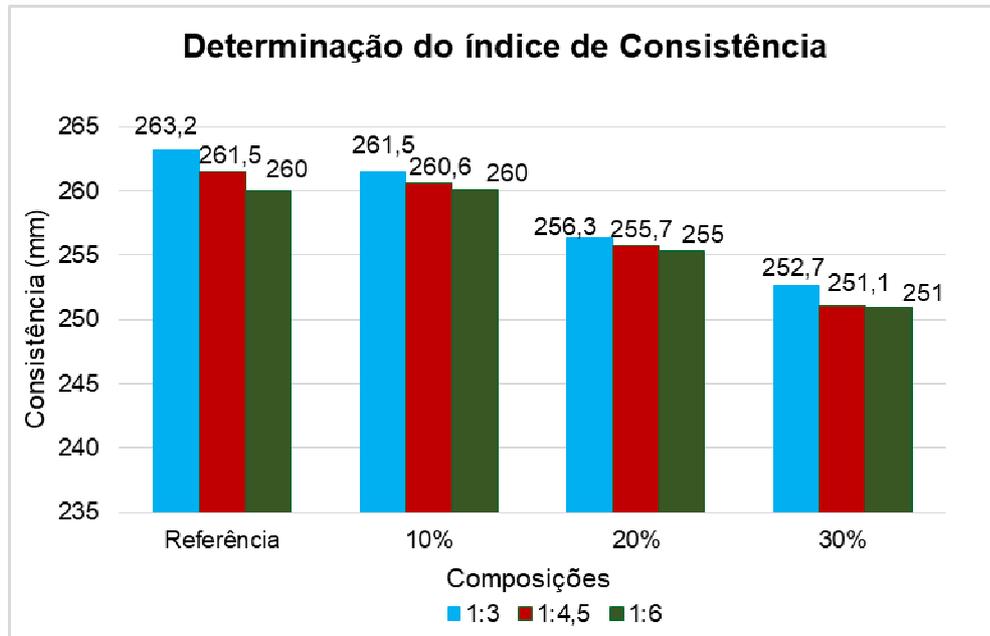


Fonte: A Autora (2019).

A Figura 26 mostra os resultados dos ensaios de índice de consistência das argamassas utilizando-se as proporções 1:3 ( $a/c=0,60$ ); 1:4,5 ( $a/c=0,80$ ) e 1:6 ( $a/c=1,0$ ). Para cada proporção substituindo 10%, 20% e 30% de cimento Portland através da incorporação do lodo calcinado na temperatura 800°C. Argamassas de

referências foram produzidas como forma de realizar comparativo com os resultados obtidos.

Figura 26- Determinação do índice de consistência



Fonte: A Autora (2019).

No geral, ocorreu uma diminuição na fluidez das argamassas com incorporação de lodo de esgoto calcinado a 800°C (corroborando com os resultados da microscopia eletrônica de varredura que apresentou as características do lodo com partículas irregulares, com texturas de superfície áspera e uma microestrutura porosa). Logo, este resultado era esperado, visto que o lodo, por apresentar natureza porosa, o torna higroscópico. Para tanto, aumentar o conteúdo de incorporação do lodo leva naturalmente a uma diminuição da fluidez.

Em relação a proporção 1:3, a fluidez reduziu 3,99% quando se compara a argamassa de referência com a argamassa contendo 30% de lodo incorporado. Realizando o mesmo comparativo para as argamassas na proporção 1:4,5, houve redução de 3,98%, e na proporção 1:6 houve redução de 3,46% na trabalhabilidade.

Das proporções analisadas obtiveram o melhor desempenho as que receberam incorporação de 10% e 20% de lodo de esgoto calcinado, pois os resultados se apresentaram conforme as recomendações da NBR 13276 (2005) ( $260 \pm 5$ ) mm. A incorporação de 30% de lodo de esgoto não apresentou resultado

favorável em nenhuma das proporções analisadas, visto que não se enquadrou às prescrições normativas no que concerne ao índice de consistência ( $260 \pm 5$ ) mm.

Os resultados apresentados quanto ao índice de consistência corroboram com Chen e Poon (2017), que avaliaram a fluidez de argamassas com incorporação de lodo nos percentuais 5%, 10% e 20% e constataram a sua diminuição conforme o aumento da incorporação de lodo.

Há fatores que geram contribuição para os resultados acerca da consistência, e podem estar associados desde a granulometria da areia utilizada (REED, 1995) (parâmetro que justifica resultados acerca da consistência (fluidez) em argamassa), bem como a granulometria do lodo calcinado, fator água/aglomerante e ambos podem ser trabalhados para que se alcance resultados satisfatórios, como no caso da inserção de 30% de lodo de esgoto calcinado mediante a redução de 30% do uso de cimento Portland.

Monzó et al. (2003) avaliaram a fluidez das argamassas com substituição parcial do cimento Portland por lodo de esgoto incinerado a  $800^{\circ}\text{C}$  em um teor de até 30%. Os autores mostraram que a substituição parcial de cimento Portland por cinza de lodo de esgoto reduz a fluidez e este comportamento é explicado pela morfologia irregular das partículas de lodo e a sua alta absorção de água. Porém, o uso de um aditivo superplastificante cancela esse efeito da incorporação da cinza de lodo de esgoto sobre a argamassa.

Pan et al. (2003) verificaram que para o teor de 20% de substituição do cimento Portland pela cinza do lodo de esgoto, à medida que se aumenta a finura da cinza, a trabalhabilidade é melhorada, no entanto, permanece com valores inferiores aos da argamassa sem substituição do cimento Portland. Segundo os autores, este aumento da fluidez é influenciado pela mudança na morfologia das partículas devido à moagem das cinzas, processo que proporciona às partículas do material exercerem um efeito lubrificante na argamassa.

Apesar do índice de consistência apresentar valores quantitativos medidos pelo espalhamento da argamassa após ser submetido ao ensaio, a trabalhabilidade de uma argamassa é estabelecida por parâmetros qualitativos.

Essa avaliação qualitativa é analisada através de critérios tais como facilidade de manuseio pelo operador (pedreiro), não endurecer rapidamente durante sua

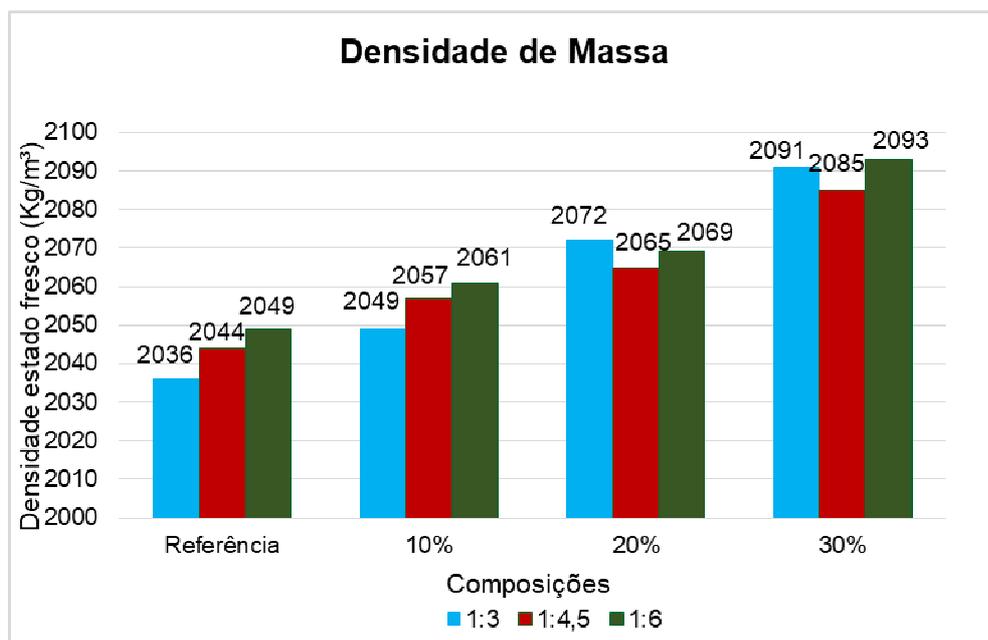
aplicação, distribuir-se facilmente na superfície aplicada, manter-se coesa ao ser transportada, etc (SOUZA, 2013).

De acordo com Metha e Monteiro (2008), a consistência da argamassa depende de fatores tais como, a relação entre água/cimento ( $a/c$ ), a relação pasta/inerte, tipo de inerte, granulometria, dimensão, forma, teor de finos, porosidade, a natureza do ligante e a presença de aditivos na mistura.

#### 4.1.2 Densidade

A Figura 27 apresenta os resultados dos ensaios referentes à densidade de massa no estado fresco das argamassas de referência, bem como das argamassas com incorporação de lodo de esgoto calcinado a 800°C produzidas nas proporções 1:3 ( $a/c=0,60$ ); 1:4,5 ( $a/c=0,80$ ) e 1:6 ( $a/c=1,0$ ).

Figura 27- Densidade de massa no estado fresco



Fonte: A Autora (2019).

Observa-se que, à medida que se aumenta-se o percentual do lodo incorporado, quando o cimento é por ele substituído parcialmente, ocorre um aumento da densidade.

A densidade com maior aumento foi das argamassas com incorporação de 30% de lodo de esgoto calcinado na temperatura 800°C produzidas na proporção

1:6, e a menor densidade obtida foi apresentada na argamassa de referência produzida na proporção 1:3.

A incorporação de lodo provocou aumento de densidade de 2,7% quando comparadas às argamassas de referência produzidas na proporção 1:3 com as argamassas com 30% de lodo produzidas na mesma proporção; no caso da proporção 1:4,5, quando se compara as argamassas de referência com as produzidas com 30% de lodo, o aumento de densidade foi de 2,01%; as argamassas produzidas na proporção 1:6, o lodo provocou aumento de 2,8%.

O lodo de esgoto calcinado a 800°C apresentou massa específica maior que a da areia utilizada, logo, o aumento na densidade de massa no estado fresco quando comparado com a argamassa de referência já era esperado.

Observa-se que nas proporções distintas, a densidade de massa aumenta conforme a incorporação do lodo, que ocorre devido à melhoria no empacotamento de grãos, onde a densidade vai sendo influenciada pelas características dos agregados, como distribuição granulométrica e morfologia das partículas (KWAN e MORA 2001).

A Tabela 19 apresenta a classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco.

Tabela 19- Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco

<b>Classe</b>	<b>Densidade de massa no estado fresco (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Método de ensaio</b>
D1	≤1 400	ABNT NBR 13278
D2	1 200 a 1 600	
D3	1 400 a 1 800	
D4	1 600 a 2 000	
D5	1 800 a 2 200	
D6	> 2 000	

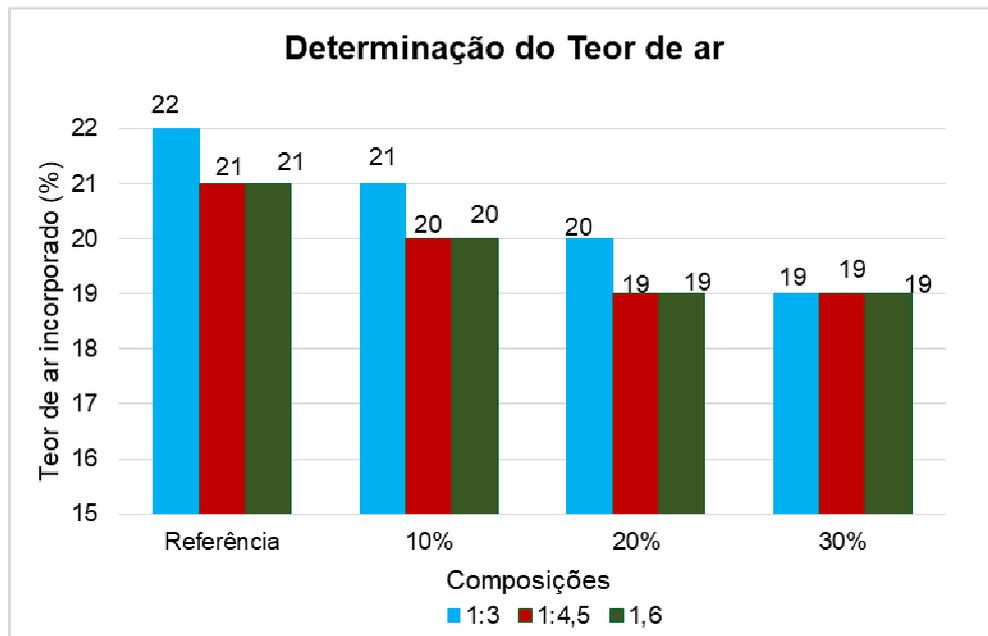
Fonte: NBR 13281 (2005).

Observa-se que conforme a NBR 13281 (2005), as argamassas com incorporação de lodo de esgoto calcinado pertencem à classe D6.

### 4.1.3 Teor de Ar Incorporado

A Figura 28 apresenta os resultados obtidos relativos ao teor de ar incorporado das argamassas de referência e das argamassas com incorporação de lodo de esgoto calcinado nas proporções 10%, 20% e 30%.

Figura 28- Determinação de teor de ar nas argamassas



Fonte: A Autora (2019).

A argamassa de referência produzida na proporção 1:3 apresentou maior teor de ar incorporado. Já as argamassas com incorporação de 20% de lodo nas proporções 1:4,5 e 1:6 e todas as argamassas com incorporação de 30% de lodo apresentaram as menores proporções de teor de ar. A incorporação de lodo proporcionou redução de teor de ar incorporado de 13,64% nas argamassas.

A densidade de massa varia inversamente com o teor de ar incorporado. Assim, havendo redução do teor de ar incorporado, ocorre aumento da densidade (CARASEK, 2010).

No tocante à determinação do teor de ar nas argamassas estudadas, as argamassas de referência apresentaram maior teor de ar quando comparadas com as argamassas produzidas com lodo de esgoto indicando que a incorporação de lodo calcinado acarretou a redução do ar incorporado. A menor relação água / cimento + (incorporação de lodo) gerou maior necessidade de água (como se

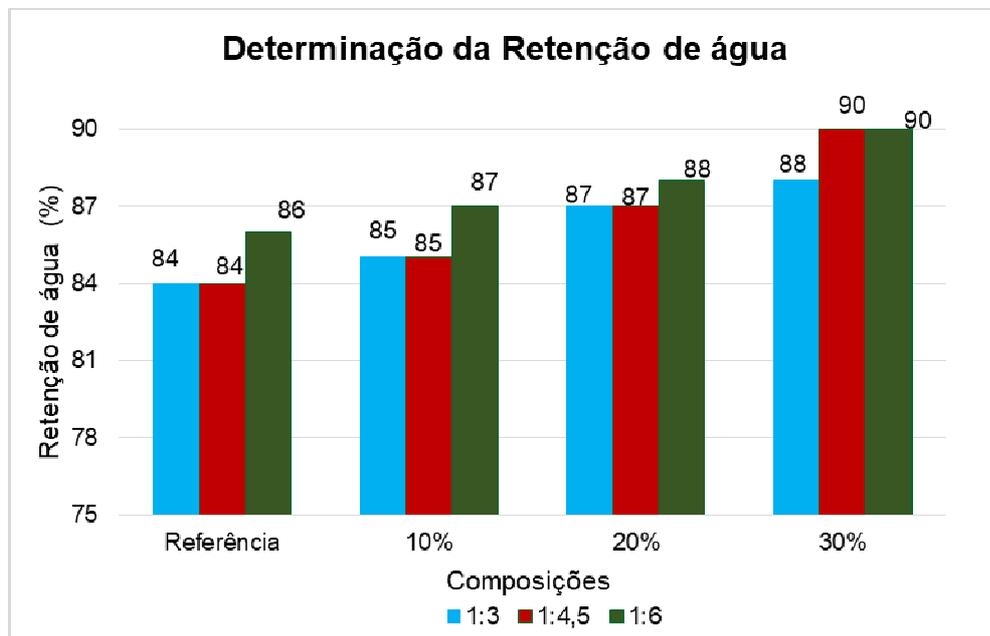
percebeu nos resultados dos ensaios de índice de consistência) proporcionando menos vazios reduzindo o teor de ar das argamassas produzidas.

Quando o teor de ar incorporado aumenta, é considerado um problema para as argamassas, pois indica que a porosidade é relativamente mais alta do que nas argamassas que não apresentam tal indicação, visto que pode facilitar a penetração de CO<sub>2</sub> da atmosfera. Este CO<sub>2</sub>, assim como outros gases existentes, pode reagir com a pasta de cimento e causar enfraquecimento do produto final (MARTINS et al. 2018).

#### 4.1.4 Retenção de água

A Figura 29 mostra os resultados obtidos nos estudos referentes à determinação da retenção de água nas argamassas de referência e nas argamassas com incorporação de lodo em substituição parcial ao cimento Portland nas proporções 10%, 20% e 30%.

Figura 29- Determinação da retenção de água das argamassas estudadas



Fonte: A Autora (2019).

A incorporação do lodo de esgoto calcinado nas argamassas promoveu aumento de retenção de 4,76% comparando à argamassa de referência produzida na proporção 1:3 com a argamassa produzida na mesma proporção com a incorporação de 30% de lodo de esgoto calcinado. Em relação às argamassas

produzidas na proporção 1:4,5, o aumento de retenção proporcionado pela incorporação de lodo foi de 7,14% quando se compara a argamassa de referência com a argamassa contendo 30% de lodo. Em relação às argamassas produzidas na proporção 1:6, o aumento de retenção proporcionado pela incorporação de 30% de lodo foi de 4,65%.

Partículas de cinzas de lodo quando misturadas em argamassa diminuem os vazios capilares, bem como os locais de nucleação, e há menos percolação de água através dos poros capilares e um aumento na retenção de água (Dal Molin, 2011).

As argamassas de referência nos traços 1:3 e 1:4,5 apresentaram menor proporção quanto à retenção de água; as argamassas dos traços 1:4,5 e 1:6 apresentaram maiores percentuais de retenção de água, para um teor de 30%.

Em geral, a incorporação de lodo provocou aumento da retenção de água nas argamassas, corroborando com os resultados apresentados na Figura 26 (índice de consistência), isto é, à medida que a consistência diminuiu a retenção de água aumentou. O aumento da retenção de água pode ter ocorrido devido à redução dos vazios existentes (conforme apresentado nos resultados de teor de ar) proporcionados devido à finura apresentada pelo lodo de esgoto após calcinado.

A Tabela 20 apresenta a classificação das argamassas quanto à retenção de água.

Tabela 20- Classificação das argamassas quanto à retenção de água

<b>Classe</b>	<b>Retenção de água (%)</b>	<b>Método de ensaio</b>
U1	≤78	ABNT NBR 13277
U2	72 a 85	
U3	80 a 90	
U4	86 a 94	
U5	91 a 97	
U6	95 a 100	

Fonte: NBR 13281 (2005).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 20, as argamassas produzidas com incorporação de lodo de esgoto calcinado na temperatura 800°C nas proporções 10%, 20% e 30% estão classificadas como U3 conforme a NBR 13281 (2005), pois os valores variaram de 84 a 90.

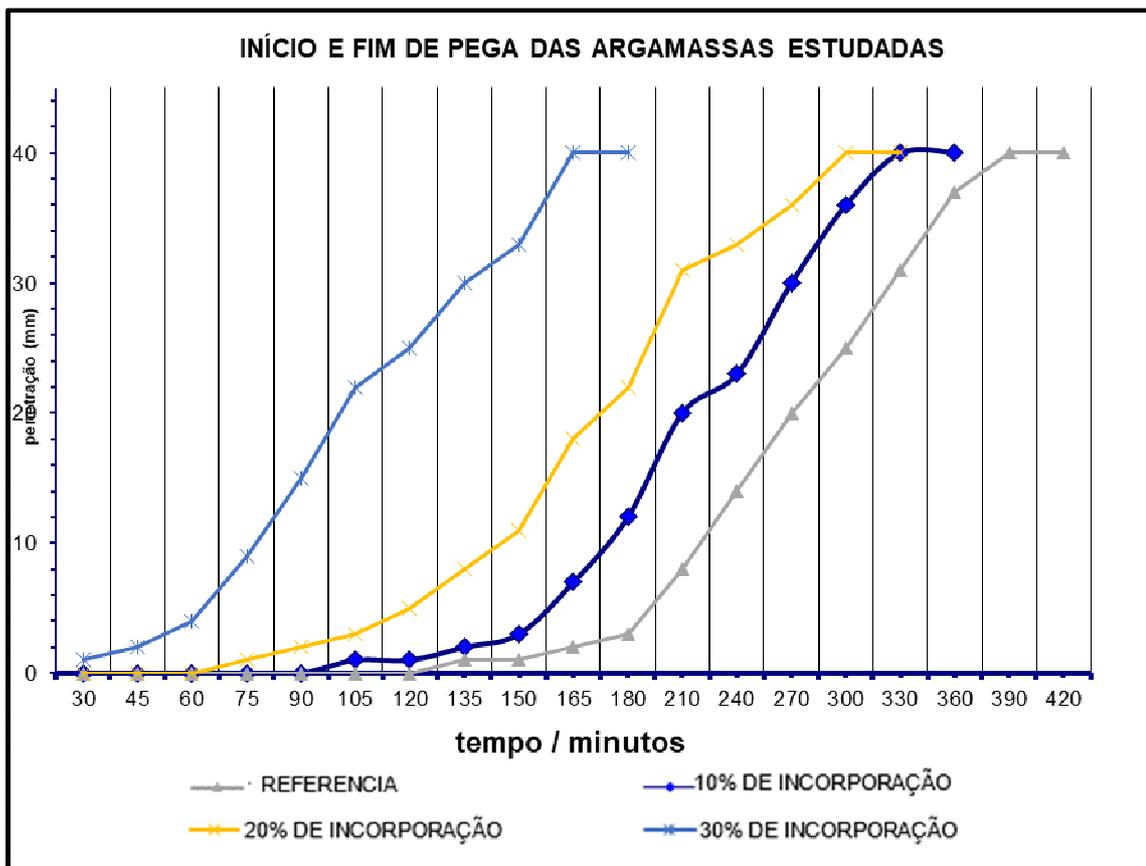
Segundo Owen (2002), as principais características que distinguem o lodo de outros resíduos são: a capacidade de suportar a vida vegetal e a capacidade de retenção de água.

A utilização de lodo de esgoto calcinado em argamassas apresenta-se como uma proposta viável no que se refere à retenção de água para a redução de manifestações patológicas ocasionadas por retração por secagem.

#### 4.1.5 Tempo de endurecimento

A Figura 30 apresenta as curvas de início e fim de endurecimento das incorporações de lodo de esgoto nas proporções 0%, 10%, 20% e 30%.

Figura 30- Tempo de início e fim de endurecimento das argamassas estudadas



Fonte: A Autora (2019).

A Tabela 21 apresenta o tempo de início e fim de pega das amostras analisadas.

Tabela 21- Tempo de início e fim de pega

<b>Traço</b>	<b>Tempo de início de pega (horas: minutos)</b>	<b>Tempo de fim de pega (horas:minutos)</b>
Referência	03:05	06:35
Incorporação de 10% de lodo calcinado a 800°C	02:35	06:00
Incorporação de 20% de lodo calcinado a 800°C	02:10	05:25
Incorporação de 30% de lodo calcinado a 800°C	00:50	03:05

Fonte: A Autora (2019).

A incorporação de lodo de 10% proporcionou redução de 1 hora e 30 minutos no tempo de início de pega e 35 minutos do tempo de fim de pega quando comparada com a pasta de referência; a incorporação de 20% apresentou diferença de tempo de início de pega de 1 hora e 5 minutos quando comparada com a pasta de referência; A incorporação de 30% de lodo na pasta causou redução de 1 hora e 55 minutos no tempo de início de pega e 3 horas e 30 minutos no tempo de fim de pega em comparação à pasta de referência.

O aumento no teor do lodo de esgoto calcinado provocou a aceleração nos tempos de início e fim de pega, em comparação com a pasta de referência, fato atribuído ao menor teor de cimento utilizado, visto que o aglomerante foi substituído em 10%, 20% e 30% pelo lodo.

Elementos como zinco e fósforo (presentes nas cinzas do lodo de esgoto) perturbam o processo de hidratação do cimento e contribuem para a aceleração do tempo de início e fim de pega das pastas (CYR, COUTAND e CLASTRES, 2007). A presença do zinco e fósforo pode ser confirmada mediante os resultados de fluorescência de Raio X (Tabela 9).

A incorporação de 30% não é recomendada visto que o tempo de início de pega está fora dos padrões de normatização, estando a incorporação de 10% e 20% dentro dos padrões, com viabilidade técnica para uso no tocante à análise correspondente ao início e fim de pega das pastas de cimento Portland.

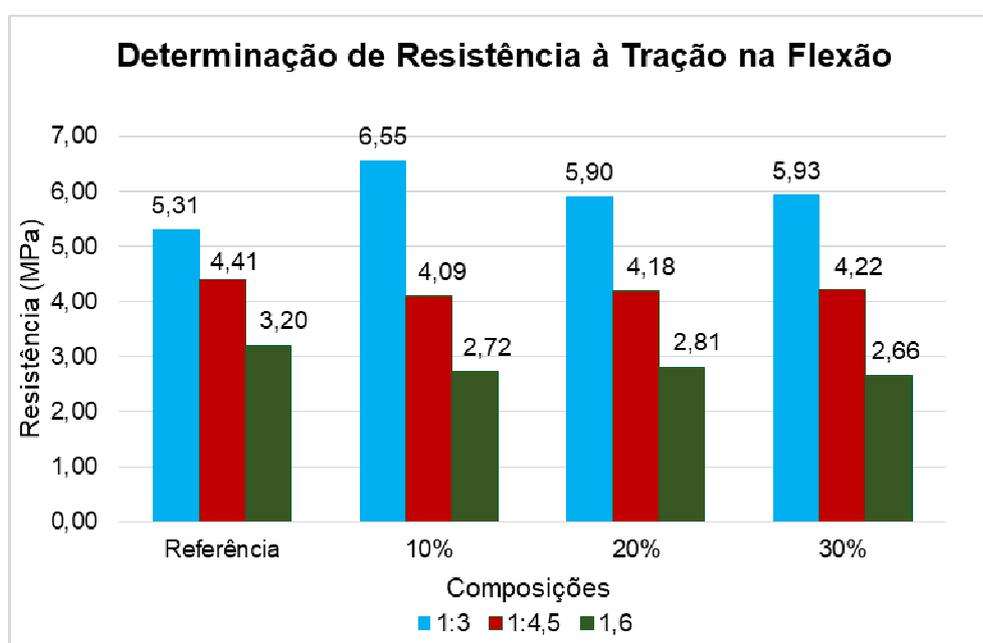
## 4.2 ENSAIOS DE ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

Apresenta-se os resultados das argamassas no estado endurecido.

### 4.2.1. Determinação de Resistência à tração na flexão

A Figura 31 apresenta os resultados referentes à determinação de resistência à tração na flexão das argamassas de referência e das argamassas executadas com lodo de esgoto calcinado a 800°C nos traços 1:3, 1:4,5 e 1:6.

Figura 31- Ensaio referente à determinação de resistência à tração na flexão das argamassas



Fonte: A Autora (2019).

As argamassas produzidas com lodo de esgoto calcinado a 800°C nas proporções 1:4,5 e 1:6, apresentaram queda na resistência à tração na flexão quando comparadas com as argamassas de referência.

As argamassas produzidas na proporção 1:3 apresentaram maiores resistências quando comparadas com todas as argamassas executadas.

A argamassa produzida na proporção 1:3 com substituição de cimento Portland por 10% de lodo de esgoto calcinado apresentou melhor desempenho diante de todas as argamassas produzidas com um aumento de 19,21% em relação à argamassa de referência; posteriormente as argamassas com 30% e 20% de incorporação de lodo de esgoto calcinado e a de referência obtiveram melhor

desempenho em relação resistência à tração na flexão com resultados 5,93MPa, 5,90MPa e 5,31Mpa, respectivamente.

As argamassas correspondentes à proporção 1:6 apresentaram os resultados menos favoráveis quando comparadas com todas as argamassas produzidas. A argamassa com 30% de incorporação de lodo obteve o pior desempenho, apresentando redução de 16,88% na resistência à tração na flexão quando comparada com a argamassa de referência produzida com a mesma proporção.

Cyr, Coutand e Clastres (2007) analisaram a resistência à tração na flexão de argamassas com 25% e 50% de cimento Portland substituído por lodo de esgoto calcinado a 850°C e constataram que a incorporação do lodo de esgoto causa redução da resistência à tração na flexão mediante comparação com as argamassas de referência.

Simoka, Reis e Boni (2016) estudaram a resistência à tração na flexão de argamassas produzidas na proporção 1:3 (cimento/areia) com incorporação de lodo calcinado em mufla à 850°C em frações de 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. Como resultado, concluíram que houve um aumento na resistência à tração na flexão até a proporção de 20% de incorporação; para as demais proporções de incorporações, houve uma redução da resistência à tração na flexão. Finalizando as análises das argamassas com demais ensaios, concluíram que a incorporação do lodo calcinado até 15% de cinzas não compromete a qualidade da argamassa.

Os resultados quanto à redução da resistência à tração na flexão conforme o aumento da incorporação de lodo obtidos pelos pesquisadores foram semelhantes aos obtidos na presente pesquisa (exceto para a proporção 1:3), sua redução é explicada pela necessidade de alto teor de água exigido nas misturas para manter a fluidez e devido ao teor de CaO nas cinzas (menos de 10%), o que afeta as propriedades hidráulicas (CHEN et al., 2013).

A necessidade de alto teor de água foi comprovada pelos resultados dos ensaios de índice de consistência e o baixo percentual de CaO (menos de 10%) nas cinzas do lodo confirma-se mediante os resultados dos ensaios de fluorescência de raio X.

A Tabela 22 apresenta a classificação das argamassas em relação à resistência à tração na flexão.

Tabela 22- Classificação das argamassas de acordo com a Resistência à tração na flexão

<b>Classe</b>	<b>Resistência à tração na flexão (MPa)</b>	<b>Método de ensaio</b>
R1	≤1,5	ABNT 13279
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	> 3,5	

Fonte: NBR 13281 (2005).

As argamassas de referência, bem como as com incorporação de 10%, 20% e 30% de lodo de esgoto calcinado a 800°C nas proporções 1:3 e 1:4,5 foram classificadas como R6 de acordo com a NBR 13281 (2005).

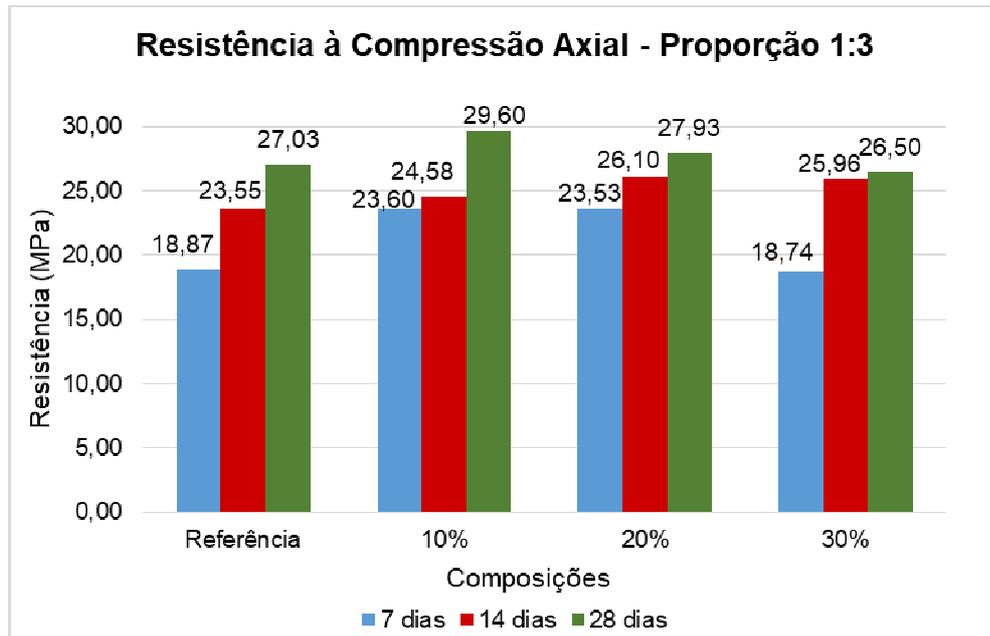
A argamassa de referência produzida na proporção 1:6 e as com incorporação de 10% e 20% de lodo de esgoto calcinado foram classificadas como R5 e a argamassa com incorporação de 30% classificada como R4.

#### **4.2.2. Determinação da Resistência à compressão**

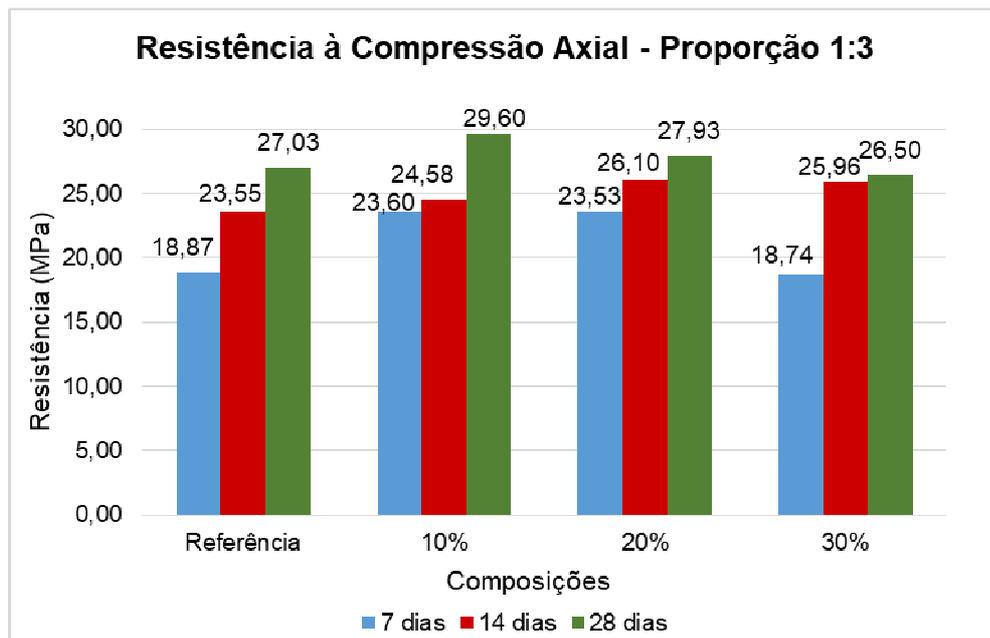
A Figura 32 (a, b e c) mostra a resistência à compressão axial das argamassas de referência, bem como das argamassas com incorporação de lodo nas proporções 10%, 20 e 30%.

Os resultados apresentados correspondem ao cálculo da média das resistências individuais seguindo o que preconiza a NBR 7215 (1996) objetivando a determinação de resistência à compressão dos corpos de prova (5x10)cm, rompidos nas idades de 7, 14 e 28 dias.

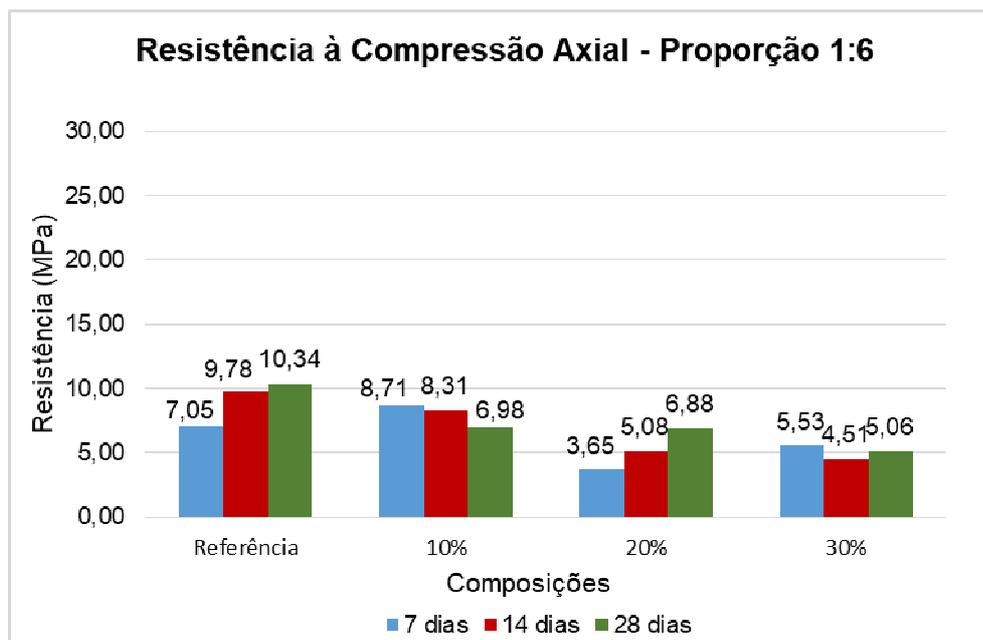
Figura 32-Resistência à compressão axial



a)



b)



c)

Fonte: A Autora (2019).

Nas argamassas produzidas na proporção 1:3, os resultados obtidos indicaram que a incorporação de lodo de esgoto calcinado na temperatura 800°C aumentou a resistência à compressão axial aos 7 dias quando se compara a argamassa de referência e as argamassas com 10% e 20% de lodo; aos 14 dias a incorporação de 10%, 20% e 30% de lodo promoveu aumento da resistência à compressão axial; aos 28 dias a incorporação de 10% e 20% de lodo promoveu aumento da resistência.

A argamassa com incorporação 30% de lodo produzida na proporção 1:3 reduziu 0,64% da resistência aos 7 dias em relação à argamassa de referência e aos 28 dias a redução foi de 1,96%; aos 14 dias as argamassas com incorporação de lodo nas proporções 10%, 20% e 30% obtiveram melhor desempenho mecânico quando comparadas com a argamassa de referência.

Os resultados quanto à determinação da resistência à compressão das argamassas aos 7 e 14 dias produzidas na proporção 1:4,5 mostraram que o lodo nas proporções 10%, 20% e 30% promoveram redução da resistência, onde a argamassa de referência obteve melhor desempenho. Aos 28 dias, a incorporação de 20% de lodo de esgoto calcinado em substituição ao cimento Portland promoveu um aumento de 9,10% da resistência à compressão axial.

Nas argamassas produzidas na proporção 1:6, aos 7 dias, as amostras com 10% de incorporação de lodo apresentaram aumento de 23,55% em comparação com a argamassa de referência; as proporções 20% e 30% apresentaram redução quanto à resistência. A redução quando comparada à argamassa de referência com a argamassa com incorporação de 30% foi de 35,94%.

Comparando a argamassa de referência com as argamassas com incorporação de lodo de esgoto calcinado, aos 14 dias, a incorporação de lodo de esgoto provocou queda na resistência à compressão axial, tendo a de referência apresentado maior resistência (9,78 MPa) e a argamassa com incorporação de 30% a menor (4,51 MPa). Aos 28 dias a incorporação de lodo de esgoto promoveu queda na resistência da compressão axial. A argamassa de referência apresentou melhor desempenho diante de todas as análises produzidas na proporção 1:6.

A diferença da resistência à compressão observada entre as amostras aos 7, 14 e 28 dias foi mais significativa com a incorporação de 30% de lodo das argamassas produzidas na proporção 1:6. Este comportamento pode ser explicado pela presença de matéria orgânica que pode alterar o processo de hidratação do cimento Portland, ocasionando aumento do tempo de início de pega e retardando a formação dos compostos hidratados (MACIOSKI, 2014).

Segundo Pan et al. (2003), o aumento na finura das partículas da cinza de lodo de esgoto proporcionou um aumento da resistência à compressão das argamassas, potencializando a atividade pozolânica da cinza. O aumento da resistência à compressão mediante à incorporação de lodo foi observado nas argamassas produzidas nas proporções 1:3 e 1,45.

Monzó et al. (1999), em seus estudos, comprovaram que a substituição de cimento por lodo de esgoto em até 30% não reduziu a resistência das argamassas e sugeriu que é devido às propriedades pozolânicas do lodo de esgoto. No presente trabalho a substituição de 30% não provocou redução significativa nas amostras analisadas correspondentes ao traço 1:3 (aos 14 e 28 dias).

Tay (1986) e Tay et al. (2002), através de estudos sobre incorporação de lodo em substituição ao cimento Portland, concluíram que à medida que o teor de cinza na mistura aumentou, a resistência à compressão reduziu, em relação à referência. No presente trabalho o mesmo resultado foi observado em todas as amostras

executadas do traço 1:6 correspondentes à substituição de 20% e 30% de lodo aos 7, 14 e 28 dias.

A Tabela 23 apresenta a classificação das argamassas quanto à resistência à compressão.

Tabela 23- Classificação das argamassas de acordo com a Resistência à compressão

<b>Classe</b>	<b>Resistência à compressão (Mpa)</b>	<b>Método de ensaio</b>
P1	≤2,0	ABNT 13279
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	> 8	

Fonte: NBR 13281 (2005).

Os resultados quanto à resistência à compressão obtidos apresentaram variações: todas as argamassas produzidas nas proporções 1:3 e 1:4,5 e as de referência com resistência analisada aos 14 e 28 dias produzidas na proporção 1:6 e com 10 % de incorporação de lodo aos 7 e 14 dias pertencem à classe P6.

As argamassas produzidas na proporção 1:6 (com a incorporação de 10% de lodo analisada aos 28 dias; com 20% de lodo analisada aos 14 e 28 dias e as argamassas com incorporação de 30% de lodo com resistência analisada aos 7 e 28 dias) pertencem à classe P5.

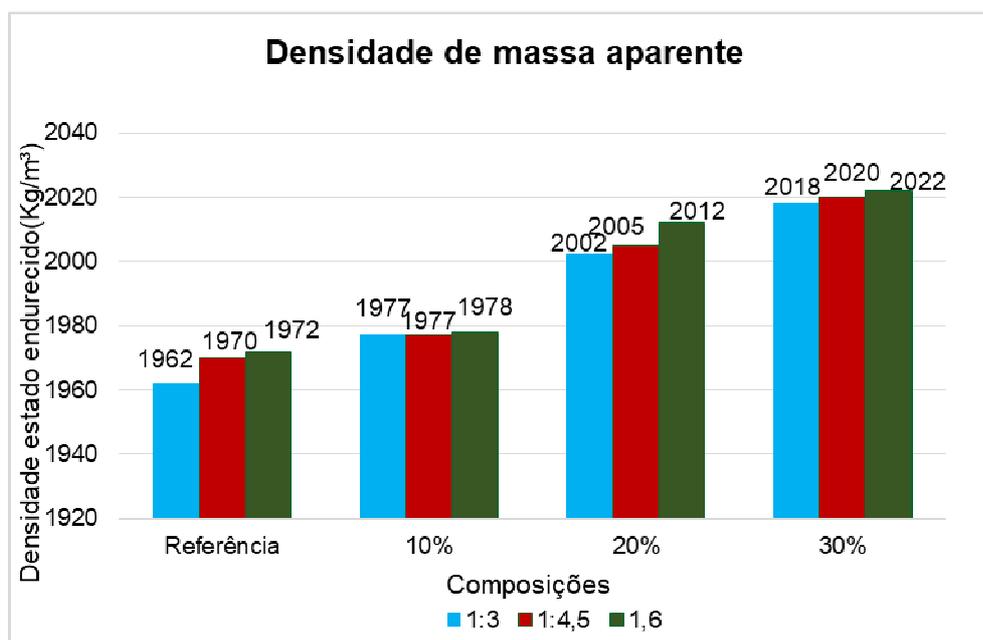
A argamassa produzida com incorporação 30% de lodo de esgoto analisada aos 14 dias, pertence à classe P3.

As proporções 1:3 e 1:4,5 apresentaram melhores desempenhos quanto à determinação da resistência à compressão. Em relação às argamassas com incorporação de lodo nas proporções de 10%, 20% e 30%, o traço 1:6 apresentou resultados com as maiores variações acerca da avaliação da resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias comparando-se com os traços 1:3 e 1:4,5.

#### **4.2.3. Densidade de massa aparente**

A figura 33 apresenta os resultados referentes à densidade da massa de argamassas no estado endurecido produzidas nas proporções 1:3, 1:4,5 e 1:6.

Figura 33- Densidade da massa de argamassas no estado endurecido



As argamassas de referência apresentaram menores densidade de massa quando comparadas com as argamassas produzidas com incorporação de lodo de esgoto. A incorporação de lodo de esgoto calcinado apresentou aumento na densidade da massa nas argamassas, tendo maior valor as argamassas com 30% de incorporação.

Do valor da argamassa de referência para o valor de maior densidade, que no caso corresponde à argamassa produzida na proporção 1:6 com 30% de incorporação de lodo, houve um aumento de 3,06% na densidade.

Nas argamassas no estado fresco, a incorporação de lodo de esgoto provocou aumento de densidade. O mesmo fato pode ser observado nas argamassas produzidas com 20% e 30% de incorporação de lodo no estado endurecido, pois à medida que aumenta o teor de incorporação de lodo de esgoto calcinado, aumenta a densidade de massa para as argamassas produzidas nestas proporções.

O lodo de esgoto calcinado apresentou maior massa específica que a da areia, logo, era esperado que as argamassas produzidas com incorporação de lodo calcinado apresentassem maiores densidades quando comparadas com às

argamassas de referência. Outro fator que pode ter contribuído com o aumento da densidade seria a reação pozolânica.

Narciso (2006) em seus estudos sobre argamassas, verificou que quando são produzidas argamassas com agregados que apresentam maior teor de finos, a densidade de massa é maior do que as argamassas que não foram produzidas com agregados com tais características. O fenômeno foi justificado em função dos finos ocuparem os vazios entre os grãos, aumentando o empacotamento do conjunto. No caso da presente pesquisa, os finos são representados pelo lodo de esgoto calcinado, entretanto não foram utilizados como agregado nesta pesquisa.

A Tabela 24 mostra, conforme a NBR 13281 (2005), os requisitos relacionados à densidade da massa aparente no estado endurecido.

Tabela 24- Densidade de massa aparente no estado endurecido

<b>Classe</b>	<b>Densidade de massa aparente no estado endurecido kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Método de ensaio</b>
M1	≤1200	ABNT 13280
M2	1000 a 1400	
M3	1200 a 1600	
M4	1400 a 1800	
M5	1600 a 1200	
M6	>1800	

Fonte: NBR 13281 (2005).

Conforme a NBR 13281 (2005), a densidade de massa aparente analisada nos traços 1:3, 1:4,5 e 1:6 com adições de 10%, 20% e 30% de lodo calcinado se encaixam na classe M6, mesma classe das argamassas de referências.

### 4.3 ENSAIOS DE DURABILIDADE DE ARGAMASSA

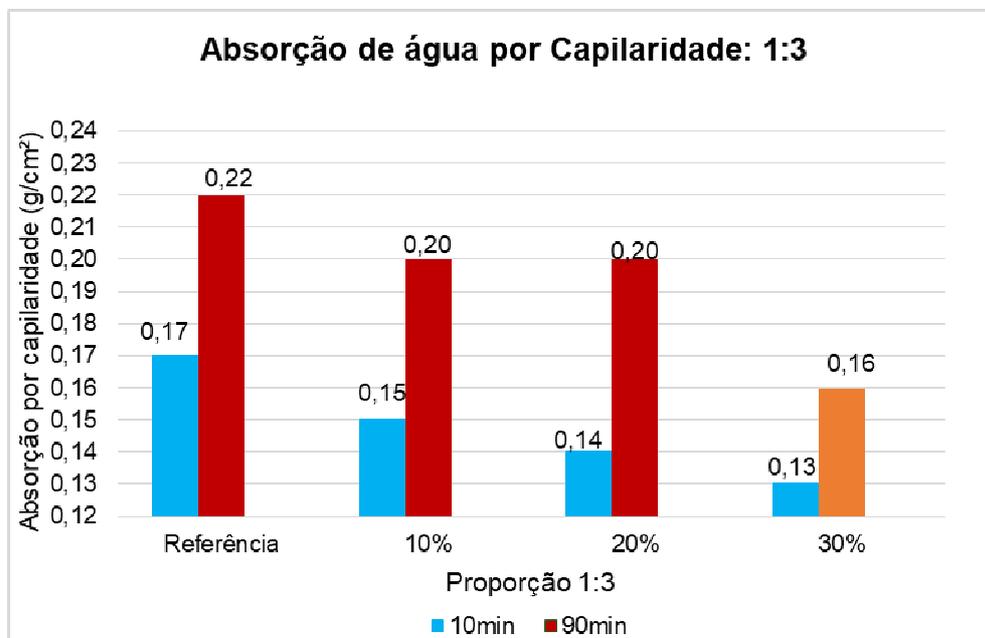
A seguir, os ensaios de durabilidade das argamassas produzidas.

#### 4.3.1 Absorção de água e coeficiente de capilaridade

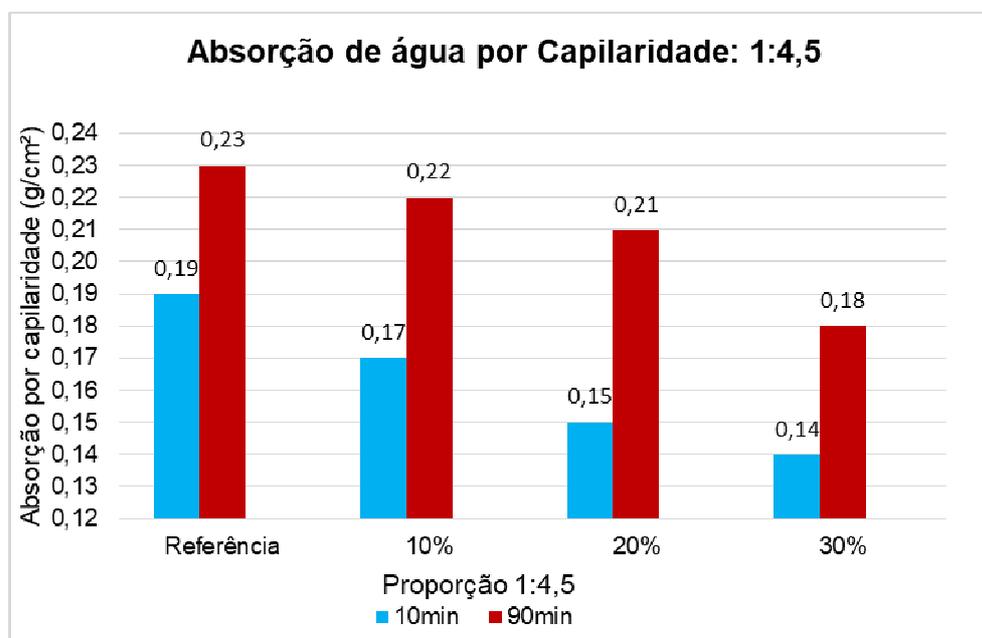
A Figura 34 apresenta os resultados de absorção de água por capilaridade executados com os corpos de prova sem incorporação de lodo e incorporados com

lodo calcinado na temperatura 800°C após cura de 28 dias referentes as proporções 1:3, 1:4,5 e 1:6 com incorporação de 0%, 10%, 20% e 30% de lodo de esgoto calcinado.

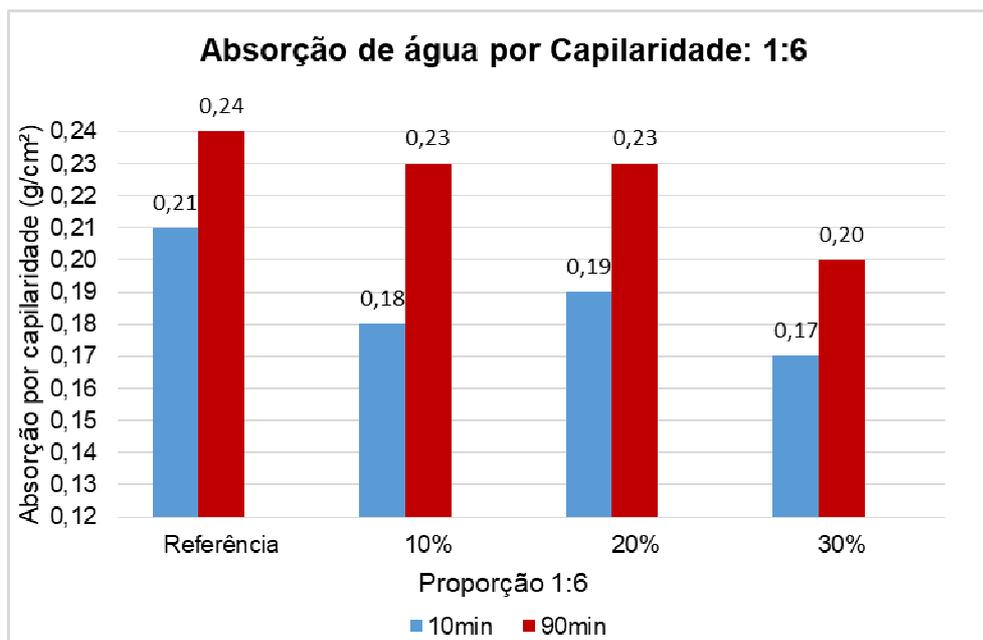
Figura 34- Absorção por capilaridade medida aos 10 e aos 90 minutos



a)



b)



c)

Fonte: A Autora (2019).

Percebe-se que o maior tempo de contato com a água faz com que a absorção aos 90 minutos seja mais elevada que a absorção aos 10 minutos e que há uma estabilidade na absorção das amostras com incorporação de 10% e 20 % do lodo substituindo o aglomerante (proporções 1:3, 1:4,5 e 1:6).

Todas as proporções estudadas sofreram aumento na absorção quando se compara as leituras de absorção realizadas aos 10 minutos com as realizadas aos 90 minutos, fato observado em todas as proporções (1:3, 1:4,5 e 1:6) para todas as porcentagens de incorporação de lodo de esgoto calcinado (0%, 10%, 20% e 30%). A micrografia do lodo de esgoto mostrou a presença de partículas irregulares, com texturas de superfície áspera e uma microestrutura porosa, levando a uma alta absorção de água.

A proporção 1:3 em relação aos 10 minutos, sofreu redução de absorção de 23,53% quando se compara com a absorção da argamassa de referência com a argamassa com 30% de incorporação de lodo e aos 90 minutos, a redução foi de 27,27%; realizando a mesma comparação com a proporção 1:4,5 a redução de absorção foi de 26,32% aos 10 minutos e aos 90, a redução foi de 21,74% e para as argamassas produzidas na proporção 1:6, a redução de absorção aos 10 minutos foi de 19,05% e aos 90 minutos de absorção, a redução foi de 16,67%.

Segundo os estudos de Posser (2004), há uma relação entre a absorção de água com a resistência à compressão dos corpos de prova. Com isso, à medida em que aumenta a quantidade absorvida de água pelos corpos de prova, há ocorrência da diminuição da resistência a compressão (vice-versa). Desta forma, no presente estudo confirmou-se a existência da correlação entre absorção de água e resistência à compressão.

Nas proporções 1:3 e 1:4,5 (incorporação de 30% de lodo com resistência à compressão determinada aos 28 dias), onde houve o aumento da resistência à compressão axial conforme a redução de absorção de água.

Na argamassa endurecida, o tamanho e a continuidade dos poros controlam a absorção de água e o coeficiente de capilaridade. A porosidade nas argamassas está relacionada à resistência mecânica de forma inversa (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A absorção de água por capilaridade mostra que para os dois períodos de medição (10 min e 90 min) o aumento da incorporação de lodo de esgoto reduziu a absorção de água.

A redução quanto à absorção pode ser devido ao melhor empacotamento das partículas (que ocorreu com o aumento da incorporação do lodo), ou seja o preenchimento dos vazios causado pelas partículas finas de lodo.

A Tabela 25 apresenta os valores de coeficiente de capilaridade conforme à NBR 13281 (2005).

Tabela 25- Classificação das argamassas quanto ao coeficiente de capilaridade

<b>Classe</b>	<b>Coeficiente de capilaridade g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup></b>	<b>Método de ensaio</b>
C1	≤1,5	ABNT NBR 15259
C2	1,0 a 2,5	
C3	2,0 a 4,0	
C4	3,0 a 7,0	
C5	5,0 a 12,0	
C6	> 10,0	

Fonte: NBR 13281 (2005).

As argamassas produzidas apresentaram coeficiente de capilaridade constantes equivalentes à 2 g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>, logo, as argamassas estudadas com

incorporação de lodo de esgoto nas proporções 0%, 10% e 20% foram classificadas como C2.

Todas as argamassas produzidas apresentaram coeficiente de capilaridade baixo, o que traz indicativo de um baixo valor de permeabilidade, contribuindo para o aumento da impermeabilidade e da durabilidade dessas argamassas em estudo.

Os resultados corroboram com os estudos de Ingunza; Camarini; Costa (2018), que avaliaram a viabilidade de utilização de cinza de lodo de esgoto como incorporação em argamassa de cimento Portland no traço 1:3 em massa considerando o traço padrão estudando adições desta cinza nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% em relação à massa de cimento.

Também foram estudados a absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade de argamassas e obtiveram coeficientes de capilaridade constantes em suas amostras ( $2 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{-1/2}$ ) e verificaram que apesar da possível redução do raio dos capilares e do bloqueio dos capilares causado pelas partículas finas da cinza do lodo de esgoto que resultaram em uma menor absorção de água por capilaridade, o coeficiente de capilaridade permaneceu inalterado para todos os teores de incorporação analisados.

#### **4.3.2 Resistência de Aderência à Tração**

A Figura 35 apresenta os resultados obtidos para a resistência de aderência à tração das argamassas ensaiadas, a de referência e as com incorporação de 0%, 10%, 20% e 30% de lodo de esgoto dado mediante a média aritmética dos resultados obtidos nos 12 corpos de prova de cada proporção estudada.

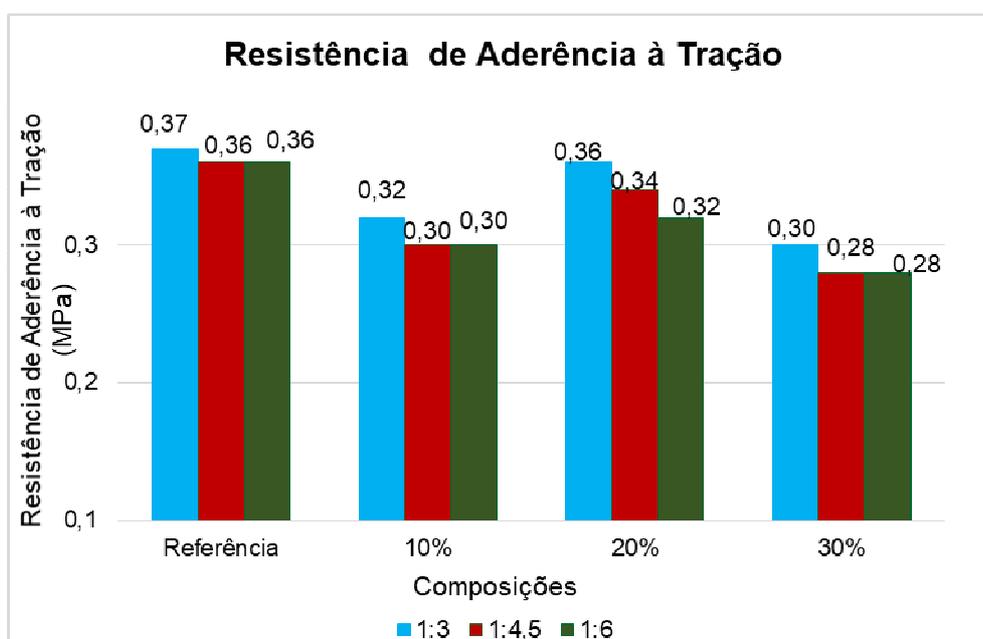
Figura 35- Arrancamento do corpo de prova



Fonte: A Autora (2019).

Em relação aos resultados do teste referente à resistência à tração na flexão, as rupturas ocorreram no substrato (Figura 36). A NBR 13528 (2010) afirma que para este tipo de ruptura o valor da resistência de aderência à tração é igual ao valor obtido no ensaio.

Figura 36- Resistência de aderência à tração das argamassas



Fonte: A Autora (2019).

Em geral, a carga de ruptura das pastilhas das amostras de referência apresentou maiores resistências de aderência à tração das argamassas analisadas.

A substituição de 20% de lodo apresentou melhor desempenho acerca das incorporações para todas as proporções analisadas com incorporação de lodo. Os corpos de prova retirados do substrato com 20% de incorporação de lodo na proporção 1:3 quando comparados com os de referência, apresentaram resultado 2,7% inferior em relação à aderência à tração. Na proporção 1:4,5 o resultado foi 5,56% inferior e na proporção 1:6 o resultado foi 11% inferior às cargas de ruptura da amostra de referência.

Nas argamassas de revestimento produzidas nas proporções 1:4,5 e 1:6, a carga de ruptura das pastilhas nas argamassas com incorporação de 10% e 30% de lodo apresentaram mesmo desempenho.

Todas as cargas de ruptura apresentadas pelas argamassas produzidas na proporção 1:6 apresentaram desempenho inferior quando comparadas com as demais cargas de ruptura apresentadas pelas argamassas de mesmo percentual de incorporação de lodo.

A Tabela 26 apresenta os limites de resistência de aderência à tração para revestimento.

Tabela 26- Limites de resistência de aderência à tração para revestimento

Local		Acabamento	Ra (Mpa)
Parede	Interna	Pintura ou base para reboco	≥0,20
		Cerâmica ou laminado	≥0,30
	Externa	Pintura ou base para reboco	≥0,30
		Cerâmica	≥0,30
Teto			≥0,20

Fonte: NBR 13749 (2013).

A NBR 13749 (2013) estabelece que os ensaios de resistência de aderência à tração serão aceitos se, do grupo de 12 corpos de prova, pelo menos 8 valores de resistência de aderência à tração forem superiores ao mínimo exigido (conforme apresentado na tabela 26 da norma), após os 28 dias.

Conforme a NBR 13749 (2013) e os resultados das médias, todos os corpos de prova apresentaram seus valores dentro do limite estabelecido.

As argamassas com incorporação de 30% do lodo produzidas nas proporções 1:4,5 e 1:6, por terem apresentado resistência inferior à que estabelecida pela NBR 13749(2013) ( $\geq 0,30$  MPa), não se enquadram para uso interno (cerâmica ou laminado) e externo (pintura ou base para reboco e cerâmica).

Observa-se que as menores resistências foram apresentadas pelas proporções que foram produzidas com incorporação de 30% e que, conforme a Figura 26, foram as argamassas que apresentaram maior queda de fluidez. Devido à sua finura, justificada pela morfologia irregular, o lodo de esgoto demanda por um consumo elevado de água, dessa forma, tendendo a reduzir a resistência de aderência.

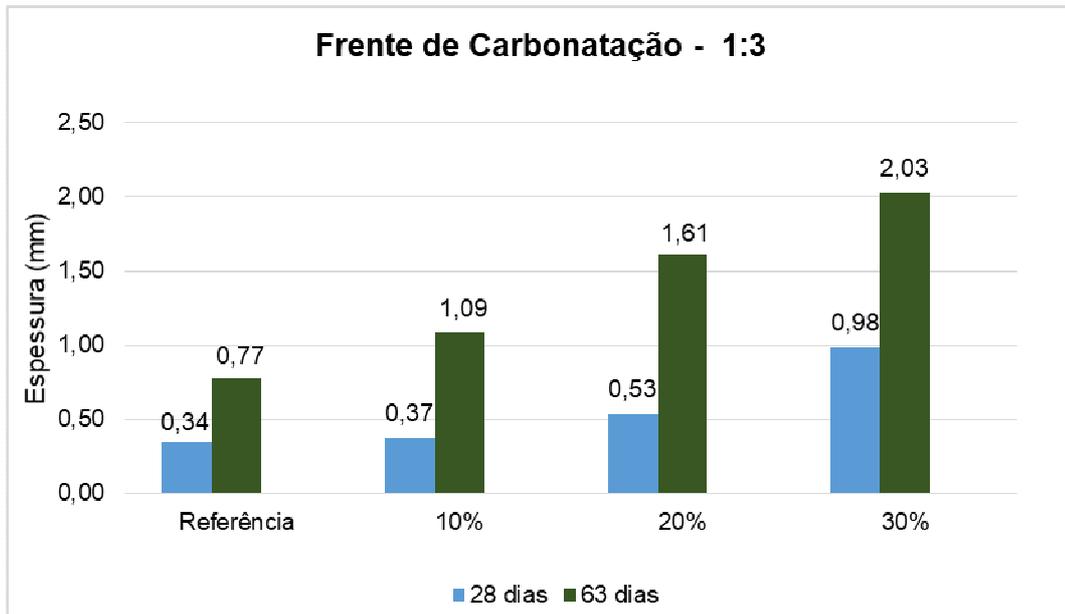
As propriedades da argamassa no estado fresco, o material, as condições do substrato e os procedimentos da execução do revestimento influenciam diretamente na resistência de aderência à tração (MACIEL, BARROS e SABBATINI, 1998).

#### **4.3.3 Envelhecimento acelerado e Resistência à carbonatação**

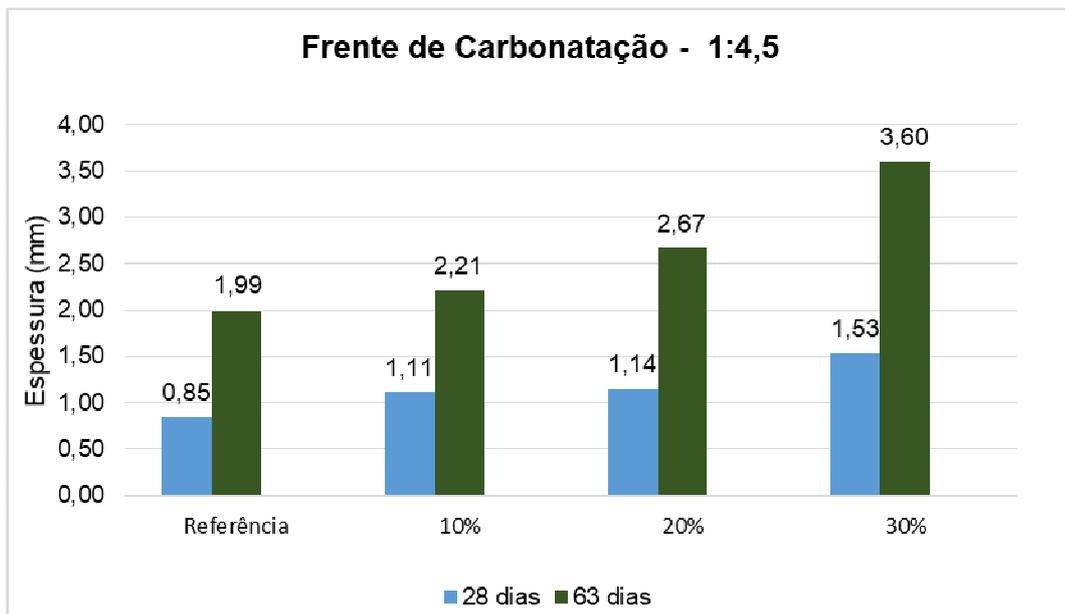
A Figura 37 apresenta os resultados oriundos à frente de carbonatação das argamassas produzidas.

Mensuradas através de paquímetro digital, as zonas danificadas foram medidas. As amostras que passaram pelo processo de envelhecimento acelerado aos 28 dias apresentaram menor frente de carbonatação quando comparadas com as amostras que passaram pelo processo de envelhecimento acelerado aos 63 dias.

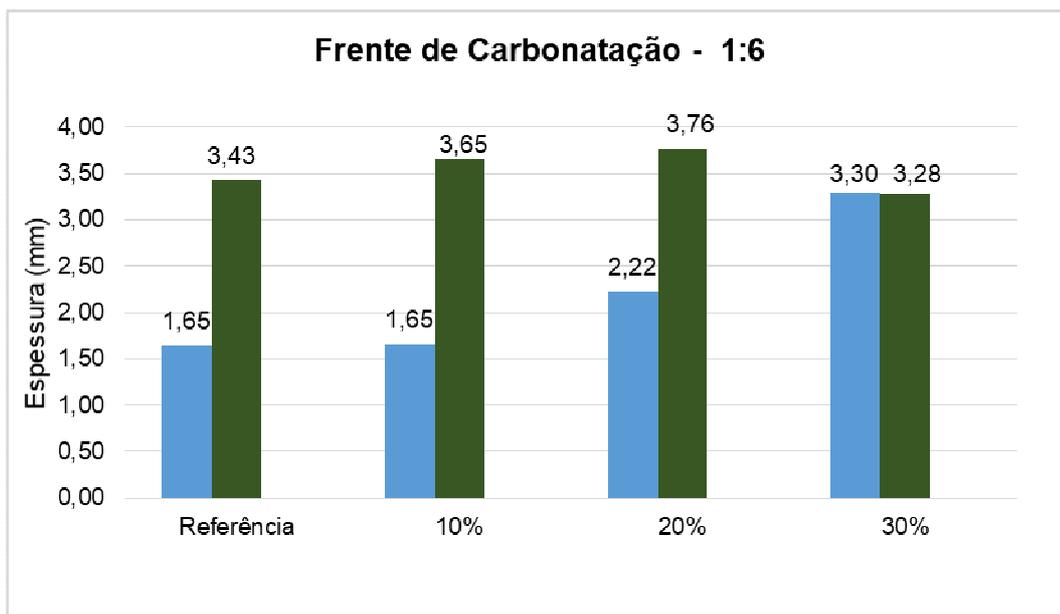
Figura 37- Frente de carbonatação das argamassas



a)



b)



c)

Fonte: A Autora (2019).

Das amostras produzidas na proporção 1:3, a incorporação de 30% de lodo de esgoto apresentou maior percentual de frente de carbonatação quando comparada com a amostra de referência produzida na mesma proporção após o processo de envelhecimento aos 63 dias, apresentando aumento de 163,04%.

Das argamassas com incorporação de lodo que passaram pelo processo dos ciclos de molhagem e secagem aos 28 dias, a argamassa com incorporação de 10% apresentou menor percentual de frente de carbonatação, apresentando 8,82% de diferença em relação à amostra de referência (amostra que obteve menor percentual de frente de carbonatação aos 28 dias das amostras analisadas na proporção 1: 3).

Em relação às medições de frente de carbonatação das amostras produzidas na proporção 1:4,5, a amostra com 30 % de lodo após processo de envelhecimento de 63 dias apresentou a maior frente de carbonatação de todas as amostras avaliadas, apresentando aumento de 80,90% quando comparada com a amostra de referência que passou pelos mesmos ciclos.

Acerca do envelhecimento acelerado aos 28 dias de ciclos de molhagem e secagem das amostras com lodo, a incorporação equivalente à 10% apresentou menor frente de carbonatação quando comparada com a amostra de referência (amostra que apresentou menor percentual de frente de carbonatação de todas as

amostras produzidas que foram analisadas), apresentando a amostra com 10% de lodo, diferença de 30,59% sobre à amostra de referência.

As amostras produzidas na proporção 1:6, aquela com 20% de lodo de esgoto calcinado em substituição ao cimento Portland, após processo de 63 dias de molhagem e secagem, apresentou 9,62% de aumento em relação à amostra de referência que passou pelo mesmo processo. A amostra de referência que passou pelos ciclos de molhagem e secagem aos 28 dias apresentou mesma frente de carbonatação da amostra com 10% de lodo de esgoto que passou pelos mesmos ciclos. A amostra com 30% de lodo após os ciclos de molhagem e secagem apresentou menor frente de carbonatação quando comparada com a argamassa de referência.

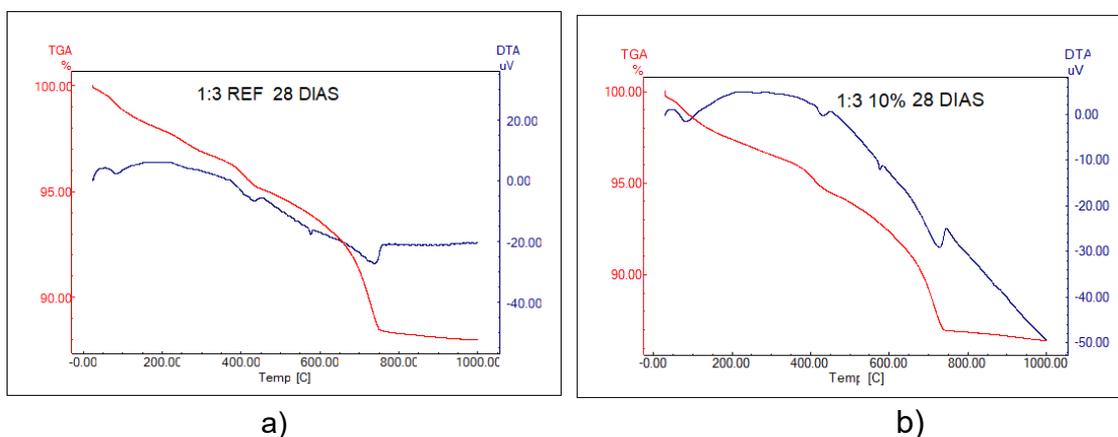
#### 4.3.4 Termogravimetria das argamassas

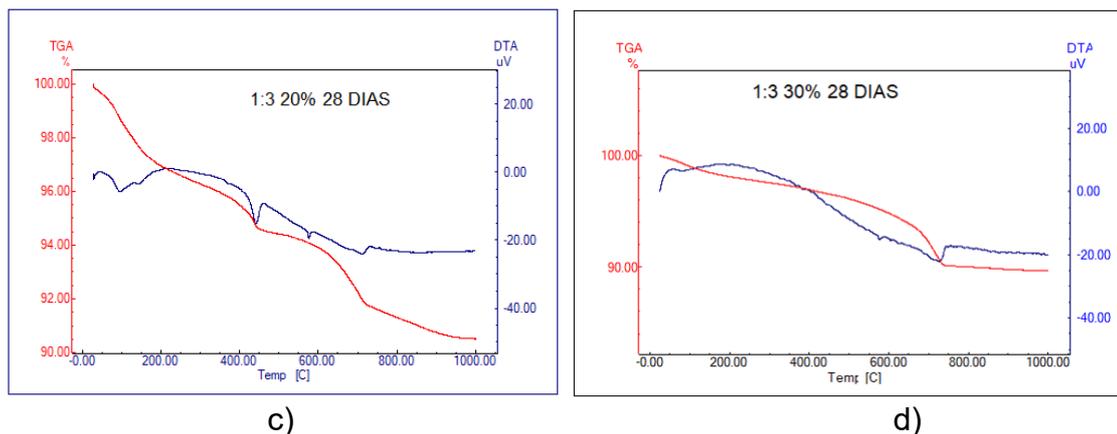
Apresenta-se a termogravimetria das argamassas produzidas.

##### 4.3.4.1 Termogravimetria das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:3 após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem

A Figura 38 apresenta as amostras referentes aos 28 dias de ciclo de molhagem e secagem produzidas na proporção 1:3 das argamassas carbonatadas.

Figura 38- Argamassas após 28 dias de ciclos envelhecimento acelerado produzidas na proporção 1:3





Fonte: A Autora (2019).

A argamassa de referência produzida na proporção 1:3 que sofreu carbonatação através do envelhecimento acelerado mediante os ciclos de molhagem e secagem aos 28 dias (Figura 38 a), apresentou uma perda de massa total de 12,007% que ocorreu em cinco etapas de decomposição.

A primeira etapa de perda de massa ocorreu na faixa de 24,55°C a 177°C com perda de 1,345% associada ao teor de água quimicamente combinada relacionada à formação de C-S-H, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 84°C.

A segunda etapa de perda ocorreu entre 117°C e 366°C com perda de massa de 2,275%. A terceira etapa de perda ocorreu entre 366°C e 499°C com perda de 1,230%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 432°C. Entre 499°C e 754°C observa-se a perda de massa da quarta, de 6,697% representada por pico endotérmico na curva DTA em 737°C.

A quinta etapa ocorreu na faixa de temperatura entre 754°C e 1000°C com perda de massa de 0,461%.

Para a argamassa produzida com 10% de incorporação de lodo na proporção 1:3 após 28 dias do ciclos de envelhecimento acelerado (Figura 38 b), evidenciou-se perda de massa em cinco estágios e a perda de massa total foi de 13,417%.

A primeira perda de massa foi entre 30,55°C e 107°C, com perda de massa de 1,375%, associada ao teor de água quimicamente combinada relacionada à formação de C-S-H. Essa perda de massa foi representada na curva DTA com um pico endotérmico de máximo em 83,46°C.

O segundo estágio de perda ocorreu entre 107 e 411°C, correspondendo a uma perda de 3,317%.

O terceiro estágio de perda de massa ocorreu entre 411°C e 450°C, com perda de 0,628%, evidenciada na curva DTA pelo pico endotérmico máximo em 431,82°C, que está associada à desidroxilação do hidróxido de cálcio encontrada no cimento (portlandita).

A quarta etapa ocorreu entre 450°C e 745°C com perda de massa de 7,536%, representada na curva DTA por um pico endotérmico em 728°C, associada à degradação oxidativa dos resíduos carbonáceos formados durante a segunda etapa e entre 745°C e 1000°C ocorreu a quinta etapa de perda e observou-se uma perda de 0,561%.

Para a amostra produzida na proporção 1:3 com 20% de incorporação de lodo após 28 dias do ciclo de envelhecimento de molhagem e secagem objetivando o envelhecimento acelerado (Figura 38 c), pode-se observar uma perda de massa total equivalente a massa percentual de 9,497%, em cinco etapas de decomposição.

A primeira etapa ocorreu na faixa de 27°C a 154°C com perda de massa de 2,542% associada ao teor de água quimicamente combinada relacionada à formação de C-S-H, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 95°C, estando associada à decomposição da Gipsita e decomposição da Etringita.

A segunda etapa ocorreu entre 154°C e 417°C com perda de 2,228%; já a terceira etapa ocorreu na faixa de temperatura entre 417°C e 457°C, com perda de massa 0,680%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 441°C.

A quarta etapa de perda ocorreu entre 457°C e 727°C com perda de massa de 2,808% representada por pico endotérmico em 710°C e na quinta etapa a perda foi entre 727°C e 1000°C, onde observa-se uma perda de massa de 1,238%.

As curvas de TGA/DTA para a argamassa produzida na proporção 1:3 com 30% de lodo nas mesmas condições de envelhecimento (28 dias) (Figura 38 d), evidenciam três estágios de perda de massa, com perda de massa total de 10,313%.

O primeiro estágio ocorreu entre 25,72°C e 108°C, com perda de massa de 1,113%. O segundo estágio ocorreu entre 108°C e 734°C, correspondendo a uma perda de 8,766%, evidenciada na curva DTA pelo pico endotérmico máximo em 726°C e o terceiro estágio ocorreu entre 734°C e 1000°C com perda de 0,434%.

A Tabela 27 apresenta o resumo das perdas de massa em todas as etapas de decomposição de cada argamassa estudada na proporção 1:3 que sofreu carbonatação.

Tabela 27- Resumo das perdas de massa em todas as etapas de decomposição das argamassas

Amostra	Primeira etapa	Segunda etapa	Terceira etapa	Quarta etapa	Quinta etapa
Referência 1:3	24,55°C a 177°C com perda de 1,345%	117°C a 366°C com perda de 2,275%	366°C a 499°C com perda de 1,230%	499°C e 754°C com perda de 6,697%	754°C e 1000°C com perda de 0,461%
1:3 com 10% de incorporação 28 dias de ciclo	30,55 e 107°C com perda de 1,375%	107 e 411°C com perda de 3,317%.	411°C e 450°C com perda de 0,628%	450°C e 745°C com perda de 7,536%	745°C e 1000°C com perda de 0,561%
1:3 com 20% de incorporação 28 dias de ciclo	27°C a 154°C com perda de 2,542%	154°C a 417°C com perda de 2,228%.	417°C e 457°C, com massa 0,680%,	457°C a 727°C com perda de 2,808%,	727°C a 1000°C com perda de 1,238%
1:3 com 30% de incorporação 28 dias de ciclo	25,72 e 108°C, com perda de 1,113%	108°C e 734°C, com perda de 8,766%	734°C e 1000°C com perda de 0,434%	-	-

Fonte: A Autora (2019).

Segundo Ramachandran (1979), a análise termogravimétrica é uma das técnicas de caracterização mais utilizadas e divulgadas para a determinação do material carbonatado, bem como para determinar o teor de hidróxido de cálcio e a atividade pozolânica das adições minerais. Donatello, Tyer, Cheeseman (2010) relataram que ao se multiplicar a perda de massa observada nos intervalos aproximadamente nas temperaturas entre 465 e 1000°C pelo fator (2,27), logo se tem a quantidade de carbonato de cálcio.

Saad (1996) afirma que o pico de decomposição de DTA do hidróxido de cálcio ocorre no intervalo de temperatura de 450°C a 550°C. A análise termogravimétrica permite até quantificar, na idade preconizada na NBR 5751 (2015)- Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias, o teor de hidratos formados, a portlandita consumida por atividade pozolânica e a carbonatação da amostra.

A Tabela 28 apresenta o percentual de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio presentes nas argamassas produzidas na proporção 1:3 após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem onde foram detectadas regiões carbonatadas.

Tabela 28- Teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio presentes nas argamassas produzidas na proporção 1:3 após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem

<b>Teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio das argamassas produzidas na proporção 1:3 (28 dias de ciclos de molhagem)</b>		
<b>Incorporações</b>	<b>Hidróxido de cálcio (%)</b>	<b>Carbonato de cálcio (%)</b>
Referência	5,05	16,25
10%	2,58	18,38
20%	2,79	9,18
30%	-	20,88

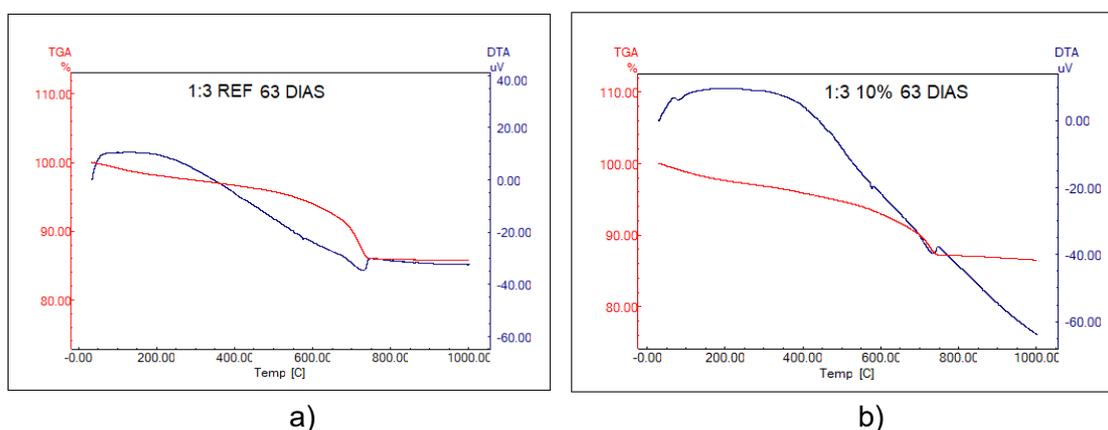
Fonte: A Autora (2019).

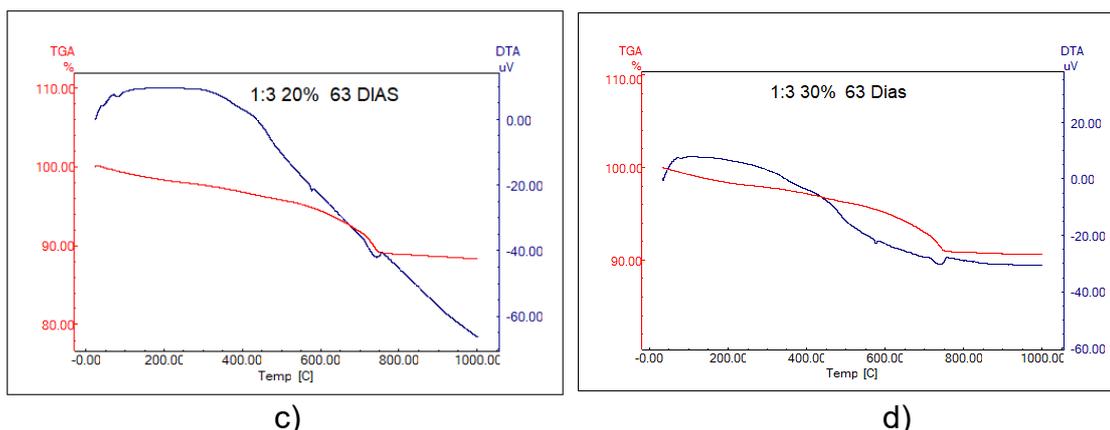
Das argamassas produzidas na proporção 1:3, a argamassa com incorporação de 20% de lodo de esgoto calcinado apresentou melhor desempenho quanto à durabilidade devido ao menor percentual de carbonato de cálcio. Na argamassa produzida com 30% de lodo de esgoto, não se observou a presença de hidróxido de cálcio evidenciado pelo pico endotérmico na curva DTA, na faixa de temperatura entre 450-550°C.

#### 4.3.4.2 Termogravimetria das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:3 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem

A Figura 39 apresenta a análise térmica diferencial das argamassas que apresentaram zona carbonatada identificada, produzidas na proporção 1:3 com incorporação de lodo de esgoto calcinado nas proporções 0%, 10% 20% e 30% após ciclo de molhagem e secagem de 63 dias.

Figura 39-Amostras Após 63 dias de ciclos produzidas na proporção 1:3





Fonte: A Autora (2019).

A TGA/DTA da argamassa de referência (Figura 39 a) produzida na proporção 1:3 após 63 dias de ciclo de molhagem e secagem apresentou uma perda de massa total de 14,249 %, em três etapas de decomposição.

A primeira etapa ocorreu na faixa de 34,86°C e 653°C, com perda de massa de 7,564%. A segunda etapa ocorre entre 653°C e 743°C, com perda de 6,370%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 730°C. A terceira etapa ocorre entre 743°C e 1000°C com a perda de 0,312%. Observa-se nos resultados de TGA/DTA que para a amostra 1:3 com 10% de incorporação de lodo (Figura 39 b) que as perdas de massa ocorreram em quatro etapas de decomposição e perda de massa total foi de 13,55 %. A primeira etapa ocorreu na faixa de 30,08°C e 92°C com perda de massa de 1,127%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 79°C.

A segunda etapa de perda ocorreu entre 92°C e 691°C com perda de 8,563%; a terceira etapa ocorreu entre 691°C e 746°C com a perda de 3,089%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 734°C e a quarta etapa ocorreu na faixa de temperatura entre 746°C e 1000°C, com perda de massa de 0,775%.

Na TGA/DTA da argamassa produzida na proporção 1:3 com 20% de lodo (Figura 39 c), nas mesmas condições de envelhecimento (63 dias), observou-se uma perda de massa total de 11,728% em quatro etapas de decomposição.

A primeira etapa ocorreu na faixa de 24,49°C e 95°C com perda de massa de 0,764%. A segunda etapa ocorreu entre 95°C a 710°C com perda de 7,850%. A terceira etapa ocorreu entre 710°C e 756°C com a perda de 2,394%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 744°C e a quarta etapa ocorreu entre 756°C e 1000°C com a perda de 0,720%.

As curvas termogravimétricas de TGA/DTA para a argamassa produzida na proporção 1:3 com 30% de incorporação de lodo (Figura 39 d), nas mesmas condições de envelhecimento (63 dias), a perda de massa total de 9,434%, em três etapas de decomposição.

Através desta observa-se uma perda de massa total de 9,434%, em três etapas de decomposição. A primeira etapa ocorreu na faixa de 34,22°C e 711°C com perda de massa de 7,339%; a segunda etapa ocorreu entre 711°C e 754°C com perda de 1,734%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 736°C e a terceira etapa ocorreu entre 754°C e 1000°C com a perda de 0,362%.

A Tabela 29 mostra o resumo das perdas de massa em todas as etapas de decomposição das argamassas estudadas após 63 dias de ciclos de envelhecimento de molhagem e secagem.

Tabela 29- Perda de massa em todas as etapas de decomposição de cada amostra analisada

<b>Amostra</b>	<b>Primeira etapa</b>	<b>Segunda etapa</b>	<b>Terceira etapa</b>	<b>Quarta etapa</b>
Referência 1:3 63 dias de ciclo	34,86°C a 653°C com perda de 7,564%	653°C a 743°C com perda de 6,370%	743°C a 1000°C com a perda de 0,312%	-
1:3 com 10% de incorporação 63 dias de ciclo	30,08°C a 92°C com perda de 1,127%	92°C e 691°C com perda de 8,563	691°C e 746°C com a perda de 3,089%	746°C e 1000°C, com perda de 0,775%
1:3 com 20% de incorporação 63 dias de ciclo	24,49°C a 95°C com perda de 0,764%	95°C a 710°C com perda de 7,850%	710°C a 756°C com a perda de 2,394%	756°C e 1000°C com a perda de 0,720%
1:3 com 30% de incorporação 63 dias de ciclo	34,22°C a 711°C com perda de 7,339%	711°C a 754°C com perda de 1,734%	754°C a 1000°C com a perda de 0,362%	-

Fonte: A Autora (2019).

A Tabela 30 apresenta o percentual de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio presentes nas argamassas produzidas na proporção 1:3 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem que apresentaram regiões carbonatadas.

Tabela 30- Teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio presentes nas argamassas produzidas na proporção 1:3 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem

<b>Teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio das argamassas produzidas na proporção 1:3 (63 dias de ciclos de molhagem)</b>		
<b>Incorporações</b>	<b>Hidróxido de cálcio (%)</b>	<b>Carbonato de cálcio (%)</b>
Referência	Presença não evidenciada	15,17
10%		8,77
20%		7,07
30%		4,76

Fonte: A Autora (2019).

Através da Tabela 30 observa-se que com o aumento da incorporação do lodo de esgoto calcinado tem-se a diminuição do carbonato. Só observou-se picos de perda na derivada TG associados à água na proporção 10% e 20%. A argamassa produzida com incorporação de 30% apresentou menor teor de carbonato de cálcio.

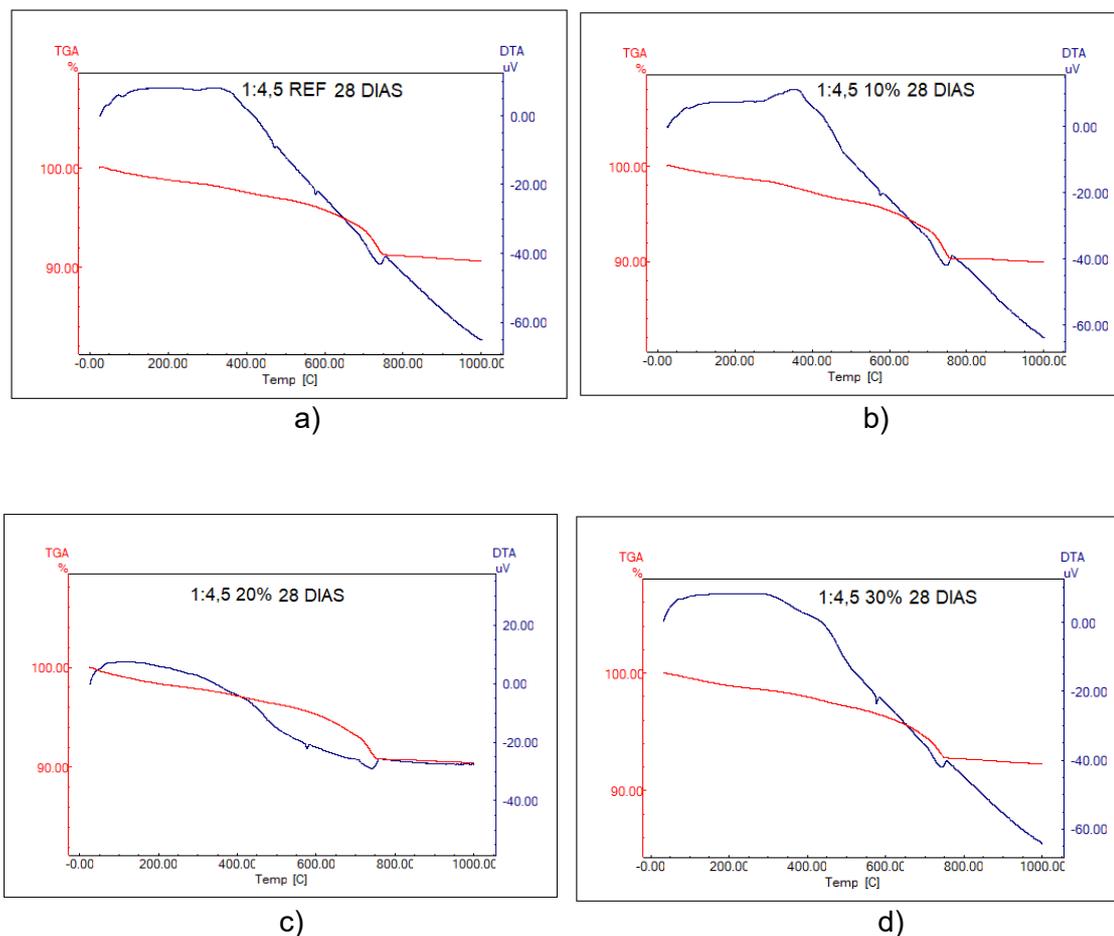
Comparando-se as argamassas que passaram pelo ciclo de molhagem e secagem aos 28 e 63 dias, produzidas na proporção 1:3, após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem objetivando o envelhecimento acelerado, as mesmas apresentaram maiores teores de carbonatos de cálcio indicando a presença de dióxido de carbono decorrente da dissociação do carbonato de cálcio. Há um aumento na quantidade de carbonato de cálcio com a inserção de lodo de esgoto em substituição ao cimento na argamassa.

As argamassas estudadas não apresentaram o pico na curva de DTA característicos de hidróxido de cálcio e a carbonatação foi observada em todas as argamassas que passaram pelo processo de envelhecimento acelerado.

#### 4.3.4.3 Termogravimetria das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:4,5 após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem

A Figura 40 apresenta a análise térmica diferencial das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:4,5 com incorporação de lodo de esgoto calcinado nas proporções 0%, 10% 20% e 30% após ciclo de molhagem e secagem de 28 dias.

Figura 40- Perda de massa em todas as etapas de decomposição de cada amostra analisada



Fonte: A Autora (2019).

Nos resultados de TGA/DTA para a argamassa de referência (Figura 40 a) amostra 1:4,5 (28 dias de ciclos de molhagem e secagem), observa-se uma perda de massa total de 9,396 %, em cinco etapas de decomposição.

A primeira etapa ocorreu na faixa de temperatura entre 25,48°C e 81°C com perda de massa de 0,552%. A segunda etapa ocorre entre 81°C e 464°C com perda de 2,384%. A terceira etapa ocorreu entre 464°C e 480°C com a perda de 0,112%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 463°C. A quarta etapa localiza-se em 480°C e 755°C com perda de massa 5,739%. A quinta etapa ocorre na faixa de temperatura de 755°C e 1000°C com perda de massa de 0,610%.

Nas curvas termogravimétricas de TGA/DTA para a argamassa produzida na proporção 1:4,5 com 10% de lodo após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem (Figura 40 b), observa-se uma perda de massa total de 10,113 %, em três etapas de decomposição.

A primeira etapa ocorreu na faixa de temperatura entre 25,6°C e 700°C com perda de massa de 6,696%. A segunda etapa ocorre entre 700°C e 761°C com perda de 3,008%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 746°C. A terceira etapa ocorreu entre 761°C e 1000°C com a perda de 0,409%.

Para a amostra produzida na proporção 1:4,5 com 20% de lodo após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem (Figura 40 c), tem-se uma perda de massa total de 9,577 %, em três etapas de decomposição.

A primeira etapa ocorreu na faixa de temperatura entre 26,03°C e 704°C com perda de massa de 6,913%. A segunda etapa ocorreu entre 704°C e 757°C com perda de 2,283%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 706°C. A terceira etapa ocorreu entre 757°C e 1000°C com a perda de 0,382%.

Para a amostra 1:4,5 com incorporação de 30% de lodo nas mesmas condições de envelhecimento e molhagem (28 dias) (Figura 40 d), observa-se uma perda de massa total de 7,768 %, em três etapas de decomposição.

A primeira etapa ocorreu na faixa de temperatura entre 34,6°C a 689°C com perda de massa de 5,170%. A segunda etapa ocorreu entre 689°C a 757°C com perda de 2,090%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 743°C e a terceira etapa ocorreu entre 757°C a 1000°C com a perda de 0,541%.

A Tabela 31 mostra o resumo das perdas de massa em todas as etapas de decomposição de cada argamassa produzidas na proporção 1:4,5 após ciclo de 28 dias de molhagem e secagem com incorporação de lodo calcinado nas proporções 0%, 10%, 20% e 30%.

Tabela 31- Resumo das perdas de massa em todas as etapas de decomposição de cada amostra analisada traço 1:4,5 28 dias de ciclos

<b>Amostra</b>	<b>Primeira etapa</b>	<b>Segunda etapa</b>	<b>Terceira etapa</b>	<b>Quarta etapa</b>	<b>Quinta etapa</b>
Referência 1:4,5 28 dias de ciclo	25,48°C a 81°C com perda de massa de 0,552%	81°C a 464°C com perda de 2,384%	464°C a 480°C com a perda de 0,112%	480°C e 755°C com perda de massa 5,739%	755°C a 1000°C com perda de massa de 0,610%
1:4,5 com 10% de incorporação 28 dias de ciclo	25,6°C a 700°C com perda de massa de 6,696%	700°C a 761°C com perda de 3,008%	761°C a 1000°C com a perda de 0,409%	-	-
1:4,5 com 20% de incorporação 28 dias de ciclo	26,03°C a 704°C com perda de massa de 6,913%	704°C a 757°C com perda de 2,283%	757°C a 1000°C com a perda de 0,382%	-	-
1:4,5 com 30% de incorporação 28 dias de ciclo	34,6°C a 689°C com perda de massa de 5,170%	689°C a 757°C com perda de 2,090%	757°C a 1000°C com a perda de 0,541%	-	-

Fonte: A Autora (2019).

A Tabela 32 apresenta o percentual de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio presentes nas argamassas produzidas na proporção 1:3 que foram detectadas regiões carbonatadas após ciclo de 28 dias de envelhecimento acelerado.

Tabela 32- Teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio presentes nas argamassas produzidas na proporção 1:4,5 após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem

<b>Teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio das argamassas produzidas na proporção 1:4,5 (28 dias de ciclos de molhagem)</b>		
<b>Incorporações</b>	<b>Hidróxido de cálcio (%)</b>	<b>Carbonato de cálcio (%)</b>
Referência	0,460	14,41
10%	-	7,76
20%	-	6,04
30%	-	5,97

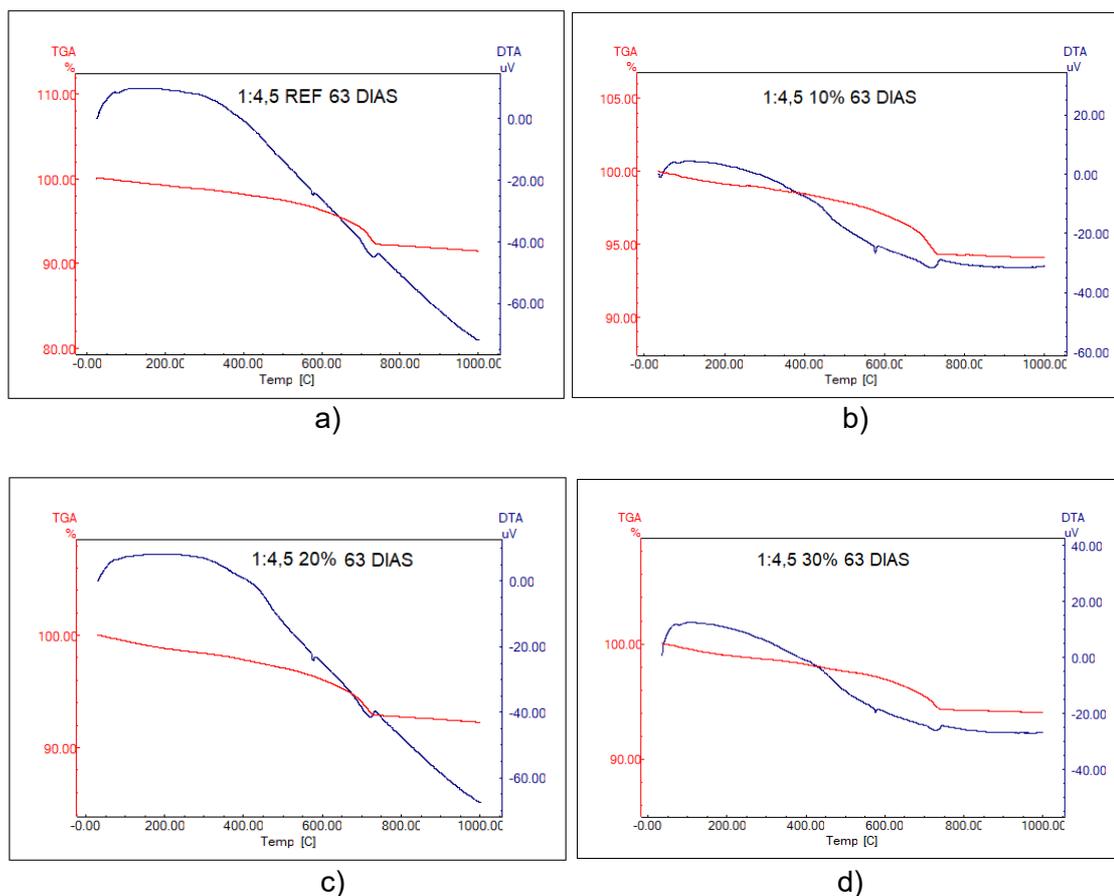
Fonte: A Autora (2019).

O aumento da incorporação do lodo calcinado reduziu a quantidade de carbonato de cálcio nas argamassas que passaram pelo ciclo de molhagem e secagem durante o período de 28 dias, tendo a incorporação de 30% apresentado melhor desempenho.

#### 4.3.4.4 Termogravimetria das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:4,5 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem

A Figura 41 apresenta a análise térmica diferencial das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:4,5 com incorporação de lodo de esgoto calcinado nas proporções 0%, 10% 20% e 30% após ciclo de molhagem e secagem de 63 dias.

Figura 41- Amostras 63 dias de ciclos de molhagem e secagem produzidas na proporção 1:4,5



Fonte: A Autora (2019).

Nos resultados de TGA/DTA para a argamassa de referência produzida na proporção 1:4,5 após ciclo de molhagem e secagem de 63 dias (Figura 41 a), observa-se uma perda de massa total de 8,543 %, em quatro etapas de decomposição.

A primeira etapa ocorreu na faixa de temperatura entre 24,81°C a 88°C com perda de massa de 0,241%. A segunda etapa ocorre entre 88°C a 693°C com perda de 5,379%.

A terceira etapa ocorreu entre 693°C a 744°C com a perda de 2,152%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 732°C. A quarta etapa localiza-se em 744°C e 1000°C com perda de massa 0,771%.

As curvas de TGA/DTA para a argamassa 1:4,5 com 10% de incorporação de lodo após o ciclo de 63 dias de molhagem e secagem (Figura 41 b) apresentaram uma perda de massa total de 5,945 %, em três etapas de decomposição.

A primeira etapa ocorreu na faixa de temperatura entre 35,38°C a 687°C com perda de massa de 4,271%. A segunda etapa ocorreu entre 687°C a 733°C com perda de 1,426%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 720°C. A terceira etapa ocorreu entre 733°C a 1000°C com a perda de 0,248%.

Nos resultados de TGA/DTA para argamassa produzida na proporção 1:4,5 com incorporação de 20% de lodo (63 dias de ciclos) (Figura 41 c), observa-se uma perda de massa total de 7,746 %, em três etapas de decomposição.

A primeira etapa ocorreu na faixa de temperatura entre 30,8°C a 678°C com perda de massa de 5,313%. A segunda etapa entre 678°C a 733°C com perda de 1,804%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 722°C e a terceira etapa ocorreu entre 733°C a 1000°C com a perda de 0,629%.

Nas curvas termogravimétricas de TGA/DTA para a argamassa produzida na proporção 1:4,5 com 30% de lodo (63 dias de ciclos) (Figura 41 d), observa-se uma perda de massa total de 5,970 %, em três etapas de decomposição.

A primeira etapa ocorreu na faixa de temperatura entre 36,55°C a 702°C com perda de massa de 4,591%. A segunda etapa entre 702°C a 743°C com perda de 1,107%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 727°C e a terceira etapa ocorre entre 743°C a 1000°C com a perda de 0,271%.

A Tabela 33 apresenta o resumo das perdas de massa em todas as etapas de decomposição das argamassas produzidas na proporção 1:4,5 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem.

Tabela 33 - Resumo das perdas de massa em todas as etapas de decomposição de cada amostra analisada traço 1:4,5 (63 de ciclos de molhagem e secagem)

<b>Amostra</b>	<b>Primeira etapa</b>	<b>Segunda etapa</b>	<b>Terceira etapa</b>	<b>Quarta etapa</b>
Referência 1:4,5 63 dias de ciclo	24,81°C a 88°C com perda de massa de 0,241%	88°C a 693°C com perda de 5,379%	693°C a 744°C com perda de 2,152%	744°C e 1000°C com perda de massa 0,771%
1:4,5 com 10% de incorporação 63 dias de ciclo	35,38°C a 687°C com perda de massa de 4,271%	687°C a 733°C com perda de 1,426%	733°C a 1000°C com a perda de 0,248%	-
1:4,5 com 20% de incorporação 63 dias de ciclo	30,8°C a 678°C com perda de massa de 5,313%	678°C a 733°C com perda de 1,804%	733°C a 1000°C com a perda de 0,629%	-
1:4,5 com 30% de incorporação 63 dias de ciclo	36,55°C a 702°C com perda de massa de 4,591%	702°C a 743°C com perda de 1,107%	743°C a 1000°C com a perda de 0,271%	-

Fonte: A Autora (2019).

A Tabela 34 apresenta o teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio presentes nas argamassas produzidas na proporção 1:4,5 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem.

Tabela 34- Teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio presentes nas argamassas produzidas na proporção 1:4,5 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem

<b>Teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio das argamassas produzidas na proporção 1:4,5 (63 dias de ciclos de molhagem)</b>		
<b>Incorporações</b>	<b>Hidróxido de cálcio (%)</b>	<b>Carbonato de cálcio (%)</b>
Referência	0,46	6,63
10%	-	3,80
20%	-	5,52
30%	-	3,13

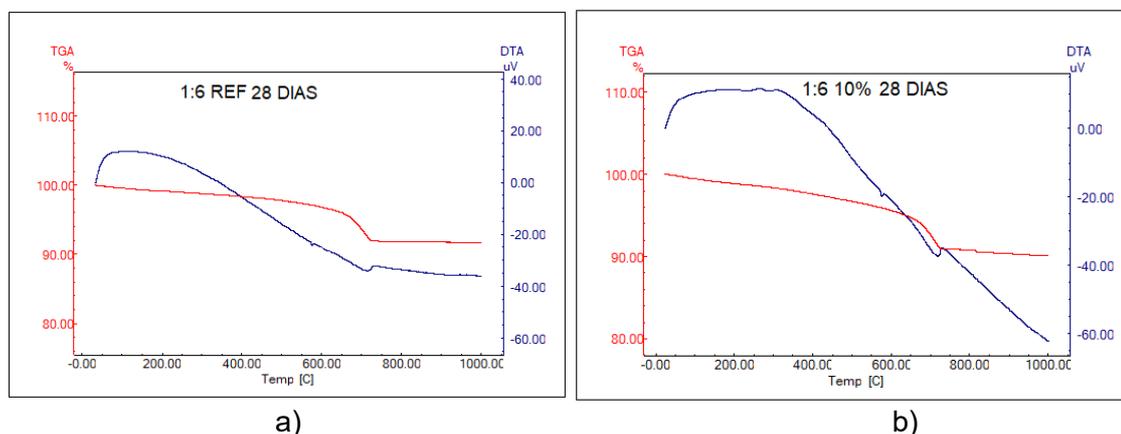
Fonte: A Autora (2019).

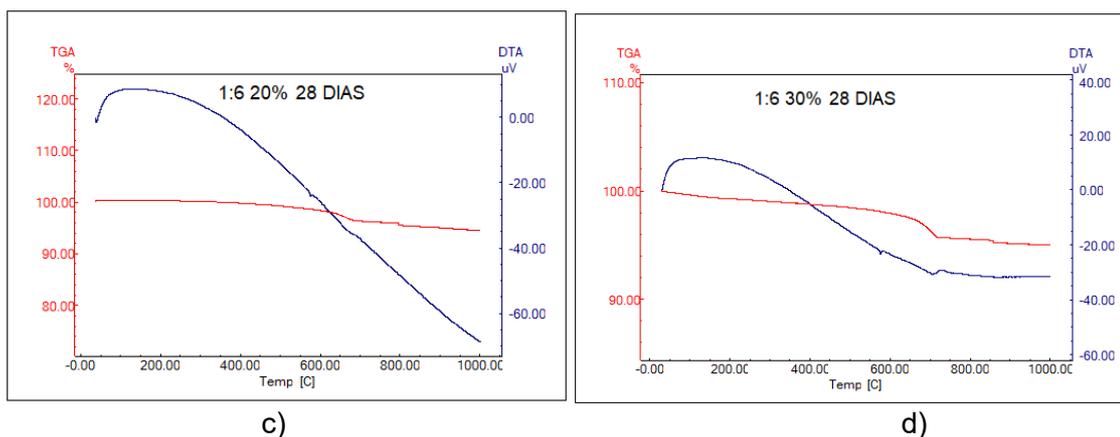
Para as argamassas produzidas na proporção 1:4,5 (após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem), a amostra com incorporação de 10% de lodo de esgoto apresentou melhor desempenho, seu teor de carbonato de cálcio na amostra foi 3,80%.

#### 4.3.4.5 Termogravimetria das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:6 após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem

A Figura 42 apresenta a termogravimetria das argamassas após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem produzidas na proporção 1:6 dias.

Figura 42- Amostras após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem na proporção traço 1:6





Fonte: A Autora (2019).

A Tabela 35 apresenta o resumo da perda de massa em todas as etapas de decomposição das argamassas produzidas nas proporções 1:6 após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem.

Tabela 35- Perda de massa em todas as etapas de decomposição de cada amostra analisada produzidas na proporção 1:6 28 dias de ciclos

Amostra	Primeira etapa	Segunda etapa	Terceira etapa
Referência 1:6 28 dias de ciclo	32,85°C a 649°C com perda de 3,985%	649°C a 732°C com perda de 4,132%	732°C a 1000°C com perda de 0,261%
1:6 com 10% de incorporação 28 dias de ciclo	24,2°C a 610°C com perda de 4,575%	611°C a 730°C com perda de 4,496%	730°C a 1000°C com perda de 0,878%
1:6 com 20% de incorporação 28 dias de ciclo	39°C a 611°C com perda de 1,789%	611°C a 689°C com perda de 1,893%	689°C a 1000°C com perda de 1,910%
1:6 com 30% de incorporação 28 dias de ciclo	30,98°C a 623°C com perda de 2,251%	623°C a 724°C com perda de 2,071%	724°C a 1000°C com perda de 0,664%

Fonte: A Autora (2019).

Todas as amostras obtiveram perdas de massa em três etapas. Nos resultados de TGA/DTA para a argamassa de referência produzida na proporção 1:6, após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem (Figura 42 a) observa-se uma perda de massa total de 8,378%.

A primeira etapa ocorreu na faixa de 32,85°C a 649°C com perda de massa de 3,985%. A segunda etapa ocorreu entre 649°C a 732°C com perda de 4,132%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 716°C. A terceira etapa

ocorreu entre 732°C a 1000°C com a perda de 0,261%. O teor de carbonato de cálcio na amostra foi 9,97%.

Para a amostra produzida na proporção 1:6 com 10% de incorporação de lodo após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem (Figura 42 b), pode-se observar uma perda de massa total de 9,949 %, em três etapas de decomposição. A primeira etapa ocorreu na faixa de 24,2°C a 610°C com perda de massa de 4,575%. A segunda etapa ocorre entre 611°C a 730°C com perda de 4,496%, representado por um pico endotérmico na curva DTA em 718°C. A terceira etapa ocorre entre 730°C a 1000°C com a perda de 0,878%.

Para a argamassa produzida na proporção 1:6 com incorporação de 20% de lodo de esgoto após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem (Figura 42 c) pode-se observar uma perda de massa total de 5,593 %, em três etapas de decomposição.

A primeira etapa ocorreu na faixa de 39°C a 611°C com perda de massa de 1,789%. A segunda etapa ocorreu entre 611°C a 689°C com perda de 1,893%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 627°C e a terceira etapa ocorreu entre 689°C a 1000°C com a perda de 1,910%.

Observa-se nos resultados de TGA/DTA para a argamassa produzida na proporção 1:6 com incorporação de 30% de lodo de esgoto calcinado (Figura 42 d) que após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem houve uma perda de massa total equivalente à massa percentual de 4,986%, em três etapas de decomposição.

A primeira de degradação ocorreu entre 30,98° C a 623 °C com perda de massa de 2,251%. A segunda etapa nos intervalos de temperatura entre 623°C a 724°C, com perda de massa de 2,071%, com pico de decomposição endotérmico na curva DTA em 709°C. Na terceira etapa houve uma perda de 0,664% e ocorreu entre 724°C a 1000°C. A segunda e terceira etapas estão associadas à decomposição do carbonato de cálcio em CO<sub>2</sub>.

A Tabela 36 mostra os percentuais de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio das argamassas produzidas na proporção 1:6 após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem.

Tabela 36- Teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio presentes nas argamassas produzidas na proporção 1:6 após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem

<b>Teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio das argamassas produzidas na proporção 1:6 (28 dias de ciclos de molhagem)</b>		
<b>Incorporações</b>	<b>Hidróxido de cálcio (%)</b>	<b>Carbonato de cálcio (%)</b>
Referência	-	9,97
10%	-	8,63
20%	-	8,63
30%	-	6,21

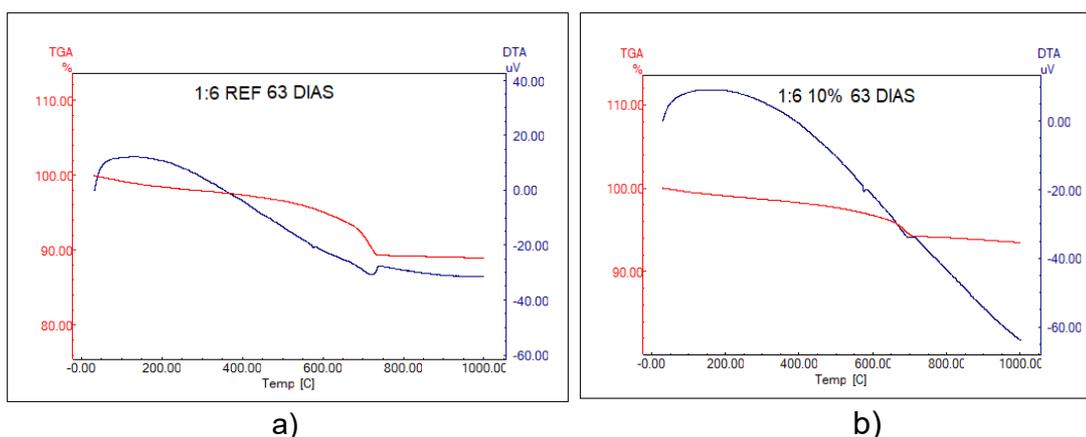
Fonte: A Autora (2019).

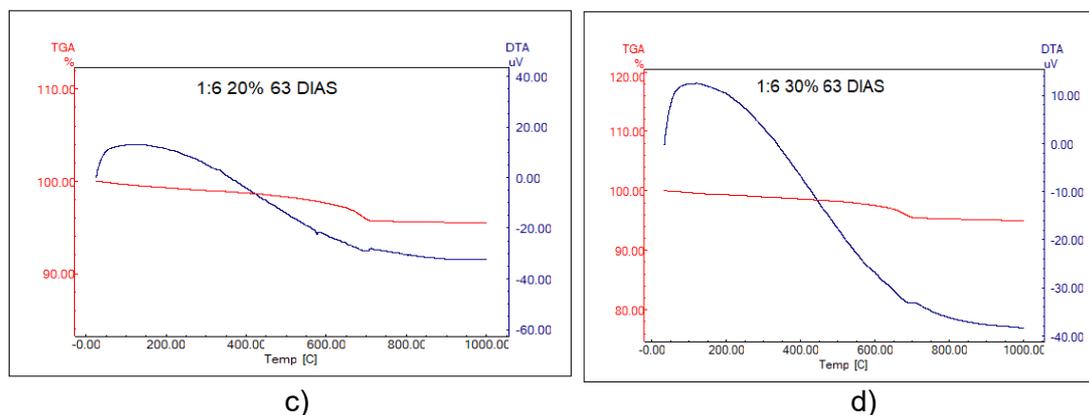
Para a argamassa com 30% de incorporação de lodo de esgoto calcinado após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem, o teor de carbonato de cálcio foi 6,21% apresentando o melhor desempenho entre as argamassas produzidas na proporção 1:6 em relação à durabilidade.

#### 4.3.4.6 Termogravimetria das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:6 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem

A Figura 43 apresenta as amostras referente aos 63 dias de ciclo de molhagem e secagem executadas no traço 1:6 dias que não receberam aspensão de fenolftaleína

Figura 43- Amostras após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem produzidas na proporção 1:6





Fonte: A Autora (2019).

Para as argamassas de referência produzidas na proporção amostra 1:6 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem (Figura 43 a), observa-se uma perda de massa total de 11,099%, em três etapas de decomposição.

A primeira etapa ocorreu na faixa de temperatura entre 31,87°C a 661°C com perda de massa de 6,369%. A segunda etapa entre 661°C a 742°C com perda de 4,336%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 723°C e a terceira etapa ocorreu entre 742°C a 1000°C com a perda de massa de 0,395%.

Nos resultados de TGA/DTA para a argamassa produzida na proporção 1:6 com 10% de incorporação de lodo após processo de 63 dias de envelhecimento acelerado (Figura 43 b), observa-se uma perda de massa total de 6,552 %, em três etapas de decomposição.

A primeira etapa ocorreu na faixa de temperatura entre 30,74°C a 643°C com perda de massa de 3,845%. A segunda etapa entre 643°C a 713°C com perda de 1,916%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 714°C e a terceira etapa ocorreu entre 713°C a 1000°C com a perda de massa 0,791%.

Na amostra argamassa com 20% de incorporação de lodo após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem (Figura 43 c), observa-se uma perda de massa total de 4,580%, em três etapas de decomposição. A primeira etapa ocorreu na faixa de temperatura entre 25,86°C a 641°C com perda de massa de 2,816%. A segunda etapa entre 641°C a 711°C com perda de 1,504%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 641°C e a terceira etapa ocorreu entre 711°C a 1000°C com a perda de massa 0,260%.

Na amostra com 30% de lodo após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem (Figura 43 d), observa-se uma perda de massa total de 5,092 %, em três etapas de

decomposição. A primeira etapa ocorreu na faixa de temperatura entre 33,42°C a 630°C com perda de massa de 2,820%. A segunda etapa ocorreu entre 630°C a 715°C com perda de 1,774%, representada por um pico endotérmico na curva DTA em 711°C e a terceira etapa ocorreu entre 715°C a 1000°C com perda de massa de 0,498%.

A Tabela 37 apresenta o resumo das perdas das argamassas produzidas na proporção 1:6 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem.

Tabela 37- Perda de massa em todas as etapas de decomposição de cada amostra analisada produzidas na proporção 1:6 63 dias de ciclos

<b>Amostra</b>	<b>Primeira etapa</b>	<b>Segunda etapa</b>	<b>Terceira etapa</b>
Referência 1:6 63 dias de ciclo	31,87°C a 661°C com perda de massa de 6,369%	661°C a 742°C com perda de 4,336%	742°C a 1000°C com a perda de massa de 0,395%
1:6 com 10% de incorporação 63 dias de ciclo	30,74°C a 643°C com perda de massa de 3,845%	643°C a 713°C com perda de 1,916%	713°C a 1000°C com a perda de massa 0,791%
1:6 com 20% de incorporação 63 dias de ciclo	25,86°C a 641°C com perda de massa de 2,816%	641°C a 711°C com perda de 1,504%	711°C a 1000°C com a perda de massa 0,260%
1:6 com 30% de incorporação 63 dias de ciclo	33,42°C a 630°C com perda de massa de 2,820%	630°C a 715°C com perda de 1,774%	715°C a 1000°C com a perda de massa de 0,498%

Fonte: A Autora (2019).

A Tabela 38 apresenta o teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio presentes nas argamassas produzidas na proporção 1:65 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem.

Tabela 38-Teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio presentes nas argamassas produzidas na proporção 1:6 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem

<b>Teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio das argamassas produzidas na proporção 1:6 (63 dias de ciclos de molhagem)</b>		
<b>Incorporações</b>	<b>Hidróxido de cálcio (%)</b>	<b>Carbonato de cálcio (%)</b>
Referência	-	10,74
10%	-	6,14
20%	-	4,0
30%	-	5,16

Fonte: A Autora (2019).

Para as amostras produzidas na proporção 1:6, após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem para diferentes incorporações (0%, 10%, 20% e 30%) observa-se que todas as argamassas produzidas não apresentaram hidróxido de cálcio confirmado através das curvas termogravimétricas. Observa-se que, quando aumenta-se a incorporação de lodo calcinado nas amostras há uma redução na perda massa total

Das argamassas produzidas na proporção 1:3 quanto ao envelhecimento acelerado (63 dias) para avaliar a resistência à carbonatação pela execução do ciclo de molhagem e secagem, as argamassas de referência apresentaram maior teor de carbonato de cálcio, e posteriormente, das argamassas com incorporação de lodo calcinado, porém a maior proporção de 30% de lodo favoreceu maior quantidade de carbonato de cálcio.

Nas amostras com incorporação de lodo produzidas na proporção 1:4,5, após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem, observa-se que a incorporação do lodo calcinado substituindo parcialmente o cimento proporcionou uma redução no percentual de carbonato de cálcio.

As amostras não apresentaram perda de massa associada à água. Não se utilizou cal na produção das argamassas, porém o cimento utilizado contém óxido de cálcio (cal), silicato tricálcico e silicato bicálcico, que na presença de água reage formando hidróxido de cálcio. A determinação do teor da portlandita liberada na hidratação do cimento é dada pela relação estequiométrica da massa molecular da portlandita pela massa molecular da água (HOPPE FILHO, 2008).

Geyer et al. (2000) demonstraram que a utilização do lodo de esgoto altamente poluente, proveniente de esgoto urbano, pode ser uma alternativa segura e econômica, em substituição parcial de até 20% do cimento portland. No entanto, poucas informações estão disponíveis sobre o impacto ambiental da incorporação de lodo em materiais à base de cimento (FONTES, et al., 2004).

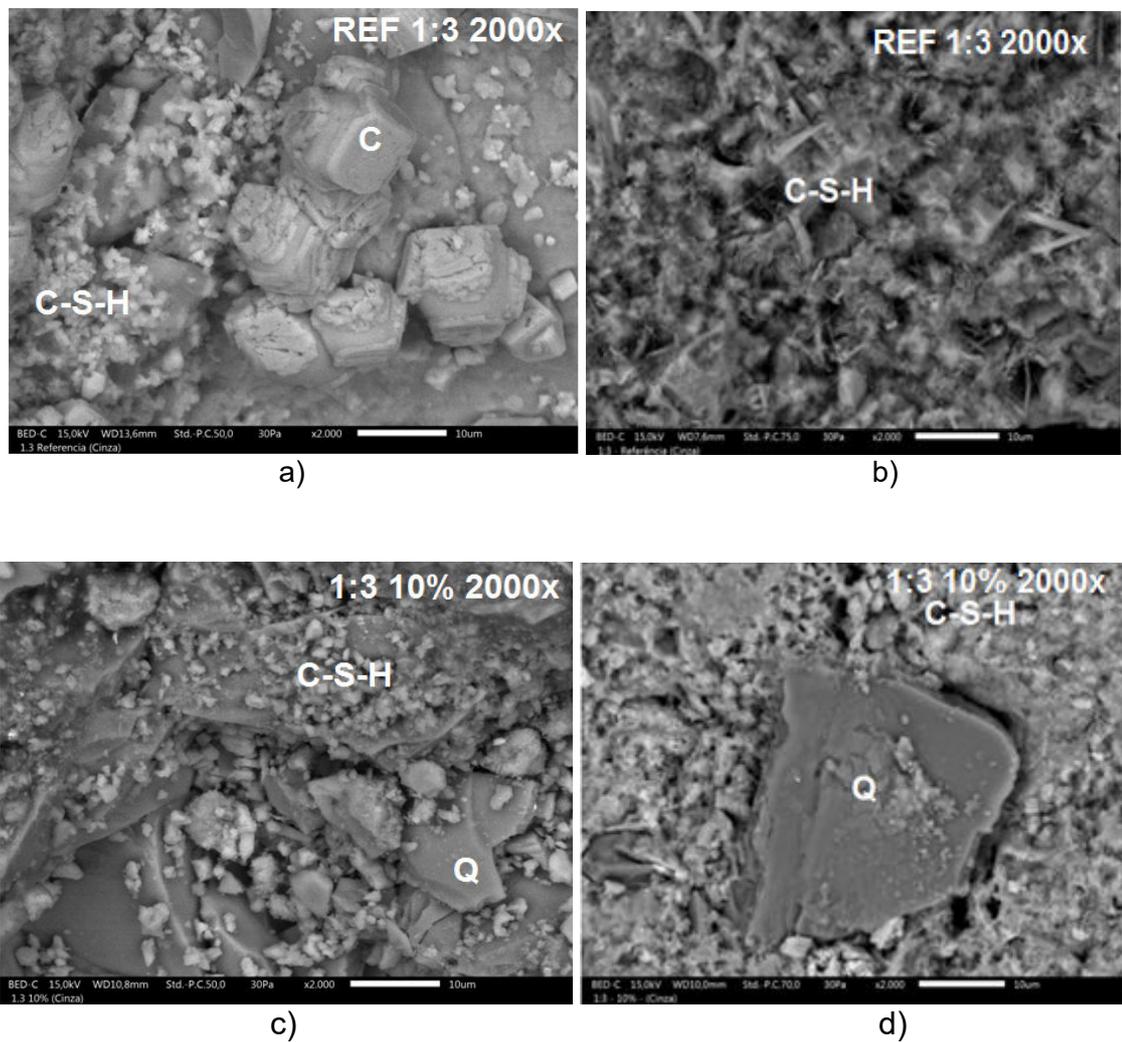
#### **4.3.5 Microscopia das argamassas**

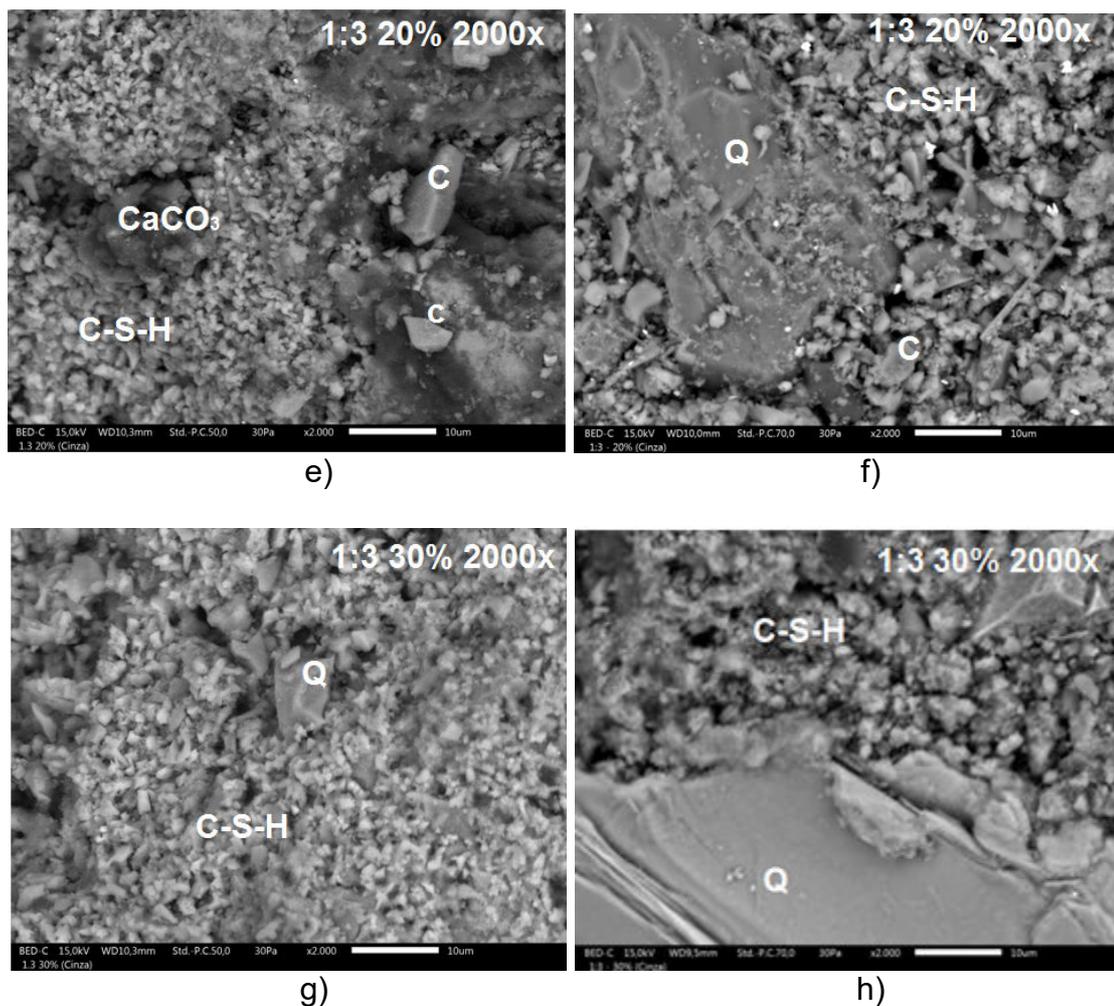
Apresenta-se a microscopia das argamassas produzidas.

#### 4.3.5.1 Microscopia das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:3 após 28 dias e 63 dias de ciclos de molhagem e secagem

A Figura 44 mostra a micrografia das argamassas produzidas na proporção 1:3 após 28 e 63 dias de ciclos de molhagem e secagem com incorporação de 0%, 10%, 20% e 30%.

Figura 44- Micrografia das amostras produzidas na proporção 1:3 após ciclos de 28 e 63 dias de ciclos respectivamente





Fonte: A Autora (2019).

Observa-se através da micrografia da Figura 44 a, (micrografia de referência 28 dias), que a morfologia é constituída de grãos de caulinita de formato hexagonal, de aspecto denso e rígido, tamanho menor que 2µm, de partículas de C-S-H que se apresenta ligando a superfície rígida e estão soltas na interface. Observa-se ainda carbonato de cálcio mostrando que houve a carbonatação. Na micrografia da Figura 44 b referente a amostra após 63 dias de ciclos, observa-se uma morfologia onde tem-se cristais de grandes dimensões, sendo uma região mais densa; e composta por pequenas fibras cristalinas com cristalinidade característica de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que ocasionam a porosidade na amostra.

Através da micrografia da argamassa produzida com incorporação de 10% de lodo após 23 (Figura 44 c), observa-se uma morfologia constituída de cristais de aspecto denso, tamanho variável e formato irregular característico de quartzo. Observa-se uma região com fibras com pouca cristalinidade característica de C-S-H

e sob a superfície maior, estas partículas ficam entrelaçadas e adere à superfície irregular de aspecto denso. Para a amostra com 10% de lodo de esgoto incorporado (Figura 44 d), observam-se vazios formando trincas e uma morfologia constituída de cristais. Estes possuem uma superfície plana e de formatos irregulares e tamanhos variáveis, característicos de quartzo, com a presença de aglomerados pequenos acumulados sobre o aglomerado maior, e de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) que aderem na interface da superfície irregular. Verifica-se um cristal de cor clara, composto em sua maioria por  $Ti_2O_3$ . Estes têm um coeficiente de retrodifusão superiores aos demais elementos químicos existentes nas demais partículas, por isso exibem maior contraste.

Quando ocorre a reação da água com os silicatos de cálcio ( $C_3S$  e  $C_2S$ ), forma-se uma camada adicional de C-S-H em torno da partícula a uma distância de cerca 1  $\mu m$ , que se designa correntemente por “C-S-H exterior” (HADLEY, DOLCH e DIAMOND, 2000); (KJELLEN e JUSTNES, 2004); essas partículas são observadas preenchendo os vazios em cima dos silicatos.

Através da Figura 44 e (micrografia das argamassas com incorporação de 20% de lodo após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem) observa-se vazios formando trincas. Observa-se uma morfologia constituída de cristais de formatos irregulares, estes possuem superfícies planas, de aspecto denso, característicos de quartzo, com a presença de aglomerados pequenos acumulados sobre o aglomerado maior, associados a silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) que aderem na interface da superfície irregular.

Observa-se a presença de carbonato de cálcio. Na micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura para a amostra com 20% de lodo (Figura 44 f após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem), observam-se vazios que resultam do aprisionamento de ar durante o processo de mistura do cimento com a água.

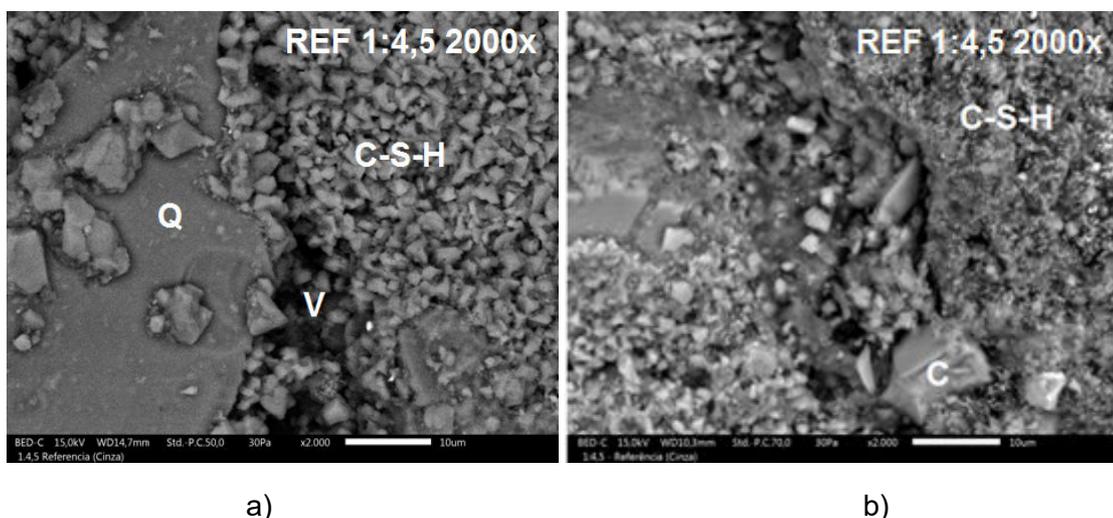
Verifica-se que a estrutura tornou-se mais densa com o aumento de lodo calcinado, diminuindo assim a porosidade. Observa-se uma morfologia constituída por cristais, estes possuem uma superfície plana e de formatos irregulares e tamanhos variáveis, característicos de quartzo, com a presença de aglomerados pequenos acumulados sobre o aglomerado maior. Há fibras com pouca cristalinidade característica de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H).

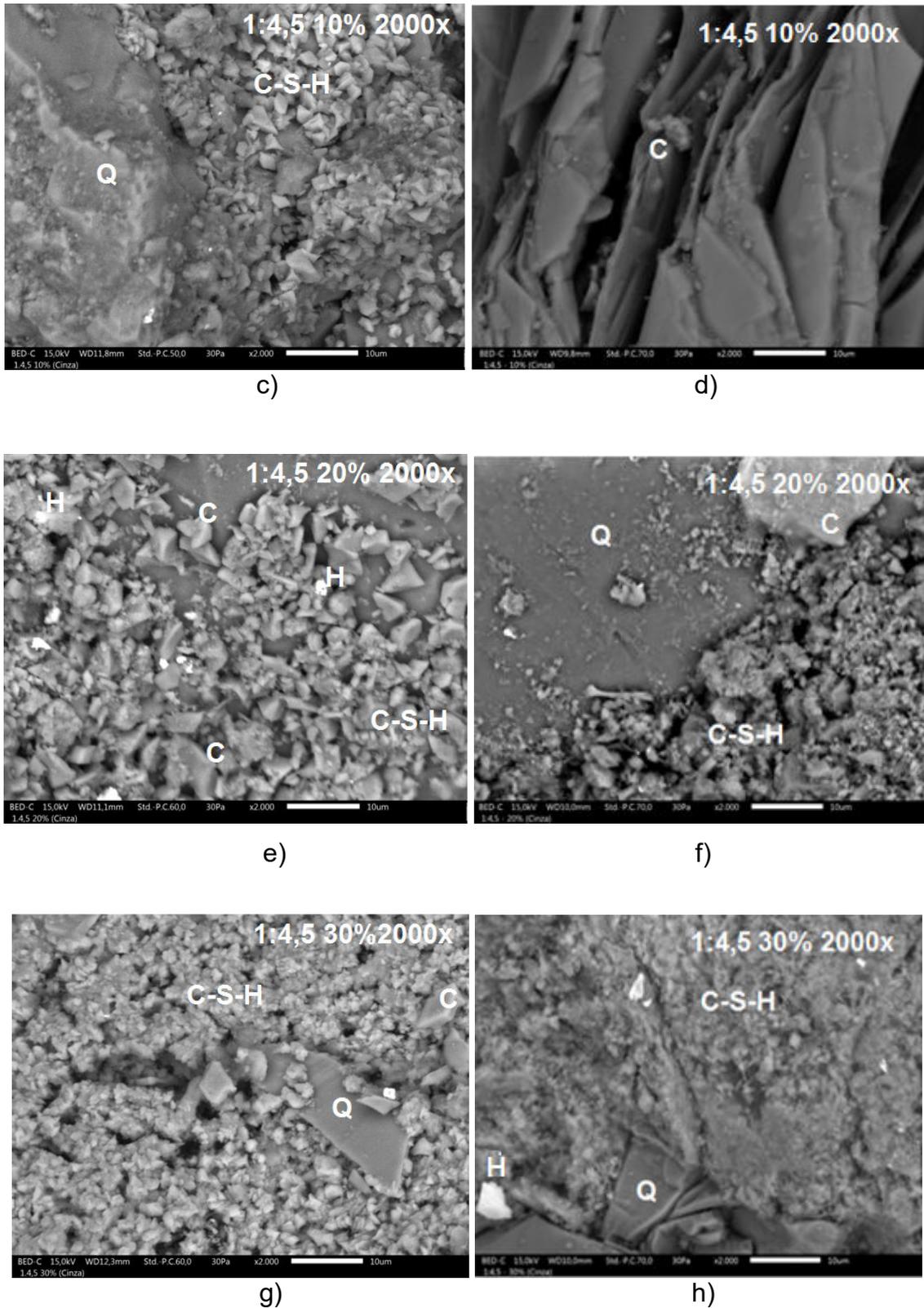
Mediante a Figura 44 g (amostra de argamassa com 30% de incorporação de lodo que passou pelo ciclo de 28 dias) observa-se a presença do carbonato de cálcio mostrando que houve a carbonatação. Através da micrografia pode-se observar a presença do quartzo através de cristais de grandes dimensões, de aspecto denso e tamanho irregular, observa-se o C-S-H fibras com pouca cristalinidade, entrelaçadas ao redor da superfície irregular e caulinita que apresentam formato pseudo-hexagonais e de aspecto denso. Para a amostra com de 30% de lodo após 63 dias de ciclos (Figura 44 h), observa-se um cristal de grande dimensão, onde parte de sua estrutura é plana e densa, de formato circular, que é atribuída ao quartzo. Em sua volta verifica-se também com essas mesmas características com tamanhos menores do mesmo composto e pequenas fibras do tipo característica de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) que na região interfacial aderem à superfície irregular.

#### 4.3.5.2 Microscopia das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:4,5 após 28 e 63 dias de ciclos de molhagem e secagem

Na Figura 45 tem-se a micrografia das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:4,5 após 28 e 63 dias de ciclos de molhagem e secagem.

Figura 45- Micrografia das amostras das argamassas após 28 e 63 dias de ciclos de molhagem e secagem





Fonte: A Autora (2019).

Através da micrografia da argamassa de referência produzida na proporção 1:4,5 (Figura 45 a) após 28 dias de molhagem e secagem em ciclo de

envelhecimento, observa-se uma morfologia composta em sua maioria de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) em estado amorfo e uma partícula de formato e tamanho irregular, de densidade rígida associado ao quartzo. Há a presença de carbonato de cálcio mostrando a carbonatação da amostra. Observa-se através da micrografia da argamassa de referência produzida na proporção 1:4,5 após 63 dias de ciclo (Figura 45 b) uma morfologia composta em sua maioria de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) em estado amorfo, partículas densas e rígidas de óxido de silício (quartzo) e caulinita.

Observa-se através da micrografia da argamassa com incorporação de 10% de lodo após 28 dias de ciclos apresentada na Figura (45 c) que há presença de partículas de tamanho grande, aspecto rígido, denso, cristalina, característico de óxido silício. Verifica-se que em torno dessas partículas há fibras de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), amorfas, que preenchem os espaços em torno das partículas mais densas. Observa-se que houve a carbonatação da amostra pela presença do carbonato de cálcio. Na micrografia da argamassa com zona carbonatada identificada e produzida na proporção 1:4,5 com incorporação de 10% após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem (Figura 45 d) observa-se uma morfologia composta em sua maioria de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) em estado amorfo, estas partículas se apresentam em sua maioria compactadas e algumas soltas e, em torno de grandes partículas de morfologia em forma de lamela, de densidade rígida, de modo a não deixar vazios na estrutura do material. As partículas em forma de lamela tem características do aluminossilicato caulinita ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5\text{OH}_4$ ).

Através da micrografia da argamassa produzida com incorporação de 20% de lodo de esgoto após 28 dias de ciclos (Figura 45 e) verifica-se que a morfologia é constituída em sua maioria de partículas de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), umas se encontram compactadas e outras soltas sobre o aglomerado maior que apresenta uma superfície irregular, de dimensão grande, e aspecto rígido. Observa-se a presença de hematita e caulinita. Observa-se através da micrografia da argamassa produzida na proporção 1:4,5 com incorporação 20% cinza após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem (Figura 45 f) uma morfologia composta em sua maioria de partículas em estado amorfo de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) e

partículas de formatos e tamanhos variados, de aspecto rígido característico de óxido de silício (quartzo) e caulinita.

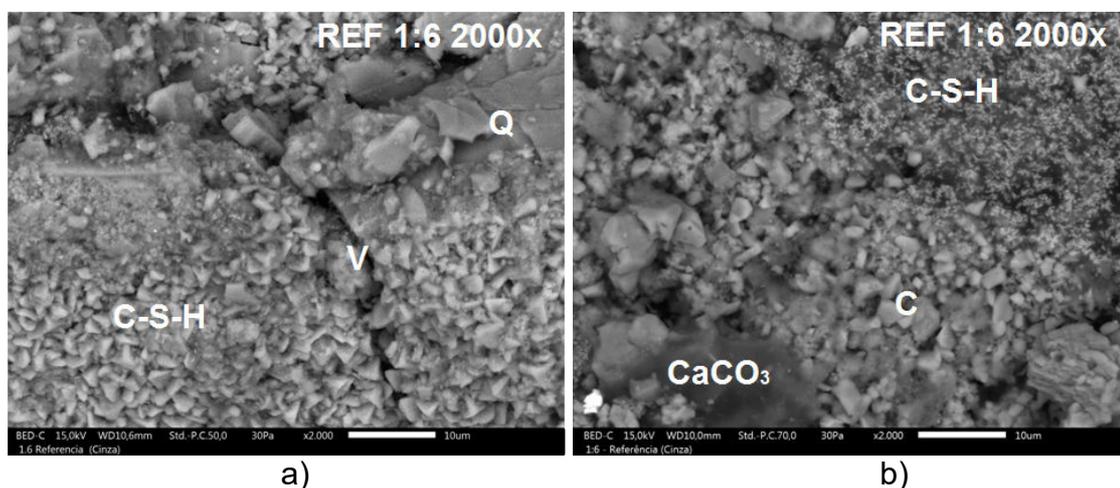
Verifica-se através da Figura 45g correspondente à argamassa produzida com 30% de lodo de esgoto uma morfologia composta por partículas de fibras de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), em estado amorfo e cristalino, umas compactadas e outras soltas, sobre a partícula de dimensão maior, associado ao quartzo. Estas partículas apresentam-se entrelaçadas ocupando todos os espaços em torno das partículas mais densas. Observa-se a presença da hematita.

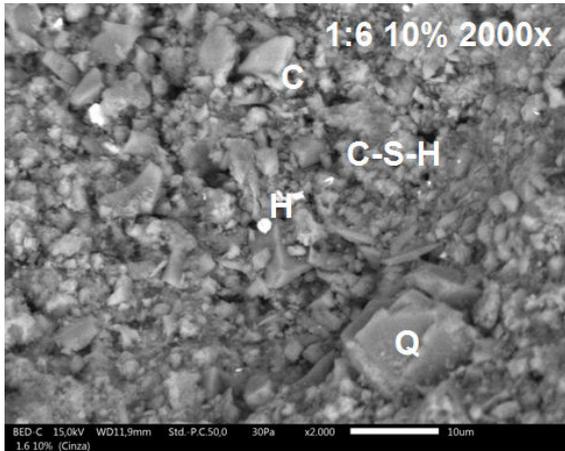
Na micrografia da Figura 45h que corresponde à argamassa produzida na proporção 1:4,5 com incorporação de 30% de lodo de esgoto calcinado após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem uma morfologia composta em sua maioria de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) em estado amorfo e partículas de formatos e tamanhos variados, de aspecto rígido característico de óxido de silício (quartzo). Observa-se uma partícula de cor clara, esta é composta em sua maioria por compostos químicos Fe e O, característicos do composto hematita.

#### 4.3.5.3 Microscopia das argamassas com zona carbonatada identificada produzidas na proporção 1:6 após 28 dias de ciclos de molhagem e secagem

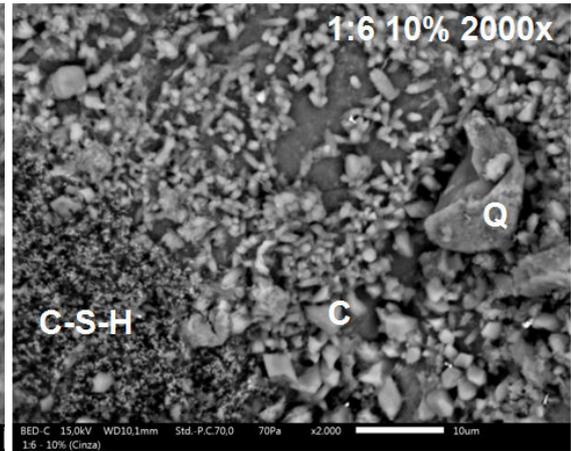
Na Figura 46 tem-se as micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura das argamassas produzidas na proporção 1:6, onde substituiu-se 0%, 10%, 20% e 30% do cimento através da incorporação do lodo de esgoto calcinado após 28 dias de ciclos de molhagem

Figura 46- Micrografia das amostras das argamassa após 28 e 63 dias de ciclos de molhagem e secagem

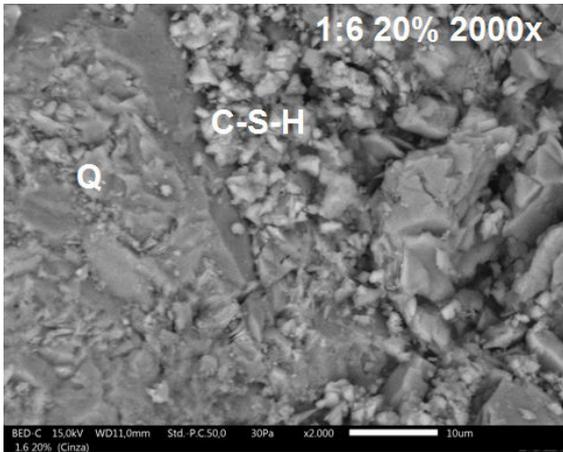




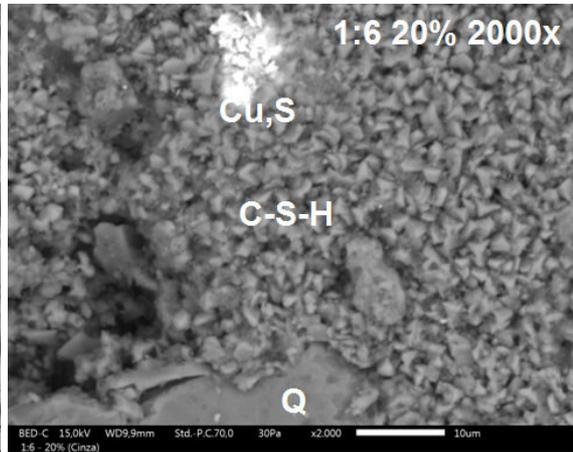
c)



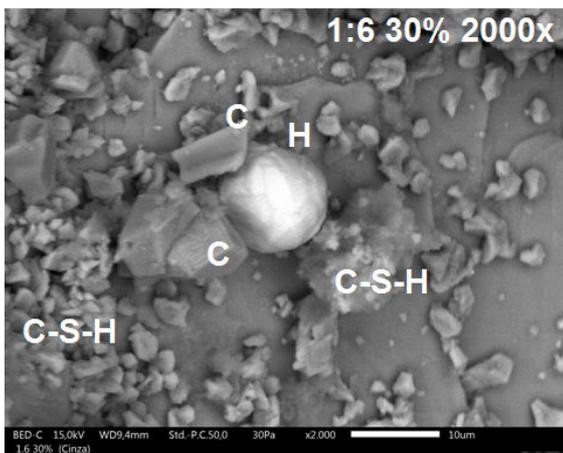
d)



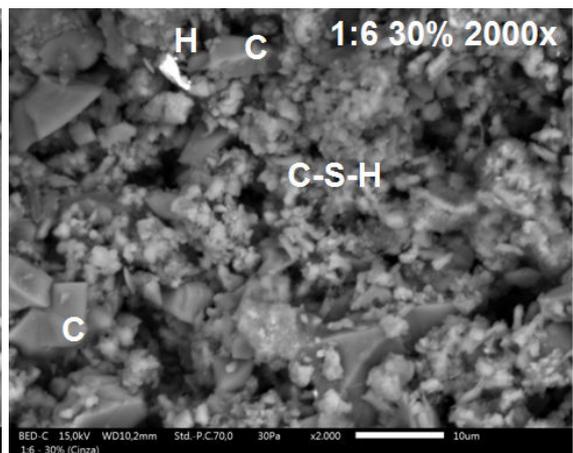
e)



f)



g)



h)

Fonte: A Autora (2019).

Verifica-se através da micrografia da Figura 46 a das argamassas de referência produzidas na proporção 1:6, após ciclos de 23 dias de molhagem e secagem, uma morfologia composta por duas regiões uma densa e uma porosa. A zona de transição apresenta um ótimo entrelaçamento das fibras de C-S-H ao agregado de quartzo e hidróxido de cálcio de modo a não deixar nenhum espaço vazio, melhorando assim as propriedades do material. O hidróxido de cálcio precipita como forma de prisma hexagonal, de grande dimensão nos espaços entre as partículas de cimento.

Observa-se pequenas partículas pseudo-hexagonais características de caulinita e carbonato de cálcio indicando a carbonatação da amostra. Verifica-se na micrografia da argamassa de referência produzida na proporção 1:6 após 63 ciclos de molhagem e secagem apresentada pela Figura 46 b uma morfologia composta por partículas há silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), em estado amorfo e cristalino, umas compactadas e outras soltas, preenchendo os espaços em torno das partículas mais densas. Observam-se ainda partículas de carbonato de cálcio.

Através da Figura 46 c produzidas na proporção 1:6 com incorporação de 10% de lodo de esgoto calcinado, observa-se uma morfologia heterogênea típica de concretos e não de argamassas, composta por duas regiões, uma onde há presença de aglomerado com densidade rígida, superfície irregular, de dimensão grande, característico de óxido de silício (quartzo) e outra região composta por fibras porosas de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), que preenche todos os espaços, entrelaçando com a superfície densa. Observa-se ainda partículas de hematita que são provenientes do lodo, e são responsáveis pelo enferrujamento das estruturas, causando corrosão.

Mediante a Figura 46 d que apresenta a micrografia da argamassa com incorporação de 10% de lodo de esgoto que passou por ciclos de molhagem e secagem de 63 dias, observa-se uma morfologia composta por partículas de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), amorfas e cristalinas, de formato variados e tamanho pequeno, umas se encontram compactadas e outras soltas sobre o aglomerado maior. Observa-se buracos causando vazios na amostra, o que prejudica a resistência mecânica e a durabilidade desse concreto. Verifica-se ainda, a presença de óxido de silício, caulinita e carbonato de cálcio.

Na argamassa com incorporação de 20% de lodo de esgoto (Figura 46 e), observa-se partículas de hematita que são provenientes do lodo que no concreto são responsáveis pelo enferrujamento das estruturas, causando corrosão.

Verifica-se através da micrografia da argamassa com incorporação de 20% de lodo após envelhecimento acelerado em ciclos de molhagem e secagem após 63 dias Figura 46 f, partículas de superfície plana, de aspecto rígido, que tem características do aluminossilicato caulinita ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5\text{OH}_4$ ), confirmado pela presença dos elementos químicos O, Si, Al. Observa-se uma partícula de cor clara composta em sua maioria de Cu e S, observado pelo EDS, estes tem um coeficiente de retrodifusão superior aos demais elementos químicos existentes nas demais partículas, por isso exibe maior contraste. Observa-se ainda, silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), amorfas e cristalinas, de formato variado e tamanho pequeno, umas se encontram compactadas e outras soltas sobre o aglomerado maior, e a presença do carbonato de cálcio.

Através da Figura 46 g observa-se que com a incorporação de 30% de lodo após 28 dias de molhagem e secagem a micrografia é constituída de uma morfologia heterogênea, compostas por aglomerados de densidade rígida e fibras porosas. Superfícies planas e de formato irregulares e tamanhos variáveis, são atribuídos ao quartzo. Observa-se a presença de pequenas fibras característicos de C-S-H (silicatos de cálcio hidratados) ocupando os espaços vazios de maiores dimensões existentes na pasta de cimento ou na zona de transição ao redor do aglomerado, aumentando o desempenho mecânico e a durabilidade do material, e acumulados sobre o aglomerado maior.

É possível observar partículas lamelares de formato pseudo-hexagonal com tamanhos menores que  $2\ \mu\text{m}$ , associadas com a caulinita. Mediante a micrografia da Figura 46 h produzida com incorporação de 30% de lodo após ciclos de 63 dias de molhagem e secagem, observa uma morfologia composta por partícula de silicatos de cálcio hidratado. Estas partículas são tanto amorfas como cristalinas, de formato e tamanho variados. Observa-se uma partícula de cor clara é composto em sua maioria de Fe e O, característico de hematita, estes tem um coeficiente de retrodifusão superior aos demais elementos químicos existentes nas demais partículas, por isso exibe maior contraste. Observa-se ainda a presença de óxido de silício, caulinita e carbonato de cálcio.

A argamassa produzida na proporção 1:3 com 10% e 20% de incorporação de lodo após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem, observa-se que o C-S-H não aderiu na interface da superfície densa formando vazios, estes têm dimensões muito superiores à dos poros de gel e podem estar vazios ou parcial ou totalmente preenchidos com água.

Na proporção traço 1:3, após 63 dias de envelhecimento acelerado com incorporação de 20% e 30 % de lodo, observa-se que formaram-se cristais em forma de agulha etringita, após a mistura do cimento com a água, que depois se transformaram em monossulfato de cálcio hidratado que cristaliza na forma hexagonal em cristais de grandes dimensões. A etringita não é determinante para a resistência, porém os sulfoaluminatos de cálcio hidratados são atacados por sulfatos, sendo os responsáveis pela vulnerabilidade dos materiais cimentícios ao ataque de sulfatos. Os vazios que se apresentam em forma esférica atingem diretamente a resistência mecânica.

Esses vazios de variadas dimensões provavelmente podem ter sido causados por uma cura mal feita, que facilita a entrada do  $\text{CO}_2$ , tornando mais fácil o avanço da frente de carbonatação, penetrando nos poros, formando o ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Posteriormente esse ácido reage com alguns dos componentes da pasta de cimento hidratada, resultando em água e carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Portanto, percebe-se que a cura tem grande influência na velocidade da carbonatação (CALAZANS, 2013).

A argamassa produzida na proporção 1:4,5 com 20% de incorporação de lodo após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem, observa-se a presença de etringite e vazios, causando redução na resistência mecânica.

Conforme a micrografia, a argamassa produzida na proporção 1:4,5 após 63 dias de ciclos de molhagem e secagem é considerada a melhor proporção, pois apresenta estrutura unida e entrelaçada entre si.

Na argamassa produzida na proporção 1:6 com 10% de incorporação de lodo após 63 dias de ciclos, observa-se a presença de vazios.

Em geral, a proporção 1:3 apresentou o maior grau de carbonatação comprovado pelos resultados TGA. Por outro lado, o aumento da incorporação do lodo gerou redução do carbonato de cálcio. O carbonato de cálcio não deteriora o

concreto, porém durante a sua formação consome os álcalis da pasta e reduz o pH, tornando o concreto frágil (POLITO, 2006).

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho e a durabilidade de argamassas de revestimento produzidas em proporções distintas incorporando lodo de esgoto calcinado em percentuais distintos substituindo parcialmente o cimento Portland.

De forma específica, tem-se as seguintes conclusões:

Em relação à classificação ambiental do lodo objetivando a quantificação dos elementos presentes nas amostras coletadas, no tocante ao extrato solubilizado, o lodo foi considerado não inerte e acerca dos resultados do extrato lixiviado, o lodo foi considerado não perigoso indicando que o quantitativo dos metais pesados presentes não causam danos.

As caracterizações realizadas por meio de termogravimetria indicaram que a primeira perda de massa do lodo de esgoto ocorrida na primeira etapa de decomposição, corresponde à remoção de água fisicamente adsorvida, fenômeno típico de materiais argilosos.

Os resultados obtidos nas análises de fluorescência de Raio X mostraram que as amostras do lodo calcinado nas temperaturas 600°C, 700°C, 800°C e 900°C, do ponto de vista químico, são constituídas basicamente por  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , a presença de tais elementos favorecem o resíduo por contribuírem para excelente estabilidade térmica, resistência química e boa resistividade elétrica. A presença de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  proporciona resistência ao ataque de cloretos devido à capacidade positiva da ligação química de cloretos com o teor de alumínio, proporcionando benefícios no tocante à durabilidade.

Os resultados referentes ao MEV mostraram que o lodo após calcinado se apresenta com partículas irregulares, com texturas de superfície áspera e uma microestrutura porosa, podendo levar a uma alta absorção e a um aumento na demanda de água. A demanda de água ficou evidenciada nos ensaios de índice de consistência em relação ao aumento da porcentagem do lodo calcinado.

Em relação à reatividade pozolânica seguindo as recomendações da NBR 5752 (2015), o lodo calcinado na temperatura 800°C foi o único que apresentou índice de atividade pozolânica dentro dos padrões estabelecidos.

Em relação ao estudo sobre consistência em geral, ocorreu uma diminuição na fluidez das argamassas com incorporação de lodo (corroborando com os

resultados da microscopia eletrônica de varredura que apresentou as características do lodo com partículas irregulares, com texturas de superfície áspera e uma microestrutura porosa).

No tocante à densidade, o lodo de esgoto calcinado a 800°C apresentou massa específica maior que a da areia utilizada, logo, o aumento na densidade de massa no estado fresco quando comparado com a argamassa de referência já era esperado.

Sobre o teor de ar, as argamassas de referência apresentaram maior teor de ar quando comparadas com as argamassas produzidas com lodo de esgoto indicando que a incorporação de lodo calcinado acarreta a redução do ar incorporado devido à menor relação água / cimento causada pela incorporação do lodo.

A incorporação de lodo provocou aumento da retenção de água nas argamassas, corroborando com os resultados apresentados no estudo relacionado ao índice de consistência.

Elementos como zinco e fósforo (confirmados pela fluorescência) presentes no lodo de esgoto calcinado perturbam o processo de hidratação do cimento e contribuem para a aceleração do tempo de início e fim de pega das pastas.

A resistência à tração na flexão não apresentou bom desempenho nas argamassas com incorporação de lodo devido à necessidade de alto teor de água quando comparadas com as argamassas de referência.

Os resultados quanto à resistência à compressão nas amostras estudadas aos 7, 14 e 28 para a incorporação de 30% de lodo nas argamassas produzidas na proporção 1:6 apresentaram menor resistência quando comparadas com as demais proporções estudadas. Este comportamento pode ser explicado pela presença de matéria orgânica que pode alterar o processo de hidratação do cimento Portland, ocasionando aumento do tempo de início de pega e retardando a formação dos compostos hidratados.

A absorção de água por capilaridade mostra que para os dois períodos de medição (10 min e 90 min) o aumento da incorporação de lodo de esgoto reduziu a absorção de água devido ao melhor empacotamento dos compósitos que ocorreu com o aumento da incorporação do lodo, bem como o preenchimento dos vazios causado pelas partículas finas de lodo.

Em relação à durabilidade, a argamassa produzida na proporção 1:3 com incorporação de 30% de lodo de esgoto calcinado apresentou melhor desempenho com um menor percentual de carbonato de cálcio após envelhecimento acelerado mediante ciclos de 28 e 63 dias; para proporção 1:4,5 o melhor desempenho foi para a argamassa com 10% de incorporação de lodo; e para a proporção 1:6, as incorporações de 20% e 30%. Em geral, o aumento da incorporação do lodo gerou redução do carbonato de cálcio, logo a incorporação do lodo de esgoto não prejudicou a durabilidade das argamassas estudadas.

Em consonância com os estudos realizados mundialmente sobre a incorporação do lodo de esgoto calcinado como material cimentício, conclui-se que mediante os ensaios realizados na presente pesquisa, as proporções 1:3 e 1:4,5 com incorporação de 10% e 20% de lodo de esgoto calcinado a 800°C apresentaram melhores resultados quanto aos parâmetros estudados.

A incorporação de lodo de esgoto em argamassas promove a reciclagem do resíduo que possui grande complexidade em seu descarte, gerando alto custo para as estações de tratamento, promovendo assim benefícios ambientais, sociais e financeiros.

Por fim, espera-se contribuir para os estudos que envolvem a utilização de materiais não convencionais na indústria da construção civil, especificamente sobre a utilização de lodo de esgoto como substituição parcial do cimento em argamassas, aprofundando o conhecimento sobre o desempenho e durabilidade das mesmas.

## REFERÊNCIAS

- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. São Paulo: ABRELPE, 2017.
- AGRAWAL, D.; HINGE P.; WAGHE, U. P.; RAUT, S.P. Utilization of industrial waste in construction material – A review. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, v.3, p. 8390-8397, 2014.
- ALMEIDA, G. B. et al. Padronização de Métodos para análise granulométrica no Brasil. **Comunicado Técnico 66**. Rio de Janeiro, RJ, 2012.
- ANDREOLI, C.V; DOMASZK, S; FERNANDES, F.; LARA, A.I. Proposta preliminar de regulamentação para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto no Paraná. **Sanare**, v.7, n.11, p.53-60, 1997.
- ANDREOLI, C.V.; FERREIRA, A. C.; CHERUBINI, C.; TELES, C. R.; CARNEIRO, C.; FERNANDES, F. Higienização do Lodo de Esgoto. In: Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, Cap. 4, p. 87 – 117, 2001.
- AREIAS, I. O. R.; VIEIRA, C. M. F.; MANHÃES, R. S. T.; INTORNE, A. C. Incorporation of sludge of the sewage treatment station (STS) into red ceramic. **Cerâmica**, v. 63, p. 343-349,2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276:2005**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277:2005**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281:2005**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279:2005**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280:2005**. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259:2005**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5712:2014**. Bloco Vazado Modular de Concreto, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776:1987**. Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman - Método de ensaio, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 45:2006**. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios, 2006

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:2006**. Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 1007:2004**. Amostragem de resíduos sólidos, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278:2005**. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 43:2002**. Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23:2001**. Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:1996**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM15:2012**. Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel, 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65:2003**. Cimento Portland - Determinação do tempo de pega, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372:2001**. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine), 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 23:2001**. Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7200:1998**. Execução de revestimentos de parede e tetos com argamassas inorgânicas: procedimento, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752:2014**. Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575:2013**. Edificações habitacionais — Desempenho.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: 2004. Resíduos Sólidos – Classificação, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528**:2010. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - determinação da resistência de aderência à tração, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13749**:2013. Revestimento de parede e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14001**:2015. Sistemas de gestão ambiental – especificação e diretrizes para uso, 2015.

AZÁROFF, L. V. **Elements of X-ray crystallography**. McGraw-Hill Book Company, 1968.

BAÍA, L. L. M.; SABBATINI, F. H. **Projeto e Execução de Revestimento de Argamassa**. 4 ed. São Paulo: Nome da Rosa, 2008.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, p. 349, 2006.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 248, 2008.

BRASIL. Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução n° 357, de 17 de março de 2005 (Alterada pela Resolução n° 410/2009 e pela n° 430/2011).

BRUCE, A. M.; PIKE, E. B.; FISHER, W. J. A review of treatment process options to meet the EC sludge Directive. **Water and Environment Journal**, v. 4, n. 1, p. 1-13, 1990.

CAETANO, M. D. D. E.; DEPIZZOL, D. B.; REIS, A. O. P. Analysis of solid waste management and improvement proposal: a case study in carpentry of Cariacica-ES. **Gestão da Produção**, v. 24, n. 2. p. 382-394, 2017.

POLITO, G. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. TCC (Especialização), Minas Gerais, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, 2002.

CAMPOS, J. R. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: PROSAB/FINEP, p.464,1999.

CAPROS, P.; KOUVARITAKIS, N.; MANTZOS, L. **Economic evaluation of sectoral emission reduction objectives for climate change: top-down analysis of greenhouse gas emission possibilities** in the E.U, Contribution to a Study for DG Environment, European Commission by Ecofys Energy and Environment, AEA Technology Environment and National Technical University of Athens, 2001.

CARASEK, H. **Argamassas: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, v2, p.893 – 944, 2010.

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos - Avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. Tese (Doutorado). São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1996.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L.M. Importância dos materiais na aderência do revestimento das argamassas. IN: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Brasília. Anais...Brasília: SBTA, 2001.

CASSINI, S. T.; CHERNICHARO, C. A. L.; ANDREOLI, C. V.; FRANÇA, M.; BORGES, E. S. M.; GONÇALVES, R. F. **Hidrólise e atividade anaeróbia em lodos**. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

CASTELLOTE, M.; ALONSO, C.; ANDRADE, C.; TURRILLAS, X.; CAMPO, J. Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n.9, p. 1633-1644 2004,

CEMBUREAU – **European cement association**. Activity report. Brussels, Belgium, 2014.

CHEN, C.; HABERT, G.; BOUZIDI, Y; JULLIEN A. CHEN, C. Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. **Journal of Cleaner Production**. v. 18, p. 478–485, 2010.

CHEN, M.; BLANC, D.; GAUTIER, M.; J. MEHU; GOURDON, R. Environmental and technical assessments of the potential utilization of sewage sludge ashes (SSAs) as secondary raw materials in construction. **Waste Manage**, v.33, p. 1268-1275, 2013.

CHEN, Z.; POON, C. S. Comparative studies on the effects of sewage sludge ash and fly ash on cement hydration and properties of cement mortars. **Construction and Building Materials**. v.54, p. 791–803, 2017.

CHERNICHARO, C. C. A. L. Post-treatment options for the anaerobic treatment of domestic wastewater. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v.5, n. 1, p. 73-92, 2006.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias** – Reatores Anaeróbios, v. 5, 2008.

- CORDEIRO, G. C. **Concreto de Alto Desempenho com Metacaulinita**. Dissertação (Mestrado). Campos dos Goytacazes, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Centro de Ciência e Tecnologia, 2001.
- CORNWELL, D.A.; MUTTER, R.N.; VANDERMEYDEN, C. **Commercial application and marketing of water plant residuals**. Denver, CO: American Water Works Association Research Foundation; American Water Works Association, p.187, 1999.
- COSTA, C. F. M.; VIEIRA, D. A.; LULA, R. T.; BARROS, B. B.; GAMA, L.; SANTOS, P. T.A., JESUS, A. A. DE; ANDRADE, H. M. C. Catalisadores  $ZnFe_2O_4$  e  $NiFe_2O_4$  Preparados por Reação de Combustão para Reação de Deslocamento do Gás de Vapor D'água (WGSR). **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.1, p. 01-08, 2002.
- COSTA, S. A. J. **Descolamento dos revestimentos cerâmicos de fachada na cidade do Recife**. Dissertação (Mestrado). São Paulo, Universidade de São Paulo, 2001.
- COSTA, F. M. S. **Estudo da viabilidade da utilização de cinza de lodo de esgoto como adição em argamassa de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado). Natal, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.
- CORDEIRO, G. C. **Concreto de Alto Desempenho com Metacaulinita**. Dissertação (Mestrado). Campos dos Goytacazes, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Centro de Ciência e Tecnologia, 2001.
- CYR, M.; COUTAND, P.; CLASTRES, P. Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v.37, p.1278– 1289, 2007.
- DEBAPRIYA, D.; SUKUMAR, M.; ADHIKARI, B. Reclaiming of rubber by a renewable resource material (RRM). II. Comparative evaluation of reclaiming process of NR vulcanizate by RRM and diallyl disulfide. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 73, p.2951-2958, 1999.
- DAL MOLIN, D.C.C., Mineral additions, in: G.C. Isaia, **Concreto: Ciência e Tecnologia**, IBRACON, p.1946, São Paulo, 2011.
- DMAE**- Departamento Municipal de Água e Esgotos. Normas gerais para Ensaios. Divisão de Pesquisa do Departamento Municipal de Água e Esgotos de Porto Alegre, 1978.
- DONATELLO, S.; TYRER, M.; CHEESEMAN, C.R. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. **Cement & Concrete Composites**, v.32, p.121–127, 2010.
- ECKENFELDER, W.W. **Industrial Water Pollution Control**. Boston, McGraw-Hill, 2005.
- FABER, M.H.; STEWART, M.G. Risk assessment for civil engineering facilities: critical overview and discussion. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 80, p. 173–184, 2003.

FARIAS FILHO, J. **Estudo da durabilidade de argamassas alternativas produzidas de resíduos de construção e granito**, Tese (Doutorado). Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande, 2007.

FONTES, C.M.A; BARBOSA, M.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; GONCALVES, J.P. **Potentiality of sewage sludge ash as mineral additive in cement mortar and high performance concrete**. In: International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, Barcelona, p. 797–806, 2004.

FONTES, M. A.; TOLEDO FILHO, R. D.; BARBOSA, M. C. Sewage sludge ash (SSA) in high performance concrete: characterization and application. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v.9, n.6, p. 989 – 1006, 2016.

FYTILI, D.; ZABANIOTOU, A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.12, p. 116–140, 2008.

GEYER, A. L. B.; MOLIN, D. D.; CONSOLI, N. C. **Recycling of sewage sludge from treatment plants of Porto Alegre city, Brazil**, and its use as a addition in concrete. In: International conference on sustainable construction into the next millennium: environmentally friendly and innovative cement based materials, Universidade Federal da Paraiba / The University of Sheffield, João Pessoa, Brasil, p. 464-473, 2000.

GODOY, L.C. A logística na destinação do lodo de esgoto. **Revista Científica Online Tecnologia, Gestão, Humanismo**, v. 2, n. 1, 2013.

GONÇALVES, J. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. D. M. R. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. **Ambiente Construído**, v.6, p. 83-94, 2006.

GRAM, H. E. Durability of natural fibres in concrete. **Natural fibre reinforced cement and concrete**, v.1, p.143-172, 1988.

HADLEY, D.W.; DOLCH, W.L.; DIAMOND, S. On the Occurrence of Hollow-Shell Hydration Grains in Hydrated Cement Paste. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1-6, 2000.

HALLEY, E.; MILLER, G. A. Backward”approach to sludge management. **Water Engineering & Management**. v. 9, p. 36-39, 1991.

HONG, J.; LI, X. Environmental assessment of sewage sludge as secondary raw material in cement production – A case study in China. **Waste Management**, v. 31, p. 1364–1371, 2011.

HOPPE FILHO, J.; CINCOTTO, M. A. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada – mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo -SP, p.21, 2008.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; FRANCK, R.; SALES, A.; ANDREOLI, C. V.; PAULON, V. A. Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. **Cerâmica**, v. 51, p. 85-95, 2005.

HSIAU P.-C.; LO. S.- L. Extractabilities of heavy metals in chemically-fixed sewage sludges. **Journal of Hazardous Materials**. v. 58, p. 73–82, 1998.

HUNTZINGER, DEBORAH N; EATMON, THOMAS D. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative Technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, p.668–675, 2009.

INGUNZA, M. P. D., CAMARINI, G., COSTA, F.M.S. Performance of mortars with the addition of septic tank sludge ash. **Construction and Building Materials**, v.160, p. 308–315, 2018.

ISMAIL, Z. Z.; AL-HASHMI, E. A. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. **Waste Management**, v. 28, p.2041–2047, 2008.

ISAIA, G. C. Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de levado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura. Tese (Doutorado). São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995.

JIANGUO, J.; YONG, Y.; SHIHUI, Y.; BIN, Y.; CHANG, Z. Effects of leachate accumulation on landfill stability in humid regions of China. **Waste Management**, v. 30, n. 5, p. 848-855, 2010.

JONH, V. M.; AGOPYAN, V.; PRADO, T.A. Durabilidade de compósitos de cimento e fibrasvegetais. In:III Seminário Internacional de Durabilidade de Materiais, Componentes e Estruturas. São Paulo, 1997.

JUNIOR, J. V. B.; ROMANEL, C. Sustentabilidade na indústria da construção: uma logística para reciclagem dos resíduos de pequenas obras urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana. **Brazilian Journal of Urban Management**, v. 5, n. 2, p. 27-37, 2013.

KJELLEN, K. O.; JUSTNES H., Revisiting the Microstructure of Hydrated Tricalcium Silicate-A Comparison to Portland Cement. **Cement and Concrete Composites**, v.26, p. 947-956, 2004)

KWAN, A.K.H; MORA, C.F. Effects of various shape parameters on packing of aggregates particles. **Magazine of Concrete Research**, v.53, n.2 (2001) p.91, 2001

LETTINGA, G.; VINKEN J. N. **Feasibility of the Upflow Anaerobic-Sludge Blanket (UASB) Process for the Treatment of Low-Strength Wastes**. In Proc. of the 35th Industrial Waste Conference. Purdue University, West Lafayette, U.S.A, p. 625-634, 1980.

LEVY, S. M. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria. Tese (Doutorado). São Paulo, Universidade de São Paulo, 2001.

LIMA, J. **Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas, São Paulo**: Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, EPUSP, 2010.

LO, I. M. C.; ZHOU, W. W.; LEE, K. M. Geotechnical characterization of dewatered sewage sludge for landfill disposal. **Canadian Geotechnical Journal**, Ontário, v. 39, n. 5, p. 1139-1149, 2002.

LOPES, J.C.; RIBEIRO, L.G.; ARAÚJO, M.G.; BERALDO, M.R.B.S. Produção de alface com doses de lodo de esgoto. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.23, n.1, p.143-147, 2005.

LULA, R. P. T.; MELO, P. S.; BARROS, B. S.; GAMA, L.; MARIANO W. A.; KIMINAMI, R H. G. A.; Costa, A. C. F. M. Catalisadores cerâmicos de  $ZnAl_2-xFexO_4$ : síntese de pós nanométricos e sua caracterização. **Cerâmica**, v. 51, p. 102-106, 2005.

LYNN, C. J.; DHIR, R. K.; GHATAORA, G. S.; WEST, R. P. Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 767–779, 2015.

LUDUVICE, M. **Processos de estabilização de lodos**. In: Lodos de Esgotos – Tratamento e Disposição Final. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

MACIEL, L.L.; BARROS, M. S.B.; SABBATINI, F.H. **Recomendações para Execução de Revestimentos de Argamassa para paredes de vedação internas e externas e tetos**. EPUSP, S. Paulo, SP, 1998.

MACIOSKI, G. **Avaliação do comportamento de argamassas estabilizadas para revestimento**, Trabalho Final de Curso, Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2014.

MALHOTRA, V.M; MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious materials. Advances in concrete technology**, Canadá, v.1, 1996.

MARQUES, M. G. S. **Estudo das Propriedades Físicas e Mecânicas e da Durabilidade de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibra Amazônica**. Tese (Doutorado). São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2015.

MARTINS, R.O.G.; ALVARENGA, R.C. S. S.; PEDROTI, L. G.; OLIVEIRA, A.F.; MENDES, B.C.; AZEVEDO, A.R.G. Assessment of the durability of grout submitted to accelerated carbonation test. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 261–262, 2018.

MARCONDES, M.J. A. **Cidade e natureza: proteção dos mananciais e exclusão social**. São Paulo: Studio Nobel: Edusp/Fapesp, 1999.

MENEZES, R. R.; FARIAS FILHO, J.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas. **Cerâmica**, v. 55, p.263-270, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades, Materiais**, São Paulo, Pini, 1994.

MEHTA, P. K. Greening of the concrete industry for sustainable development. **ACI Concrete International**, v. 24, p. 23–28, 2002.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: Arte Interativa, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. v.1, São Paulo, IBRACON, 2014.

METCALF, L.; EDDY, H. **Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse**. New York: Ed. McGraw-Hill.4. ed, p. 1819, 2003.

MISHRA, S.; SIDDIQUI, N. A. A Review On Environmental and Health Impacts of Cement Manufacturing Emissions. **International Journal of Geology, Agriculture and Environmental Sciences**, v.2, p. 26-31, 2014.

MONZÓ, J.; PAYÁ, J.; BORRACHERO, M.V.; GIRBÉS, I. Reuse of sewage sludge ashes (SSA) in cement mixtures: the effect of SSA on the workability of cement mortars. **Waste Manage**. v.23, p.373–381, 2003.

MONZÓ, J.; PAYA, J.; BORRACHERO, M.V.; PERIS-MORA, E. Mechanical behavior of mortars containing sewage sludge ash (SSA) and Portland cements with different tricalcium aluminate content. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 87–94, 1999.

MORAES, L.D.M. **Avaliação da biodegradabilidade anaeróbia de lodos de esgoto provenientes de reatores anaeróbios sequenciais**. Tese (Doutorado. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

MORALES, G. Aproveitamento do lodo de esgoto sanitário como matéria prima para a produção de pozolana. **Exact and Technological Sciences**, v. 18/20, n. 4, p. 39-45, 1997.

MOURA, D. M. **Estudo das propriedades mecânicas de ligas Fe-Ni e Fe-Ni-Mo processadas por metalurgia do pó**. TCC (Graduação). Mossoró, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2015.

NAAMANE S.; RAIS, Z.; TALEB, M. The effectiveness of the incineration of sewage sludge on the evolution of physicochemical and mechanical properties of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v.112, p.783–789, 2016.

NARCISO, G. S. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Dissertação (Mestrado). Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2006.

NAVIA, R.; RIVELA, B.; LORBER, K.E.; MENDEZ, R. Recycling contaminated soil as alternative raw material in cement facilities: Life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 48, p. 339–356, 2006.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 2ª. ed. São Paulo, PINI, 1997.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, v. 50, p. 324-330, 2004.

OWEN, P. G. Water-Treatment Works' Sludge Management. *Water and Environment Journal*, v. 16, p. 282-285, nov. 2002

PAN, S.C.; TSENG, D.C.; LEE, C.C.; LEE, C. Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties. *Cement and Concrete Research*, v.33, p.1749–1754, 2003.

PEDROZA, M.M.; VIEIRA, G. E. G.; SOUSA, J. F.; Pickler, A. C.; LEAL, E. R. M.; MILHOMEN, C. C. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. *Revista liberato*, v.11, n.16, p.89, 2010.

PINTO, F. C. Influência da pressão exterior na embebição de materiais de construção. Tese (Doutorado). Porto, Universidade do Porto, 1998.

PÉREZ-CARRIÓN, M.; BAEZA-BROTONS, F.; PAYÁ, J.; SAVAL, J.M.; ZORNOZA, E.; BORRACHERO, M.V.; GARCÉS, P. Potential use of sewage sludge ash (SSA) as a cement replacement in precast concrete blocks. *Materiales de Construcción*, v.64, 313, 2014.

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: uma abordagem geral. *Revista Técnico Científica* do CREA-PR, 2013.

POSSER, N. D. **Proporcionamento de Argamassa para Reboco de Recuperação**. TCC (Monografia (Especialização)). Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

RATO, V. N. P. M. **Influência da microestrutura morfológica no comportamento e argamassas**. Tese (Doutorado). Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2006.

RECENA, F. A. **Conhecendo Argamassa**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2012.

REED, J. S. **Principles of Ceramic Processing**, 2nd Ed., New York: John Wiley & Sons, 1995.

ROQUE, J. A. **O desempenho quanto à durabilidade de alvenarias de blocos cerâmicos de vedação com função auto-portante: o caso da Habitação de Interesse Social**. Campinas. Tese (Doutorado). São Paulo, Universidade de Campinas, 2009.

SABBATINI, F. H.; BAÍA, L.L.M. **Projeto e execução de revestimento de argamassa**. Coleção primeiros passos da qualidade no canteiro de obras. São Paulo, 2000.

SACRAMENTO, D. S.; MEDEIROS, M.S.; Guerrero, J. C. H.; Ortiz, R.A.; FENNER, A.L.D. Custo das doenças atribuíveis a fatores ambientais na cidade de Manaus, Amazonas, Brasil. **Ciência e saúde Coletiva**, v.19 n.2, 2014.

SAMPAIO, A. Afinal, queremos ou não viabilizar o uso agrícola do lodo produzido em estações de esgoto sanitário? Uma avaliação crítica da Resolução CONAMA 375. **Revista DAE**, n. 193, p. 16-27, 2013.

SANTOS, J. O.; BATISTA, O. H. S.; SOUZA, J. K. S.; LIMA, C.T.; SANTOS, J. R.; MARINHO, A. A. Resíduos da indústria da construção civil e o seu processo de reciclagem para minimização dos impactos ambientais. **Ciências exatas e tecnológicas**, v. 1, p. 73-84, 2014.

SANTOS, P. T. A.; DANTAS, J.; SANTOS, P. T. A.; ARAÚJO, P. M. A. G.; COSTA, A. C. F. M. **Nanoferritas ni-zn silanizadas com 3- aminopropiltrimetoxisilano usando o método de refluxo**. COLAOB – Congresso Latino Americano de órgãos Artificiais e Biomateriais, 2012.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, V. 1, 1989.

SHARPE, M. The science of the unclean—JEM focus. **Journal of Environmental Monitoring**, v.3, p.2–6, 2001.

SILVA, C. R. L., CHINELATTO, A. L., CHINELATTO, A. S. A. Viabilidade da incorporação do lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) em massa cerâmica para produção de blocos. **Cerâmica**, v. 61, p. 31-40, 2015.

SILVA, C. R. L.; CHINELATTO, A. L.; CHINELATTO, A. S. A. Viabilidade da incorporação do lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) em massa cerâmica para produção de blocos. **Cerâmica**, vol. 61, p. 31-40, 2015.

SIDERIS, K. K.; SAVVA, A. E.; PAPAYIANNI, J. Sulfate attack and carbonation of plain and blended cements. **Cement Concrete Composites**, v.36, p. 47-56 , 2006.

SILVA, E. F. **Variações dimensionais em concreto de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração**. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

SILVA, N. G. **Argamassas de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. Dissertação (Mestrado). Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2006.

SILVEIRA, M. L. A., ALLEONI, L. R. F., GUILHERME, L. R. G. Biosolids and heavy metals in soils. **Scientia Agricola**, v. 60, n.4, p. 793-806, 2003

SIMOKA, B. P. DE M., REIS, C. Z., BONI, H. T. Use of industrial sludge ash in the preparation of mortar for constructio. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, v.3, n. 5, 2016.

**SNIS**- Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos. Disponível em <http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2015>

SOUZA, C. H. **Desenvolvimento de argamassa de revestimento com adição de resíduo do polimento do porcelanato**. TCC (Graduação). Recife, Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

SPERLING, V. M.; ANDREOLI, C. V. Introduction to sludge management. Sludge Treatment and Disposal. **IWA Publishing**, p. 1-3, 2007.

SPERLING, V.M.; GONÇALVES, R.F. **Lodo de esgotos: características e produção: Disposição Final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG: Companhia de Saneamento do Paraná, 2001.

SPERLING, V. M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. DESA/UFMG, volumes I e II, 1995.

TANTAWY, M.A., EL-ROUDI, A.M., ABDALLA, E.M., ABDELZAHER, M.A. Evaluation of the Pozzolan Activity of Sewage Sludge Ash. **Chemical Engineering**, Article ID 487037, 2012.

TAY, J. H, SHOW, K. Y., HONG, S. Y. Potential Reuse of Wastewater Sludge for Innovative Applications in Construction Industry. **Bulletin of the College of Engineering**, n. 86, p.103-112, 2002.

TAY, J.H. Potential Use of Sludge Ash as Construction Material. **Elsevier Science Publishers**, v. 13, p. 53-58, 1986.

TEIXEIRA, Izabella. **Vamos Cuidar do Brasil**. In:4º Conferência Nacional do Meio Ambiente – Resíduos Sólidos. Texto Orientador. 2º Edição. Brasília, 2013.

TESSARO, A. B.; SÁ, J. S.; SCREMIN, L. B. Quantificação e classificação dos resíduos procedentes da construção civil e demolição no município de Pelotas, RS. **Ambiente Construído**, v.12, p.121-130, 2012.

UNGERICHT, A.J. PIOVESAN, A.Z. Influência da cura da argamassa em relação às propriedades mecânicas e absorção de água. **Unoesc & Ciência – ACSA**, Joaçaba, v. 2, n. 1, p. 75-86, 2011.

UTLU, Z., SOGUT, Z.; HEPBASLI, A.; OKTAY, Z. Energy and exergy analyses of a raw mill in a cement production. **Applied Thermal Engineering**, v. 26, p.2479-2489, 2006.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos – Um manual para regiões de clima quente**. EPGRAF/UFPB, Campina Grande, p.255, 1994.

VIEIRA, C. M. F.; TERRONES, L. A.; SÁNCHEZ; MONTEIRO, S. N. Characteristics and effect of the granulometric fraction  $< 2 \mu\text{m}$  on the firing behavior of a clay. **Cerâmica**, v. 53, p. 249-254, 2007.

VIEIRA, S. **Experiência e perspectivas do tratamento anaeróbio de esgotos sanitários no Brasil**. In: III Taller y seminario latinoamericano "tratamiento anaerobio de aguas residuales", Montevideo, Uruguay, p. 293-301, 1994.

VILLAIN, G.; THIERY, M. Platret, G. Measurement methods of carbonation profiles in concrete: Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. **Cement and Concrete Research**. v. 37 p. 1182–1192, 2007.

WANG, X.S. Magnetic properties and heavy metal pollution of soils in the vicinity of a cement plant, Xuzhou (China). **Journal of Applied Geophysics**, v. 98, p.73-78, 2013.

WEBBER, M. D.; SHAMESS, A. **Land utilization of sewage sludge: a Discussion Paper**. Toronto: Expert Committee on Soil and Water Management, p.48, 1984.

YANG, G.; ZHANG, G.; WANG, H. Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China. **Water Research**, v. 78, p. 60-73, 2015.