



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MESTRADO PROFISSIONAL EM
ENGENHARIA AMBIENTAL

FERNANDO MORENO SUARTE JÚNIOR

**APROVEITAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE
ETE PARA FINS ENERGÉTICOS E COMO ADIÇÃO
POZOLÂNICA PARA O CONCRETO**

Palmas/TO
2019

FERNANDO MORENO SUARTE JÚNIOR

**APROVEITAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE
ETE PARA FINS ENERGÉTICOS E COMO ADIÇÃO
POZOLÂNICA PARA O CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Foi avaliada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Valdés Serra

Palmas/TO
2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

S939e Suarte, Fernando Moreno Júnior.
Aproveitamento e caracterização do lodo de ETE para fins Energéticos e como adição pozolânica para o concreto. / Fernando Moreno Suarte Júnior. – Palmas, TO, 2019. 113 f.

Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - curso de Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental, 2019.
Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Valdés Serra

1. Engenharia ambiental. 2. Saneamento. 3. Cinza de lodo de ETE. 4. Concreto. I. Título

CDD 628

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – a reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (LEI Nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do código penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

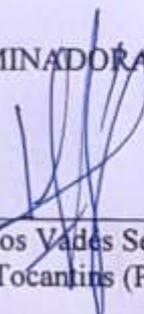
FOLHA DE APROVAÇÃO

FERNANDO MORENO SUARTE JÚNIOR

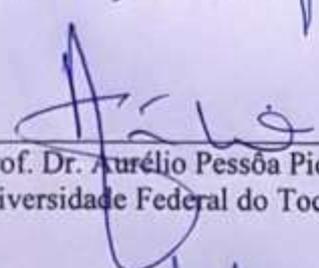
APROVEITAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ETE PARA FINS ENERGÉTICOS E COMO ADIÇÃO POZOLÂNICA PARA O CONCRETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Nível Mestrado Profissional, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. A presente dissertação foi aprovada pela Banca Examinadora composta pelos membros abaixo relacionados:

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Juan Carlos Vades Serra
Universidade Federal do Tocantins (Presidente)



Prof. Dr. Aurélio Pessoa Picanço
Universidade Federal do Tocantins



Prof. Dr. Moacyr Salles Neto
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins

Aprovada em: 20 de maio de 2019
Local de defesa: Sala 103 do bloco J
Universidade Federal do Tocantins, Campus Universitário de Palmas

*Dedico esse trabalho aos meus filhos Mateus e
Theo, a minha esposa Isis, aos meus pais
Fernando e Haydée, irmãos, amigos e demais
familiares.*

*Professores brilhantes ensinam para uma
profissão. Professores fascinantes ensinam
para a vida. (Augusto Cury)*

AGRADECIMENTOS

Agradeço as pessoas que ao longo da minha vida me incentivaram a buscar o conhecimento e usá-lo como ferramenta de transformação e oportunidades.

Aos professores Aurélio, Catalunha, Emerson, Fernan, Girlene, Marcelo e Joel que desenvolvem com excelência a missão de ensinar. Ao Professor Moacyr pelos ensinamentos e contribuições durante o processo de elaboração dessa dissertação.

Ao meu orientador Dr. Juan Carlos que sempre se mostrou prestativo nos atendimentos e contribui bastante para o desenvolvimento deste trabalho.

As instituições que disponibilizaram os laboratórios para realização dos experimentos: CEULP-ULBRA, Concreto Engenharia, CRTI, TECPAR e USP.

RESUMO

O presente trabalho aborda a temática do saneamento ambiental de resíduos sólidos, focado no lodo gerado na Estação de Tratamento de Esgoto Norte (ETE-Norte) de Palmas-TO. A concessionária responsável, BRK Ambiental, realiza a coleta, tratamento e destino final do esgoto doméstico gerado no plano diretor da capital, sendo fonte geradora responsável em buscar o método mais apropriado para o destino final do resíduo. O lodo é um resíduo sólido gerado em grande quantidade no tratamento do esgoto, sendo uma problemática no saneamento ambiental a destinação final deste resíduo, visto a presença de metais pesados podendo poluir o solo e mananciais. Com objetivo de minimizar os impactos ambientais e sugerir um método de destinação final com aproveitamento do material, o trabalho propõe verificar as características físicas e químicas do lodo, determinar seu poder calorífico e verificar a reatividade pozolânica da cinza. O resíduo gerado no processo de incineração foi considerado adição pozolânica e incluído na composição do concreto, sendo inserindo em teores de 5 e 10% na substituição do cimento *Portland* na dosagem do concreto. Os estudos comparativos dos resultados do concreto referência e no concreto com teores de cinza de lodo de estação de tratamento de esgoto apresentaram resultados satisfatório que viabilizam a utilização do lodo como insumo para o concreto, visto que os corpos de prova analisados apresentaram resistências à compressão axial próximo do traço referência e acima do *f_{ck}* determinado na dosagem. A resistência à tração e módulo de elasticidade são satisfatórias, comparada aos padrões. Referente à cinza, foi verificado que existe reatividade pozolânica, verificado através da condutibilidade elétrica, no tratamento térmico por incineração o lodo apresentou poder calorífico elevado comparado a outros resíduos, viabilizando a utilização do mesmo como material combustível e possibilitando o aproveitamento da cinza no concreto.

Palavras-chaves: Poder Calorífico, Resíduo Sólido, Adição Pozolânica de Resíduos.

ABSTRACT

The present work deals with the environmental sanitation of solid waste, focused on the sludge generated at the North Sewage Treatment Plant (ETE-Norte) of Palmas-TO. The responsible concessionaire, BRK Ambiental, performs the collection, treatment and final destination of domestic sewage generated in the capital master plan, being the generating source responsible for seeking the most appropriate method for the final destination of the waste. Sludge is a solid waste generated in large quantities in the treatment of sewage, being a problem in the environmental sanitation the final destination of this waste, since the presence of heavy metals can pollute the soil and water sources. With the objective of minimizing environmental impacts and suggesting a final disposal method with material utilization, the work proposes to verify the physical and chemical characteristics of the sludge, determine its calorific value and verify the pozzolanic reactivity of the ash. The waste generated in the incineration process was considered a pozzolantic addition and included in the concrete composition, being inserted in contents of 5 and 10% in the replacement of the Portland cement in the concrete dosage. The comparative studies of the results of the reference concrete and the concrete with sludge ash contents of the sewage treatment plant presented satisfactory results that make feasible the use of the sludge as an input to the concrete, since the analyzed specimens presented resistance to axial compression near the reference trace and above the determined fck in the dosage. The tensile strength and modulus of elasticity are satisfactory, compared to the standards. Regarding the ash, it was verified that there is a pozzolanic reactivity, verified through the electric conductivity, in the thermal treatment by incineration, the sludge presented high calorific value compared to other residues, making feasible the use of the same as combustible material and making possible the use of the ash in the concrete.

Key-words: Calorific Power, Solid Waste, Pozzolanic Addition of Residues.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Situação da ETE Norte.....	22
Figura 2: Evolução histórica da ETE Norte.....	23
Figura 3: Fluxograma das atividades.....	24
Figura 4: Frasco volumétrico de Le Chalelier.....	26
Figura 5: Ensaio de Condutibilidade Elétrica.....	29
Figura 6: Equipamento utilizado para determinar o módulo de elasticidade.....	32
Figura 7: Fluxograma do Sistema Lodo Ativado.....	41
Figura 8: Fluxograma do Sistema UASB seguido de pós tratamento.....	42
Figura 9: Interação entre o material orgânico afluyente e o lodo (Sistema Anaeróbico).....	42
Figura 10: Sistemas de Secagem do Lodo.....	43
Figura 11: Recuperação de Área Degradada em Goiânia-GO.....	50
Figura 12: Ruptura à compressão de concretos de baixa ou média resistência ($f_{ck} < 40\text{MPa}$).....	57
Figura 13: Imagem Satélite da ETE Norte.....	63
Figura 14: Fotos da ETE Norte.....	64
Figura 15: Textura do lodo fresco.....	65
Figura 16: Desidratação do lodo.....	66
Figura 17: Equipamentos utilizados na pesquisa.....	66
Figura 18: Ensaio de Massa Específica do Lodo de ETE.....	72
Figura 19: Mufla e lodo desidratado.....	76
Figura 20: Queima do lodo na Mufla.....	76
Figura 21: Moagem no moinho de bolas.....	77
Figura 22: Realização do ensaio em Bomba Calorífica.....	78
Figura 23: Massa Específica dos Agregados.....	82
Figura 24: Abatimento TR Figura 25: Abatimento TR+5%.....	88
Figura 26: Corpos de Prova no Tanque de Cura.....	89
Figura 27: Ensaio do Traço Referência à Compressão.....	92
Figura 28: Corpo de prova submetido ao ensaio de compressão diametral.....	94
Figura 29: Corpos de prova submetido ao ensaio módulo de elasticidade.....	95
Figura 30: Ensaio de reatividade pozolânica.....	97

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Quantidade de Matéria Orgânica contida no lodo.....	46
Gráfico 2: Difratoograma obtido para a amostra Cinza ETE	67
Gráfico 3: Difratoograma obtido para a amostra Cinza ETE com a identificação qualitativa das fases cristalinas presentes	68
Gráfico 4: Difratoograma do Lodo Residual LD-1, da ETE Vila União.....	68
Gráfico 5: Termograma referente a amostra 1 – lodo de ETE	73
Gráfico 6: Variação do TGA com a evolução da Temperatura	73
Gráfico 7: Curva TG do lodo residual, LD-1, obtido de reator UASB, em Palmas (TO)	74
Gráfico 8: Curva Granulométrica da Areia	84
Gráfico 9: Curva Granulométrica da Brita	85
Gráfico 10: Consumo de Materiais para 1m ³ de concreto em quilograma	86
Gráfico 11: Consumo de Materiais para os Ensaios.....	87
Gráfico 12: Gráficos da evolução da resistência à compressão traço referência.....	91
Gráfico 13: Gráficos da evolução da resistência à compressão traço 5%	91
Gráfico 14: Gráficos da evolução da resistência à compressão traço 10%	91
Gráfico 15: Gráfico comparativo da evolução da resistência.....	92
Gráfico 16: Gráfico comparativo da resistência a tração	94
Gráfico 17: Condutibilidade da CLETE.....	98

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Principais características físicas do esgoto domésticos	38
Quadro 2: Principais Microrganismos presentes nos esgotos	39
Quadro 3: Alternativas de utilização do lodo	48
Quadro 4: Principais compostos do cimento	58
Quadro 5: Influencia dos compostos na propriedade do cimento	58
Quadro 6: Classificação das Adições Minerais	59
Quadro 7: Identificação qualitativa das fases cristalinas presentes na amostra Cinza ETE	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classes de lodo de esgoto ou produto derivado – agentes patogênicos.....	45
Tabela 2: Ensaio de fluorescência de Raios X para o lodo de Ponta Grossa-PR	54
Tabela 3: Elementos Químicos das ETE's de Ponta Grossa - PR	55
Tabela 4: Determinação de umidade do lodo fresco	65
Tabela 5: Determinação da semiquantitativa da cristalinidade da amostra Cinza ETE	67
Tabela 6: Análise química dos óxidos maiores analisados.....	70
Tabela 7: Análise Química	70
Tabela 8: Análise dos elementos menores.....	71
Tabela 9: Variação do TGA com a variação de temperatura	75
Tabela 10: Poder Calorífico.....	77
Tabela 11: Poder calorífico de resíduos orgânicos	78
Tabela 12: Determinação do Traço Referência	79
Tabela 13: Determinação do Traço 5%	80
Tabela 14: Determinação do Traço 10%	80
Tabela 15: Quantitativo de materiais em kg para realização dos ensaios	80
Tabela 16: Propriedades do Cimento.....	81
Tabela 17: Massa Unitária dos Agregados	81
Tabela 18: Massa Específica dos Agregados	82
Tabela 19: Determinação da Composição Granulométrica da Areia	83
Tabela 20: Determinação da Composição Granulométrica da Brita	85
Tabela 21: Abatimento do Concreto.....	88
Tabela 22: Resistência à Compressão Axial aos 3 dias.....	89
Tabela 23: Resistência à Compressão Axial aos 7 dias.....	89
Tabela 24: Resistência à Compressão Axial aos 14 dias.....	90
Tabela 25: Resistência à Compressão Axial aos 28 dias.....	90
Tabela 26: Ensaio de Tração à Compressão	93
Tabela 27: Módulo de Elasticidade do Concreto Referência	95
Tabela 28: Módulo de Elasticidade do Concreto com 5% de CLETE	96
Tabela 29: Módulo de Elasticidade do Concreto com 10% de CLETE	96
Tabela 30: Reatividade por condutibilidade elétrica da CLETE	97
Tabela 31: Reatividade por condutibilidade elétrica da Cinza de Cana de Açúcar.....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CLETE	Cinza de lodo de estação de tratamento de esgoto
ETE	Estação de tratamento de esgoto
LETE	Lodo de estação de tratamento de esgoto
PPGEAmb	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
UFT	Universidade Federal do Tocantins

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>fck</i>	Resistência Característica de Projeto (concreto)
<i>fcj</i>	Resistência Característica de Dosagem (concreto)
<i>MPa</i>	Mega Pascal
<i>sd</i>	Desvio Padrão
μ	Exemplo de símbolo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	19
1.2	Delimitação de Escopo	19
1.3	Justificativa	19
2	OBJETIVOS.....	21
2.1	Objetivo Geral.....	21
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3	METODOLOGIA.....	22
3.1	METODOLOGIA DA PESQUISA	22
3.2	Quanto ao local de realização metodológica	22
3.3	Etapas para Realização da Pesquisa.....	23
3.4	ESTUDO DO LODO	25
3.4.1	Coleta do Lodo.....	25
3.4.2	Determinações Químicas do Lodo.....	25
3.4.3	Determinações Físicas do Lodo	26
3.4.4	Produção da Cinza	27
3.4.5	Estudo do Poder Calorífico.....	27
3.4.6	Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica	27
3.4.7	Estudo da Reatividade Pozolânica.....	27
3.5	ESTUDO DE DOSAGEM DO CONCRETO	29
3.5.1	Estudo do Aglomerante	30
3.5.2	Estudo de Agregado Miúdo	30
3.5.3	Estudo de Agregado Graúdo.....	30
3.5.4	Preparo do Concreto	30
3.5.5	Abatimento.....	31
3.5.6	Estudo de Compressão Axial.....	31
3.5.7	Estudo de Tração Diametral	31
3.5.8	Determinação do Módulo de Elasticidade	31
4.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	33
5	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	34
5.1 -	SANEAMENTO AMBIENTAL	34
5.2 –	RESÍDUOS SÓLIDOS	34
5.3 –	TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS	36
5.3.1 –	Esgoto	36
5.3.2 -	Parâmetros de Qualidade do Esgoto.....	37
5.3.3 -	Sistemas de Tratamentos	40
5.4 -	LODO DE ETE.....	42
5.4.1 –	Produção do Lodo.....	42
5.4.2 –	Características do Lodo	45
5.4.3 –	Problemática do LETE	46
5.4.4 –	Alternativas para uso do lodo	47
5.4.5 –	Utilização agrícola do lodo.....	49
5.5 –	TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	51
5.6 –	APROVEITAMENTO DO PODER CALORÍFICO.....	51
5.7 –	PROJEÇÕES ECONÔMICAS AMBIENTAIS	52
5.8 –	UTILIZAÇÃO DE CINZA DE RESÍDUOS PARA CONCRETO.....	53
5.9 –	CINZA DE LODO DE ETE.....	54
5.10 –	CONCRETO	55
5.10.1 –	Cimento <i>Portland</i>	57

5.10.2 – Agregados	58
5.10.3 – Aditivos e Adições para o Concreto	59
5.10.4 – Avaliação da Pozolanicidade	60
5.10.5 – Módulo de Elasticidade do Concreto	61
6 RESULTADOS E ANÁLISE	63
6.1 – ESTUDO DA ETE NORTE	63
6.2 – ARMAZENAMENTO E COLETA DO LODO	65
6.3 – PROPRIEDADES DO LODO	65
6.3.1 - DETERMINAÇÕES QUÍMICAS	66
6.3.2 – DETERMINAÇÕES FÍSICAS	71
6.3.3 – Produção da Cinza	76
6.4 – ESTUDO DO PODER CALORÍFICO	77
6.5 - ESTUDO DO CONCRETO	79
6.5.1- Estudo de Dosagem	79
6.5.2 - Estudo de Aglomerante.....	81
6.5.3 – Massa Unitária.....	81
6.5.4 – Massa Específica	82
6.5.5 – Granulometria.....	83
6.5.6 – Teores de Materiais Finos do Agregado Miúdo	86
6.5.7 – Produção do Concreto	86
6.5.8 – Abatimento do Concreto e Cura	88
6.5.9 – Compressão Axial.....	89
6.5.10 – Tração por Compressão Diametral	93
6.6 – ESTUDO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE	94
6.7 – REATIVIDADE POZOLÂNICA DA CLETE.....	96
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
REFERÊNCIAS.....	101
ANEXOS.....	109

1 INTRODUÇÃO

O tratamento de esgoto é um fator determinante para melhoria da qualidade de vida nos centros urbanos e rurais, porém no Brasil o acesso a essa infraestrutura é baixo, segundo ABES (2018) a região com maior representatividade no ranking da universalização do saneamento é a região Sudeste com 86,14% da população, já a região Norte é a menor, com 43,86% da população. A região Norte possui 18,20% de coleta e 19,44% de tratamento. Segundo o mesmo autor a necessidade de ampliação do sistema de tratamento de esgoto é prioridade no Brasil, visto que só no ano de 2013 foram lançados 1,2 bilhões de m³ de esgoto na natureza.

Com a ampliação do sistema de tratamento de esgoto aumentará também os resíduos gerados no processo. Esses resíduos sólidos (lodo) gerados nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) além de serem nocivos ao meio ambiente são produzidos em grande quantidade. Segundo estudos de Castro *et al.* (2015), o Estado que realiza a maior coleta é São Paulo com 75,39%, sendo Amapá e Pará os que menos realizaram coleta, com apenas 6,07%, o Estado do Tocantins aparece na pesquisa com 18,73% de coleta e 93,68% deste material coletado é tratado.

Este material sem o devido reaproveitamento impacta os aterros e demais locais de destinação inadequada. Uma das medidas mitigadoras é a reutilização do material calcinado como insumo da construção civil, diminuindo o volume de material lançado como expurgo e reduzindo a exploração de jazidas de agregados e aglomerantes.

A sustentabilidade ambiental na gestão de resíduos sólidos possibilita a destinação adequada, promovendo o reuso e reciclagem, além de diminuir o desperdício gerado na cadeia de produção. Devido ao grande volume de resíduos houve a necessidade de criação da Resolução CONAMA 307/02, que visa adequar os princípios de coleta, armazenamento e destinação final dos resíduos da construção (Brasil, 2002).

A utilização da reciclagem energética, incineração dos resíduos sólidos urbanos, tem papel fundamental na diminuição das áreas de aterros sanitários, podendo reduzir 75% da massa e 90% do volume; maior controle na gestão dos resíduos sólidos; higienização, eliminando agentes biológicos; e aproveitamento energético do resíduo no processo de balanço energético (NUNES, 2017).

Segundo Donato (2017) uma forma barata e tecnologicamente viável de produzir energia é o aproveitamento térmico de biomassa, além de representar grandes benefícios em termos de qualidade de energia, impactos na vida humana e meio ambiente.

Para Heck et al (2013) apud Castro et al (2015), o crescimento da população e a urbanização irá aumentar a geração de resíduos, devendo a sociedade compatibilizar o desenvolvimento econômico com as limitações da exploração dos recursos naturais.

O presente trabalho aborda a problemática do resíduo sólido gerado na Estação de Tratamento de Esgoto de Palmas-TO, ETE Norte, estudando as propriedades físicas e químicas do lodo, determinando seu poder calorífico e utilizando a cinza gerada na incineração como insumo na produção de concreto de cimento *Portland*.

1.1 Problema de pesquisa

A concessionária responsável pelo tratamento/abastecimento de água e coleta/tratamento do esgoto de Palmas-TO tem como problema o resíduo sólido gerado no tratamento do esgoto doméstico, sendo armazenado em bag's sem nenhum tratamento ou disposição final, sendo retido por longo período de tempo sem previsão de destinação. Como aproveitar no processo de tratamento térmico o lodo, seu poder calorífico e a cinza?

1.2 Delimitação de Escopo

Os estudos de incineração foram realizados através da determinação do poder calorífico (comparando resultado com outros materiais) e a queima em mufla (produzindo a cinza e verificando a variação volumétrica e teores de umidade). Os estudos do lodo foram realizados antes e depois da queima, sendo as determinações físicas e químicas. Para o concreto foram estudados os insumos (agregado miúdo e graúdo), sendo a resistência a compressão determinada através de pesquisa dos principais serviços realizados na região e pelo saneamento, onde foi escolhido o *fck* de 25MPa, os estudos mecânicos foram de resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade. Através de composições de custo unitário de tabelas referências utilizadas pela concessionária, serão substituídos os teores de cimento determinando os custos dos principais serviços de saneamento.

1.3 Justificativa

Os avanços das ações voltadas ao saneamento básico buscam ampliar o tratamento do esgoto em todo o Brasil, visto que diversas patologias são ligadas a falta do tratamento do esgoto e seu lançamento de forma irregular.

Dentre as etapas de tratamento de esgoto, tratamento de efluentes líquidos, essa atividade gera o lodo como resíduos sólidos, devendo ser tratado de forma ideal para minimizar os impactos ambientais. Conforme a ABNT NBR 10.004:2004, os resíduos sólidos podem apresentar características de periculosidade como toxicidade, teratogenicidade, mutagenicidade, carcionogenicidade e ecotoxicidade.

Conforme Brasil (2011), a Política Nacional de Resíduos Sólidos descreve como objetivo da política a “não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”. Observando a ordem descrita na Política podemos observar que a “disposição de rejeitos” é a última etapa, devendo não gerar ou aproveitar o resíduo sólido.

“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” (BRASIL, 2011).

A queima dos resíduos além de reduzir o volume do material, pode-se ainda utilizar o poder calorífico e a cinza do resíduo, como comparativo temos os seguintes poderes caloríficos: lodo de ETE 20MJ/kg, Eucalipto 19,5MJ/kg e bagaço de cana de açúcar 19MJ/kg (BORGES, SELLIN e MEDEIROS, 2008).

A ETE Norte é a única estação em funcionamento no plano diretor de Palmas-TO, sendo tratado a maior parte do esgoto da capital, gerando grande volume de lodo durante o processo. Os lodos gerados na ETE estão sendo armazenados em bag's, e não existe um plano para tratamento e disposição final do resíduo sólido.

A problemática iniciou devido a proibição do lançamento do resíduo de saneamento no aterro sanitário, devido normativas que restringem os aterros apenas ao tratamento e destinação dos resíduos domésticos.

Este trabalho se justifica pela preocupação contínua com a preservação do meio ambiente, vinculado com avanço tecnológico que visa minimizar impactos ambientais do lançamento dos resíduos de ETE e exploração de jazidas naturais de agregados e impactos gerados no processo industrial de produção de cimento *Portland*. Substituindo parcialmente teores de cimento através da adição mineral de cinza de lodo de ETE, utilizando o resíduo sólido do tratamento do esgoto como matéria prima. Propondo o tratamento térmico para o resíduo visando a diminuição do volume do lodo e aproveitamento da cinza.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

A pesquisa busca estudar o aproveitamento e caracterização do lodo da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Palmas-TO, utilizando o lodo para fins energéticos e a cinza como adição pozolânica, substituindo teores de cimento Portland na produção de concreto.

2.2 Objetivos Específicos

1. Estudo da ETE Norte em Palmas-TO, verificando o sistema de tratamento do esgoto doméstico: geração, armazenamento e tratamento do resíduo sólido gerado no processo;
2. Realizar a caracterização térmica, física e química do lodo de ETE;
3. Determinar as propriedades físicas dos insumos utilizados no concreto: cimento, agregado miúdo e agregado graúdo, para determinar a dosagem do concreto;
4. Obtenção do concreto referência e concretos com substituições parciais de cimento *Portland* por cinza de lodo de ETE com teores de 5 e 10%;
5. Caracterizar o concreto obtido com adição do lodo de ETE e comparar os resultados com o concreto referência (sem adição do lodo);

3 METODOLOGIA

3.1 Metodologia da Pesquisa

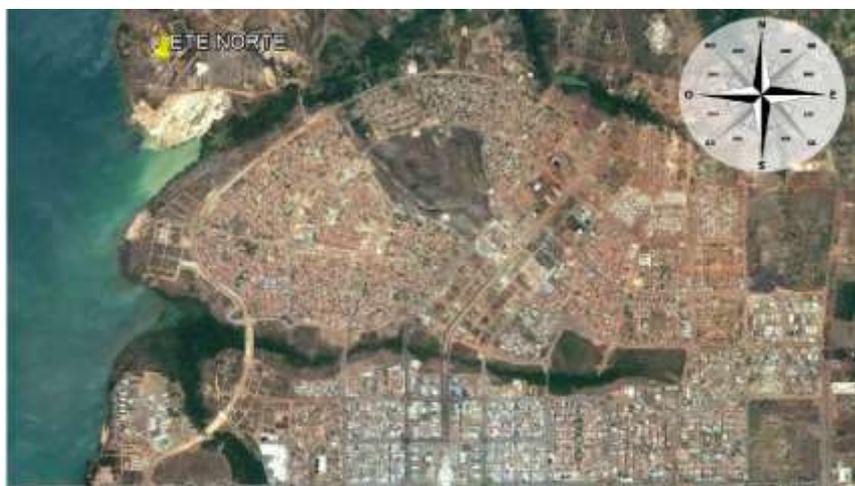
A presente trabalho tem como finalidade metodológica uma Pesquisa Aplicada de abordagem Qualitativa e Quantitativa no estudo do Lodo da ETE (Estação de Tratamento de Esgoto) Norte, em Palmas-TO.

O objeto metodológico da pesquisa exploratória, embasado em procedimentos de levantamento, pesquisas bibliográficas e ensaios experimentais em laboratório, através de estudo de casos do lodo da estação de tratamento citado acima.

3.2 Quanto ao local de realização metodológica

O material foi coletado na estação de tratamento ETE Norte, com material fornecido pela BRK Ambiental, responsável pelo abastecimento de água e coleta / tratamento de esgoto de Palmas-TO. A ETE Norte está localizada na parte norte da cidade de Palmas-TO, conforme Figura 01.

Figura 1: Situação da ETE Norte



Fonte: Google (2017), adaptado pelo autor (2018)

A ETE Norte é uma das mais antigas da capital, sendo construída para atender a região norte com sistema de reator e lagoa, posteriormente implantação do sistema atual, conforme Figura 2.

Figura 2: Evolução histórica da ETE Norte



Fonte: Google, 2018, adaptado pelo autor (2018)

A ETE possui sistema de tratamento de UASB seguido de Lodo Ativado, e o lodo é armazenado em bag's, e está localizada na Coordenada Latitude $10^{\circ} 8'58.06S$ e Longitude $48^{\circ} 21'32.24''$. Atendendo atualmente todo plano diretor de Palmas-TO, visto que as outras ETE's localizadas no plano diretor foram desativadas o tratamento, sendo atualmente utilizadas como estações elevatórias.

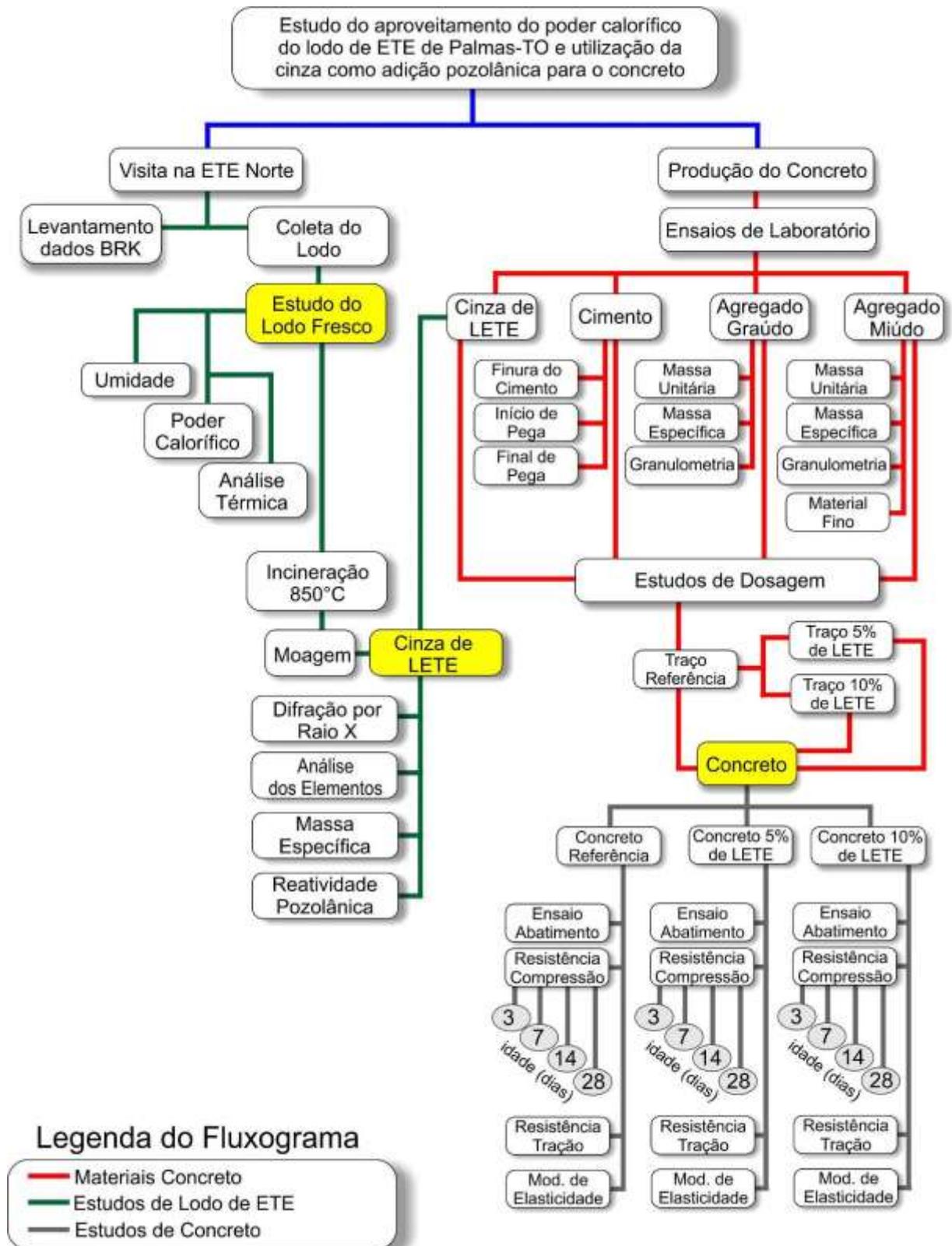
3.3 Etapas para Realização da Pesquisa

A pesquisa foi realizada em Palmas-TO durante os anos de 2017, 2018 e 2019, sendo dividida nos seguintes grupos de estudos:

- a) Estudo da ETE e coleta do lodo
- b) Estudo das propriedades do LETE e produção da Cinza do LETE
- c) Incineração, Estudo do Poder Calorífico e Reatividade Pozolânica
- d) Estudo do aproveitamento da Cinza do Lodo de ETE (CLETE) com substituição parcial de cimento Portland para Concreto
- e) Estudo comparativo dos ensaios do concreto referência com o os concretos que tiveram a substituição parcial de teores de cimento por CLETE.

O fluxograma apresentado na Figura 3 apresenta as atividades desenvolvidas, através da representação gráfica dos procedimentos realizados desde a coleta, ensaios e determinação das propriedades do resíduo e concreto.

Figura 3: Fluxograma das atividades



Fonte: Autor, 2019

3.4 Estudo do Lodo

Seguindo as etapas do fluxograma (Figura 3), o lodo foi coletado, armazenado e posteriormente estudado, conforme descrito do item 3.4.1 ao 3.4.7.

3.4.1 Coleta do Lodo

O lodo está armazenado na forma líquida no Tanque de Lodo e Sólida em Bag's na ETE Norte. O material de estudo foi disponibilizado pela empresa BRK Ambiental, e coleta pelo autor e um funcionário da empresa.

Foi utilizado baldes, pá, tambor e os equipamentos de proteção individual (bota, óculos, luva, máscara e calça). O lodo foi coletado e armazenado em tambor plástico, guardado em local coberto e na sombra. Posteriormente foi embalado e destinado para análise, sendo caracterizado químico e físico.

3.4.2 Determinações Químicas do Lodo

Para análise química o material foi realizado uma visita técnica in loco no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da Universidade Federal de Goiás em Goiânia-GO, sendo disponibilizado cerca de 200g de lodo seco em estufa e 200g de cinza de lodo de ETE, sendo realizado os seguintes ensaios e procedimentos:

- **Relatório de Análises Difração de Raios – X**

A medida de difração de raios-X (DRX) foi realizada em um difratômetro Bruker D8 Discover. Utilizou-se radiação monocromática de um tubo com anodo de cobre acoplado a um monocromador Johansson para K1 operando em 40kV e 40mA, configuração Bragg-Brentano Θ - 2Θ , detector unidimensional Lynxeye®, 2Θ de 5° a 100° e passo de 0,01°. A amostra foi mantida em rotação de 15 rpm. A cristalinidade da amostra foi calculada utilizando a ferramenta do software Bruker Diffrac.Eva. V 2.1

- **Análise dos Elementos (Fluorescência de Raios – X)**

- a) Metodologia de fluorescência de raios-x para elementos maiores

A amostra foi inicialmente seca em estufa a 105°C por 12 horas. Para determinação da perda na ignição (LOI) ou ganho na ignição (GOI), as amostras foram calcinadas 1000 °C por 5 horas. Uma alíquota de 1g de amostra previamente calcinada foi fundida com 9g de tetraborato de lítio.

b) Metodologia de fluorescência de raios-x para elementos traços

A amostra foi inicialmente seca em estufa a 105°C por 12 horas. A confecção da pastilha foi realizada misturando e homogeneizando 3g de aglutinante e 9 gramas de amostra previamente seca em seguida prensando com uma força de 15 toneladas.

A medida de fluorescência de raios-X (FRX) foi realizada em um espectrômetro WDS Bruker S8 Tiger, equipado com tubo de Rh. A calibração foi realizada com o pacote GeoQuant M da Bruker composto por padrões de rochas e minerais naturais. Os valores obtidos estão representados em porcentagem de massa para os óxidos de elementos maiores, em base úmida.

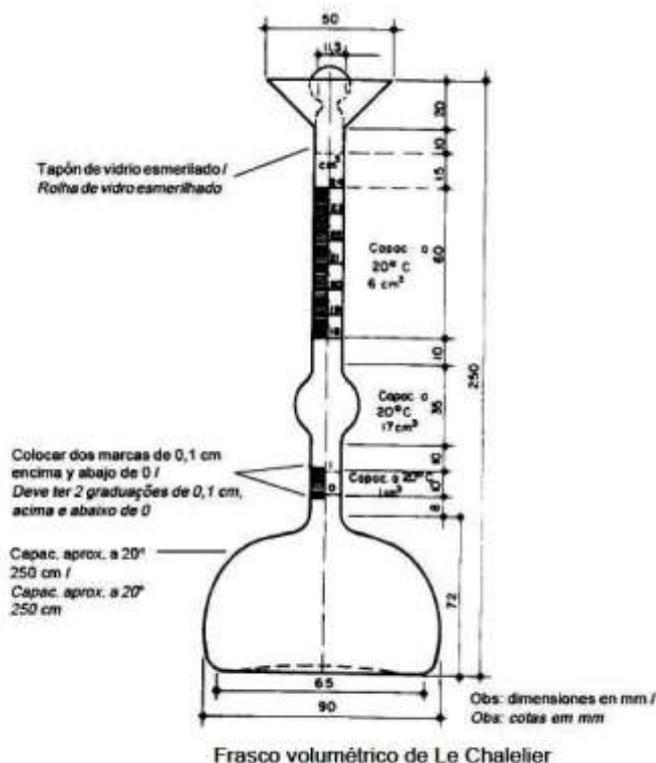
3.4.3 Determinações Físicas do Lodo

Foi determinado a massa específica da cinza do lodo e o teor de umidade do material. Seguindo os seguintes ensaios:

a) Ensaio de Massa Específica (ABNT NBR 6474 NM 23:2000)

O ensaio de Massa Específica foi realizado no laboratório do CEULP ULBRA, seguindo o procedimento descrito em norma.

Figura 4: Frasco volumétrico de Le Chalelier



b) Teor de umidade: (ABNT NBR 6457:2016)

Sendo disposto o lodo fresco em uma bandeja metálica, pesagem do material, realizar a secagem em estufa durante 24h com temperatura controlada 110° C, posteriormente será pesado novamente e determinado sua perda de massa e o teor de umidade.

3.4.4 Produção da Cinza

Para produção da cinza do lodo, o material fresco foi coletado e armazenado em tambor plástico vedado, seco em estufa e posteriormente queimado em Mufla com temperatura de 850°C durante 2 horas, seguindo a metodologia do Fontes *et al* (2016). Incineração foi realizada no Laboratório de Minas do CEULP – ULBRA em Palmas-TO.

Após queimado o material foi submetido ao moinho de bolas por 1 hora, posteriormente submetido a peneiramento com a peneira 150 μm .

3.4.5 Estudo do Poder Calorífico

Os estudos referentes ao poder calorífico foram desenvolvidos no Laboratório do Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR), em Curitiba-PR. Conforme orientação do TECPAR o material foi seco em estufa, diminuindo o teor de umidade, posteriormente retirado e pesado cerca de 200g e enviado via SEDEX para realização do experimento em Curitiba-PR.

Metodologia utilizada: ASTM D5865:2013 – *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke*.

3.4.6 Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica

O termograma foi obtido pela técnica de análise térmica diferencial e termogravimétrica, usando um equipamento *Shimadzu DTG-60H*. A medida foi realizada no intervalo de temperatura de 25 a 1000 °C, usando taxa de aquecimento de 10°C/min, fluxo de nitrogênio de 100 mL/min e ar sintético (gás de reação) de 100mL/min em cadinhos de platina de 70 μL .

3.4.7 Estudo da Reatividade Pozolânica

Os ensaios foram desenvolvidos pelo Laboratório de Construções e Ambiência do Departamento de Engenharia de Biosistemas – FZEA/USP em Pirassununga –SP.

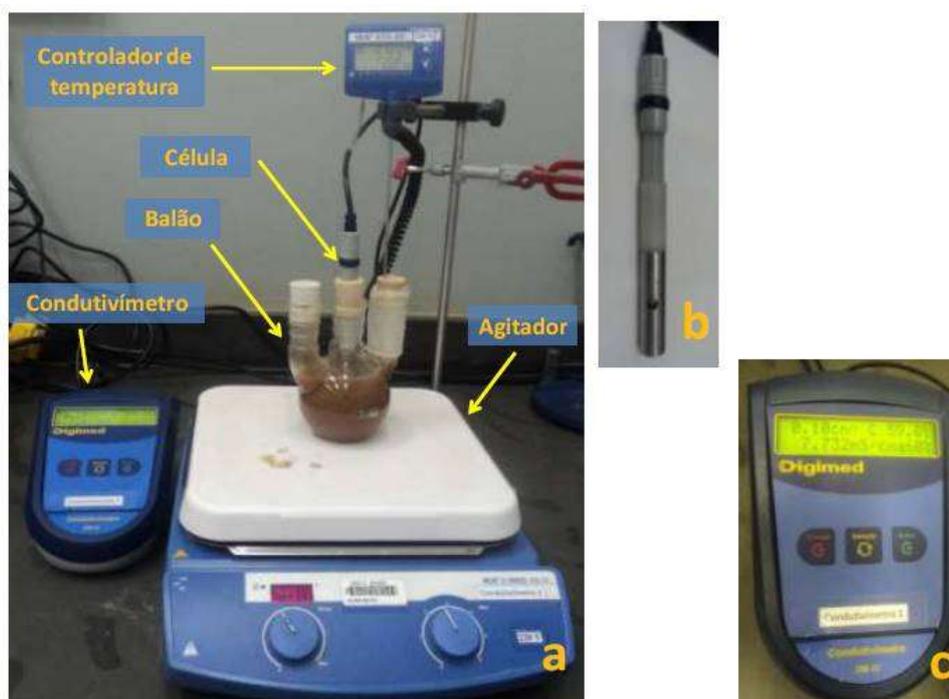
O material foi peneirado, sendo considerado o material passante a peneira 150 μm , sendo submetido a reatividade até a condutibilidade estiver estabilizada, podendo variar de 24h até 7 dias.

A Metodologia para desenvolver o trabalho foi a de medição da condutividade elétrica para a cinza e a água deionizada. Esse procedimento teve como objetivo avaliar a contribuição da condutividade total dos íons Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , de acordo a metodologia de Rodrigues (2012), determinando a pozolanicidade do material através de medida de condutibilidade elétrica em uma solução de hidróxido de cálcio.

As medições de condutividade elétrica de solução CH/adiação mineral seguiram as etapas:

- Colocou-se 250 mL de água deionizada em um balão de fundo chato de três bocas paralelas;
- A temperatura da água foi elevada a 80 °C (agitador magnético com aquecimento, modelo RCT Basic, da Ika e com controlador digital de temperatura, modelo ETS-D5, Ika);
- Com a água a 80 °C colocou-se 200 mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para se obter uma solução insaturada de CH;
- A solução ficou sob agitação durante 1 hora para garantir que todo CH fosse dissolvido, visto que o aumento de temperatura a velocidade de dissolução do CH aumenta;
- Após 1 hora, efetuou-se a mudança da temperatura da solução para 60 °C, essa temperatura foi adotada por ser similar a temperatura da reação exotérmica no cimento, durante as primeiras horas de hidratação;
- Quando chegou a 60 °C foi acionada a coleta de valores de condutividade elétrica por meio de um condutímetro elétrico, modelo DM-32, da Digimed, com um programa de coleta de dados, desenvolvido pela Digimed e a célula de condutividade de aço inox, modelo DMC-001 XTX, da Digimed, com leitura de 0,001 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20000 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- Foi imediatamente colocada 5,25g de adiação mineral na solução CH/água;
- As informações foram coletadas durante 24h.

Figura 5: Ensaio de Condutibilidade Elétrica



Fonte: Rodrigues, 2012

Sendo os seguintes equipamentos:

- a) Equipamento utilizado para medir a condutibilidade elétrica do sistema CH/cinza;
- b) Célula de condutividade aço inox;
- c) Condutivímetro Digimed;

3.5 Estudo de Dosagem do Concreto

Nesta etapa foram desenvolvidos os estudos do concreto com adição da cinza do lodo da estação de tratamento do esgoto.

Para estudo do LETE como adição mineral para o Concreto de Cimento Portland, foram definidos os traços com as seguintes Resistências Média de Compressão Axial, $f_{ck}=25\text{MPa}$ e $f_{cj}=31,60\text{MPa}$, seguindo as proporções de substituições do trabalho de Fontes *at al* (2016), conforme descrito abaixo:

- a) Traço Referencia (TR) – com zero adição de cinza de LETE
- b) Traço 5% (TR+5%) – com substituição de 5% do teor de cimento Portland
- c) Traço 10% (TR+10%) – com substituição de 10% do teor de cimento Portland

Foi utilizado o método de dosagem ACI 211.1-91, utilizando o desvio padrão rigoroso (4MPa), com abatimento 10 + 2cm, as características dos agregados necessários para o traço foram determinadas de acordo os processos descritos abaixo.

A água utilizada no preparo foi potável fornecido pela concessionária local BRK Ambiental.

3.5.1 Estudo do Aglomerante

O aglomerante utilizado foi Cimento Portland CP II – F 40, devido ser amplamente utilizado na região, os ensaios foram realizados no CEULP-ULBRA em Palmas-TO, sendo determinado as seguintes propriedades:

- Determinação do índice de finura (ABNT NBR 11579:2012)
- Tempo de Início de Pega (ABNT NBR NM 65:2003)

3.5.2 Estudo de Agregado Miúdo

O Agregado Miúdo utilizado foi areia natural proveniente de dragagem do lago de Palmas-TO, os ensaios foram realizados no CEULP-ULBRA em Palmas-TO, sendo realizados os seguintes ensaios:

- Ensaio de Granulometria e módulo de finura (ABNT NBR NM 248:2003)
- Ensaio de Massa Específica (ABNR NBR NM 52:2001)
- Ensaio de Massa Unitária (ABNT NBR NM 45:2001)
- Determinação do Material Fino: (ABNT NBR NM 46:2003 - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem)

3.5.3 Estudo de Agregado Graúdo

Será utilizado como Agregado Graúdo brita de jazida de Palmas-TO, os ensaios serão realizados no CEULP-ULBRA em Palmas-TO, onde serão realizados os seguintes ensaios:

- Ensaio de Granulometria e módulo de finura (ABNT NBR NM 248:2003)
- Ensaio de Massa Específica (ABNT NBR NM 53:2001)
- Ensaio de Massa Unitária (NBR NM 45 / 2001)

3.5.4 Preparo do Concreto

O procedimento que foi preparo segue a ABNT NBR 12655:2015 Concreto – Preparo, controle, recebimento e aceitação. Os materiais foram introduzidos na betoneira estacionária, na seguinte ordem, primeiramente o agregado graúdo mais 50% da água de amassamento logo

depois o cimento e o restante da água, por fim o agregado miúdo. Foi realizado o mesmo procedimento para os três traços distintos.

3.5.5 Abatimento

Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, com ensaio de abatimento (*slump test*) seguido os parâmetros apresentados na ABNT NBR 10342:2012.

3.5.6 Estudo de Compressão Axial

Foram realizados quatro traços e analisados com 3, 7, 14, e 28 dias de acordo com a NBR 5738:2015, foi utilizado corpos de prova de 10x20cm. Foram ensaiados 3 CP's para cada idade, sendo descartado da amostra o valor que possuir maior desvio padrão e utilizado como resultado da amostra a média dos dois corpos de prova.

As amostras ficaram submersa em um tanque de água (cura), quando atingirem a idade determinada, serão retirados do tanque e ficou exposta a temperatura ambiente com no mínimo 2 horas. Posteriormente serão submetidas a compressão axial até o rompimento na prensa hidráulica, de acordo com a ABNT NBR 5739:2007 Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndrico.

3.5.7 Estudo de Tração Diametral

O ensaio foi realizado conforme ABNT NBR 7222:2011, que determina a resistência a tração na flexão em concreto. O ensaio foi realizado em dois corpos de prova para cada dia de dosagem, sendo determinado aos 28 dias.

3.5.8 Determinação do Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade foi desenvolvido aos 28 dias, sendo ensaiados 3 corpos de provas para cada traço (com 0%, 5% e 10% de substituição de Cimento *Portland* por CLETE), curados em água até a data do ensaio, seguindo os procedimentos da ABNT NBR 8522:2017, o equipamento utilizado no ensaio está representado na Figura 6.

Figura 6: Equipamento utilizado para determinar o módulo de elasticidade



Fonte: Autor, 2019

Para determinação da propriedade foram utilizados os seguintes materiais:

- Prensa Elétrica Hidráulica com indicador digital da marca LR- Equipamentos 100TN;
- Bases de medidas com dimensões devidamente iguais;
- Compressômetro com bases independentes, mecânico;
- Medidor de deformação analógico;
- Cronômetro;
- Paquímetro Digital;

4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está organizado em 7 capítulos correlacionados. O Capítulo 1 apresenta a Introdução, contextualizando o tema proposto neste trabalho com problemáticas e justificativa do tema proposto.

No Capítulo 2, os objetivos gerais e específicos.

A Metodologia é exposta no Capítulo 3, determinando todas as normas e procedimentos utilizados para determinação das propriedades.

O Capítulo 5, Fundamentação Teórica, foram apresentadas citações, tabelas, quadros, figuras de pesquisas fundamentadas em livros, artigos, periódicos e normas que embasadas na temática de saneamento e concreto.

O Capítulo 6, Resultados e Análise, apresenta os resultados das pesquisas e ensaios através gráficos, tabelas, quadros, figuras e textos, comentando os dados apresentados da pesquisa.

Nas Considerações Finais, Capítulo 7, foi apresentado uma conclusão de todo processos e resultados estudados no presente trabalho, enfatizando o lodo, desde sua geração até o aproveitamento como insumo de concreto. São ainda propostas possibilidades de continuação da pesquisa desenvolvida a partir das experiências adquiridas com a execução do trabalho.

As demais partes do trabalho tratam das Referências Bibliográficas, Apêndices e Anexos.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

5.1 - Saneamento Ambiental

O Meio Ambiente pode ser definido como “conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas”, conforme definido na Lei 6.938/1981. (BRASIL, 1981).

Para preservar o Meio Ambiente, o conjunto de ações socioeconômicas, definidas como Saneamento Ambiental, promove a Salubridade Ambiental através de abastecimento de água potável, coleta e destinação sanitária de resíduos sólidos, líquidos e gasosos, além de tratar de assuntos como a utilização do solo, drenagem urbana, controle de doenças transmissíveis e outros serviços que visa melhorar a qualidade de vida do meio urbano e rural. (BRASIL, 2004).

O tema resíduos sólidos têm ganhado cada vez mais relevância, pois os impactos gerados no meio ambiente pelo setor da construção civil é um dos maiores entre os diferentes setores industriais. Várias normas e legislações estão em vigência para tentar minimizar os danos causados pelo setor, entre elas: Resolução CONAMA 307/2002, Política Nacional de Resíduos Sólidos Lei nº 12305/2010, IN Ibama nº 13/2012 e ABNT NBR 10.004:2004, NBR 15112:2004, NBR 15.113:2004 e NBR 15.114:2004.

Segundo Coelho (2006), os resíduos sólidos urbanos produzidos em Palmas-TO podem ser estimados entre 100 a 140 toneladas/dia, o material tem como destino o aterro sanitário do município, que se localiza a 35 quilômetros de distância do centro de Palmas-TO.

A Lei 12.305/2010 ressalta a importância do manejo e gerenciamento do resíduo descrevendo que “disposição final ambientalmente adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos”. (BRASIL, 2011)

5.2 – Resíduos Sólidos

O termo "resíduo" não deve ser associado a "lixo", pois diferente do lixo os resíduos possuem valor agregado e podem ser reaproveitados, porém com o intenso processo de industrialização ocorre a geração excessiva de resíduo, e esses materiais são abandonados ou destinados inadequadamente para lixões e aterros sanitários. (DONATO, 2017).

Segundo Garcia *et al.* (2015) o resíduo sólido não recebia uma atenção especial, sendo descartado livremente em locais não apropriados (mar, rios, lagos e as periferias da cidade),

contribuindo para o aumento de doenças, diminuindo a qualidade de vida, empobrecendo os solos e poluindo as águas. Com a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), permite o tratamento tecnológico de resíduos sólidos através da recuperação energética (BRASIL, 2011).

Conforme Brasil (2011) a Lei 12.305/2010 a Política Nacional de Resíduos Sólidos, explica a política através Princípios, Objetivos e Instrumentos, no seu artigo terceiro conceitua as seguintes termologias que estão definidas abaixo:

XV – rejeitos: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada;

XVI – resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível;

Seguindo as termologias do Política Nacional de Resíduos Sólidos, o lodo de ETE sem o devido tratamento pode ser considerado rejeito, porém a proposta deste trabalho tem como objetivo utilizado como resíduo sólido, aproveitando seu poder calorífico e a cinza, que seria um rejeito do processo de geração de energia, com aproveitamento deste resíduo sólido como adição pozolânica.

Referente a ordem prioritária na Gestão e Gerenciamento do Resíduo Sólido, a Lei 12.305/2010 em seu artigo 9º, define a seguinte ordem: não geração; redução; reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. (BRASIL, 2011)

Conforme a ABNT NBR 10.004:2004, segue a classificação de resíduos:

- a) Classe I (Perigosos): oferece risco devido suas propriedades físicas e químicas, tendo como características a inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade
- b) Classe II A (não perigosos e não inertes): não se enquadra na classe I e II B, tendo como características a combustibilidade, biogrababilidade ou solubilidade em água;
- c) Classe II B (não perigosos e inertes): seus constituintes não solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água ao contato com água destilado ou deionizada, alterando apenas aspectos de cor, turbidez, dureza e sabor.

O Lodo de ETE pode ser considerado Classe I, conforme a ABNT NBR 10.004:2004, devido ser um material com patogenicidade.

Diferente da ABNT NBR 10.004:2004, a Política Nacional Resíduos Sólidos (BRASIL, 2011), classifica o resíduo sólido conforme descrito abaixo:

I – quanto à origem:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas *a* e *b*;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas *b*, *e*, *g*, *h* e *j*;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea *c*;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

II – quanto à periculosidade:

- a) resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;
- b) resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea *a*.

Parágrafo único. Respeitado o disposto no art. 20, os resíduos referidos na alínea *d* do inciso I do *caput*, se caracterizados como não perigosos, podem, em razão de sua natureza, composição ou volume, ser equiparados aos resíduos domiciliares pelo poder público municipal.

Conforme descrição na Política Nacional de Resíduos Sólidos, o Lodo de ETE pode ser definido quanto à Origem como Resíduos de Serviços Públicos de Saneamento e quanto à periculosidade é considerado perigoso devido seu potencial patogênico.

Na seção II, artigo 15 da Lei 12.305 (2010), aborda a temática da elaboração da Política Nacional de Resíduos Sólidos, relata a importância da redução, reutilização e reciclagem, com intuito de reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos; também define como meta o aproveitamento energético, medidas de incentivar e viabilizar a gestão regionalizada dos resíduos.

5.3 – Tratamento de Águas Residuárias

5.3.1 – Esgoto

Para Andreoli (2001), o processo biológico é a forma mais utilizada para tratamento do esgoto doméstico, que tem por finalidade a remoção da matéria orgânica. As bactérias são

responsáveis pela degradação ou estabilização da matéria, utilizando essa matéria como fonte de energia.

Segundo Von Sperling (1996-A), no Brasil o sistema de esgoto é separado do sistema de águas pluviais, onde a estação de tratamento de esgoto recebe três fontes distintas de contribuição, sendo:

- a) esgoto doméstico (incluindo residências, instituições e comércios);
- b) águas de infiltração;
- c) despejos industriais (diversas origens e tipos de indústrias).

O esgoto doméstico pode ser caracterizado fisicamente por: matéria sólida, temperatura, odor, cor e turbidez, variação de vazão. Quimicamente pode ser caracterizado por: matéria orgânica e inorgânica. (Brasil, 2004)

A quantidade de esgoto é definida pela vazão doméstica, onde o valor é definido em função da população de projeto, dado um valor atribuído para o consumo diário médio de água do indivíduo, denominado *Quota Per Capita* (QPC). Sabendo o consumo de água, a fração de água que adentra na rede coletora de esgoto é denominada coeficiente de retorno, onde os valores variam entre 60% a 100%, sendo usualmente adotado 80%. (VON SPERLING, 1996-A)

O lançamento inadequado de resíduos sólidos no solo pode gerar poluição, dentre algumas formas de controle da poluição do solo, Brasil (2004) ressalta os mais utilizados: Seleção dos locais e técnicas mais apropriadas para cada região, relevo e vegetação; Execução de sistemas de prevenção da contaminação das águas subterrâneas; Prevenção de erosões, com ações que afetam a topografia, vegetação e drenagem; Minimizar a disposição final dos resíduos urbanos com coleta seletiva, reciclagem e tratamento; Sistemas de disposição final de resíduos, protegendo o solo.

Várias doenças como febre tifoide e paratifoide, diarreias infecciosas, amebíase, ancilostomíase, esquistossomose, teníase, ascaridíase dentre outras pode ser transmitida por dejetos humanos não tratados. Brasil (2004) ressalta, que além de evitar a transmissão de doenças, o tratamento do esgoto doméstico diminui a mortalidade, diminui despesas de tratamento de doenças e água potável, preserva locais de recreação e fauna aquática.

5.3.2 - Parâmetros de Qualidade do Esgoto

Segundo Von Sperling (1996-A), os esgotos domésticos contêm aproximadamente 99,9% de água e 0,1% de sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, bem como

microrganismos. A característica do esgoto é em função do uso da água, bem como fatores climáticos, situação social e econômica, e hábitos da população.

As principais características das águas residuárias podem ser verificadas de acordo o Quadro 01.

Quadro 1: Principais características físicas do esgoto domésticos

Parâmetro	Descrição
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> - Ligeiramente superior à da água de abastecimento - Variação conforme as estações do ano (mais estável que a temperatura do ar) - Influência na atividade microbiana - Influência da solubilidade dos gases - Influência na viscosidade do líquido
Cor	<ul style="list-style-type: none"> - Esgoto fresco: ligeiramente cinza - Esgoto séptico: cinza escuro ou preto
Odor	<ul style="list-style-type: none"> - Esgoto fresco: odor oleoso, relativamente desagradável - Esgoto séptico: odor fétido (desagradável), devido ao gás sulfídrico e a outros produtos da decomposição - Despejos industriais: odores característicos
Turbidez	<ul style="list-style-type: none"> - Causada por uma grande variedade de sólidos em suspensão - Esgotos mais frescos ou mais concentrados: geralmente maior turbidez

Fonte: Von Sperling (1996-A), adaptado de Qasim (1985)

Referente os microrganismos presentes no esgoto doméstico, Von Sperling (1996-A) apresenta os principais no Quadro 02.

Quadro 2: Principais Microrganismos presentes nos esgotos

Microrganismo	Descrição
Bactérias	<ul style="list-style-type: none"> - Organismos protistas unicelulares - Apresentam-se em várias formas e tamanhos - São os principais responsáveis pela estabilização da matéria orgânica - Algumas bactérias são patogênicas, causando principalmente doenças intestinais
Fungos	<ul style="list-style-type: none"> - Organismos aeróbios, multicelulares, não fotossintéticos, heterotróficos - Também de grande importância na decomposição da matéria orgânica - Podem crescer em condições de baixo pH
Protozoários	<ul style="list-style-type: none"> - Organismos unicelulares sem parede celular - A maioria é aeróbia ou facultativa - Alimentam-se de bactérias, algas e outros microrganismos - São essenciais no tratamento biológico para a manutenção de um equilíbrio entre os diversos grupos - Alguns são patogênicos
Vírus	<ul style="list-style-type: none"> - Organismos parasitas, formados pela associação de material genético (DNA ou RNA) e uma carapaça proteica - Causam doenças e podem ser de difícil remoção no tratamento da água ou do esgoto
Helmintos	<ul style="list-style-type: none"> - Animais superiores - Ovos de helmintos presentes nos esgotos podem causar doenças

Fonte: Silva e Mara (1979) *apud* Von Sperling (1996-A)

Os sólidos contidos no esgoto são classificados por tamanho e estado (em suspensão e dissolvidos), pelas características químicas (voláteis e fixos) e pela decantabilidade (sedimentáveis e não sedimentáveis). (VON SPERLING, 1996-A)

A matéria orgânica contida no efluente por determinada por métodos diretos e indiretos. Os Métodos Indiretos são definidos através da medição do consumo de oxigênio, determinados através da DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), DBO_u (Demanda Última de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio). O método indireto de determinação é através de medição de carbono orgânico, através do COT (Carbono Orgânico Total). (VON SPERLING, 1996-A)

Para Von Sperling (1996-A), “A DBO retrata a quantidade de oxigênio requerida para estabilizar, através de processos bioquímicos, a matéria orgânica carbonácea”, sendo que para o esgoto doméstico foi convencionado a realizar a análise no 5º dia com temperatura de 20°C. Já a DQO é um teste que mede o consumo de oxigênio ocorrido durante a oxidação química da matéria orgânica, obtida através do uso de um oxidante (dicromato de potássio). O ensaio

de COT é medido diretamente, sendo um teste instrumental, mostrando satisfatório em amostras com reduzidas quantidades de matéria orgânica.

5.3.3 - Sistemas de Tratamentos

Para Phillpi Jr *et al* (2004) *apud* HIRATA (2015) o sistema de tratamento de esgoto é dividido nas seguintes etapas:

- a) Tratamento Preliminar: grade de sólidos e areia
- b) Tratamento Primário: esgoto em sedimentação e em suspensão
- c) Tratamento Secundário: processo biológico
- d) Tratamento Terciário: remoção de substancia não removida na etapa anterior
- e) Tratamento dos Lodos: desidratação e disposição final do logo
- f) Tratamento Físico-Químico: utilizado em efluentes inorgânicos

Von Sperling (1996-A), classifica os métodos de tratamento conforme Metcalf & Eddy (1991), como:

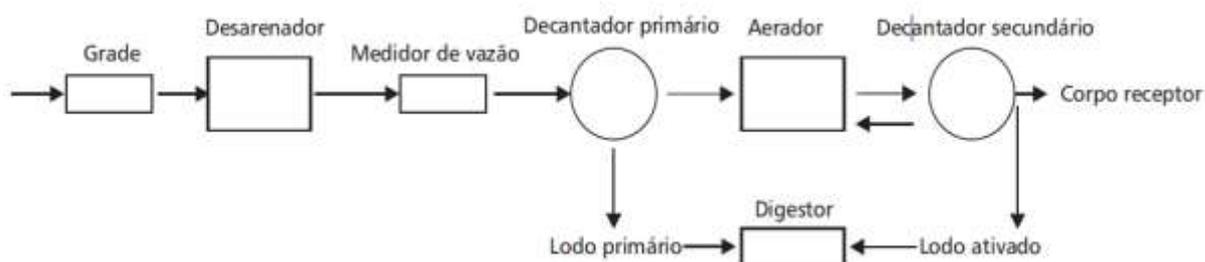
- a) Operações Físicas Unitárias: etapas físicas como gradeamento, mistura, floculação, sedimentação, flotação e filtração;
- b) Processos Químicos Unitários: etapas caracterizadas pela remoção por conversão, havendo reações químicas como precipitação, adsorção e desinfecção;
- c) Processos Biológicos Unitários: métodos de tratamento por atividades biológicas como remoção da matéria orgânica carbonácea e desnitrificação.

Os processos e operações do tratamento ocorrem na fase líquida e sólida do sistema. Onde a fase líquida é caracterizada pelo tratamento do esgoto doméstico, fluxo principal da estação de tratamento de esgoto; e a fase sólida, que refere aos subprodutos gerados no tratamento, refere-se ao lodo. Von Sperling (1996-A), define os principais sistemas de tratamento:

- Lagoas de Estabilização
 - Lagoa facultativa
 - Lagoa Anaeróbia
 - Lagoa Aerada facultativa
 - Lagoa Aerada de Mistura Completa (lagoa de decantação)

- Lodos Ativados
 - Lodos Ativados Convencional
 - Lodos Ativados por Aeração Prolongada
 - Lodos Ativados de Fluxo Intermitente
- Sistemas Aeróbios com Biofilmes
 - Filtro de Baixa Carga
 - Filtro de Alta Carga
 - Biodisco
- Sistemas Anaeróbios
 - Reator Anaeróbio de Manta de Lodo
 - Filtro Anaeróbio
- Disposição no Solo
 - Infiltração lenta
 - Infiltração rápida
 - Infiltração sub-superficial
 - Escoamento superficial

Figura 7: Fluxograma do Sistema Lodo Ativado



Fonte: Andreoli (2001)

No sistema de Lodo Ativado (Figura 07) o lodo de sedimentação e o lodo secundário são instáveis, e necessita passar por processo suplementar para estabilização.

Para Van Haandel & Marais (1999) *apud* Andreoli (2001) as águas residuárias são compostas por duas categorias principais: material biodegradável e não biodegradável, essas frações são subdivididas em frações solúveis, que compreende aos compostos dissolvidos, de fácil acesso ao metabolismo bacteriano, seguindo em quatro frações:

- a) F_{us} ou fração solúvel e não biodegradável ($\pm 10\%$ em esgoto bruto)
- b) F_{up} ou fração particulada e não biodegradável ($\pm 8\%$ em esgoto bruto)
- c) F_{bs} ou fração solúvel e biodegradável ($\pm 20\%$ em esgoto bruto)
- d) F_{bp} ou fração particulada e biodegradável ($\pm 62\%$ em esgoto bruto)

O processo de geração do lodo deve ser observado o material orgânico biodegradável, e a fração de DQO do afluente se transforma em massa bacteriana, e em função da idade se transforma em lodo (ANDREOLI, 2001).

As frações de massa descarregada no afluente (m_{Se}) e afluente convertida em lodo (m_{Sxv}) é indesejável no sistema, visto que aumentará o custo da unidade de tratamento pós-tratamento; aumento da quantidade de lodo e a preocupação para disposição final; e o objetivo dos sistemas anaeróbios é maximizar a digestão do material biodegradável, visando produção de biogás (ANDREOLI, 2001).

Segundo Andreoli (2001) variáveis como pH, temperatura e idade do lodo devem ser bem acompanhadas no processo. Deve buscar pH na faixa neutra, evitando implantação de sistema de controle. A temperatura influencia o processo de geração, porém pouco expressiva, visto que a energia disponível no metano é limitada. E a idade deve ser longa, havendo remoção eficiente da matéria biodegradável, ao mesmo tempo curta para evitar custos excessivos nos investimentos.

Antes da disposição final, Fontes (2003) ressalta que o teor de umidade do lodo deve diminuir, podendo ser dispostos conforme a Figura 10.

Figura 10: Sistemas de Secagem do Lodo



(a) Tanque



(b) Lagoa



(c) Centrifuga



(d) Bag's

Fonte: Google Imagens (2018), adaptado pelo autor

Para Fontes (2003) os principais processos de secagem são:

- a) Secagem natural em leitos: processo onde o lodo é disposto em tanques retangulares de alvenaria ou concreto, onde a água é evaporada durante o período de secagem, devendo esses locais serem protegidos das ações de chuvas. Este processo caracteriza pelo baixo valor de investimento, simplicidade operacional. Porém, com necessidade de grande área, elevado número de trabalhadores e risco de emissão de odores;
- b) Secagem natural em lagoas: o lodo é disposto no solo com depressões naturais durante 3 a 5 anos, passando pelas fases de drenagem e evaporação, restante um total de aproximadamente 25 a 30%;
- c) Secagem mecanizada em filtro prensa: operação por batelada, com bombeamento do lodo para câmaras com telas filtrantes, onde os sólidos são retidos, formando “torta”, sendo posteriormente prensados e destinado ao local de coleta. Neste processo tem um resultado de aproximadamente de 25 a 50% de sólidos;
- d) Secagem mecanizada com filtro esteira: o lodo é disposto em esteira (tela) onde acontece o escoamento da água, posteriormente o lodo é comprimido para retirada da água e retirada do material sólido. A quantidade de sólido está entre 15 a 25%;
- e) Secagem mecanizada com centrífugas: separação dos teores de sólidos e líquidos através de força centrífuga, onde a parte sólida se sedimenta através do giro em alta velocidade e na segunda etapa a compactação, onde o lodo perde a água capilar, restante um teor de 25 a 35% de matéria sólida.

5.4.2 – Características do Lodo

O Lodo de ETE (LE) é definido pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 375/2006, retificada pelo CONAMA nº 380/2006, como fonte potencial de riscos à saúde pública e ao meio ambiente, sendo classificado como A e B na tabela de agentes patogênicos demonstrada abaixo. (Castro *et al.*, 2015).

Tabela 1: Classes de lodo de esgoto ou produto derivado – agentes patogênicos

Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado	Concentrações de patógenos
A	Coliformes Termotolerantes < 10 ³ NMP / g de ST Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo / g de ST <i>Salmonella</i> ausência em 10 g de ST Vírus < 0,25 UFP ou UFF / g de ST
B	Coliformes Termotolerantes < 10 ⁶ NMP / g de ST Ovos viáveis de helmintos < 10 ovos / g de ST

ST - Sólidos Totais.

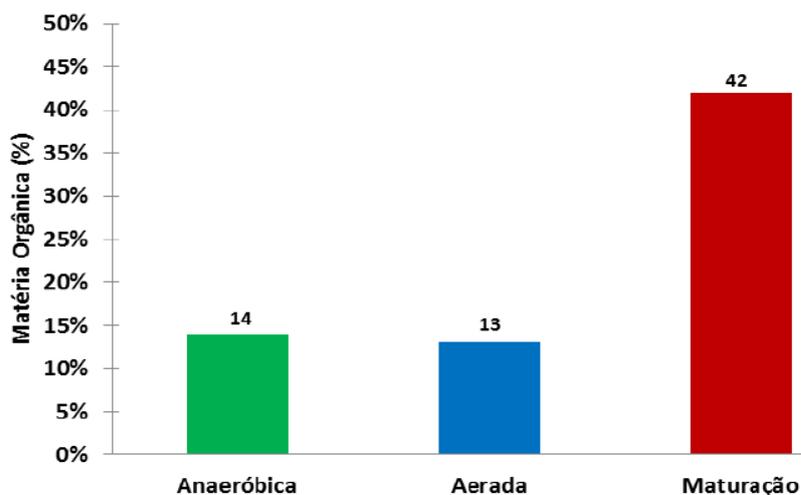
Fonte: Castro *et al* (2015)

Andreoli (2001) ressalta que a quantidade e as características do lodo são definidas pela alternativa de tratamento e a qualidade do esgoto, o sistema deve ser concebido visando mecanismos de gestão que irão mitigar impactos ambientais que podem ser relacionadas a falta de um planejamento estratégico para utilização e/ ou disposição do resíduo sólido.

Para Andreoli (2001) O lodo deve ser estabilizado para diminuir odor e conteúdo patogênicos, pois parte do lodo resultante do tratamento biológico é constituída por bactérias vivas. O lodo com pouco idade se assemelha com a matéria orgânica “fresca”, possuindo maior quantidade de patógenos, com o passar do tempo acontece o processo de biotransformação, e os componentes orgânicos mais biodegradáveis são se transformando em lodo e ganha característica de lodo “estabilizado”, sendo este menos patogênico e com menos odor.

Conforme Almeida (2017) a utilização do lodo nas atividades agrícolas é benéfica devido a incorporação dos macronutrientes fósforo (P) e nitrogênio (N) e dos micronutrientes cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn), ferro (Fe) e molibdênio (Mo). Além desses benefícios o lodo influencia na melhoria da infiltração, diminuindo erosões.

Gráfico 1: Quantidade de Matéria Orgânica contida no lodo



Fonte: Almeida (2017)

O gráfico 01 apresenta a porcentagem de matéria orgânica no lodo da ETE de Anápolis-GO, onde ocorre diferentes quantidades de acordo a fase do tratamento. (ALMEIDA, 2017)

5.4.3 – Problemática do LETE

Conforme a CONAMA (2006), a Resolução nº 375 relata que os lodos provenientes de tratamento de instalações hospitalares, portos e aeroportos; resíduos de gradeamento, resíduos de desarenador; material lípico sobrenadante (decantadores primários, caixas de gordura e reatores anaeróbicos); tratamento individual coletados por veículos, lodo de esgoto não estabilizado; e lodos classificados como perigosos são vetados para utilização agrícola.

O crescimento populacional tende a aumentar a quantidade de lodo gerado nas ETE's, onde a responsabilidade ambiental deve exigir medidas urgentes para as estações se adequarem as legislações e resoluções. (SILVA *et al*,2017)

Segundo Andreoli (2001), o Brasil possui baixos índices de coleta e tratamento do lodo, sendo estimado uma produção de 150 a 220 mil toneladas seca por ano. Somente 27,60% da população brasileira possui coleta e tratamento de esgoto, sendo estimado uma grande evolução na produção de lodo nas próximas décadas.

Segundo Faria e Santos (2007) a cidade de Goiânia produzia 70 toneladas de lodo por dia e a previsão para o ano de 2025 é de 200 toneladas diárias. Essa problemática levou a SANEAGO a desenvolver um Plano Diretor de Uso e Disposição de Lodos, contemplando alternativas para disposição final de lodos para uso agrícolas e incineração.

Rosa e De Paula (2009) relata que no tratamento dos efluentes os potenciais degradadores existentes nos líquidos são transferidos para o lodo, devendo ser tratados devido seu alto potencial poluidor, porém os custos operacionais são elevados, sendo necessário integração com outras atividades atrativas da região.

Para Silva *et al* (2017) a problemática ambiental é ocasionada da grande geração de resíduos sólidos de saneamento sem tratamento, exigindo diversas ações que viabilizem o reuso e consumo do logo. A reutilização visa reduzir o consumo dos recursos naturais e promover benefícios sociais e econômicos.

5.4.4 – Alternativas para uso do lodo

Para Andreoli (2001) a atividade de destino final do lodo tem alta complexidade, visto a quantidade de lodo gerada e as leis de crimes ambientais (Lei nº 9.065 de 12/02/98). Para as ETEs deve se propor, ainda na fase de licenciamento, alternativas detalhadas sobre a disposição final.

Segundo Stasinakis (2012) *apud* Castro (2015), estudou a disposição do lodo em 27 países, aponta o uso agrícola como a maior destinação deste resíduo, com crescimento do espalhamento do LE diretamente no solo como compostagem. Além das duas formas de destino disposta acima, o mesmo autor aponta a incineração, aterros e outras como forma de destinação final do LE na Europa.

No Brasil Castro *et al* (2015) realizou estudos de publicações de trabalhos acadêmicos sobre a utilização do LE, onde São Paulo publicou 61,8% dos 301 artigos e o Tocantins apenas 0,3%. A utilização deste composto bio sólido com as seguintes finalidades: aplicação no solo, uso industrial, obtenção de energia térmica, obtenção de energia elétrica, mistura na fabricação de artefatos cerâmicos e utilização na construção civil.

O LE pode ser utilizado na indústria cerâmica, segundo estudos de Santos *et al* (2013) *apud* Castro *et al* (2015), devendo ser observado à origem e a presença do elemento alumínio em grande concentração no estrato solubilizado.

Segundo Andreoli (2006) *apud* Silva *et al* (2017) o lodo pode ser utilizado como matéria prima para produção de telhas, tijolos, peças cerâmicas, tubos e produção de cimento. Também pode ser utilizado substituindo teores de outros materiais como brita e areia, conforme quadro 3.

Quadro 3: Alternativas de utilização do lodo

Alternativa	Aproveitamento e/ou disposição final
Uso agrícola	Aplicação direta no solo, fertilizante e solo sintético (N-Viro Soil)
Aplicação em plantações florestais	Adubo
Disposição em aterro sanitário	Aterro e co-disposição com resíduos sólidos urbanos
Reuso Industrial	Produto de agregado leve, fabricação de tijolos e cerâmicas e produção de cimento
Incineração	Incineração exclusiva e co-incineração com resíduos sólidos urbanos
Recuperação de solos	Recuperação de áreas degradadas e recuperação de área de mineração
Disposição oceânica	Disposição Final

Fonte: Tsutiya (2002) *apud* Silva *et al* (2017)

Incineração, disposição em aterros e uso agrícola, corresponde a mais de 90% da disposição final do lodo em todo mundo, e nos Estados Unidos 55,5% do lodo tem destinação para uso agrícola, na Europa 40% do lodo é reciclado e dispostos em aterros sanitários (ANDREOLI, 2001).

Para Andreoli (2001) *apud* Fontes (2003) a utilização do lodo para recuperação de áreas degradadas é uma forma de disposição final, porém deve ser verificado a problemas com acúmulo de metais pesado, compostos orgânicos e patógenos. O autor cita também a disposição oceânica, sendo uma medida que causa grandes impactos ambientais, sendo essa prática proibida em diversos países.

Outra forma de disposição do lodo é o *Landfarming* (disposição superficial), consiste em dispor o lodo no solo, sem finalidade agrícola, a taxa de aplicação varia de acordo com a existência ou não de uma camada impermeabilizada situada à 60 – 70cm da superfície. Como o sistema é aberto o mau planejamento pode acarretar em risco ao meio ambiente, porém é uma alternativa de baixo custo e se bem monitorada se torna uma boa alternativa (FONTES, 2003, ANDREOLI, 2001).

A disposição em aterros sanitários pode ser em Aterros Exclusivos, onde o lodo foi destrutado ou seco termicamente, sendo disposto em forma de “torta”, sendo dispostos em células devidamente projetadas com drenos e captação de gases. Outra forma de aterro são os de Co-disposição, que consiste em disponibilizar lodos com no máximo 60% de teor de umidade em aterros sanitários, porém essa prática aumenta a quantidade de chorume. (ANDREOLI *et al* ,2001; FONTES, 2003)

A utilização agrícola do lodo será detalhada no capítulo 5.4.5.

5.4.5 – Utilização agrícola do lodo

Segundo Bittencourt (2017), a utilização do lodo na forma agrícola é uma forma sustentável e ambientalmente correta, visto os benefícios na reciclagem dos nutrientes promovendo melhorias nas características físicas, químicas e biológicas.

A CONAMA (2006), a Resolução nº 375 ressalta que com o crescimento da população e os processos de tratamento de esgoto a sua disposição pode oferecer risco a saúde pública e ao meio ambiente, a maneira inadequada de gestão pode potencializar a proliferação de vetores de moléstias e organismos nocivos. Devido ao grande volume gerado é previsto a utilização na agricultura, porém deve respeitar as diretrizes e parâmetros estabelecidos pelas normas e resoluções.

Além dessa problemática, a mesma Resolução, descreve que o lodo do esgoto sanitário constitui fonte de matéria orgânica e de nutrientes para as plantas e sua disposição no solo poderá trazer benefícios à agricultura, porém cabe ressaltar que pode conter metais pesados, compostos orgânicos, patógenos que são nocivos à saúde e ao meio ambiente.

Ensaios necessários conforme CONAMA (2006) para viabilizar a utilização agrícola são:

§ 1o Para a caracterização do potencial agrônômico do lodo de esgoto ou produto derivado deverão ser determinados, de acordo com os Anexos II, III e IV desta Resolução, os seguintes parâmetros:

- I - carbono orgânico;
- II - fósforo total;
- III - nitrogênio Kjeldahl;
- IV - nitrogênio amoniacal;
- V - nitrogênio nitrato/nitrito;
- VI - pH em água (1:10);
- VII - potássio total;
- VIII - sódio total;
- IX - enxofre total;
- X - cálcio total;
- XI - magnésio total;
- XII - umidade;
- XIII - sólidos voláteis e totais.

§ 2o Para a caracterização química do lodo de esgoto ou produto derivado quanto à presença de substâncias inorgânicas, deverão ser determinadas, de acordo com os Anexos II e IV desta Resolução, as seguintes substâncias:

- I - Arsênio;
- II - Bário;
- III - Cádmio;
- IV - Chumbo;
- V - Cobre;
- VI - Cromo;
- VII - Mercúrio;
- VIII - Molibdênio;
- IX - Níquel;
- X - Selênio;
- XI - Zinco.

§ 5o Para a caracterização do lodo de esgoto ou produto derivado quanto à presença de agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos, deverão ser determinadas, de acordo com os Anexos II e IV desta Resolução, e as concentrações de:

I - coliformes termotolerantes;

II - ovos viáveis de helmintos;

III - Salmonella;

IV - vírus entéricos.

Os lodos sanitários que são isentos de quantidades significativas de metais pesados, necessitam de estabilização de sua fração orgânica, além de redução de patógenos eficaz para utilização na agricultura. (ROSA E DE PAULA, 2009).

Higienização de lodos por meio de produtos alcalinos, associada à existência de solos predominantemente ácidos na maioria das regiões brasileiras, permite-nos também adotar esta prática, agregando valor ao bio sólido produzido, o que pode substituir total ou parcialmente o uso de corretivos agrícolas. A rápida oxidação da matéria orgânica dos solos tropicais é mais uma evidência da grande vantagem do uso de bio sólidos como condicionadores, capazes de melhorar as características físicas, químicas e biológicas do solo com grandes reflexos na produtividade agrícola. (ANDREOLI, 2001)

Para Stamatiadis (1999) *apud* Faria e Santos (2007), a reciclagem agrícola de bio sólidos de origem doméstica é uma alternativa para o enriquecimento do solo, aplicado em solos com intuito de aumentar a fertilidade, mineralizando e estimulando as atividades microbianas, além do aumento da capacidade de retenção de água devido o acréscimo do carbono orgânico.

A Figura 11 apresenta a recuperação de uma área degradada na cidade de Goiânia-GO, restaurando uma área de jazida, lançando lodo primário do esgoto doméstico da cidade para plantio de eucalipto.

Figura 11: Recuperação de Área Degradada em Goiânia-GO



Fonte: Faria e Silva (2007), adaptada pelo autor (2018)

Segundo Faria e Silva (2007) o experimento desenvolvido na cidade de Goiânia-GO, apresentado na Figura 11, houve a recuperação de área degradada com a utilização de 20 toneladas de bio sólido para plantio de eucalipto, observou que o lodo primário utilizado na

agricultura não atraiu vetores de agentes patogênicos, ocorreu aumento de fertilidade na camada de 0 a 10cm de profundidade, as quantidades de metais pesados detectados não foram prejudiciais à vegetação.

Bittencourt (2017) ressalta que o monitoramento definido pela Resolução Conama 375/06 deveria ser alterado, tendo como base o lodo gerado, visto os altos custos de monitoramento para pequenas unidades de gerenciamento ou ETE possa prejudicar o processo. O Estudo de caso realizado no estado do Paraná apresentou que a relação custo de caracterização e o custo evitado pelo agricultor inviabiliza sua aplicação agrícola em algumas regiões distantes dos grandes centros e que geram pequena quantidade de lodo.

5.5 – Tratamento Térmico de Resíduos Sólidos

Segundo a Portaria nº 15/96 de 23 de janeiro a incineração é considerada uma forma de valorização energética com a recuperação de energia.

Para Guedes (2010) *apud* Viera *et al* (2014), o setor energético deve ser observado no contexto ambiental e socioeconômico buscando a utilização de energia renováveis, aproveitando as biomassas (resíduos) provenientes de madeira, culturas agrícolas, plantas aquáticas, algas, animais, processamentos de alimentos e seus resíduos.

Para Andrioli (2001) a incineração do lodo é uma prática adotada em vários países, acontecendo em incinerador de câmaras múltiplas e incinerador de leito fluidizado. Nos países europeus a incineração está em processo de crescimento, em 1985 apenas 10% dos países usavam essa técnica, em 2001 no Japão 60% do lodo era incinerado. Na Eupora houve um crescimento devido à falta de espaço para armazenamento.

Segundo Fontes (2003) a incineração é uma prática que não deveria ser considerada como disposição final, visto que no processo de queima gera resíduos sólidos, cinza de lodo de esgoto, que contém em sua composição metais pesados. Sendo a aplicação no concreto uma alternativa viável para cinza, visto que ela pode ser retida na matriz cimentícia.

5.6 – Aproveitamento do Poder Calorífico

Os resíduos urbanos ao ser incinerados são comumente usados para ganhar energia e minimizar a quantidade de resíduos sólidos. Muitos países europeus já adotam a técnica de incineração, com intuito de tratamento e a escolha justificada pelo ponto de vista de eficiência na conversão energética (POLI *et al*, 2017).

Segundo Borges (2008) a queima dos resíduos além de reduzir o volume do material, pode-se ainda utilizar o poder calorífico e a cinza do resíduo, como comparativo temos os

seguintes poderes caloríficos: lodo de ETE 20MJ/kg, Eucalipto 19,5MJ/kg e bagaço de cana de açúcar 19MJ/kg.

O poder calorífico do material é definido como energia, sendo ela bruta, líquida ou sob outra condição pré-definida, sendo disponibilizada na unidade de massa de um combustível definidos como Poder Superior e Inferior, expresso nas seguintes unidades de medida cal, kcal, J, kJ, kWh, BTU, etc. (NUNES, 2017).

Para Poli *et al* (2017) O poder calorífico superior e inferior possuem metodologia de determinação consagradas, porém os Resíduos Sólidos Urbanos não possuem. Diversos equívocos ocorrem no processamento devido o desconhecimento das condições a que se referem os parâmetro e extrapolação às regras, devendo ainda verificar as condições do material combustível (seco, in natura ou parcialmente úmido).

O teor de umidade pode ser considerado uma das características mais relevantes ao se utilizar materiais lignocelulósicos para a geração de energia, tanto em processos termoquímicos, como a combustão e a pirólise, quanto em processos físicos, como a densificação para produção de pellets e briquetes, e biológicos, como a fermentação. Além desse fato, é necessário considerar que o poder calorífico dos materiais lignocelulósicos segue tendências inversamente proporcionais ao conteúdo de água presente nos mesmos. (SOUZA, 2012)

Segundo Nunes (2017) A energia gerada no processo térmico ou elétrico na reciclagem de resíduos sólidos é definida como reciclagem energética ou recuperação energética. Diferente da simples incineração do material, a reciclagem energética visa o controle das variáveis massa e volume dos materiais.

O principal objetivo da reciclagem energética é a percepção do alto poder calorífico dos materiais encontrados nos resíduos sólidos urbanos. O balanço de energia no processo de combustão consiste na análise do processo antes e após a queima do material. Antes da queima estão presentes o combustível e comburente, após a queima são gerados gases, água, cinzas e energia (NUNES, 2017).

5.7 – Projeções Econômicas Ambientais

As diversas técnicas de destinação do lodo das estações de tratamento de esgoto podem ser viáveis tecnicamente, porém podem ser inviáveis financeiramente, portanto é necessário aprofundar nos estudos e procedimentos que visam reduzir custo e tornar o tratamento viável antes da disposição final, visando ainda a não poluição ambiental com contaminações de solo, água e propagar doenças (SILVA *et al*, 2017).

Para Andreoli (2001) a gestão do lodo produzido por uma ETE é um grande desafio, visto que estudos demonstram que o tratamento da fase sólida (lodo) pode representar até 60% dos custos operacionais da estação, visto a complexidade técnica e operacional do sistema de tratamento de esgoto.

Conforme Fontes (2003) a indústria da construção civil busca utilizar resíduos com o intuito de aproveitamento, desenvolvendo reações pozolânicas com o cimento, utilizando como material as cinzas volantes, escórias de alto forno e sílica ativa. Além desses materiais o autor cita a utilização de materiais com elevado potencial de filer em para produção de peças ornamentais, tijolos, filer e agregados para concreto, e filer para pavimentação.

5.8 – Utilização de Cinza de Resíduos para Concreto

Segundo Castellani e Guimarães (2017) as adições minerais mais frequentes são as de materiais pozolânicos de caráter natural (cinza vulcânica) ou artificial (procedimentos químicos de incineração ou físico por trituração ou moagem).

As cinzas de Lodo de Águas possui altos teores de enxofre (12,4%), diminuindo a resistência à compressão da argamassa, podendo ser incinerada a temperatura de 550°C a 950°C, substituindo 15% do teor de cimento, além de reduzir o volume de sólido, onde a cinza corresponde à 10 a 20% do volume inicial (SILVEIRA, 2017).

Segundo Pereira (2017) A temperatura da queima da casca de arroz é importante para a composição morfológica da cinza, além do tempo de moagem. Foram observados que a queima em temperaturas muito elevadas acontece o surgimento de fases cristalinas, diminuindo a reatividade com outros componentes, sendo inviável a sua utilização em concretos e argamassas.

A folha de bananeira é retirada no cultivo da banana, melhorando a luminosidade e os frutos. A cinza da folha calcinada a uma temperatura de 850°C e 1 hora, possui altos teores de sílica e pode ser empregada como adição mineral em concretos e argamassas (PEREIRA, 2017).

Para Castellani e Guimarães (2017) o bagaço da cana tem como produto de incineração a cinza com propriedades de adição artificial, devendo as partículas serem moídas para redução das partículas, tendo significativo efeito em sua atividade pozolânica.

A cinza do bagaço de cana tem como composto químico principal a sílica, em quantidades acima de 60% em massa, controlando a temperatura pode manter a sílica em estado amorfo, que possibilita a sua utilização como pozolana. A substituição utilizada foi de 0%, 10%, 20% e 30% do teor de cimento (SAMPAIO, 2017)

5.9 – Cinza de Lodo de ETE

Para Castro (2015) a cinza de lodo de ETE é uma adição mineral que tem sido utilizada na substituição parcial de cimento no concreto e na mistura de solo-cimento para estabilização de solo, este processo reduz o custo do concreto, com a economia de cimento, além de oferecer ganho de resistência.

No estudo de caso desenvolvido por Mol e Doll (2016) no município de Ponta Grossa-PR, no ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX) verificou a presença de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SO_3 , e a perda total da massa orgânica com a temperatura de 880°C . O estudo foi realizado com o lodo caleado in natura, não caleado in natura, caleado calcinado e não caleado calcinado, apresentados os resultados na tabela 02.

Tabela 2: Ensaio de fluorescência de Raios X para o lodo de Ponta Grossa-PR

Oxidos	Análise Química				
	CaO (%)	SiO2 (%)	Al2O3(%)	Fe2O3(%)	SO3 (%)
Lodo Caleado in natura	28,726	23,886	21,292	16,669	5,398
Lodo Não-Caleado in natura	29,51	28,468	17,394	8,65	7,616
Lodo Caleado Calcinado	27,037	20,012	18,772	9,546	4,113
Lodo Não-Caleado Calcinado	7,817	33,746	30,905	14,983	3,92

Fonte: Mol e Doll (2016)

O estudo de Mol e Doll (2016) conclui que a cinza de LETE atendem os requisitos pozolânicos referente a análise mineralógica, e que o lodo não caleado incinerado obteve o teor de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SO_3 dentro dos estipulados pela norma, sendo caracterizados quimicamente como material pozolanico.

No trabalho desenvolvido por Fontes (2003) o material estudado apresentou os seguintes dados:

a) Físico

- Teor de Umidade do Lodo: 66,2%

- Teor de Sólidos: 37%

b) Químico

- Teor de matéria orgânica: 52,5 a 55,50%

- Composição química: foi apresentado diversos elementos químicos, conforme tabela 3

Tabela 3: Elementos Químicos das ETE's de Ponta Grossa - PR

Elementos químicos	ETE Alegria	ETE Penha	ETE I. Gov	ETE Belém	ETE Valparraís	ETE Cetrel	ETE IAPI
	Lodo digerido	Lodo digerido	Lodo digerido	Lodo ativado	Lagoa aeróbia.	Lodo ativado	Lodo ativado
Concentração no lodo (mg/l)							
P	5300	4600	8200	16200	9600	15000	8000
K	5400	1900	1700	3000	698	200	1400
Ca	22000	20700	21000	15900	-	17500	8600
Fe	25000	-	-	-	21700	3300	14600
Al	37000	-	-	-	-	-	3400
S	11700	1600	1310	-	-	-	3200
Si	93000	-	-	-	-	-	-
Cd	2,5	3	2	n.d.	2	6	-
Cr	296	-	-	178	63	47	-
Cu	398	506	310	439	190	220	300
Pb	315	294	168	123	95	70	200
Mg	5100	4500	4400	6000	-	-	360
Hg	4,8	7,1	6,9	1	2,5	-	3
Ni	126	143	38,5	73	30	62	-
Zn	1400	1204	1031	824	1512	701	1000

Fonte: Mol e Doll (2016)

c) Microbiológicas

- Análises de coliformes fecais e totais e bactérias heterotróficas

d) Minerológicas

- Realização do ensaio de difração de raios X, onde os picos de pequena intensidade são materiais mal cristalizados

e) Análises Térmica Diferencial e Termogravimétrica

- Consiste em aquecer o material em velocidade constante juntamente com um material inerte (coridon) registrando as diferenças de temperatura entre os materiais estudados. Verifica que ocorre transformações endotérmicas, que ocorre a desidratação, e exotérmicas, que se deve as oxidações, reconstrução da estrutura cristalina.

5.10 – Concreto

Concreto é um produto desenvolvido através de misturas de componentes, podendo ser simples ou com armaduras de aço. Tem como maior parte do volume os agregados (miúdos e

gráudos) que são aglomerados por uma pasta de cimento Portland, podendo conter aditivos e adições. (FUSCO, 2012).

Conforme Azeredo (1997) a mistura de cimento, água e materiais inertes (miúdo e gráudos) formam o concreto, que são empregados no estado plástico e com passar do tempo endurecem devido à combinação química do cimento com a água.

Segundo a ABNT NBR 12655:2015, o concreto é um material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados (miúdo e gráudo) e água. Na composição pode haver ou não a incorporação de aditivos químicos, pigmentos, metacaulim, sílica ativa e outros materiais pozzolânicos.

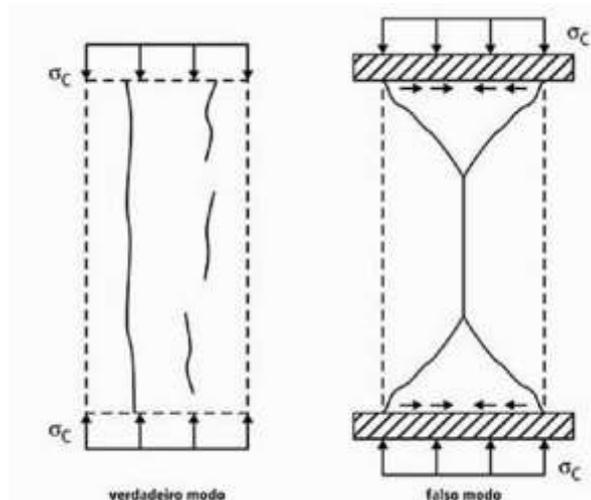
A mesma norma relata que o concreto se encontra em duas formas, a primeira o estado “fresco”, onde após completamente misturado encontra-se em estado plástico, capaz de ser adensado de acordo o método. O segundo estado é o “endurecido”, que está na forma sólida e desenvolveu resistência mecânica.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) os materiais após serem misturados é possível moldar o formato desejado, ao hidratar inicia o processo de ganho de resistência com o passar do tempo inicia o endurecimento da mistura, e com o os dias, essa adquire grande resistência mecânica, convertendo-se num material monolítico dotado das mesmas características de uma rocha.

A dosagem do concreto consiste no procedimento de definir as proporções dos materiais a serem utilizados na mistura (aglomerantes, agregados, adições, aditivos e água). O processo é fundamental para atingir as características imposta e exigida pela obra, sendo necessário observar o tipo de obra, dificuldades ao se concretar, propriedades finais e custo dos materiais. Deve ser feita uma boa seleção do material, adensar, realizar a cura (AZEREDO, 1997).

Dentre as propriedades do concreto, Fusco (2012) ressalta as resistências, onde a compressão consiste na ruptura dos agregados, da zona de transição ou da matriz da argamassa, onde as fraturas devem ocorrer em planos paralelos com campo de compressão.

Figura 12: Ruptura à compressão de concretos de baixa ou média resistência ($f_{ck} < 40\text{MPa}$)



Fonte: Fusco (2012)

Fusco (2012) descreve que o concreto é mais resistente à compressão que à tração, onde a ruptura de tração ocorre na matriz de argamassa, onde a ordem de resistência é de 1/10 referente as tensões de compressão.

5.10.1 – Cimento *Portland*

A normalização europeia (EM 197 – 1) define cimento como um ligante hidráulico, constituído por material inorgânico finamente moído, onde em contato com água forma uma pasta que endurece por meio de reações químicas de hidratação, após seu endurecimento esta pasta mantém a sua resistência e estabilidade em contato com a água.

O cimento *Portland* é definido pela ABNT NBR 12655:2015 como um aglomerante hidráulico, obtido na moagem de clínquer, podendo ser adicionado sulfato de cálcio, sendo permitido também a adição de materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto forno e materiais carbonáticos com teores determinados pelas normas específicas.

Os cimentos se diferenciam principalmente pelas adições nas suas composições, onde tem os materiais pozolânicos, escória de alto forno e carbonáticos. A finura e a capacidade de absorver aditivos (superplastificantes) também tem destaque no processo, visto que o aluminatos (C_3A e A_4AF) realizam a adsorção preferencialmente. (NEVILLE, 1997).

Quadro 4: Principais compostos do cimento

Composto	Composição	Abreviação
Silicato tricálcio	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C₃S
Silicato dicálcio	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C₂S
Aluminato tricálcio	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C₃A
Ferroaluminado tetracálcio	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C₄AF

Fonte: Neville (1997)

Segundo Castro (2007) as propriedades do concreto estão diretamente ligadas aos compostos químicos do cimento, conforme quadro 05.

Quadro 5: Influencia dos compostos na propriedade do cimento

Propriedades	C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF
Resistência em pequenas idades	Boa	Fraca	Boa	Fraca
Resistência em idades posteriores	Boa	Fraca	Fraca	Fraca
Velocidade de reação com a água (hidratação)	Média	Lenta	Rápida	Rápida
Quantidade de calor gerado na hidratação	Média	Pequena	Grande	Média
Resistência a águas agressivas	Média	Boa	Fraca	Fraca

Fonte: Liborio (1999) *apud* Castro (2007)

5.10.2 – Agregados

Neville (2013) define agregado como material granular sem forma e volume definido, de atividade química praticamente inerte, constituído de dimensão e propriedade significativa para a fabricação de argamassa e concreto nas obras de engenharia civil.

Segundo Bauer (2015), o termo “agregado” nos ramos da construção é conhecido, conforme cada caso, pelo nome específico: fíler, pedra britada, bica-corrída, rachão etc.

Mehta e Monteiro (2008) definem agregados como: “... material granular, sem forma e volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para o uso em obras de engenharia”. A maneira de extração e a natureza dos agregados podem interferir diretamente em suas características e propriedades de compactação, massa específica, absorção de água, porosidade, permeabilidade e trabalhabilidade. A resistência do agregado é

muito importante para o concreto, visto que é mais resistente que a matriz da pasta de cimento.

5.10.3 – Aditivos e Adições para o Concreto

Conforme descrito na ABNT NBR 11768:2011, os aditivos são produtos adicionados no concreto durante a etapa de preparo, onde os teores são de acordo a massa do material cimentício contida no concreto. Os aditivos têm objetivo de alterar as propriedades do concreto no estado plástico e ou endurecido, com exceção dos pigmentos que são utilizados para colorir o concreto.

Azeredo (1997) relata que os aditivos são produtos químicos que são adicionados no concreto com intuito de alterar algumas propriedades, sendo classificados como: aceleradores, agentes redutores de água, difusores, incorporadores de ar, expulsos de ar, formadores de gás, expansores, minerais finamente divididos, impermeabilizantes, ligantes, redutores da reação álcali-agregados, inibidores de corrosão, fungicidas, germicidas, inseticidas, agente floculantes e colorantes.

Segundo a NBR 12653:2014, pozolana é um material artificial ou natural que contém sílica em forma reativa. Pode ser definida também como materiais silicosos ou silicoaluminosos, esses materiais possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas quando está no estado fino e em contato com água, reagem com hidróxido de cálcio em temperatura ambiente, formando um composto com propriedades aglutinantes.

Quadro 6: Classificação das Adições Minerais

Classificação	Tipo de adições
Cimentantes	Escória granulada de alto-forno
Cimentantes e pozolânicas	Cinzas voltantes com alto teor de cálcio
Superpozolanas	Sílica ativa
	Metacaulim
	Cinzas de casca de arroz
Pozolanas comuns	Cinzas voltantes com baixo teor de cálcio
	Argilas calcinadas
	Materiais naturais (origem vulcânica e sedimentar)
Pozolanas pouco reativas	Escória de alto-forno resfriada lentamente
	Cinzas de forno
	Escória de caldeira
	Palha de arroz queimada em campo
Adições inertes (filler)	Calácio, pó de cálcio, pó de pedra

Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

As cinzas possuem elevada concentração de sílica, além da presença de alumínio e outros materiais, que adicionados ao cimento combinam-se ou são ativadas pelo hidróxido de cálcio, havendo reação de hidratação com o clínquer e originando compostos com propriedades ligantes. (NEVILLE, 2016).

As cinzas podem ser classificadas como Pozolânicas e Cimentantes. As pozolânicas reagem fixando o hidróxido de cálcio e formam estruturas do tipo C-S-H, as cinzas volantes com baixo teor de cálcio são exemplos. As cimentantes reagem com a água, hidratando, a escória granulada de alto forno é exemplo (NBR 12653:2014).

Segundo Mehta e Monteiro (2008) a pozolana influencia nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. No estado fresco melhoram a trabalhabilidade, facilidade no bombeamento, diminuem a exsudação e a segregação, necessita de maior consumo de água ou aditivos, a pozolana tem menor calor de hidratação que o cimento. Já no estado endurecido aumenta a resistência mecânica da pasta e da zona de transição, diminui os poros, aumenta durabilidade, menor absorção de água, redução de álcalis.

O endurecimento das pozolanas, conforme descrito por Fusco (2012), é a mesma reação do cimento *Portland* formando gel rígido de silicato de cálcio hidratado, que para isso acontecer o material tem que ser moído muito fino. No início do endurecimento a pozolana desempenha uma ação física, como um agregado ultrafino impermeabilizando o gel rígido capilar. Com o passar do tempo, em torno de 90 dias, acontece o efeito químico, com formação de silicato hidratado.

5.10.4 – Avaliação da Pozolanicidade

A avaliação da pozolanicidade pode acontecer nos métodos químicos, físicos e mecânicos. Além da finura que contribui para o processo.

Segundo Rodrigues (2012) o uso de pozolanas contribui para as matrizes cimentícias no ganho de resistência mecânica, através da combinação físicos e químicos, conforme descrito abaixo:

- Físico e Químico: A hidratação dos compostos do cimento e água com a reação pozolânica do material, além do efeito mecânico gerado no empacotamento, que depende da granulometria dos agregados;
- Composição Química: para que um material seja considerado pozolana deve apresentar no mínimo 50% da somatória dos óxidos $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, e no máximo 5% de SO_3 e que o teor máximo de álcalis disponíveis em Na_2O deve ser de 1,5%, valores determinados através de ensaios de raios-X;

- Composição Minerológica: a presença de fases amorfas (vítreas) está diretamente relacionada com a atividade pozolânica, devendo verificar a forma como se apresenta a sílica nas pozolanas, quanto maior a quantidade de sílica amorfa no material, mais ele será reativo;
- Finura do Material: o efeito físico da finura do material auxilia na superfície de contato da pozolana com o hidróxido de cálcio, aumentando sua taxa de reação pozolânica;
- Avaliação por medida de Condutibilidade elétrica: consiste em verificar a reação de pozolana/hidróxido de cálcio, O decréscimo de íons de Ca^{2+} devido ao aumento de fases de CSH produz decréscimo da condutividade, da qual a velocidade da mudança depende, se a reatividade da pozolana for alta ou baixa.

A metodologia de avaliar através de condutibilidade elétrica está sendo bastante difundida devido a obtenção de resultados em menor tempo.

5.10.5 – Módulo de Elasticidade do Concreto

Segundo a ABNT NBR 6118:2014 a deformação da estrutura depende do processo construtivo, principalmente do módulo de elasticidade e da resistência a tração, devendo este dado ser obtido através de ensaio, onde os valores podem ser estimados através de equações, porém os dados não são precisos.

Battagin (2007) *apud* Arruda (2013) afirma que o módulo de elasticidade tem se tornado muito importante, visto que as propriedades fornecem informações da estrutura quando submetida as reações a curto e longo prazo, definindo a desforma e retirada do escoramento do concreto.

A capacidade de os materiais retornarem à sua forma e volume originais após a sollicitação é a definição do termo “elasticidade”, dependendo da composição estrutural dos materiais, onde o resultado é obtido através de diagrama tensão-deformação do material, onde haver variações de até 20% para o mesmo material. Pode ser definido também através da velocidade de pulsação ultra-sônica, determinada a partir do tempo de propagação de pulsações geradas eletronicamente. Para o concreto existem três tipos de módulos de elasticidade, o Tangencial Inicial (E_{ci}) adotado para tensões e deformações de tração; o Secante (E_{cs}) que é utilizado para análises elásticas de projeto e o Módulo Tangencial. (ARRUDA, 2013).

NUNES (2005) ressalta que alguns fatores podem afetar o módulo de elasticidade do concreto, sendo dividido em três grupos:

- a) Características e proporções dos materiais
 - Relação água-cimento
 - Consumo de cimento
 - Aditivos químicos
 - Aditivos minerais
 - Dimensão do agregado
 - Fração volumétrica do agregado
 - Porosidade e módulo de elasticidade do agregado
 - Natureza do agregado
- b) Condições de cura
- c) Parâmetros de ensaio
 - Umidade do corpo de prova
 - Velocidade de carregamento
 - Tensão

Para Estolano *et al.* (2018) os cálculos estruturais passaram a se preocupar mais com o conhecimento das deformações reais da estrutura de concreto e de outros parâmetros que expressem as condições dos estados limites de serviço, onde os projetistas expressam a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto. O concreto por ser um material que não apresenta comportamento com deformações lineares, visto que é um composto, deve ser estimado a partir de ensaios seu módulo de elasticidade.

Na utilização de resíduos para confecção de concreto Bilesky *et al.* (2018) afirma que o módulo de elasticidade para agregado reciclado diminui devido a porosidade do agregado, onde foi analisada a relação do índice de vazios, absorção de água e massa específica, o autor relata que esses fatores foram alterados devido a presença dos agregados reciclados.

6 RESULTADOS E ANÁLISE

6.1 – Estudo da ETE Norte

A ETE Norte funciona com capacidade total, o sistema está em fase de ampliação, porém não iniciou a etapa de obra. A imagem satélite (Figura 13) apresenta a estação o funcionamento de 2017.

Figura 13: Imagem Satélite da ETE Norte



- | | |
|---|----------------------------------|
| 1-Lagoa desativada (antigo sistema de tratamento) | 7- Tanque de lodo |
| 2- Reator desativado (antigo sistema de tratamento) | 8 – Edificação de Desidratação |
| 3- Tratamento Preliminar | 9 – Depósito e Bombas |
| 4- UASB | 10 – Bag's de lodo |
| 5- RLA Aerado | 11 - Administração e Laboratório |
| 6- Decantador | |

Fonte: Google Earth (2017), adaptada pelo autor (2018)

As visitas para pesquisa e coleta do lodo foram realizadas nos dias 27 e 28 de abril de 2018. A Figura 14 apresenta as etapas do tratamento inumerada conforme Figura 13.

Figura 14: Fotos da ETE Norte



6.2 – Armazenamento e Coleta do Lodo

Os resíduos sólidos (lodo) da ETE Norte estão armazenados em 8 recipientes denominados *Bag's*, que possuem 8m de largura, 30m de comprimento e altura máxima de 2,30m, com capacidade máxima de 552m³ cada *bag*, totalizando 4.416,00m³ de lodo.

O material é bombeado do tanque de lodo para os *bag's*, o material líquido é drenado por meio de calhas instaladas em todo perímetro da área. A coleta foi realizada manualmente conforme exigência de segurança da Concessionária.

Figura 15: Textura do lodo fresco



O lodo foi armazenado em tambor plástico isento de material, devidamente lavado para não contaminar a amostra, conforme Figura 15.

6.3 – Propriedades do Lodo

Foi verificado a perda de massa de lodo durante o processo de desidratação artificial, conforme dados apresentados na tabela 4, onde o material foi para estufa durante 24h com temperatura de 110°C.

Tabela 4: Determinação de umidade do lodo fresco

Descrição	Quant.	Unid
Bandeja Vazia:	0,884	kg
Bandeja + Lodo Fresco:	4,892	kg
Bandeja + Lodo Seco:	2,71	kg
Massa de Lodo Fresco:	4,008	kg
Massa de Lodo Seco:	1,826	kg
Perda de Massa (%):	54,44	%

Fonte: Autor (2018)

O lodo perdeu 54,44% da massa e ainda apresentava teores de umidade, 45,56% de matéria sólida, conforme Figura 16.

Figura 16: Desidratação do lodo



A imagem (A) demonstra o lodo fresco, (B) o material dentro da estufa e (C) o material seco. Observa que o material ainda apresenta umidade, devendo ser submetido a maior tempo dentro da estufa.

6.3.1 - DETERMINAÇÕES QUÍMICAS

As análises químicas do material foram determinadas com a cinza do lodo de ETE no Centro Regional e Departamento Tecnológico e Inovação da Universidade Federal de Goiás, em Goiânia-GO, a Figura 17 apresenta o equipamento.

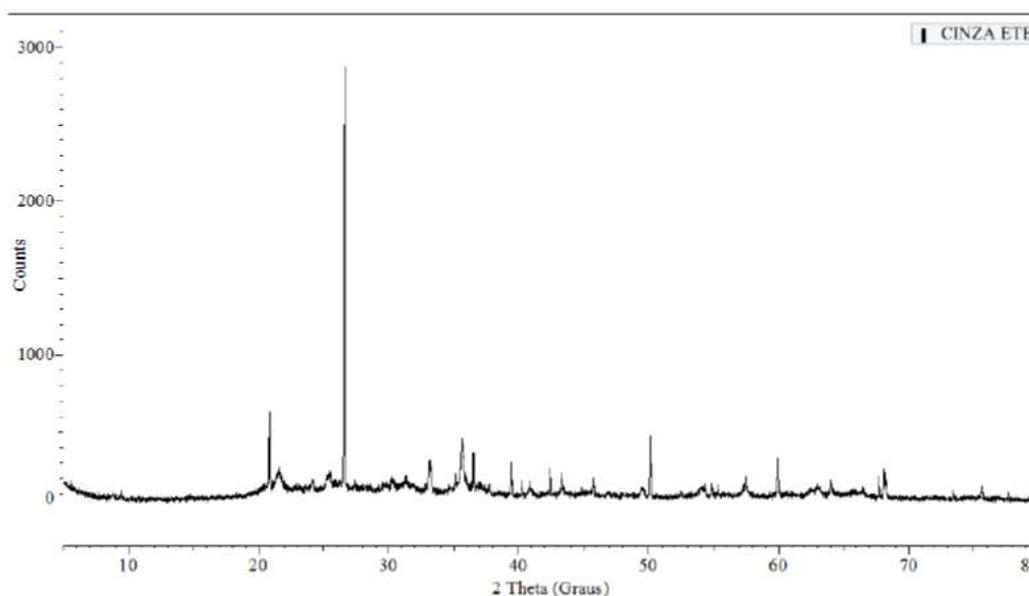
Figura 17: Equipamentos utilizados na pesquisa



No ensaio de Mineralogia por Difração de Raio-X, apresentado no gráfico 2, teve como resultado descrito pela análise da equipe técnica da CRTI:

“Não foi possível proceder à reconciliação da mineralogia com análises químicas da amostra 1, devido a proporção de material de baixa cristalinidade (amorfo) presente na amostra. Não foi possível identificar todas as fases presentes por difração de raios-X, sendo as únicas fases cristalinas identificadas de forma inequívoca foram quartzo, hematita, magnetita, goethita, anatásio, caulinita e muscovita.” (CRTI, 2018)

Gráfico 2: Difratoograma obtido para a amostra Cinza ETE



Fonte: Autor (2018)

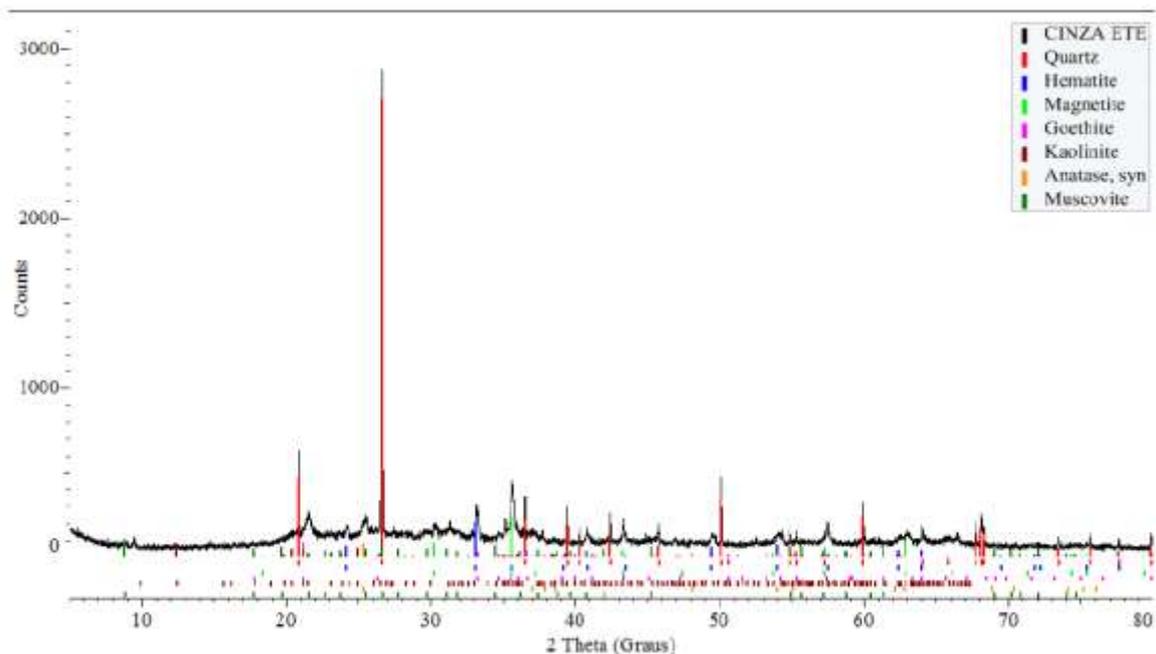
Na verificação da cristalinidade da amostra, foi determinado que 63% do material possui cristalinidade, ou seja existe arranjo regular dos átomos, moléculas ou íons. Completando a outra parte da amostra, temos 37% de material amorfo, que não apresentou temperatura constante durante a fusão, conforme tabela 5.

Tabela 5: Determinação da semiquantitativa da cristalinidade da amostra Cinza ETE

Análise Semiquantitativa da Cristalinidade	
<i>Cinza ETE</i>	
% de Cristalinidade	63,0
% de Material Amorfo	37,0

Fonte: Autor (2018)

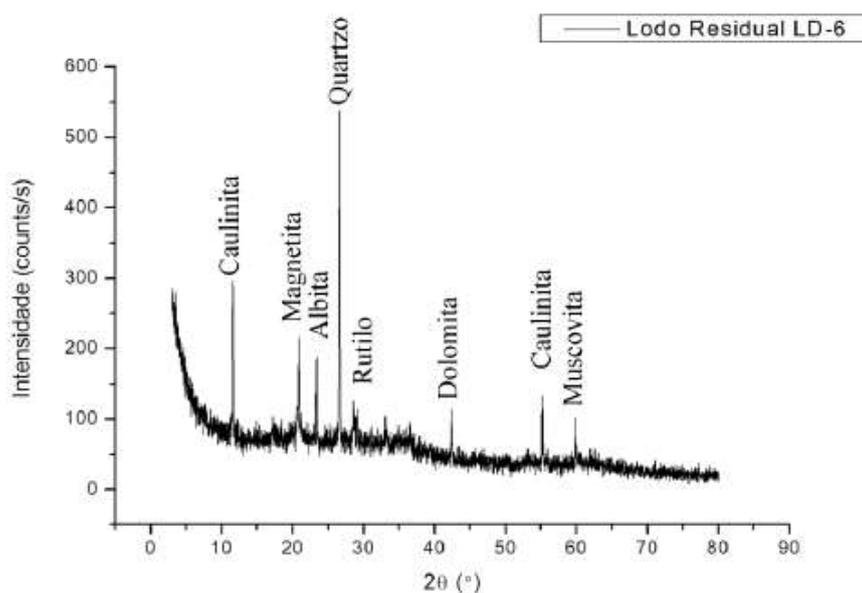
Gráfico 3: Difratoograma obtido para a amostra Cinza ETE com a identificação qualitativa das fases cristalinas presentes



Fonte: Autor (2018)

Comparando com os resultados de Difratoograma do lodo da ETE Vila União de Palmas – TO (gráfico 4) obtidos por Pedroza (2011), podemos verificar que os elementos constituintes são os mesmos do apresentado neste trabalho (gráfico 3).

Gráfico 4: Difratoograma do Lodo Residual LD-1, da ETE Vila União



Fonte: Pedroza (2011)

Para Fonts *et al.*, (2009) *apud* Pedroza (2011) identificaram em amostras de lodos anaeróbios domésticos os seguintes minerais: caulinita, magnetita, mica, albita, quartzo, calcita e dolomita. Segundo os autores esses minerais contêm metais alcalinos tais como K, Na, Mg e Ca, que podem atuar como catalisadores em algumas reações do processo de pirólise, bem como outros elementos como Al, Fe e Si.

Na análise qualitativa obtivemos os seguintes elementos apresentados no quadro 7.

Quadro 7: Identificação qualitativa das fases cristalinas presentes na amostra Cinza ETE

Identificação Qualitativa de Fases
<i>Cinza ETE</i>
Quartzo
Hematita
Magnetita
Goethita
Caolinita
Anatásio
Muscovita

Fonte: Autor (2018)

Os dados químicos foram obtidos por Fluorescência de Raios – X, onde as análises químicas dos óxidos maiores analisados apresentam as seguintes concentrações. Onde (<LQ) define como “Concentração abaixo do limite quantificável”.

Tabela 6: Análise química dos óxidos maiores analisados

Óxidos Analisados (%) em massa	BASE ÚMIDA
	<i>Cinza ETE</i>
SiO ₂	19,77
TiO ₂	0,98
Al ₂ O ₃	30,78
Fe ₂ O ₃	16,95
MnO	< LQ
MgO	0,72
CaO	4,77
Na ₂ O	< LQ
K ₂ O	0,32
P ₂ O ₅	15,80
SO ₃	< LQ
LOI	9,80
SOMA	99,91

Fonte: Autor (2018)

Comparando os resultados obtidos no ensaio com os determinados por Fontes *et al.* (2016), podemos observar na tabela 7 a presença dos compostos, porém com teores diferenciados. Ressaltando altos teores de Al₂O₃ encontrado na amostra, que pode ser justificado pelos produtos utilizados no tratamento dos efluentes ou do lodo.

Tabela 7: Análise Química

Ashes	Concentration (%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
CLE	39,02	19,09	12,48	10,12	1,89	4,94	6,38	1,76*	1,26*	-
(6)	33,15	25,44	5,11	5,44	3,78	4,20	6,19	0,71	-	1,14
(7)	34,2	12,6	4,7	20,6	1,9	14,8	2,8	1,7	1,0	0,9
(8)	50,6	12,8	1,93	7,21	1,48	1,67	2,38	1,70	0,32	-
(9)	17,27	9,64	8,52	30,24	3,22	14,25	8,95	1,28	0,94	0,92
Ashes	Concentration (%)									
	Cr ₂ O ₃	ZnO	PbO	CuO	SeO	BaO	NiO	ZrO ₂	SrO	MnO
CLE	0,21	0,45	0,07	0,02	0,06	1,46	0,20	-	-	0,09
(6)	0,03	0,35	0,01	0,09	-	-	0,01	0,03	0,01	0,04
(7)	0,26	0,71	0,07	0,25	-	0,14	0,06	-	0,06	0,06
(8)	0,564	2,62	0,18	1,09	-	-	0,72	-	-	0,44
(9)	0,17	0,32	0,04	0,18	-	0,14	0,03	-	0,25	0,07

Fonte: Fontes *et al.* (2016)

No trabalho de Fontes (2016) foram realizadas queimas em diferentes temperaturas para verificar a composições químicas das diferentes amostras de cinza.

Na análise de elementos menores a tabela 8 apresenta os metais existente na amostra.

Tabela 8: Análise dos elementos menores

Limite de Detecção (LD)	Elementos Analisados (ppm)	Cinza ETE
5	Sc	11
15	V	129
20	Cr	133
10	Co	< 10
10	Ni	34
15	Cu	351
20	Zn	899
5	Ga	39
10	As	15
10	Rb	11
20	Sr	213
15	Y	< 15
20	Zr	466
5	Nb	44
20	Mo	< 20
10	Sn	25
10	Sb	< 10
10	Cs	16
50	Ba	661
15	La	< 15
20	Ce	370
15	Pb	45
10	Th	29
10	U	< 10
10	Cd	< 10

Fonte: Autor (2018)

Conforme Pedroza (2011) a presença dos elementos está diretamente ligada com o tipo do tratamento empregado no tratamento do esgoto, onde foram empregados no tratamento líquido, ficando retido na matéria sólida (lodo).

6.3.2 – DETERMINAÇÕES FÍSICAS

- Ensaio de Massa Específica (ABNT NBR 6474 NM 23 / 2000)

Conforme descrito em norma, o ensaio foi realizado no frasco de *Le Chetelier*, determinando a massa específica do lodo de ETE de 2.985 kg/m³.

$$\rho = \frac{\left(\frac{M}{1000}\right)}{\frac{(V_{fcorr} - V_{incorr})}{1000000}} \quad \rho = \frac{\left(\frac{60}{1000}\right)}{\frac{(20,10 - 0)}{1000000}}$$

Sendo:

ρ = peso específico

M = massa

V_{fcorr} = volume final corrigido

V_{incorr} = volume incorporado corrigido

A figura 18 apresenta a amostra e os equipamentos utilizados na realização do ensaio.

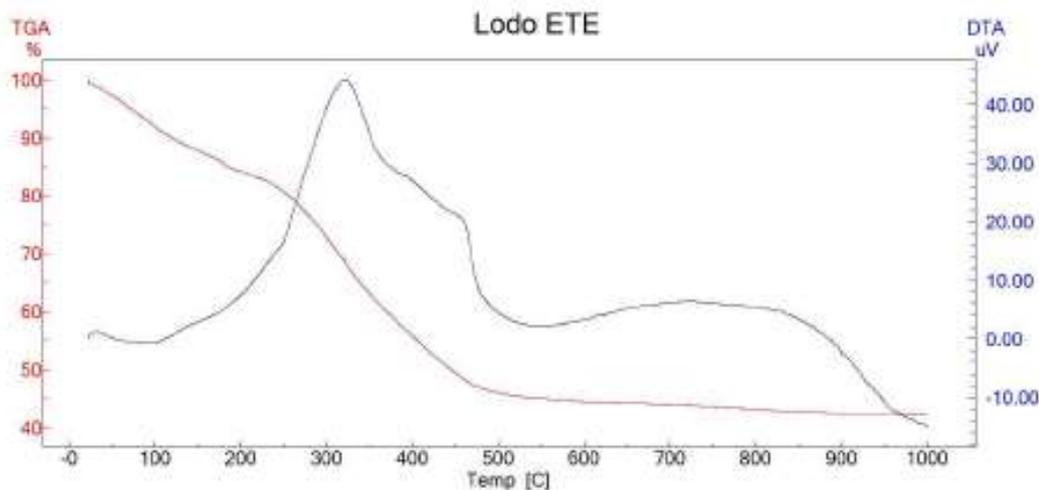
Figura 18: Ensaio de Massa Específica do Lodo de ETE



- Análise Térmica

O CRTI, laboratório responsável pelo ensaio, apresentou o seguinte gráfico analisando a temperatura (°C), DTA (uV) e a TGA (%), representados no gráfico 5.

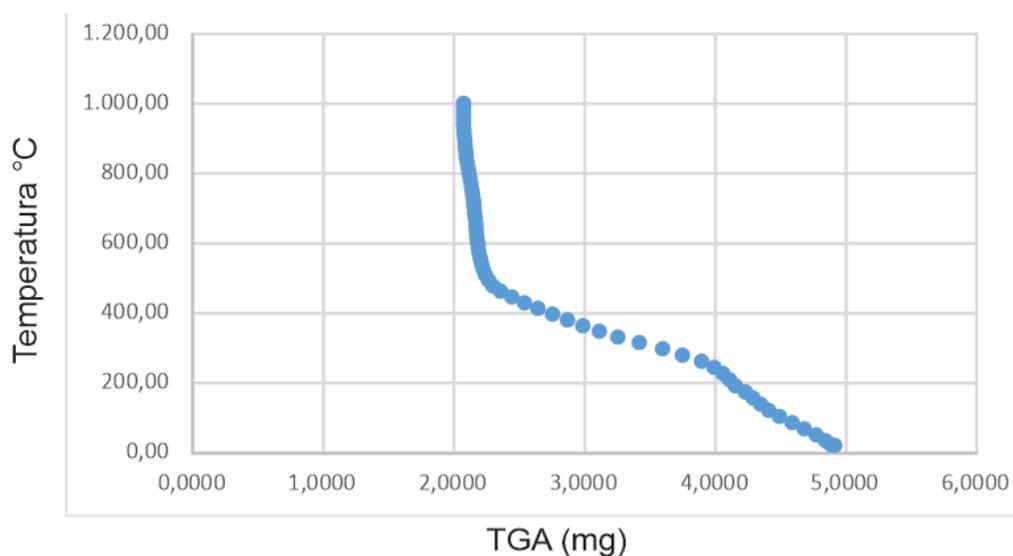
Gráfico 5: Termograma referente a amostra 1 – lodo de ETE



Fonte : CRTI (2018)

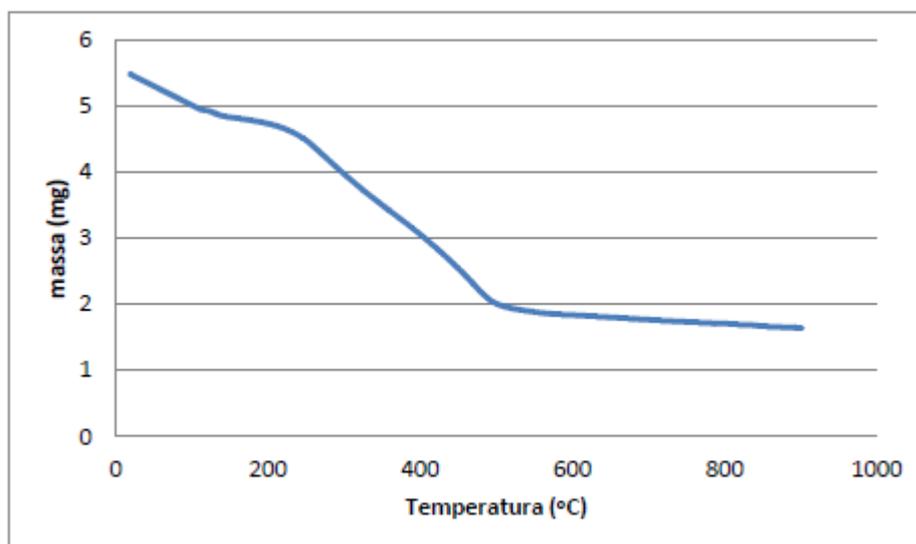
Conforme descrito na metodologia na execução do ensaio, e analisando os resultados apresentados, foi gerado um novo gráfico, comparando a variação de TGA (mg) conforme a temperatura ($^{\circ}\text{C}$). No gráfico 6, foi verificada decomposição entre as temperaturas de 226°C a 446°C e a partir de 600°C nota-se a diminuição da degradação térmica da amostra.

Gráfico 6: Variação do TGA com a evolução da Temperatura



Observando os resultados obtidos por Pedrosa (2011) no gráfico 7, a decomposição de matéria orgânica em torno de 260 e 454°C . Resultados similares ao obtido nesta pesquisa.

Gráfico 7: Curva TG do lodo residual, LD-1, obtido de reator UASB, em Palmas (TO)



Fonte: Pedrosa (2011)

A tabela 9 apresenta a variação do TGA (mg) ao longo do tempo com diferentes temperaturas., sendo realizado por 60 segundos com variação de temperatura de 22,16°C a 1000,91° C.

Tabela 9: Variação do TGA com a variação de temperatura

Time	Temp	DTA	TGA	Time	Temp	DTA	TGA
sec	C	uV	mg	sec	C	uV	mg
0	22,16	0.057449	4,9148	31	526,51	2548188	2,2225
1	23,58	0.703744	4,8851	32	542,87	2163266	2,2101
2	34,82	1096741	4,8454	33	559,16	2254143	2,1993
3	51,31	-0.020364	4,7713	34	575,62	2514959	2,1915
4	68,81	-0.513342	4,6805	35	591,99	2964740	2,1843
5	86,33	-0.717071	4,5887	36	608,12	3510134	2,1786
6	103,84	-0.580677	4,4906	37	624,24	4139599	2,1725
7	121,48	0.839807	4,4099	38	640,64	4872392	2,1697
8	139,17	2240150	4,3465	39	656,59	5236090	2,1669
9	156,71	3322215	4,2893	40	672,79	5693416	2,1627
10	174,19	4543481	4,2304	41	688,84	5959730	2,1584
11	191,72	6421798	4,1540	42	704,85	6240948	2,1537
12	209,22	8936733	4,1084	43	720,93	6378562	2,1495
13	226,75	12195218	4,0587	44	736,80	6226532	2,1428
14	244,25	15332798	3,9926	45	752,74	6017997	2,1377
15	262,25	22535334	3,8952	46	768,52	5745995	2,1305
16	280,17	30948803	3,7480	47	784,53	5635416	2,1236
17	298,02	38764950	3,5958	48	800,44	5471607	2,1160
18	315,44	43696316	3,4180	49	816,04	5036103	2,1084
19	332,01	42332924	3,2548	50	831,97	4587921	2,1010
20	348,05	35684460	3,1117	51	847,83	3601793	2,0935
21	364,34	30714577	2,9854	52	863,42	2254552	2,0902
22	380,79	28638834	2,8676	53	879,19	0.743891	2,0860
23	397,36	27230001	2,7538	54	894,95	-1242796	2,0829
24	413,77	25164543	2,6425	55	910,71	-3718495	2,0783
25	430,06	23003380	2,5409	56	926,32	-6663067	2,0753
26	446,45	21584314	2,4449	57	942,09	-9423089	2,0739
27	462,53	18714746	2,3577	58	958,12	-11858900	2,0737
28	477,84	8122788	2,3007	59	974,01	-13277090	2,0743
29	494,02	5158917	2,2657	60	989,77	-14378371	2,0736
30	510,30	3529741	2,2409	60,69	1000,91	-15012965	2,0727

Fonte: Autor (2018)

6.3.3 – Produção da Cinza

A cinza foi produzida no laboratório do CEULP ULBRA, sendo queimada a uma temperatura de 850°C durante 2 horas na Mufla do Laboratório de Engenharia de Minas (Figuras 19 e 20). O material teve grande variação de massa, devido as altas temperaturas, sendo posteriormente resfriado e submetido a moagem durante 30 minutos no moinho de bolas (Figura 21). A escolha da temperatura de queima foi embasada no trabalho de Fontes *et al.*(2016), cujo 850°C obteve melhores resultados, evitando também a cristalição em temperaturas superiores.

Figura 19: Mufla e lodo desidratado



Figura 20: Queima do lodo na Mufla



Figura 21: Moagem no moinho de bolas



Após o processo de moagem o material foi e peneirado na peneira de 150 μm e armazenado em um tambor plástico em local protegido e na sombra.

6.4 – Estudo do Poder Calorífico

O ensaio desenvolvido pela TECPAR apresentou os seguintes resultados para o lodo de ETE de Palmas:

Tabela 10: Poder Calorífico

Ensaio	Unidade	Resíduo Sólido
Poder Calorífico Superior - PCS	J/g	8.512
	cal/g	2.030

Fonte: Autor (2018)

Comparando com os resultados da tabela 11, obtidos por Precci *et. al* (2001), podemos observar que o lodo de Palmas-TO possui resultados superiores a serragem de madeira e o bagaço de cana de açúcar.

Tabela 11: Poder calorífico de resíduos orgânicos

Resíduo	Umidade (%)	Massa Específica (Kg/m ³)	Poder Calorífico (KJ/Kg)
Casca de Arroz	12	140	12.977
Casca de Amendoim	12	150	12.977
Palha de Trigo	20	160	13.395
Sabugo de Milho	13	220	17.598
Palha de Café	13	250	15.488
Serragem de madeira	40	300	8.372
Bagaço de Cana-de-Açúcar	50	150	7.535

Fonte: Precci *et al* (2001)

A Figura 22 apresenta o equipamento utilizado para a determinação do poder calorífico da amostra.

Figura 22: Realização do ensaio em Bomba Calorífica



Fonte: Autor (2018)

6.5 - Estudo do Concreto

6.5.1- Estudo de Dosagem

Para estudo do LETE como adição mineral para o Concreto de Cimento Portland, será definido o traço com Resistência Característica de Compressão Axial de 25 MPa, seguindo as proporções de substituições do trabalho de Fontes *at al* (2016), conforme descrito abaixo:

- a) Traço Referencia (TR) – com zero adição de cinza de LETE
- b) Traço 5% (TR+5%) – com substituição de 5% do teor de cimento
- c) Traço 10% (TR+10%) – com substituição de 10% do teor de cimento

A dosagem foi definida de acordo o método da ACI 211.1-91, onde foi utilizado matérias de Palmas-TO, e o desvio padrão adotado foi rigoroso (4MPa) e fck de 25 MPa e fcj de 31,60 MPa. Foi determinado o **traço referência** e posteriormente substituído nos demais traços, mantendo os teores de água e agregados. Sendo determinado o seguinte consumo para um metro cúbico de concreto:

Vol. Agregado Miúdo = 1 - (cimento + agregado graúdo + ar + água)	
Vol. Cimento = Massa Traço / M. Esp. =	0,118 m ³
Vol. Agregado Graúdo = Massa Traço / M. Espec.=	0,354 m ³
Vol. Água = Litros Traço / M. Espec. =	0,193 m ³
Vol. Ar = (% Ar / 100) x 1,00m ³ =	0,015 m ³
Vol. Ag. Miúdo = 1 - Soma dos Volumes =	0,320 m ³
Vol. Ag. Miúdo = Vol. Agr. Miúdo x M. Esp. =	844,80 kg

A tabela 12 apresenta a determinação do traço em massa e volume para o traço referência

Tabela 12: Determinação do Traço Referência

Resumo de Consumo dos Materiais				
Cimento =	371,15 kg			f a/c = 0,52
Ag. Graúdo =	959 kg			
Ag. Miúdo =	844,80 kg			
Traço em Massa				
TRAÇO =	1,000	2,280	2,580	fa/c = 0,52
Cimento =	0,118 m ³			
Ag. Graúdo =	0,354 m ³			
Ag. Miúdo =	0,32 m ³			
Traço em Volume				
TRAÇO =	1,000	2,712	3,000	fa/c = 0,52

Fonte: Autor (2018)

Para determinação das dosagens de concreto com substituição parcial de cimento por teores de 5 e 10% de CLETE, foi calculado o volume de acordo o volume de cimento, conforme determinado no traço referência de 0,118m³. Foram determinados os seguintes volumes 0,0059m³ para o teor de 5% de CLETE (tabela 13) e 0,0118m³ para o teor de 10% de CLETE (tabela 14).

Tabela 13: Determinação do Traço 5%

Traço em Volume TR-5%					
Traço (m ³)		Traço (kg)			
Cimento =	0,1121 m ³	353,12			
Cinza =	0,0059 m ³	17,61			
Ag. Graúdo =	0,354 m ³	959,34			
Ag. Miúdo =	0,32 m ³	844,8			
TRAÇO	CIMENTO	CINZA	AREIA	BRITA	ÁGUA
Consumo p/1m ³ (kg) =	353,12	17,61	844,8	959,34	0,52
Traço em Massa =	0,952	0,048	2,28	2,59	0,52

Tabela 14: Determinação do Traço 10%

Traço em Volume TR-10%					
Traço (m ³)		Traço (kg)			
Cimento =	0,1062 m ³	334,53			
Cinza =	0,0118 m ³	35,22			
Ag. Graúdo =	0,354 m ³	959,34			
Ag. Miúdo =	0,32 m ³	844,8			
TRAÇO	CIMENTO	CINZA	AREIA	BRITA	ÁGUA
Consumo p/1m ³ (kg) =	334,53	35,22	844,8	959,34	0,52
Traço em Massa =	0,905	0,095	2,28	2,59	0,52

Após determinar o volume de CLETE foi determinado a massa de acordo com a massa específica da cinza, multiplicando o volume pela massa específica que foi de 2.985 kg/m³. Após a determinação da dosagem.

Tabela 15: Quantitativo de materiais em kg para realização dos ensaios

TRAÇO	CIMENTO	CINZA	AREIA	BRITA	ÁGUA
TR	15		34,2	38,7	7,8
TR-5%	14,28	0,72	34,2	38,85	7,8
TR-10%	13,58	1,43	34,2	38,85	7,8

A tabela 15 apresenta o resumo de material necessário para realização do experimento, sendo devidamente pesado em balança de precisão.

6.5.2 - Estudo de Aglomerante

Foi utilizado Cimento Portland CP II – F 40, os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais do CEULP-ULBRA em Palmas-TO, sendo determinado as seguintes propriedades:

- Determinação do índice de finura (ABNT NBR 11579:2012)

O Material apresentou teores de 6 a 7%, atendendo as exigências da norma.

- Tempo de Início de Pega (ABNT NBR NM 65:2003)

Os valores estão dentro o tolerável pela norma, sendo determinado no equipamento de *Vicat* os seguintes tempos. A tabela 16 apresenta as propriedades do cimento utilizado.

Tabela 16: Propriedades do Cimento

Cimento CII-F40				
Massa específica (g/cm ³)	Índice de finura (%)	Tempo de pega		
		Massa de água (g)	Início (h)	Final (h)
3,09	2,1	144	2h25	3h50

Fonte: Autor (2018)

6.5.3 – Massa Unitária

A determinação dos agregados segue nas tabelas 16 e 17, onde a areia (agregado miúdo) possui 1,38kg/dm³ e a brita (agregado graúdo) possui 1,37kg/dm³.

Tabela 17: Massa Unitária dos Agregados

Agregado Miúdo (areia)					
$\delta_1 =$	1,41	kg/dm ³	$\delta_{m\u00e9dia} =$	1,38	kg/dm ³
$\delta_2 =$	1,37	kg/dm ³			
$\delta_3 =$	1,36	kg/dm ³			
Agregado Graúdo (brita)					
$\delta_1 =$	1,37	kg/dm ³	$\delta_{m\u00e9dia} =$	1,37	kg/dm ³
$\delta_2 =$	1,37	kg/dm ³			
$\delta_3 =$	1,37	kg/dm ³			

Fonte: Autor (2018)

6.5.4 – Massa Específica

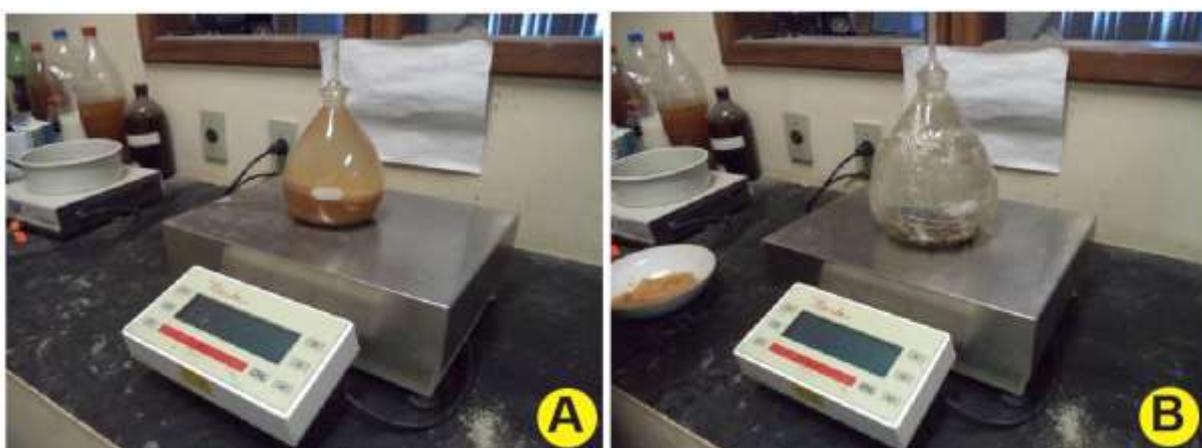
A areia (agregado miúdo) possui $2,64\text{kg}/\text{dm}^3$ e a brita (agregado graúdo) possui $2,71\text{kg}/\text{dm}^3$, conforme apresentado na tabela 18.

Tabela 18: Massa Específica dos Agregados

Agregado Miúdo - Norma ABNT NM 52:2001		
$\gamma_1 =$	2,63	kg
MSS	500	
MPCA	1201,9	
MPSA	1512,1	
$\gamma_2 =$	2,65	kg
MSS	500	
MPCA	1201,9	
MPSA	1513,2	
$\gamma_m =$	2,64	Kg/dm^3
Agregado Graúdo - Norma ABNT NM 53:2001		
$\gamma_1 =$	2,71	kg
MSS	200	
MPCA	2519,2	
MPSA	2645,4	
$\gamma_2 =$	2,71	
MSS	200	Kg
MPCA	2519,2	
MPSA	2645,4	
$\gamma_m =$	2,71	Kg/dm^3

A Figura 23 apresenta a realização do ensaio de Areia (a) e Brita (b).

Figura 23: Massa Específica dos Agregados



Também foi determinada a massa específica da Cinza do Lodo da ETE, necessária para dosagem do concreto, sendo determinada 2985kg/m^3 , bem aproxima a do cimento que possui 3090kg/m^3 .

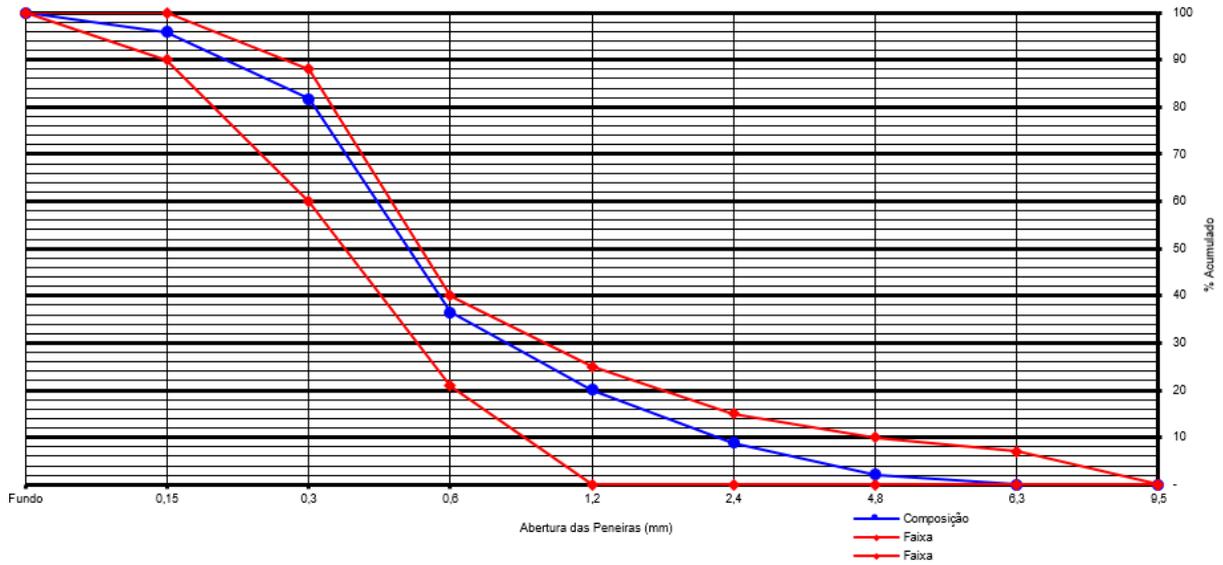
6.5.5 – Granulometria

A areia foi caracterizada como fina, definida na zona 2, e possui um módulo de finura de 2,45, porém acima de 81,68% do material está acima da peneira 0,3, conforme resultados apresentados na tabela 20 e gráfico 8.

Tabela 19: Determinação da Composição Granulométrica da Areia

PENEIRAS		1ª DETERMINAÇÃO			2ª DETERMINAÇÃO			MÉDIA % RETIDA	
		MASSA	% RETIDA		MASSA	% RETIDA			
Pol / N°	(mm)	RETIDA (g)	Simples	Acumul.	RETIDA (g)	Simples	Acumul.	Simples	Acumul.
3/8	9,5		-	-		-	-	-	-
1/4	6,3		-	-		-	-	-	-
4	4,8	10,70	2,14	2,14	10,10	2,02	2,02	2,08	2,08
8	2,4	31,80	6,36	8,50	36,00	7,20	9,22	6,78	8,86
16	1,2	51,50	10,30	18,80	60,50	12,10	21,32	11,20	20,06
30	0,6	81,10	16,22	35,02	83,20	16,64	37,96	16,43	36,49
50	0,3	226,90	45,38	80,40	225,00	45,00	82,96	45,19	81,68
100	0,15	75,60	15,12	95,52	66,50	13,30	96,26	14,21	95,89
FUNDO		22,40	4,48	100,00	18,70	3,74	100,00	4,11	100,00
TOTAL		500,00	100,00		500,00	100,00		100,00	
TOTAL DA AMOSTRA		500,00	100,00		500,00	100,00		100,00	
DIF. DA AMOSTRA		-	-		-	-		-	
MÓDULO DE FINURA		2,40			2,50			2,45	

Gráfico 8: Curva Granulométrica da Areia

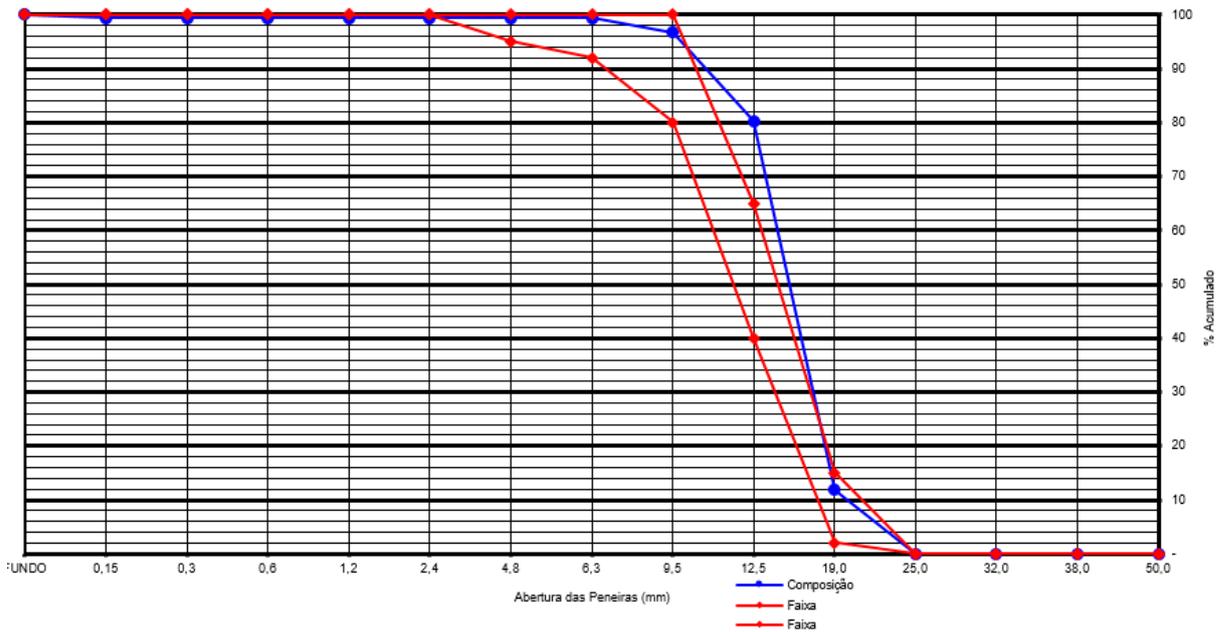


A brita foi caracterizada como 1, teve diâmetro máximo de 25mm, visto que mais que 5% do material foi retido na peneira de 19mm. Teve acúmulo significativo nas peneiras 12,5 e 9,5mm, correspondendo a 85,33% de material retido acumulado, conforme resultados apresentados na tabela 21 e gráfico 9.

Tabela 20: Determinação da Composição Granulométrica da Brita

PENEIRAS		1ª DETERMINAÇÃO			2ª DETERMINAÇÃO			MÉDIA % RETIDA	
Pol / Nº	(mm)	MASSA	% RETIDA		MASSA	% RETIDA		Simples	Acumul.
		RETIDA (g)	Simples	Acumul.	RETIDA (g)	Simples	Acumul.		
2	50,00	-	-	-	-	-	-	-	-
1 1/2	38,00	-	-	-	-	-	-	-	-
1 1/4	32,00	-	-	-	-	-	-	-	-
	25,00	-	-	-	-	-	-	-	-
	19,00	481,50	9,63	9,63	706,80	14,14	14,14	11,88	11,88
	12,50	3.308,10	66,16	66,16	3.537,00	70,74	84,88	68,45	80,33
	9,50	958,50	19,17	85,33	679,80	13,60	98,47	16,38	96,72
	6,30	189,30	3,79	89,12	72,30	1,45	99,92	2,62	99,33
	4,80	3,88	0,08	89,20	3,70	0,07	99,99	0,08	99,41
	2,40	-	-	89,20	-	-	99,99	-	99,41
	1,20	-	-	89,20	-	-	99,99	-	99,41
	0,60	-	-	89,20	-	-	99,99	-	99,41
	0,30	-	-	89,20	-	-	99,99	-	99,41
	0,15	-	-	89,20	-	-	99,99	-	99,41
FUNDO		58,72	1,17	90,37	0,40	0,01	100,00	0,59	100,00
TOTAL		5.000,00	100,00		5.000,00	100,00		100,00	
TOTAL DA AMOSTRA		5.000,00	100,00		5.000,00	100,00		100,00	
DIF. DA AMOSTRA		-	-		-	-		-	
MÓDULO DE FINURA				6,30			7,13		6,71

Gráfico 9: Curva Granulométrica da Brita



6.5.6 – Teores de Materiais Finos do Agregado Miúdo

Foi realizado ensaio em 500g de material e foi determinado o teor de 1,38% na primeira amostra, 1,36% na segunda amostra, determinando uma média de 1,37%.

6.5.7 – Produção do Concreto

Após realização dos estudos dos materiais foi definido o traço referência, posteriormente definido os teores de substituição de 5% (TR+5%) e 10% (TR+10%) de cimento *Portland* por cinza de lodo de ETE, conforme Gráfico 10.

Gráfico 10: Consumo de Materiais para 1m³ de concreto em quilograma

Traço	Cimento	CLETE	Ag. Graúdo	Ag. Miúdo	Água
TR	371,15	0	959	844,80	193
TR+5%	352,59	18,56	959	844,80	193
TR+10%	334,03	37,12	959	844,80	193

Foram mantidos os teores de agregados (miúdos e graúdos) e água, sendo substituído apenas o cimento. Para verificar a aceitabilidade do traço com a devida substituição foi realizado o ensaio de abatimento, onde os dois traços de substituição TR+5% (9,50cm) e TR+10% (9,00cm).

Foi utilizado para o ensaio de compressão axial corpos de provas com diâmetro de 10cm e altura de 20cm, e para o ensaio de tração diametral corpos de prova com diâmetro de 15cm e altura de 30cm, determinando a seguinte quantidade.

Gráfico 11: Consumo de Materiais para os Ensaios

COMPRESSÃO AXIAL					
Corpo de Provas					
Dimensão = 10X10X20cm					
Volume = 0,0016 m ³					
Idades de Rompimento = 3, 7, 14 e 28 dias (4 amostras)					
Nº de CP's = 3 unid					
Consumo em quilograma					
Traço	Cimento	CLETE	Ag. Graúdo	Ag. Miúdo	Água
TR	7,126	0	18,413	16,22	3,706
TR+5%	6,77	0,356	18,413	16,22	3,706
TR+10%	6,413	0,713	18,413	16,22	3,706
Total	20,309	1,069	55,239	48,66	11,118
Total + 20%	24,37	1,28	66,29	58,39	13,34
TRAÇÃO DIAMETRAL					
Corpo de Provas					
Dimensão = 15X15X30cm					
Volume = 0,0053 m ³					
Idades de Rompimento = 28 dias (1 amostra)					
Nº de CP's = 2 unid					
Consumo em quilograma					
Traço	Cimento	CLETE	Ag. Graúdo	Ag. Miúdo	Água
TR	3,934	0	10,165	8,955	2,046
TR+5%	3,737	0,197	10,165	8,955	2,046
TR+10%	3,541	0,393	10,165	8,955	2,046
Total	11,212	0,59	30,495	26,865	6,138
Total + 20%	13,45	0,71	36,59	32,24	7,37
TOTAL DE MATERIAL					
Consumo em quilograma					
Traço	Cimento	CLETE	Ag. Graúdo	Ag. Miúdo	Água
TR	11,06	0	28,578	25,175	5,752
TR+5%	10,507	0,553	28,578	25,175	5,752
TR+10%	9,954	1,106	28,578	25,175	5,752
Total	31,521	1,659	85,734	75,525	17,256
Total + 20%	37,83	1,99	102,88	90,63	20,71

Foi inserido na betoneira agregado graúdo e 50% da água durante um minuto, posteriormente adicionado o cimento *Portland* por mais um minuto, por fim, foram adicionados o agregado miúdo e o restante da água.

6.5.8 – Abatimento do Concreto e Cura

Conforme descrito na metodologia, o abatimento definido para o projeto foi de 10cm com variação de 2cm para mais ou para menos, sendo aceito o concreto que obteve abatimento entre 8 a 12cm. Observa que o concreto perdeu abatimento conforme aumentou a quantidade de finos.

Tabela 21: Abatimento do Concreto

Traço	Abatimento (cm)
TR	10,80
TR+5%	9,50
TR+10%	9,00

Figura 24: Abatimento TR



Figura 25: Abatimento TR+5%



A cura foi do tipo submersa após ser retirado da forma, conforme a Figura 26, e retirado do tanque para ser determinado as propriedades mecânicas 30 minutos antes do ensaio.

Figura 26: Corpos de Prova no Tanque de Cura



3.5.9 – Compressão Axial

As tabelas abaixo apresentam o tratamento estatístico dos dados das amostras. Os resultados foram apresentados por datas de 3 dias (tabela 23), 7 dias (tabela 24), 14 dias (tabela 25) e 28 dias (tabela 26).

Tabela 22: Resistência à Compressão Axial aos 3 dias

Traço	Abatimento (cm)	Resistência a Compressão Axial (MPa) - 3 DIAS				
		CP 1	CP 2	Média	Desvio Padrão	Variância
TR	10,80	19,80	19,70	19,75	0,07	0,01
TR+5%	9,50	25,50	23,80	24,65	1,20	1,45
TR+10%	9,00	17,80	16,90	17,35	0,64	0,41

Tabela 23: Resistência à Compressão Axial aos 7 dias

Traço	Abatimento (cm)	Resistência a Compressão Axial (MPa) - 7 DIAS				
		CP 1	CP 2	Média	Desvio Padrão	Variância
TR	10,80	27,20	23,20	25,20	2,83	8,00
TR+5%	9,50	24,40	28,20	26,30	2,69	7,22
TR+10%	9,00	31,60	26,40	29,00	3,68	13,52

Tabela 24: Resistência à Compressão Axial aos 14 dias

Traço	Abatimento (cm)	Resistência a Compressão Axial (MPa) - 14 DIAS				
		CP 1	CP 2	Média	Desvio Padrão	Variância
TR	10,80	31,70	32,20	31,95	0,35	0,13
TR+5%	9,50	27,50	25,40	26,45	1,48	2,21
TR+10%	9,00	29,70	32,20	30,95	1,77	3,13

Tabela 25: Resistência à Compressão Axial aos 28 dias

Traço	Abatimento (cm)	Resistência a Compressão Axial (MPa) - 28 DIAS				
		CP 1	CP 2	Média	Desvio Padrão	Variância
TR	10,80	40,10	31,70	35,90	5,94	35,28
TR+5%	9,50	35,40	33,10	34,25	1,63	2,64
TR+10%	9,00	34,00	29,30	31,65	3,32	11,05

Analisando os dados individualmente, podemos observar que o concreto teve uma evolução da resistência contínua até os 28 dias. O traço com adição de 5% (TR 5%) obteve a maior resistência inicial, porém não teve grande evolução até o 14º dia. O traço com adição de 10% obteve menor resistência inicial e final.

O gráfico 12, 13 e 14 apresentam a evolução por idade de cada traço e seus dados estatísticos da linha de tendência, neste caso exponencial, visto que melhor representou a amostra.

Gráfico 12: Gráficos da evolução da resistência à compressão traço referência

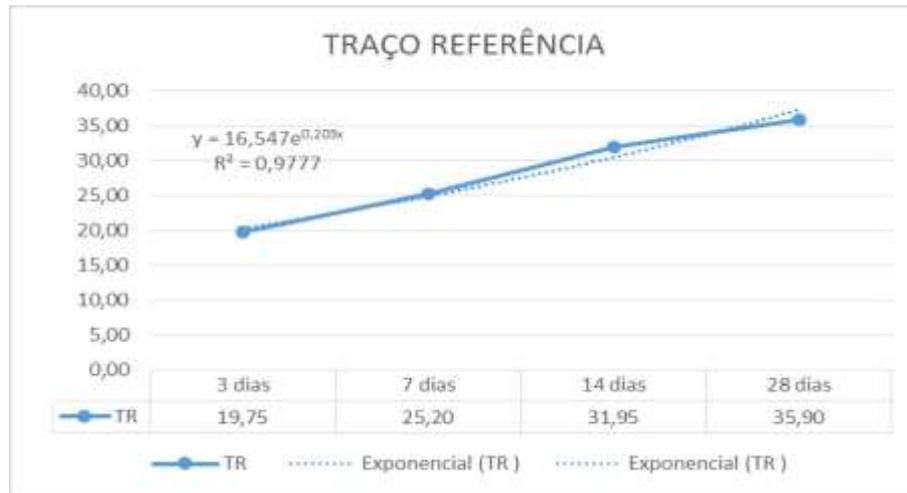


Gráfico 13: Gráficos da evolução da resistência à compressão traço 5%

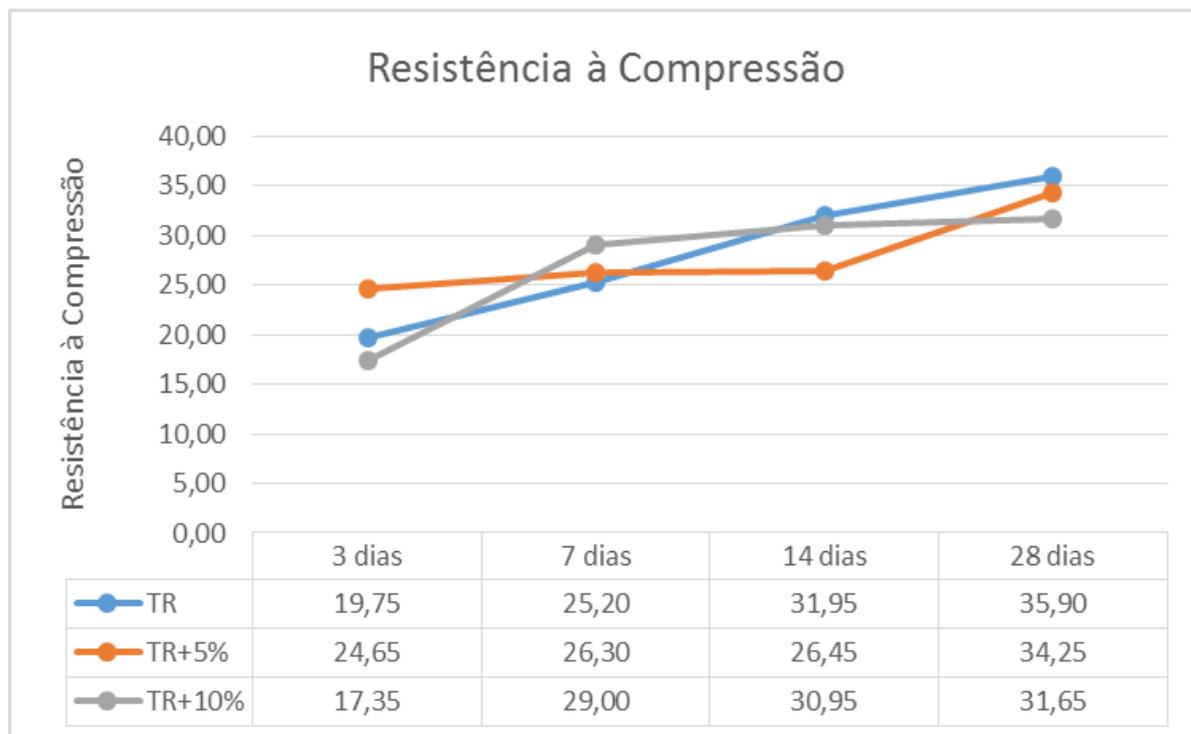


Gráfico 14: Gráficos da evolução da resistência à compressão traço 10%



Analisando os dados das médias obtidas resistência à compressão axial, podemos observar que o traço TR+5% perdeu 4,60% do traço referência, o traço TR+10% perdeu 11,83% da resistência obtida no traço referência.

Gráfico 15: Gráfico comparativo da evolução da resistência



O gráfico 15 apresenta uma evolução comparativa, podendo ser observado que o traço referência apresentou melhor resultado final, porém todos os traços obtiveram valores superiores ao f_{cj} 31,60 MPa, sendo rompidos conforme Figura 27.

Figura 27: Ensaio do Traço Referência à Compressão



Concreto Referência

Concreto +5% CLETE

Concreto +10% CLETE

6.5.10 – Tração por Compressão Diametral

Conforme os dados obtidos no laboratório podemos observar que a adição da cinza de lodo de ETE proporcionou evolução na tração no traço TR+10%, já o traço TR+5% obteve resultado inferior ao traço referência, conforme tabela 27.

Tabela 26: Ensaio de Tração à Compressão

- Tração Referência

Corpo de Prova	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Carga de Ruptura (N)	Resistência à Compressão Diametral (MPa)
CP 1	150.00	300.00	198063.48	2.80
CP 2	150.00	300.00	277373.94	3.92
Número CPs	2	2	2	2
Média	150.0	300.0	237700	3.363
Desv.Padrão	0.0000	0.0000	56080	0.7934
Coef.Var.(%)	0.0000	0.0000	23.59	23.59
Mínimo	150.0	300.0	198100	2.802
Máximo	150.0	300.0	277400	3.924

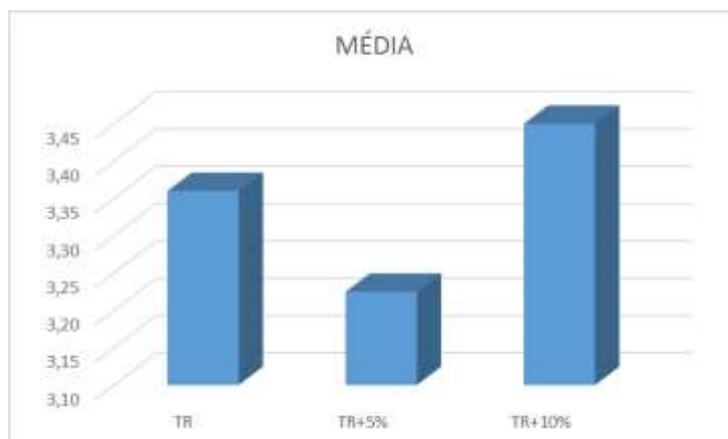
- Traço TR+5%

Corpo de Prova	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Carga de Ruptura (N)	Resistência à Compressão Diametral (MPa)
CP 1	150.00	300.00	236974.52	3.35
CP 2	150.00	300.00	218794.77	3.10
Número CPs	2	2	2	2
Média	150.0	300.0	227900	3.224
Desv.Padrão	0.0000	0.0000	12860	0.1819
Coef.Var.(%)	0.0000	0.0000	5.641	5.641
Mínimo	150.0	300.0	218800	3.095
Máximo	150.0	300.0	237000	3.353

- Traço TR+10%

Corpo de Prova	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Carga de Ruptura (N)	Resistência à Compressão Diametral (MPa)
CP 1	150.00	300.00	235805.05	3.34
CP 2	150.00	300.00	251964.81	3.56
Número CPs	2	2	2	2
Média	150.0	300.0	243900	3.450
Desv.Padrão	0.0000	0.0000	11430	0.1617
Coef.Var.(%)	0.0000	0.0000	4.685	4.685
Mínimo	150.0	300.0	235800	3.336
Máximo	150.0	300.0	252000	3.565

Gráfico 16: Gráfico comparativo da resistência a tração



A Figura 28 demonstra o ensaio realizado com o corpo de prova 15cm de diâmetro e 30cm de altura, sendo rompidos na posição diametral.

Figura 28: Corpo de prova submetido ao ensaio de compressão diametral



6.6 – Estudo de Módulo de Elasticidade

Os estudos de elasticidade foram realizados no dia 09 de março de 2019, 28 dias após a moldagem dos corpos de prova, sendo utilizado o mesmo traço e materiais do ensaio a compressão. Foram realizados na Controle Engenharia Laboratório de Concreto em Palmas-TO, realizando ensaios Estáticos para Determinação do Módulo de Elasticidade.

Devido a nova dosagem os concretos obtiveram as seguintes resistência a compressão axial: Concreto Referência 27,60MPa; Concreto 5% de CLETE 24,60MPa e Concreto com 10% de CLETE 35,60MPa.

Figura 29: Corpos de prova submetido ao ensaio módulo de elasticidade



Concreto Referência

Concreto com 5% de CLETE

Concreto com 10% de CLETE

Os módulos de elasticidade foram os seguintes: Concreto Referência 25,30GPa (tabela 28); Concreto 5% de CLETE 23,00GPa (tabela 29) e Concreto com 10% de CLETE 30,50GPa (tabela 30). Foram obtidos através da média de 2 corpos de prova.

Tabela 27: Módulo de Elasticidade do Concreto Referência

Resultado do módulo de elasticidade:				TRAÇO REFERÊNCIA
CP	Data da moldagem	Data do ensaio	Idade dos CPs (dias)	Módulo de Elasticidade (GPa)
1	09/02/2019	09/03/2019	28	25,7
2	09/02/2019	09/03/2019	28	24,8
Média				25,3

Fonte: Autor (2019)

Tabela 28: Módulo de Elasticidade do Concreto com 5% de CLETE

Resultado do módulo de elasticidade:				TRAÇO 5%
CP	Data da moldagem	Data do ensaio	Idade dos CPs (dias)	Módulo de Elasticidade (GPa)
1	09/02/2019	09/03/2019	28	23,8
2	09/02/2019	09/03/2019	28	22,2
Média				23,0

Fonte: Autor (2019)

Tabela 29: Módulo de Elasticidade do Concreto com 10% de CLETE

Resultado do módulo de elasticidade:				TRAÇO 10%
CP	Data da moldagem	Data do ensaio	Idade dos CPs (dias)	Módulo de Elasticidade (GPa)
1	09/02/2019	09/03/2019	28	30,5
2	09/02/2019	09/03/2019	28	30,5
Média				30,5

Fonte: Autor (2019)

Nota-se que seguindo as descrições da ABNT NBR 8522:2008, que relata que os concretos estruturais devem apresentar resistências entre 20 GPa e 40 GPa para intervalos de resistência a compressão entre 20 MPa e 40 MPa, os resultados dos ensaios são satisfatórios.

Os resultados individuais dos CP's condizem com o descrito no Referencial Teórico, onde as diferenças entre as amostras foram inferiores a 20%.

6.7 – Reatividade Pozolânica da CLETE

O ensaio foi desenvolvido na USP Pirassununga, através de condutibilidade elétrica para determinar a reatividade pozolânica, conforme Figura 30:

Figura 30: Ensaio de reatividade pozolânica



Fonte: Autor (2019)

Os resultados apresentados para amostra de cinza apresenta a perda da reatividade da condutibilidade elétrica do sistema com cinza. Foram apresentados os tempos de 100, 10000 e 85000 e 92540 segundos.

O tempo de verificação de 85000 segundos foi o mesmo adotado pela metodologia do trabalho, visto que o material continua perdendo condutibilidade após o tempo de 10000 segundos, sendo os resultados apresentados na tabela 31.

Tabela 30: Reatividade por condutibilidade elétrica da CLETE

Tempo (s)	mS/cm
100	1,97
1000	2,12
10000	2,15
25000	2,17
50000	2,22
85000	2,28
92540	2,30

Fonte: Autor (2019)

A cinza de lodo de ETE (CLETE) apresentou perda de condutibilidade de 13,59% entre o tempo de 100 a 85000 segundos, similar ao trabalho de Rodrigues (2012) que apresentou perda de 15,47% para a primeira amostra, conforme tabela 32.

Tabela 31: Reatividade por condutibilidade elétrica da Cinza de Cana de Açúcar

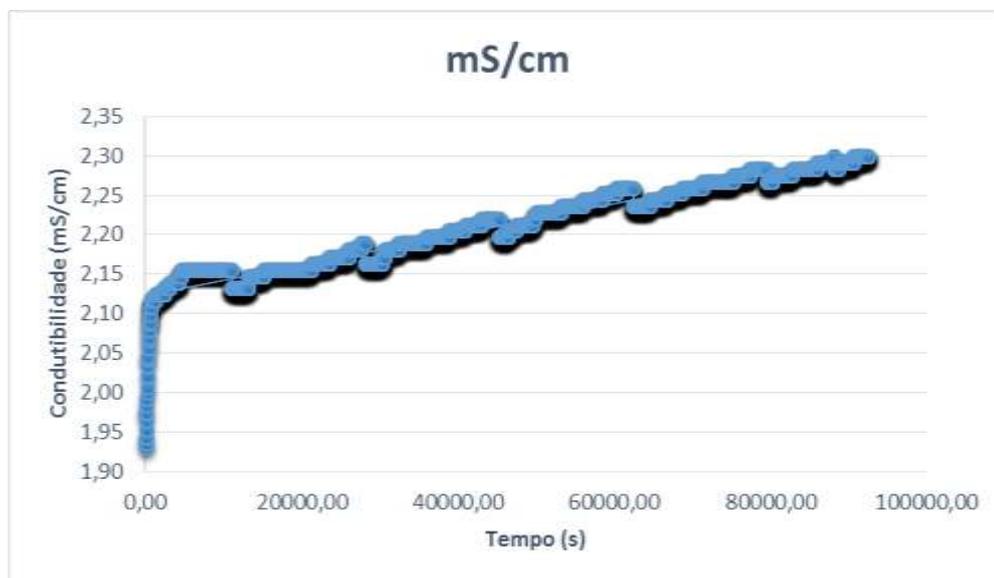
Amostras/Tempo	100 s	10000 s	85000 s
	Condutividade elétrica (mS/cm)		
CPCA600+ H ₂ O	2,35	2,58	2,78
CPCA700+ H ₂ O	1,92	2,21	2,39
CPCA800+ H ₂ O	1,72	1,81	1,77
CPCA900+ H ₂ O	1,29	1,57	1,62

Fonte: Rodrigues, 2012

Segundo Rodrigues (2012) os primeiros 100 segundos o material pozolânico apresenta perda de reatividade inferior a 10%, visto que o material está sendo dissolvido na solução, no caso da CLETE a perda nos primeiros 100 segundos representou 8,37%.

Os resultados que apresentam maiores perdas relativas de condutibilidade elétrica indicam uma maior reatividade, visto que com a diminuição da condutibilidade elétrica indica uma possível formação de CSH entre os produtos de hidratação.

Gráfico 17: Condutibilidade da CLETE



Fonte: Autor (2019)

Analisando a curva do gráfico 17, que apresenta a condutibilidade da CLETE, podemos observar que não houve estabilização dos dados, portanto, para obter maiores conclusões sobre a cinza faz-se necessário um tempo maior de avaliação.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Produção do Lodo na ETE Norte em Palmas-TO

A estação objeto de estudo está trabalhando com a capacidade máxima de tratamento de efluente, onde já existe projeto para ampliação do sistema para atender a demanda. A ampliação do sistema irá gerar maior quantidade de lodo, além do sistema de tratamento com UASB gera maior volume de lodo durante o processo.

O lodo existente está sendo armazenados em *bag's*, porém não existe disposição final para os resíduos sólidos. Conforme apresentado neste trabalho o processo de desidratação diminui 54,44% do volume, e no processo de incineração esse volume cai para aproximadamente 1%.

O lodo apresenta teores de quartzo, hematita, magnetita, goethita. caolinitaanatásio e muscovita em sua análise química.

A proposta de incineração possibilitará a empresa uma redução significativa no gasto na aquisição dos *bag's*, diminuição da área destinada a armazenamento de resíduos, utilização do lodo seco como material combustível na geração de energia elétrica ou disponibiliza-lo para processos industriais que queimam o material.

A visão sistêmica de geração do lodo, aproveitamento do poder calorífico, geração de energia e utilização da cinza como material pozolânico na composição do concreto de cimento *Portland* gera benefício a todos os atores envolvidos no cenário.

Estudo da Cinza do Lodo da ETE Norte

Foram identificaram na amostra do lodo os seguintes minerais: caulinita, magnetita, mica, albita, quartzo, calcita e dolomita, e no processo de queima apresentado 63% de materiais cristalinos.

Referente seu poder calorífico, o resultado de 8,512 J/g é satisfatório, com valores superiores a outros resíduos, podendo ser utilizado como material para combustão em processos industriais ou produção de energia em termoeleétrica.

Conforme análise química dos compostos o material estudado tem 67,50% da somatória dos compostos de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃. Segundo Mehta e Monteiro (2008) esses teores altos são características pozolanicos.

A cinza apresenta massa específica (2.985kg/dm^3) superior as massas dos agregados, e finura abaixo de $150\ \mu\text{m}$, possibilitando ao concreto uma maior massa específica tornando mais denso devido ao empacotamento das partículas.

Referente a reatividade pozolânica, o ensaio de condutibilidade demonstrou que a cinza do lodo da ETE Norte de Palmas-TO apresenta pouca reatividade, sendo considerado por Mehta e Monteiro (2008) como adição pozolânica pouco reativa.

Estudo comparativo entre o concreto referência e os concretos com substituição de teores

Conforme aumentou o teor de CLETE houve diminuição do abatimento do concreto, onde o TR+10% teve 9cm de abatimento, 1,80cm menor que o traço referência.

O traço referência e os traços com substituições parciais de cimento com teores de 5 e 10% apresentaram resultados satisfatórios, visto que seus resultados foram superiores ao f_{cj} proposto na dosagem. Onde aos 28 dias foram determinados 35,90 MPa para o traço referência, 34,25 MPa para TR+5% e 31,65 MPa para o TR+10%.

Para o ensaio de tração à compressão a dosagem Tr+10% apresentou melhor resultado, com 3,45MPa de média.

O Módulo de elasticidade foi realizado com o mesmo traço e materiais, porém a dosagem foi realizada posteriormente e no período chuvoso, podendo a umidade da areia ter prejudicado o resultado, visto que as resistências à compressão foram divergentes da determinada no primeiro ensaio. Mas os resultados do módulo de elasticidade tiveram valores dentro do esperado, seguindo a proporção referente ao ensaio de compressão.

Trabalhos futuros

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, puderam ser identificadas algumas possibilidades de continuação a partir de pesquisas futuras as quais incluem:

- a) Estudo do aproveitamento energético na geração de energia em termoelétricas;
- b) Estudo econômico da utilização da cinza em serviços de concreto;
- c) Estudo comparativo da cinza de lodo de ETE com outras cinzas de resíduos na produção de concreto de alta resistência;
- d) Estudo de queima com outras temperaturas e realizar correlação estatística

REFERÊNCIAS

ABES. Ranking da Abes de Universalização do Saneamento 2018. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, 2018. 158 p.

ALMEIDA, Verediana Fioretin; **ALMEIDA,** Renato Rosa; **GOMES,** Nayane Roda; **CAETANO,** Lucas Rodrigues; **CHOZE,** Rafael. **Caracterização química como alternativa de destinação ao uso agrícola do lodo da estação de tratamento de esgoto do Município de Anápolis, Estado de Goiás, Brasil.** Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade. ISSN 2359-1412/RBGAS-2017-0011/4/7/9/87. <https://dx.doi.org/10.21438/rbgas.040709>

ANDREOLI, Cleverson Vitório. **Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários, Inclusive com a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos.** 1ª Edição PROSAB. Curitiba – PR, 2001.

ARRUDA, Angela Maria. **Módulo de Elasticidade de concretos produzidos com formações rochosas do triângulo mineiro.** Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Uberlândia. 166 páginas, Uberlândia-MG, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

_____. **NBR 10004:** informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10520:** informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 10719:** informação e documentação: relatório técnico e/ou científico: apresentação. Rio de Janeiro, 2011a.

_____. **NBR 11768:** aditivos para concreto de cimento, Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 12653:** materiais pozolânicos, Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 12655:** concreto de cimento Portland – preparo, controle, recebimento e aceitação, Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 14724:** informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro, 2011b.

_____. **NBR 15287**: informação e documentação: projeto de pesquisa: apresentação. Rio de Janeiro, 2011c.

_____. **NBR 6027**: informação e documentação: sumário: apresentação. Rio de Janeiro, 2003c.

_____. **NBR 6028**: informação e documentação: resumo: apresentação. Rio de Janeiro, 2003d.

_____. **NBR 6118**: informação e documentação: resumo: apresentação. Rio de Janeiro, 2014.

AZEREDO, Hélio Alves. O edifício até a sua cobertura. 2ª Edição. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo-SP, 1997.

BAUER, L. A. Falcão. Materiais de Construção. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

BERNARDES, Ricardo Silveira. Esgotos combinados e controle da poluição: estratégias para planejamento do tratamento da mistura de esgotos sanitários e águas pluviais. Caixa Economica Federal. Brasília, 2004.

BILESKY, Pedro; HELENE, Paulo; NETO, Cláudio Sbringhi; CASTRO, Alessandra Lorenzetti. Influência da Natureza Petrográfica do Agregado Graúdo no Módulo de Elasticidade do Concreto. Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2018, 19 páginas, IBRACON, Foz do Iguaçu-SC, 2018

BITTENCOURT, Simone; MONTE, Beatriz; AISSE, Miguel Mansur. Regulamentação brasileira quanto à frequência de monitoramento de lodo de esgoto para uso agrícola: estudo de caso do estado do Paraná. Revista DAE, maio de 2017. Curitiba-PR.

BORGES, F., SELLIN, N., MEDEIROS, S. H. W. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e Industrial como biomassa na geração de energia. Ciência & Engenharia. v. 17. 2008; p. 27-32.

BRASIL, Fundação Nacional de Saúde. Manual de Saneamento. Imprensa no Brasil, 3ª Edição. Brasília-DF, 2004.

BRASIL. Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasil, 2011.

BRASIL. Lei 6.938 de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências, 1981.

CASTELLANI, G.A; GUIMARÃES, P.V.C; FAZZAN, J.V. Valorização da Cinza do Bagaço da Cana de Açúcar para a produção de misturas cimentícias. Disponível em: http://amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/view/1474/1496, acessado em 17/07/2017.

CASTRO, Alfred Luciano F. Gomes, SILVA, Orlando R., SCALIZE, Paulo S. Cenário Da Disposição Do Lodo De Esgoto: Uma Revisão das Publicações ocorridas no Brasil de 2004 a 2014. Artigo Científico da Universidade Federal de Goiás. Goiânia-GO, 2015.

CASTRO, A. L. Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho. 334p. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais – INTERUNIDADES. Universidade de São Paulo. São Carlos-SP, 2007.

CHERNICHARO, CARLOS AUGUSTO LEMOS. Pós Tratamento de efluentes de reatores. Projeto PROSAB isbn:85-901640-2-0. Belo Horizonte-MG, 2001

COELHO, P. E. O Gerenciamento de Resíduos Sólidos de Construção e Demolição no Município de Palmas, Tocantins. Revista engenharia. São Paulo, ed. 575/2006. p. 75-79. Disponível em: < http://www.brasilengenharia.com.br/ed/575/Eng._Ambiental.pdf>. Acesso em: 01 dezembro 2016.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. RESOLUÇÃO Nº 307 de 05 de julho de 2002. Publicada no DOU nº 136, de 17/07/2002, páginas 95-96. Diretrizes, Critérios e Procedimentos para Gestão dos Resíduos da Construção Civil. Brasil, 2002.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **RESOLUÇÃO Nº 375** de 29 de agosto de 2006, 32 páginas. Critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Brasil, 2006

DONATO, Cláudio J.; **TAJENAKA**, Edilene M. M. **O Aproveitamento de Resíduos de Madeira para o Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/view/1458/1480, acessado em 17/07/2017.

ESTOLANO, Victo; **FUCALE**, Stela; **VIEIRA**, José Orlando; **GABRIEL**, Diego; **ALENCAR**, Yuri. **Avaliação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico de concreto produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos de pré-fabricados de concreto**. Revista Matéria ISSN 1517-7076 artigo e-11974,2018. 13 páginas. 10.1590/S1517-707620170001.0310. 2018

FARIA, Pedro H; **SANTOS**, Harlen Inácio. **Uso do lodo primário de esgoto urbano de ETE's na recuperação de áreas degradadas**. Universidade Católica de Goiás. Goiânia-GO, 2007.

FONTES, C.M.A; **TOLEDO**, R.D.F; **BARBOSA**, M.C. **Cinza de lodo de esgoto (CLE) em concretos de alto desempenho: caracterização e aplicação**. Disponível em: <http://revistas.ibracon.org.br/index.php/riem/article/view/744/817>, acessado em 21/06/2017.

FONTES, Cintia Maria Atiani. **Potencialidades da cinza de lodo de estação de tratamento de esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento Portland**. Dissertação de Mestrado de Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro-RJ, 2003.

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Tecnologia do Concreto Estrutural**. 2ª Edição da Editora PINI. São Paulo – SP, 2012.

GARCIA, Maria B. dos Santos; **NETO**, João Lanzellotti; **MENDES**, Jaqueline Guimarães; **XERFAN**, Flávia Miranda de Freitas. **VASCONCELLOS**, Carlos Alexandre Bastos; **FRIEDE**, Roy Reis. **Resíduos Sólidos: Responsabilidade Compartilhada**. Revista Semioses volume 09, número 02, páginas 77-91. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.15202/1981996X.2015v9n2p77>

HIRATA, Delmar. **Avaliação do Potencial de Reciclagem de Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto na Obtenção de Materiais Cerâmicos**. Dissertação de Mestrado da Universidade Nove de Julho. São Paulo, 2015.

IBRACON, Revista de Estruturas e Materiais. **Sewage Sludge Ash (Ssa) In High Performance Concrete: Characterization And Application**. Volume 09, nº 06 de 2016.

KANNING, Rodrigo César. **Utilização da Cinza de Folha de Bananeira como Adição em Argamassa de Cimento Portland**. Disponível em: <http://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/30448/R%20-%20T%20-%20RODRIGO%20CEZAR%20KANNING.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, acessado em 17/07/2017.

LIMA, Jeffersson Fernandes de. **Avaliação da Incorporação de Cinzas de Lodo de Esgoto como Adição Mineral em Concretos de Cimento Portland**. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal-RN, 2013.

MEHTA, P. Kumar; **MONTEIRO**, Paulo J. M. **Concreto – microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª Edição Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo – SP, 2008.

MOL, Erick Roberto; **DOLL**, Maria Magdalena Ribas. **Caracterização de resíduo de uma estação de tratamento de esgoto para a produção de concretos com cimento Portland**. XXV Encontro Anual de Iniciação Científica. Ponta Grossa-PR, 2016.

NASCIMENTO, J.E; SANTOS, H.M; NETO, M.F; SILVA, J.C. Avaliação Das Propriedades Dos Concretos Nos Estados Fresco E Endurecido Após A Adição De Cinza De Madeira. Disponível em: <https://revistacientefico.devrybrasil.edu.br/cientefico/article/view/260/307>, acessado em 21/06/2017.

NETTO, Rafael Mantuano. Materiais Pozolânicos. Dissertação de Pós Graduação da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG, 2006.

NEVILLE, A. M.. Tecnologia do Concreto. Bookman Editora Ltda, 2013

NUNES, Bruno H.; CABRINI, Sérgio L. Aspectos Positivos da Utilização da Reciclagem Energética como uma Ferramenta Conjugada a Estrutura de Gestão de Resíduos Sólidos no Brasil. Disponível em http://fatec.edu.br/revista_ojs/index.php/RTecFatecAM/article/view/39/48, acessado em 21/06/2017.

NUNES, Fábio Wendell da Graça. Resistência e Módulo de Elasticidade de Concretos Usados no Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 126 páginas. Rio de Janeiro-RJ, 2005.

PEDROZA, Marcelo Mendes. Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo. Tese de Doutorado da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.

PEREIRA, A.M; SILVA, C.A.R; QUEIROZ, D.C.A; MORAES, M.J.B; MELGES, J.L.P; TASHIMA, M.M; AKASAKI; J.L. Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/129513/S1517-70762015000100021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, acessado em 17/07/2017.

POLI, D. C.; ZANCHETA , M. N.; BOARI, Z.M; MELDONIAN, N.L; MOURA, C.L; JIURGIU, P.A. Uma Avaliação das Metodologias para Determinação do Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos. Disponível em

<http://www.pgsskroton.com.br/seer/index.php/rcext/article/view/2217/2123>, acessado em 21/06/2017.

REZENDE, M.F; MACHADO, F.C; GOUVEIA, A.M; BEZERRA, A.C; GRILLO, R.G; ORTIGARA, Y.V. **Substituição parcial do cimento Portland pela cinza de bagaço de cana-de-açúcar em habitações de interesse social.** Disponível em: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/914/759>, acessado em 21/06/2017

RODRIGUES, Michelle Santos. **Avaliação de cinzas de palha de cana-de-açúcar e sua utilização como adição mineral em matrizes cimentícias.** Tese de Doutorado da Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Agrícola. 168 páginas, CAMPINAS-SP, 2012.

ROSA, Daniel B.; DE PAULA, Durval R. Jr. **Disposição de Lodo de Esgoto no Solo: Estudo de Viabilidade.** BioEng, Edição maio/agosto. Capinas-SP, 2009.

SAMPAIO, Z.L.M; SOUZA, P.A.B.F; GOUVEIA, B.G. **Análise da influência das cinzas do bagaço de cana de açúcar no comportamento mecânico de concretos.** Disponível em: <http://www.revistas.ibracon.org.br/index.php/riem/article/view/414/548>, acessado em 17/07/2017.

SILVA, Joice Moura da; VIER, Lucas Carvalho; ROSSI, Camila Taciane; SANTOS, Rafael Reinheimer dos; RODRIGUES, Maruo. **Alternativas de Destinação e Reuso Ambientalmente Corretos e Economicamente Viáveis para o Lodo das ETES no Estado do Rio Grande do Sul.** VI Fórum Sustentabilidade Corede Alto Jacuí. Cruz Alta-RS, 2017.

SIVEIRA, Cristiane M. da S. **Avaliação do Potencial Pozolânico da Cinza de Lodo de Águas Residuárias por Meio de Técnicas Instrumentais.** Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/111144/000797135.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, acessado em 21/06/2017.

SOUZA, Marina Moura; **SILVA**, Dimas Agostinho; **ROCHADELLI**, Roberto; **SANTOS**, Rosimeire Cavalcante. **Estimativa de poder calorífico e caracterização para o uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *pinus taeda***. Revista Floresta, v.42, n.2, p.325-334, abr./jun.2012. Curitiba-PR, 2012.

VIEIRA, Gláucia E. G; **NUNES**, Abimael P.; **TEIXEIRA**, Luana F.; **COLEN**, Aymara G. N. **Biomassa: uma visão dos processos de pirólise**. Artigo Científico, Universidade Federal do Tocantins. Palmas-TO, 2014.

VON SPERLING, MARCOS. Introdução à Qualidade das águas e ao tratamento de Esgoto – Volume 1. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais. 2ª Edição. Belo Horizonte – MG, 1996-A

VON SPERLING, MARCOS. Princípios Básicos do Tratamento de Esgotos – Volume 2. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais. 2ª Edição. Belo Horizonte – MG, 1996-B

VON SPERLING, MARCOS. Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final – Volume 6. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais. 2ª Edição. Belo Horizonte – MG, 1996-C

ANEXOS