

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS**

KLEBER GOMES RAMIREZ

**VIABILIDADE DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA) NA CONFECÇÃO DE
CONCRETOS**

DISSERTAÇÃO

MEDIANEIRA

2015

KLEBER GOMES RAMIREZ

**VIABILIDADE DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA) NA CONFECÇÃO DE
CONCRETOS**

Dissertação apresentada como requisito final para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais, do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais – PPGTAMB – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Medianeira.

Discente: Kleber Gomes Ramirez

Orientadora: Dra. Edna Possan

Co-orientador: Dr. Paulo Rodrigo S. Bittencourt

MEDIANEIRA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

R173v Ramirez, Kleber Gomes

Viabilidade do aproveitamento de resíduo de estação de tratamento de água (ETA) na confecção de concretos/ Kleber Gomes Ramirez – 2015.

132 f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Dra. Edna Possan

Co-orientador: Dr. Paulo Rodrigo S. Bittencourt

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais. Medianeira, 2015.

Inclui bibliografias.

1. Concreto. 2. Tratamento de água. 3. Resíduo. 4. Meio Ambiente – Dissertações. I. Possan, Edna, orient. II. Bittencourt, Paulo Rodrigo S., co-orient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambientais. IV. Título.

CDD: 628

Biblioteca Câmpus Medianeira
Fernanda Cristina Gazolla Bem dos Santos 9/1735



TERMO DE APROVAÇÃO

VIABILIDADE DO APROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA) NA CONFECÇÃO DE CONCRETOS

Por

KLEBER GOMES RAMIREZ

Essa dissertação foi apresentada às 09 horas, do dia quatro de setembro de dois mil e quinze, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais, Linha de Pesquisa Tecnologias de Tratamento e Valorização de Resíduos, no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Dra. Edna Possan (Orientadora – PPGTAMB)

Prof. Dr. Paulo Bittencourt (Co-orientador – PPGTAMB)

Prof. Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior (Membro Externo – UNILA)

Dr. Étore Funchal de Faria (Membro Externo – ITAIPU BINACIONAL)

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa

Dedico este trabalho a minha família, em especial a meus pais, pela paciência, dedicação e todo o esforço para compreender essa fase tão importante em minha vida. E claro, a ela, Daiane Correa, pela atenção, apoio, carinho e amor em todo momento.

AGRADECIMENTOS

São vários os agradecimentos. Primeiramente a Deus pelo dom da vida, pela fé e perseverança para vencer os obstáculos e à Nossa Senhora, pela proteção e interseção nos momentos difíceis.

À minha orientadora professora Dra. Edna Possan, pela paciência, pelos vários estímulos de perseverança, pela persistência, pelos ensinamentos que foram vários, pela oportunidade, pela receptividade, por acreditar que no final tudo ia dar certo, meu muito obrigado.

À minha família, grande família, que mesmo às vezes não entendendo o que era, e o porquê iria servir isso, me apoiaram em todo momento.

À minha noiva. Obrigado por todo o carinho, paciência e amor. Por estar ao meu lado, auxiliar de todas as maneiras. Amo-te paixão.

Ao Prof. Dr. Eder Flores pelo apoio na conclusão das análises desse estudo.

À doutoranda Juliana Cortez pelo apoio no laboratório de análises térmicas.

Aos pesquisadores e professores do curso de mestrado em Tecnologias Ambientais, aos amigos discentes, em especial aos amigos Aline Muller, Devanir Fappi, Diogo Seganfredo, Marivane Koschevic pelo apoio e incentivo a não desistir, por mais difícil e corrido que estivesse.

Aos colegas da Companhia Saneamento do Paraná em especial, Mauro Betanin, Altair Busnello (*in memoriam*), Airton Goes, Cristina Blanco, Edson Maier, Francisco Porto, Fernando de Paula, Hélio de Paula, Rafael Winter, Henri Graff e Sirlei Gonçalves pelo apoio.

As colegas do setor de Qualidade Elizabeth Vilas Boas e Eliane Froza pela paciência comigo.

Aos técnicos da Sanepar Denis Amaro dos Santos, Jacir Busnello, Marcos Aurélio Dvorak, Rosani Becker e Karoliny Pavei por todo apoio prestado.

Aos Engenheiros da Sanepar Milena Gardai Colodel, Jeancarlo Vivan, Victor Martinez, por todo conselho e apoio.

Ao Gerente de Pesquisa & Desenvolvimento da Sanepar Charles Carneiro pelo apoio.

Ao Laboratório da Sanepar – USAV Cascavel em especial ao Sandriel e Denise pelo apoio para conclusão do estudo.

Agradeço aos amigos de pesquisa Ademir Gardacho, Bianca Dezen, Luiz Eduardo Braga, por todo apoio prestado no desenvolvimento dessa pesquisa e pela solidariedade.

À empresa Cerâmica Foz pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus amigos do curso de Tecnologia em Gerenciamento Ambiental da UTFPR e de Engenharia Ambiental da Uniamérica.

Agradeço ao LTCl da Itaipu Binacional, aos funcionários Nilo, Claudinei, Fábio, João e Maurício por todo o apoio para o sucesso desta pesquisa.

Enfim, sou grato a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para realização desta dissertação.

RESUMO

RAMIREZ, Kleber G. **Viabilidade do aproveitamento de Resíduo de Estação de Tratamento de Água (ETA) na Confecção de Concretos**. 2015. 132 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2015.

O presente estudo objetiva avaliar a influência da substituição de areia natural por diferentes teores de Lodo de Estação de Tratamento de Água (Lodo de ETA) na produção de concretos ambientalmente amigáveis. O procedimento experimental abrangeu a coleta e caracterização das matérias-primas, o estudo de dosagem do concreto produzido com diferentes teores de substituição de Lodo Úmido (LU) e Lodo Calcinado (LC) e a avaliação das misturas produzidas no aspecto técnico, econômico e ambiental. As amostras de Lodo utilizadas foram coletadas na ETA Tamanduá, localizada em Foz do Iguaçu, PR, em três períodos distintos durante o ano de 2014. No estudo de dosagem fez-se a substituição de LU (*in natura*) por areia natural nos teores de 0, 5, 7 e 10% em concretos de relação água/cimento (a/c) 0,45, 0,55 e 0,65 e de LC (temperatura de 900 °C) nos teores de 0, 5, 10 e 20% em misturas de a/c 0,55, avaliando-se as propriedades no estado fresco (trabalhabilidade) e no estado endurecido (resistência à compressão axial, resistência à tração, módulo de elasticidade, absorção de água e lixiviação). A partir dos resultados obtidos constatou-se que a adição de até 20% de LC propiciou aumento nas propriedades mecânicas do concreto, podendo ser empregado em concretos estruturais, desde que realizados estudos de durabilidade. Já a adição de lodo de ETA úmido reduziu significativamente a resistência do concreto, sendo indicado do ponto de vista técnico um teor de substituição de até 5% para aplicações em concretos, desde que não estruturais. Do ponto de vista econômico, em relação ao concreto de referência, concretos produzidos com LU resultaram em menor custo de produção enquanto que concretos com LC maior. Pela análise termogravimétrica o lodo poderá ser calcinado a menores temperaturas (de 300 a 500 °C), promovendo economia energética no processo de tratamento térmico, resultando num melhoramento no aspecto econômico e ambiental da aplicação do Lodo calcinado na produção de concretos. Por meio da viabilidade ambiental, os resultados demonstraram que os níveis de concentração das substâncias analisadas no ensaio de lixiviação atendem ao limite máximo permitido, assegurando a saúde humana e ambiental. A sustentabilidade do aproveitamento do lodo em concreto confirma-se pela redução na extração de recursos naturais, contribuindo principalmente, na diminuição do lançamento de lodo em corpos hídricos, e ao atendimento dos requisitos do sistema de gestão e legislação ambiental vigente. Maiores estudos devem ser conduzidos a fim de verificar a influência da substituição de areia por teores mais elevados de lodo, analisando a viabilidade econômica e ambiental vinculada ao processo de calcinação.

Palavras-Chaves: Lodo de ETA. Concreto. Tratamento de Água. Resíduo.

ABSTRACT

RAMIREZ, Kleber G. **Viability of the Water Treatment Plant Waste (WTP) utilization at Concrete production.** 2015. 132 p. 2015. 132 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2015.

The aim of this study is to evaluate the influence of replacing natural sand by different levels of Water Treatment Plant Sludge (WTP sludge) in the production of environmentally friendly concrete. The experiment included the collection and characterization of raw materials, the concrete dosing study produced with different sludge replacement levels of Wet Sludge (WS) and Calcined Sludge (CS) and the evaluation of the produced mixtures with regards the technical, economic and environmental aspect. The sludge samples used in the study were collected from the Tamandua ETA, located in Foz do Iguaçu, Paraná, in three different periods during the year 2014. In the dosage of study, WS (in natura) was substituted by natural sand in the levels of 0, 5, 7 and 10% in concrete with water/cement ratio (w/c) of 0.45, 0.55 and 0.65 and CS (temperature of 900 °C) in levels of 0, 5, 10 and 20% in mixtures with w/c of 0.55, evaluating the properties in the fresh state (workability) and in the hardened state (resistance to axial compression, tensile strength, elastic modulus, water absorption and leaching). From the results obtained it was found that the addition of CS up to 20% resulted in an increase in the mechanical properties of concrete, therefore it can be used in structural concrete, provided that durability studies are carried out. With regards WS, its addition significantly reduces the strength of concrete and is suitable, from a technical point of view, a replacement level up to 5% for applications in concrete, provided that not structural. From an economic point of view, in comparison to the reference concrete, concrete produced with WS resulted in lower production cost while concrete with CS the cost was higher. By thermogravimetric analysis, the sludge may be calcined at lower temperatures (300 to 500 °C), leading to energy saving in the heat treatment process, resulting in an improvement in the economic and environmental factor in the application of the calcinated sludge in the production of concrete. With regards the environmental viability, the results demonstrated that the levels of concentration of the substances analyzed in the leaching test meet the maximum allowed limit, ensuring environmental and human health. The sustainability of sludge use in concrete is confirmed by the reduction in the extraction of natural resources, contributing mainly to the decrease of sludge release in water bodies, and upon satisfying the requirements of the management and environmental legislation system. Further studies should be conducted to assess the effect of replacing sand for higher levels of sludge, analyzing the economic and environmental viability linked to the calcination process.

Key words: WTP Sludge. Concrete. Water treatment. Residue.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distribuição da água na partícula do lodo de ETA.	27
Figura 2 - Mecanismos de lixiviação.	43
Figura 3 - ETA Tamanduá Foz do Iguaçu, PR.	44
Figura 4 - Localização da área de estudo.	45
Figura 5 - Etapas do processo de tratamento de água na ETA Tamanduá.	46
Figura 6 - a) Lodo no adensador b) Lodo centrifugado.	49
Figura 7 - a) Acondicionamento das amostras e b) lodo na argamassadeira.	51
Figura 8 - a) Lodo antes da calcinação; b) Lodo após o processo de calcinação; c) moinho de bolas, d) lodo após moagem.	52
Figura 9 - Equipamento de Fluorescência de Raio X	55
Figura 10 - Equipamento de Difração de Raio X.	55
Figura 11 - Equipamento de Análise Térmica Simultânea (TG/DSC).....	56
Figura 12 - a) Equipamentos de granulometria a laser b) Peneiras Bertel.	57
Figura 13 - Planejamento Experimental do Estudo.	58
Figura 14 - a) CP sendo moldados com auxílio de vibrador b) CPs moldados.	60
Figura 15 - a) mistura sem adição de lodo b) mistura com 5% de LU, c) mistura com 5% de LC.....	61
Figura 16 - a) Retificadora de faces do CPs b) Equipamento para ensaio de fc.	62
Figura 17 - a) Aparelhagem para ensaio b) Clip-gages instalados no CP.....	63
Figura 18 - Ensaio de Compressão diametral.	64
Figura 19 - a) CP na estufa b) CP vedado com filme plástico no recipiente.	64
Figura 20 - a) CP a/c 0,65 b) CP a/c 0,55 LU c) CP a/c 0,45 e d) CP a/c 0,55 LC....	66
Figura 21 - Imersão do CP em ácido acético de relação: a) a/c 0,65 b) a/c 0,55 LU c) a/c 0,45 e d) a/c 0,55 LC.	67
Figura 22 - Difrátogramas da análise de DRX.....	76
Figura 23 - a) Termograma (TG) b) (DTG) da amostra de LU.....	77
Figura 24 - Distribuição Granulométrica.....	79
Figura 25 - Adição de Água Inicial e Final dos traços de concreto.....	80
Figura 26 - Traço com adição de 5% de lodo a) a/c 0,65 b) a/c 0,55 LU c) a/c 0,45 e d) 0,55 LC.....	81
Figura 27 - Água adicionada para o fator a/c 0,55 LC.....	82

Figura 28 - Demonstrativo de resultados de abatimento de tronco de cone nas diferentes dosagens de concreto.	82
Figura 29 - Comparativo de coloração a) a/c 0,65 b) a/c 0,55 LU c) a/c 0,45 e d) 0,55 LC.....	83
Figura 30 – Demonstrativo f_c para a) a/c 0,65 b) a/c 0,55 LU c) a/c 0,45 d) a/c 0,55 LC.....	84
Figura 31 - a) CP a/c 0,65 com 10% de adição de lodo úmido b) CP rompido no faceamento.....	85
Figura 32 - Influência do teor de lodo e da relação a/c para f_c (MPa).....	86
Figura 33 - Influência do teor de lodo e do tipo de lodo (LU x LC) na resistência à compressão (MPa).	87
Figura 34 - Influência do teor de LC na resistência à compressão (MPa).....	88
Figura 35 - Resultados do Ensaio de Módulo de Elasticidade (GPa).....	89
Figura 36 - Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos.	89
Figura 37 - Resistência à tração das diferentes dosagens com adição de lodo.....	90
Figura 38 - Ensaio físico de resistência a tração diametral.	91
Figura 39 - Relação entre a resistência à tração ensaiada e à estimada com base na resistência à compressão.....	92
Figura 40 - Absorção por capilaridade a) a/c 0,65 b) a/c 0,55 LU c) a/c 0,45 d) a/c 0,55 LC.....	95
Figura 41 - CP rompidos no ensaio de absorção: a) Fator a/c 0,65 b) Fator a/c 0,55 LU c) Fator a/c 0,45 d) Fator a/c 0,55 LC.....	96
Figura 42 – Influência do teor de lodo na absorção do concreto.....	97
Figura 43 – Influência na relação do teor de lodo com o tempo (horas).	97
Figura 44 - Influência do tipo de lodo na absorção do concreto.	98
Figura 45 - Influência da interação do teor e do tipo de lodo (LU x LC) na A.	99
Figura 46 - Influência do teor de LC na absorção.	100
Figura 47 - Influência da interação do teor de lodo e do tempo (horas) na A.....	100
Figura 48 - Concentração do elemento Mg em cada dosagem.....	103
Figura 49 – Concentração do elemento Ni em cada dosagem.....	103
Figura 50 - Comparação do custo na confecção do concreto.	110

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição dos processos no tratamento convencional da água.	23
Quadro 2 - Alternativas de disposição final do lodo de ETA	30
Quadro 3 – Imagens das Etapas do Tratamento de Água.	47
Quadro 4 - Resumo de ensaios para caracterização do lodo.	53
Quadro 5 - Descrição dos ensaios nos agregados.....	58
Quadro 6 - Ensaio no estado fresco e endurecido.	60
Quadro 7 - Avaliação técnica.	69
Quadro 8 - Avaliação ambiental.	70
Quadro 9 - Resultado da avaliação ambiental.....	112
Quadro 10 - Resumo da avaliação econômica, técnica e ambiental.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de alguns lodos de ETA.....	26
Tabela 2 - Síntese dos trabalhos que empregam lodo de ETA em produtos para a IC.	32
Tabela 3 - Volume aduzido, produzido, e geração de lodo de ETA.	49
Tabela 4 - Coleta de amostras.	51
Tabela 5 - Dosagem de concreto para lodo úmido e lodo calcinado.	59
Tabela 6 – Resultado da umidade, densidade e sólidos totais na 1ª coleta.	72
Tabela 7 - Parâmetros inorgânicos do lodo.....	73
Tabela 8 - Composição química do lodo.	74
Tabela 9 - Análise granulométrica a laser.	79
Tabela 10 - ANOVA do concreto produzido com adição de LU para fc.....	86
Tabela 11 - ANOVA do concreto produzido com adição de LU e LC para fc.	87
Tabela 12 - ANOVA do concreto produzido com adição de LC para fc.....	87
Tabela 13 - Razão (%) entre resistência à tração e resistência à compressão.	92
Tabela 14 - Resultado da A por capilaridade ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) nos diferentes fatores a/c.	93
Tabela 15 - ANOVA do concreto produzido com adição de LU para A.	96
Tabela 16 - ANOVA do concreto produzido com adição de LU e LC para A.	98
Tabela 17 - ANOVA do concreto produzido com adição de LC para A.	99
Tabela 18 - Resultado do teste de lixiviação.....	101
Tabela 19 - Limite máximo para extrato de lixiviado e Rio Classe 2.	102
Tabela 20 - Custo da disposição do lodo gerado na ETA Tamandúá.	104
Tabela 21 - Custo dos insumos para produção de concreto convencional.	106
Tabela 22 - Custo da produção de concreto para a/c 0,65.	106
Tabela 23 - Custo da produção de concreto para a/c 0,55 LU.	107
Tabela 24 - Custo da produção de concreto para a/c 0,45.	108
Tabela 25 - Custo da produção de concreto para a/c 0,55 LC.	109
Tabela 26 - Classificação da resistência a compressão (fck) do concreto.	111
Tabela 27 - Cronograma de ensaios físicos.	131
Tabela 28 - Resultados dos ensaios físicos.	132

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- a/c** - relação água/cimento;
- A** - absorção de água por capilaridade;
- ABNT** - Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- ASTM** - *American Society for Testing and Materials*;
- CP** - Corpo de Prova;
- DNER** - Departamento Nacional de Estradas e Rodagens;
- DRX** - Difração de Raios X;
- E** - Módulo de Elasticidade do Concreto (GPa);
- ETA** - Estação de Tratamento de Água;
- fc** - Resistência à compressão axial do concreto (MPa);
- FRX** - Fluorescência de Raio X;
- Ft** - Resistência à tração por compressão diametral;
- IAP** - Instituto Ambiental do Paraná;
- IBGE** - Instituto Brasileiro de Geografia Estatística;
- IC** – Indústria da Construção Civil;
- ISO** - *International Organization for Standardization*;
- LAMIR** - Laboratório de Análises de Minerais e Rochas;
- LAQIA** - Laboratório de Análises Químicas Industriais e Ambientais;
- LC** - Lodo Calcinado;
- LTCI** - Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu;
- LU** - Lodo Úmido;
- MEV** - Microscopia Eletrônica de Varredura;
- NBR** - Norma Brasileira;
- PAC** - Policloreto de Alumínio;
- PF** - Perda ao Fogo;
- pH** - Potencial Hidrogeniônico;
- RCD** - Resíduo de Construção e Demolição;
- RPM** - Rotação por minuto;
- SANEPAR** - Companhia de Saneamento do Paraná;
- UFMS** - Universidade Federal de Santa Maria;
- UTFPR** - Universidade Tecnológica Federal do Paraná;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	19
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
1.3 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	21
2 LODO DE ETA	22
2.1 PROCESSOS CONVENCIONAIS DE TRATAMENTO DE ÁGUA	22
2.2 GERAÇÃO DE LODO DE ETA	24
2.3 CARACTERÍSTICAS DO LODO DE ETA	25
2.4 ALTERNATIVAS PARA DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO DE ETA	29
2.5 EMPREGO DO LODO DE ETA NA CONSTRUÇÃO CIVIL	30
3 CONCRETO	35
3.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO	36
3.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	37
3.2.1 Resistência à Compressão	38
3.2.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral	39
3.2.3 Módulo de Elasticidade	40
3.2.4 Absorção por Capilaridade	40
3.2.5 Lixiviação	41
4 MATERIAIS E MÉTODOS	44
4.1 LOCAL DE ESTUDO	44
4.2 LEVANTAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO LODO	49
4.2.1 Levantamento da Geração de Lodo	49
4.2.2 Coleta e Tratamento Inicial do Lodo	50
4.2.3 Caracterização das Amostras de Lodo	52
4.2.3.1 Determinações de umidade, sólidos totais, densidade e pH	53
4.2.3.2 Análise química parâmetros inorgânicos	54
4.2.3.3 Fluorescência de raios x (FRX)	54
4.2.3.4 Difração de raios x (DRX)	55
4.2.3.5 Análise termogravimétrica	56
4.2.3.6 Distribuição granulométrica	56

4.3 ESTUDO DE DOSAGEM DE CONCRETO.....	57
4.3.1 Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone - <i>Slump test</i>	61
4.3.2 Resistência à Compressão Axial.....	62
4.3.3 Módulo de Elasticidade	62
4.3.4 Resistência à Tração por Compressão Diametral	63
4.3.5 Absorção de Água.....	64
4.3.6 Ensaio de Lixiviação.....	66
4.4 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA, TÉCNICA E AMBIENTAL	68
4.4.1 Viabilidade Econômica	68
4.4.2 Viabilidade Técnica	69
4.4.3 Viabilidade Ambiental.....	70
4.5 ANÁLISE DOS DADOS E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	70
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE LODO.....	72
5.1.1 Umidade, Sólidos Totais, Densidade e pH.....	72
5.1.2 Análise Química Parâmetros Inorgânicos	73
5.1.3 Fluorescência de Raios-X (FRX).....	74
5.1.4 Difração de Raios-X (DRX)	75
5.1.5 Análise Termogravimétrica.....	77
5.1.6 Distribuição Granulométrica	78
5.2 INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE LODO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO.....	80
5.2.1 Influência da Adição de Lodo no Concreto Fresco.....	80
5.2.2 Coloração do Concreto com Adição de Lodo (LU ou LC).....	83
5.2.3 Influência da Incorporação do Lodo no Concreto Endurecido.....	84
5.2.3.1 Resistência à compressão axial (f_c).....	84
5.2.3.2 Módulo de elasticidade.....	88
5.2.3.3 Resistência à tração por compressão diametral.....	90
5.2.3.4 Absorção de água	93
5.2.3.5 Estudo da lixiviação.....	100
5.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA, TÉCNICA E AMBIENTAL.....	104

5.3.1 Viabilidade Econômica	104
5.3.2 Avaliação Técnica	110
5.3.3 Viabilidade Ambiental	112
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	117
8 REFERÊNCIAS.....	118
APÊNDICES	130

1 INTRODUÇÃO

Em decorrência do crescimento das cidades e da maior exigência por qualidade de vida, a demanda por água potável tem aumentado nas últimas décadas. Por outro lado, a carência e/ou deficiência de políticas públicas de gestão de mananciais e à falta de consciência ambiental da população tem resultado na redução de qualidade da água bruta, exigindo maiores concentrações de produtos químicos no processo de tratamento, o que eleva a geração de resíduo nas Estações de Tratamento de Água (ETA), especialmente o de Lodo de ETA.

Di Bernardo (2012), destaca que, do total de municípios brasileiros, 37,7% (2098) geram lodo nas ETAs e cerca de 67,4% (1415) dispõe os resíduos em rios, geralmente, sem qualquer tipo de tratamento. Nóbrega (2011), aponta que as ETAs podem ser vistas como mini fábricas de resíduos, sendo que atualmente, no Brasil há uma geração média cerca de $762.500 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ de resíduos nas ETAs convencionais. No estado do Paraná, a Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR (2014) revela que o volume de água tratada diariamente, em 162 ETAs, gera um montante de 17.000 t de matéria seca por ano (aproximadamente 47 toneladas por dia) de lodo centrifugado.

Pela norma brasileira NBR 10.004 (ABNT, 2004) o lodo de ETA é classificado como “resíduo sólido”, portanto deve ser tratado e disposto conforme exigência dos órgãos reguladores, em atendimento à Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305 (BRASIL, 2010), fazendo com que empresas de saneamento e indústrias do setor busquem soluções ambientalmente corretas, para o destino dos resíduos gerados nos processos de tratamento de água.

A composição dos lodos de ETAs pode variar, sendo diretamente relacionada à tipologia e qualidade dos mananciais utilizados para captação, ou até apresentar diferentes substâncias em diferentes concentrações, devidos a aspectos inerentes à bacia hidrográfica (substrato geológico, tipo de solo, tipologia florestal, relevo e declividade), ligado também à condução do uso e ocupação do solo, a fatores climáticos (intensidade e distribuição de chuvas) e principalmente ao tipo de coagulante utilizado no tratamento da água, determinando assim sua variação sazonal nas características do lodo (CARNEIRO e ANDREOLI, 2013).

Além do impacto nos corpos hídricos, os lodos das ETAs podem causar riscos à saúde humana devido à presença de agentes patogênicos (SCALIZE e DI BERNARDO, 1999) e de metais pesados (Barroso e Cordeiro, 2001), sendo de fundamental importância a correta destinação ou o aproveitamento deste resíduo.

Nos últimos anos foram desenvolvidas diversas pesquisas relacionadas à utilização de lodo de ETA, como aplicação em áreas degradadas (SILVA et al. 2005, BITTENCOURT et al. 2012), regeneração de coagulantes (FREITAS et al. 2005) e aproveitamento como material de construção civil, na produção de cimentos (CHEN et al. 2010, YEN et al. 2011, SULLIVAN et al. 2010), concretos (SOGANCIOGLU et al. 2013, CHATVEERA et al. 2006, YAGUE et al. 2005), cerâmicas (TARTARI et al. 2011, MONTEIRO et al. 2008, MARTÍNEZ-GARCIA et al. 2012, KIZIENIEVIC et al. 2013), solo-cimento (FONTANIVE et al. 2008 e FADANELLI e WIECHETECK 2010) e argamassas (UKER et al. 2010 e RODRIGUEZ et al. 2010).

A reciclagem de resíduos pode ser uma alternativa viável para controlar e/ou minimizar os danos causados pelo consumo das matérias-primas e energia (LEITE, 2001). Neste caso, a utilização de resíduos de outras indústrias ou da própria construção civil tem se mostrado como um setor promissor da absorção destes novos materiais dentro da construção civil. A viabilidade econômica desta alternativa deve ser avaliada quanto ao valor de mercado do produto, além do custo do processo de reciclagem e os custos da disposição deste resíduo em aterro (JOHN e ÂNGULO, 2003).

Em relação à indústria da construção civil, a redução do consumo de matérias-primas naturais não renováveis, o reaproveitamento de resíduos, a reciclagem de RCD – Resíduos de Construção e Demolição, entre outras práticas, são alternativas para o incremento de práticas sustentáveis por esse setor (JOHN, 1999).

Responsável por 30% das emissões de CO₂ no ambiente e por aproximadamente 40% dos resíduos produzidos pelo homem (SJOSTROM, 1999) a Indústria da Construção Civil, em contrapartida, apresenta elevado potencial de utilização de resíduos, por demandar elevados volumes de recursos naturais (materiais e energias) em seus processos (LOVATO et al. 2011).

De acordo com John (2000), as aplicações mais adequadas para a reciclagem são aquelas que além de reduzir a necessidade de separação,

classificação e transformação industrial do produto, minimizem o risco de lixiviação ou volatilização de eventuais materiais e resultem em um produto ecológico e com vantagem competitiva sobre os já existentes no mercado. Para Tsutiya e Hirata (2001), um dos grandes desafios é a busca de alternativas economicamente e tecnicamente viáveis, e ambientalmente vantajosas de destinação final do lodo de ETA.

Destaca-se que a utilização benéfica do Lodo de ETA na Indústria da Construção Civil pode ser considerada uma oportunidade para aumentar a receita das empresas de saneamento, mas, principalmente, reduzir custos e impactos ambientais associados ao resíduo.

Diante do exposto e face às divergências da literatura sobre a influência da adição de lodo de ETA nas propriedades de materiais de construção, sugere-se que novos estudos sejam conduzidos a fim de comprovar a viabilidade de uso deste resíduo na IC. Neste sentido, a incorporação do lodo de ETA úmido ou calcinado na fabricação de produtos cimentícios como, por exemplo, o concreto, pode ser uma das alternativas para correta destinação e reaproveitamento deste resíduo, sendo este o objeto principal deste estudo.

1.1 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo analisar a viabilidade da utilização de lodo de Estação de Tratamento de Água (lodo de ETA) na produção de concretos ambientalmente amigáveis.

A partir do objetivo principal, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar a quantidade de lodo gerado na ETA estudada;
- b) Caracterizar o lodo gerado por meio de análises físico-químicas;
- c) Estudar o efeito da incorporação de diferentes teores de lodo úmido e calcinado na produção do concreto com diferentes relações água/cimento;
- d) Analisar o comportamento mecânico e a absorção de água dos concretos produzidos;

- e) Avaliar a integridade e a retenção de metais pesados do concreto produzido por meio do ensaio de lixiviação;
- f) Avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da produção de concreto com adição de lodo de ETA úmido e calcinado.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para melhor compreensão do presente trabalho, neste tópico os capítulos são brevemente descritos para que o leitor entenda a estrutura da dissertação.

A Fundamentação Teórica do estudo fornece uma descrição do processo de tratamento de água, a geração de resíduos decorrente do tratamento, a caracterização do lodo, e os métodos para destinação final do resíduo, contemplando estudos alternativos de incorporação de lodo na indústria da construção civil.

No próximo capítulo, apresentam-se as definições sobre concreto, suas principais características e propriedades mecânicas.

Em seguida, no capítulo de Materiais e Métodos são descritos o procedimento experimental adota na pesquisa, que foi conduzido em três etapas: i) levantamento e caracterização (agregados, aglomerante e lodo de ETA); ii) estudo de dosagem do concreto com diferentes teores de adição de lodo (úmido e calcinado); iii) estudo de viabilidade do emprego do lodo de ETA em concretos.

Com o capítulo Resultados e Discussão são expostos os principais resultados obtidos neste trabalho bem como a análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental da incorporação de lodo úmido ou calcinado na produção de concretos.

Encerrando-se a pesquisa, encaminham-se as considerações finais e sugestões para a continuidade e desenvolvimento de novos trabalhos. Por fim apresentados as referências utilizadas neste estudo, seguido dos respectivos apêndices.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

A pesquisa incrementa alternativa para a disposição adequada do Lodo do ETA por meio do seu reaproveitamento como matéria-prima na produção de concretos, contribuindo com a solução da problemática da destinação dos resíduos de ETA em corpos hídricos, beneficiando sociedade e meio ambiente.

2 LODO DE ETA

A fundamentação teórica está subdividida em tópicos relacionados ao processo de tratamento de água, aos princípios de geração dos resíduos no processo de tratamento de água, às características do lodo, e as principais alternativas utilizadas para sua disposição final. Como alternativa, um tópico relacionado a incorporação do resíduos de ETA na fabricação de produtos cimentícios, especificamente o concreto, também é apresentado.

2.1 PROCESSOS CONVENCIONAIS DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Para atender a população com água potável de qualidade faz-se necessário um sistema de abastecimento que envolve os processos de: captação da água bruta; tratamento da água; reservação e distribuição.

A maioria das ETAs utiliza o processo convencional¹ para tratamento da água, em função das águas brutas apresentarem graus elevados de turbidez e cor, com presença de matérias coloidais, conduzindo os processos de tratamento para que ocorram de acordo com as seguintes etapas sucessivas: mistura rápida (coagulação), mistura lenta (floculação), decantação, filtração e desinfecção e fluoretação (DI BERNARDO, 2012). No Quadro 1 apresenta-se a descrição resumida de cada etapa.

O tratamento da água é realizado através da aplicação de sais de ferro ou alumínio, que provocam a desestabilização das partículas coloidais em solução e em suspensão da água bruta, formando flocos que são sedimentados em decantadores e posteriormente filtrados para a clarificação final, formando o chamado Lodo de Estação de Tratamento e Água – Lodo de ETA (KONDAGESKI, 2013).

¹ Entende-se por tratamento convencional o conjunto dos processos sequenciais de Coagulação, Floculação, Decantação, Filtração, Desinfecção, Fluoretação e Correção de pH (SANEPAR, 2014).

Processo	Definição do Processo na Estação de Tratamento de Água
Coagulação	Processo unitário que consiste na formação de coágulos, promovendo um estado de equilíbrio eletrostaticamente instável das partículas, no seio da massa líquida. Os coagulantes mais usados neste processo são os sais de alumínio ou ferro, como sulfato de alumínio, cloreto férrico, sulfato férrico, sulfato ferroso, e policloreto de alumínio, também se utilizam produtos auxiliares conhecidos como polieletrólitos catiônicos, aniônicos ou não iônicos. A coagulação depende de fatores como temperatura, pH, alcalinidade, cor verdadeira, turbidez, sólidos totais dissolvidos, força iônica, tamanho das partículas, etc.
Floculação	Ocorre imediatamente após da coagulação, consiste no agrupamento das partículas eletricamente desestabilizadas (coágulos), de modo a formar outras maiores chamadas flocos, suscetíveis de serem removidas por decantação (ou flutuação) e filtração. A floculação se vê favorecida em condições onde tem uma agitação moderada, aumentando o contato entre as partículas formando flocos.
Sedimentação (decantação)	A sedimentação é a separação das partículas suspensas mais pesadas formadas durante a floculação (flocos) no meio líquido, as quais pela ação da gravidade apresentam um movimento descendente, depositando-se no fundo e formando o lodo. A sedimentação das partículas suspensas propiciam a clarificação da água pela separação das fases sólida e líquida ao mesmo tempo em que forma no fundo do decantador uma camada de lodo que precisa ser removido periodicamente seja pelo método manual ou mecanicamente.
Filtração	Consiste na remoção das partículas suspensas e coloidais e dos microrganismos presentes na água que escoam através de um meio filtrante, onde as impurezas ficam retidas. É considerado um processo final de remoção de impurezas na ETA, portanto, é um dos responsáveis pelo cumprimento dos padrões de potabilidade da água.
Desinfecção	A desinfecção é usualmente realizada com a adição de cloro, nas formas de gás e hipoclorito. O cloro pode ser usado como desinfetante para eliminar ou inativar microrganismos patogênicos e como oxidantes de compostos orgânicos e inorgânicos presentes na água. Porém estudos têm demonstrado que o agente pode trazer alguns inconvenientes como, por exemplo, a formação de trihalometanos, que são substâncias cancerígenas.
Fluoretação	A fluoretação é o processo pelo qual se adicionam compostos de flúor às águas de abastecimento público, a fim de que tenham teor adequado de íon fluoreto. Esse teor varia de um local para o outro, de acordo com a média das temperaturas máximas anuais. O objetivo da fluoretação é proporcionar aos dentes, principalmente enquanto se processa seu desenvolvimento, um esmalte mais resistente e de qualidade superior, reduzindo na proporção de cerca de 70% a incidência de cárie dentária.

Quadro 1 - Descrição dos processos no tratamento convencional da água.

Fonte: Adaptado de AZEVEDO (1987), DI BERNARDO (2012), JANUÁRIO (2005) e SANEPAR (2014).

Como resultado deste processo tem-se água tratada de qualidade (potável) e a geração de resíduo na Estação de Tratamento de Água (lodo de ETA).

As ETAs tem-se defrontado com o problema do tratamento e disposição final dos resíduos sólidos, gerados durante o processo de tratamento. Embora não seja um problema recente, o efeito da disposição inadequada dos resíduos sólidos gerados tem-se mostrado extremamente danoso ao meio ambiente, especialmente nos grandes centros urbanos, seja pelo aumento da quantidade de sólidos e da turbidez em corpos d'água, como também no provável aumento da sua toxicidade

que, por sua vez, pode comprometer a estabilidade da vida aquática (CORDEIRO, 1999; DI BERNARDO, 2012; NOBREGA 2011).

Considerando ainda, a carência de água em muitas regiões do Brasil e o impacto dos resíduos gerados em ETAs nos corpos de água com possível comprometimento da qualidade de potenciais fontes de abastecimento, torna-se fundamental o tratamento ou a disposição adequada dos resíduos sólidos produzidos (KONDAGESKI, 2013).

Para isso, faz-se necessário conhecer o processo de geração, as características do lodo e as potencialidades de aproveitamento, que serão discutidas na sequência.

2.2 GERAÇÃO DE LODO DE ETA

A geração dos resíduos provenientes de ETA vem aumentando nos últimos anos e tem se tornado um grande problema para as companhias de saneamento, e de forma mais abrangente para a sociedade. Atualmente os sistemas de abastecimento de água têm se restringido somente ao produto final (água potável), não havendo uma preocupação com este resíduo sólido que são gerados no processo. A problemática quanto à disposição deste resíduo deve ser avaliada de forma integrada, analisando todos os setores, seja na produção, tratamento e disposição deste lodo (DI BERNARDO, 2012).

Em uma ETA convencional de ciclo completo, os resíduos gerados são provenientes das limpezas ou descargas dos decantadores (ou flotores) e das lavagens dos filtros. Em termos volumétricos, a maior quantidade de resíduo é proveniente da lavagem dos filtros. No entanto, em termos mássicos, a maior quantidade de resíduo é gerada no sistema de separação sólido/líquido que, neste tipo de estação, é basicamente efetuada nos decantadores (SANEPAR, 2014).

Cada linha geradora de resíduos decorrente do processo operacional na ETA apresenta características distintas em termos de vazão e concentração de sólidos, razão pela qual, diferentes concepções de tratamento devem ser consideradas. Outras atividades desenvolvidas na estação, tais como as lavagens

de tanques de preparação de suspensões e soluções de produtos químicos, também contribuem para a quantidade total dos resíduos produzidos (DI BERNARDO, 2012).

Segundo Cordeiro (2002) a geração deste resíduo no decantador ocorre pela desestabilização química, podendo as partículas ser de natureza química, física e biológica, e em sua grande maioria coloides. Richter (2001) comenta que este lodo é líquido, com teor de sólidos totais variando entre 0,1 a 4% nas águas de descarga dos decantadores, e entre 0,004 a 0,1% para águas de lavagem de filtros dependendo de sua fonte de origem e do coagulante utilizado.

Além da qualidade, há variação na quantidade de lodo retirado do sistema de tratamento, atingindo uma faixa média de 0,2 a 5% do volume tratado pela estação (ANDREOLI e CARNEIRO, 2013). A quantidade de lodo originária dos decantadores representa cerca de 60 a 95% da quantidade total de resíduos produzidos na ETA, sendo o restante oriundo do processo de filtração (SABOGAL PAZ e DI BERNARDO, 2006).

Richter (2001) complementa que a quantidade de lodo, também, depende da qualidade físico-química da água bruta, da qualidade final desejada desta, dos coagulantes e produtos utilizados durante o processo de tratamento, sendo o volume de lodo gerado diretamente proporcional à dosagem de coagulante utilizado no processo. Sabogal Paz (2007), também sugere que as variações sazonais e a turbidez presente na água influenciam na geração do lodo.

2.3 CARACTERÍSTICAS DO LODO DE ETA

Este resíduo é composto de água e dos sólidos suspensos e coloides contidos na água bruta, acrescidos ainda dos produtos aplicados durante o processamento. De acordo com o manual de operação de ETA da Sanepar (2014) a quantidade e a qualidade dos resíduos produzidos em uma ETA dependem de vários fatores, destacando-se:

- Qualidade da água bruta e tecnologia de tratamento;
- Características da coagulação: tipo e dosagem de coagulante, de alcalinizante e de acidificante;
- Uso, característica e dosagem do auxiliar de coagulação (floculação e filtração);

- Uso de oxidante e adsorvente (carvão ativado pulverizado ou umectado);
- Método de limpeza dos decantadores (flotadores);
- Técnica de lavagem dos filtros;
- Habilidade dos operadores;
- Automação de processos e operações na ETA;
- Reuso da água recuperada no sistema de tratamento.

A caracterização dos resíduos pode ser realizada conforme importância e objetivo de estudo que, segundo Dvorak (2004), são referentes aos:

- Aspectos ambientais associados à disposição dos resíduos: pH, sólidos, metais, DQO, biodegradabilidade, toxicidade, pesticidas, fertilizantes e compostos orgânicos voláteis; e
- Aspectos geotécnicos relacionados à remoção de água e futuras utilizações dos sólidos dos resíduos: tamanho e distribuição das partículas, limite de plasticidade e de liquidez, resistência específica, respostas ao aquecimento e resfriamento e sedimentabilidade.

A composição química do Lodo de ETA é variável, como pode ser observado na Tabela 1, sendo diretamente relacionada à tipologia e qualidade dos mananciais onde a água é captada, aos aspectos inerentes à bacia hidrográfica (substrato geológico, ao tipo de solo, à tipologia florestal, ao relevo e declividade), ao uso e ocupação do solo, a fatores climáticos como intensidade e distribuição de chuvas e ao tipo de coagulante utilizado no tratamento, determinando assim a variação sazonal nas características do lodo produzido (ANDREOLI e CARNEIRO, 2013).

Tabela 1 - Composição química de alguns lodos de ETA.

Autor	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	K₂O	Na₂O	PF
Chen (2010)	52,10	19,90	6,29	1,68	1,38	2,90	0,97	ND
Lin (2005)	53,60	20,90	6,60	0,30	1,90	2,90	0,97	ND
Yague (2005)	29,70	12,90	10,10	22,70	2,73	1,83	0,23	ND
Rodríguez (2010)	29,60	17,57	5,18	11,80	2,15	2,85	6,09	22
Chatveera (2009)	25,05	7,39	3,99	31,33	1,59	0,85	0	21,07

PF: Perda ao Fogo. ND: Não determinado.

O Lodo de ETA tem em sua composição, sólidos orgânicos e inorgânicos provenientes da água bruta, tais como: algas, bactérias, partículas orgânicas em

suspensão, coloides, areias, argila, siltes, cálcio, magnésio, ferro, manganês, etc. (DVORAK, 2007). Segundo AWWA (1999) o lodo de ETA possui uma característica mais similar aos solos do que se comparado com o lodo de esgoto. Esse resíduo é caracterizado por Silva e Isaac (2002) como um fluido não newtoniano², volumoso e tixotrópico³, apresentando-se em estado gel quando em repouso e relativamente líquido quando agitado.

Qualquer tipo de lodo consiste em uma combinação entre uma fase sólida e uma quantidade de líquido (OLIVEIRA, 2004). Conforme Figura 1, que apresenta as formas de distribuição física da água presente nos resíduos de ETAs.

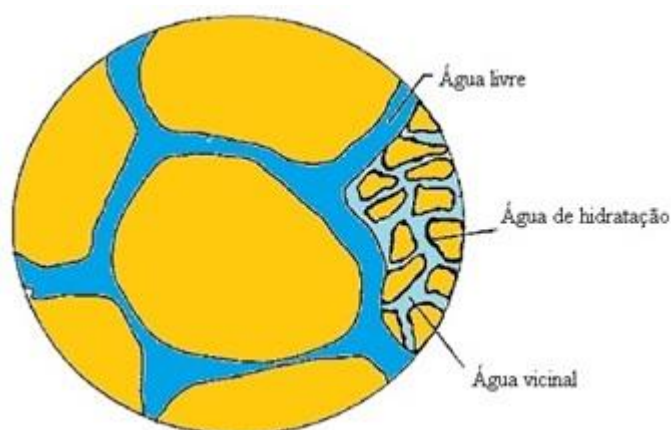


Figura 1 - Distribuição da água na partícula do lodo de ETA.

Fonte: Adaptado de Tartari (2008).

Segundo Tartari (2008), as diferentes distribuições físicas da água presente nas partículas de solos, bem como, nas partículas de lodo em ordem crescente de dificuldade de separação se apresentam a seguir:

- **Água livre:** água que está adsorvida no material sendo em abundância. Pode ser perdida facilmente nas temperaturas próximas da ebulição.
- **Água vicinal:** constituída por diversas camadas de moléculas de água fisicamente ligadas, que se encontram firmemente presas à superfície da partícula por meio de pontes de hidrogênio;

² Os fluidos que não apresentam uma taxa de cisalhamento proporcional à tensão de cisalhamento aplicada, ou seja, não possuem uma viscosidade constante (GOMES, 2015).

³ Fluidos tixotrópicos são os que apresentam comportamento transiente quando solicitados em regime permanente e que, além disso, são incapazes de armazenar energia sob a forma elástica (PINOTTI, 2015).

- Água de hidratação: água ligada quimicamente à superfície das partículas sólidas;

São essas frações de água presentes no resíduo (lodo) que determinam as características de retenção de água e, conseqüentemente, o desempenho do sistema a ser utilizado para remoção dessa água. A remoção da água do lodo tem por objetivo viabilizar o transporte e disposição dos resíduos (lodo) ao seu destino final (NOBREGA, 2011), uma vez que reduz seu volume.

Para Dvorak (2004) os lodos geralmente estão diluídos em água, necessitando serem submetidos a operações unitárias que realizem o adensamento das partículas, deixando-as com pequenas parcelas de água presentes. Para tal função, o adensamento faz indução dos sólidos à precipitação, separando assim, grande parcela dos sólidos da fase líquida.

Conforme Grandin et al. (1993), o Lodo de ETA pode ser desidratado por meio natural ou mecânico, sendo os principais métodos:

- Sistema de secagem natural: lagoas de lodo e leitos de secagem; e
- Sistema de desidratação mecânica: centrífuga; filtro a vácuo; filtro prensa e prensa desaguadora.

De acordo com Cordeiro (2002), tanto os sistemas mecânicos como os naturais não apresentam eficiência satisfatória no desaguamento do Lodo de ETA, se comparado com o desaguamento gerado pelo lodo de Estação de Tratamento de Esgoto.

É de fundamental importância ter conhecimento das características dos resíduos gerados em ETAs, para definir os métodos de tratamento e disposição final. Vários parâmetros físicos, químicos e biológicos podem ser utilizados para caracterização dos resíduos, dentre eles: teor de sólidos, turbidez, pH, alcalinidade, indicadores do teor de matéria orgânica, Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO, Demanda Química de Oxigênio - DQO, Carbono Orgânico Total - COT, Concentração de Sólidos Voláteis - SV, indicadores bacteriológicos como coliformes totais, coliformes termotolerantes⁴, *E. coli*, cistos de *Giárdia*, oocistos de

⁴ Pertencem a um subgrupo de microrganismos e são exclusivamente do trato intestinal. A presença de coliformes termotolerantes determina a origem fecal da contaminação, indicando risco da presença de outros microrganismos patogênicos. (VON SPERLING, 1996).

Cryptosporidium, concentração metais pesados tais como manganês, chumbo, alumínio, ferro (DI BERNARDO, 2012; CORDEIRO e SALES, 2001; TARTARI, 2011).

Em estudos realizados por Guerra (2005), foi observado que o Lodo de ETA é extremamente tóxico ao micro crustáceo *Daphnia Magna*, explicado pela alta concentração de metais tóxicos encontrados no sedimento. Já Barroso e Cordeiro (2001) descrevem que alguns metais, como cobre, zinco, níquel, chumbo, cádmio, cromo e manganês e, em especial, o alumínio, presentes no lodo de ETA, possuem ações tóxicas, podendo apresentar efeitos positivos ou negativos nas técnicas de tratamento, disposição final e, até mesmo, na reutilização deste resíduo.

Visto que o Lodo proveniente das ETAs não apresenta uma composição padrão, comportando-se de forma que dificulta a remoção de água e, considerando ainda, a carência de pesquisas técnicas sobre o tema, tem-se uma maior dificuldade na formulação do tratamento adequado e no seu gerenciamento (CARNEIRO e ANDREOLI, 2013).

2.4 ALTERNATIVAS PARA DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO DE ETA

Segundo Hoppen (2004) a definição de destino final para o lodo de uma estação de tratamento de água é uma das tarefas mais difíceis para o administrador do serviço de água, envolvendo custos com transporte e restrições do meio ambiente. Há várias opções possíveis de disposição a serem adotadas, dependendo da análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental para cada caso, conforme observado no Quadro 2.

Megda et al. (2005) afirmam que no Brasil o aproveitamento do lodo gerado na ETA em outras atividades (Quadro 2) poderia ser uma interessante estratégia no sentido de minimizar os impactos ambientais gerados pelo lançamento *in natura* desse resíduo em corpos d'água, propiciando aumento na receita dos serviços de água e esgoto.

Destinação final	Aspectos da destinação do lodo
Cultivo de grama comercial	O cultivo de grama comercial inclui grama para jardinagem, campos para atividades esportivas, parques, cemitérios e jardinagens de rodovias, e, normalmente, é realizada em 5 etapas: preparação do solo; semeadura; crescimento da grama; colheita e transporte. Lodos de ETAs podem ser aplicados na fase líquida ou após a desidratação. O lodo líquido pode ser aplicado tanto na fase de preparação do solo como na fase de crescimento da grama. O lodo pode ser aplicada na fase de preparação do solo.
Compostagem	Atualmente, as pesquisas estão sendo direcionadas para o uso de lodos de ETAs em compostagem, utilizando-se o sistema em leiras, juntamente com restos de vegetais, resíduos sólidos domésticos e biossólidos. A adição de lodos de ETAs na compostagem tem mostrado alguns benefícios como ajuste da umidade, fornecimento de traços de minerais, ajuste de pH e servindo, por outra parte, como material para o aumento do volume de composto.
Plantação de cítricos	Nos EUA, os solos onde são cultivadas as plantas cítricas, como laranja e limão, normalmente têm deficiência de ferro. Este elemento é fundamental para o crescimento de culturas de cítricos e pode ser suprido através da aplicação de lodos de ETAs. Entretanto, é necessário que a estação de tratamento utilize o sulfato férrico como coagulante. A aplicação de lodo de ETA tem mostrado eficiência quanto a outros produtos comerciais, normalmente utilizados para provisão de ferro ao solo.
Auxiliar de turbidez	Uma alternativa de baixo custo nos processos de tratamento de água é o aproveitamento dos lodos gerados nos decantadores da ETAs como auxiliares nos processos de coagulação e floculação em água bruta de baixa turbidez.
Construção civil	A possibilidade de reunir os rejeitos advindos do lodo de ETAs em conjunto com os resíduos da construção civil, no intuito de estudar formas de utilização dos mesmos, poderá ser uma interessante estratégia no sentido de minimizar os impactos ambientais gerados por estes dois setores, destacando-se as seguintes aplicações: concreto para contrapiso, argamassa de assentamento não-estrutural e blocos de concreto não-estrutural, e adições minerais pós calcinação do lodo.

Quadro 2 - Alternativas de disposição final do lodo de ETA

Fonte: Adaptado de MEGDA et al. (2005).

Uma das alternativas encontradas para o aproveitamento dos resíduos sólidos é a sua incorporação em materiais destinados à construção civil, tendo como parâmetro alguns exemplos nacionais e internacionais de experiências bem sucedidas (RAMIREZ et al. 2015).

2.5 EMPREGO DO LODO DE ETA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Em estudo realizado por Chen et al. (2010) afirmam-se que a adição de lodo na produção de cimento, em teores de 4% a 7%, contribuiu positivamente na resistência à compressão do produto final, sendo que os metais pesados presentes

no lodo (Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) foram quase que completamente incorporados ao clínquer⁵, não apresentando nenhuma ameaça imediata ao meio ambiente.

Já Brehm et al. (2013) comprovam que ambientalmente é possível empregar o lodo de ETA em materiais de construção civil, já que a caracterização ambiental dos resíduos de materiais de cerâmica vermelha e dos produzidos à base de cimento Portland com incorporação de lodo, não foi alterada significativamente em relação aos resíduos dos materiais de referência. Hegazy et al (2012) relatam que a composição química do lodo de estação de tratamento de água é extremamente próxima à do tijolo de barro, mas seriam necessárias temperaturas de sinterização mais elevadas para misturas com lodo devido ao conteúdo de sílica e alumina.

Conforme o estudo de Sales e Souza (2009) asseguram que a produção de concretos e argamassas com a adição conjunta de lodos de tratamento de água e de agregados reciclados pode oferecer uma alternativa de reciclagem que é viável quanto à resistência à compressão axial e absorção de água.

Por outro lado, Fadanelli et al. (2010) relataram que a utilização do lodo de ETA à mistura solo-cimento reduziu a qualidade do conjunto, aumentando o índice de retração, afetando sua durabilidade. Portanto, em caso de eventual uso, devido à variabilidade de composição química dos lodos produzidos, torna-se necessário uma caracterização cuidadosa do material.

Verifica-se na Tabela 2 que vários trabalhos foram desenvolvidos visando à reciclagem do lodo de ETA na construção civil. A maioria objetiva o emprego do lodo em materiais cimentícios e cerâmicos, indicando de modo geral que o uso pode ser satisfatório para teores médios de adição de lodo de 7%.

⁵ O clínquer de cimento Portland pode ser definido como um material obtido através da sinterização de rochas carbonáticas e argilosas, ou outro material similar que possua composição semelhante e suficiente reatividade. Estes materiais, previamente moídos, dosados e homogeneizados, são submetidos a tratamento térmico em forno rotativo, na temperatura de queima de 1450°C, onde ocorrem fusões parciais e, durante o resfriamento, nódulos de clínquer são produzidos (TAYLOR, 1990). O clínquer é a matéria prima principal do Cimento Portland, ao qual é adicionado gesso em teores de até 5%. Além do gesso podem ser adicionados materiais pozolânicos.

Tabela 2 - Síntese dos trabalhos que empregam lodo de ETA em produtos para a IC.

Autor/Local	Emprego do Lodo	Teores utilizados	Principais Conclusões
Huang e Wang, 2013 (Taiwan)	Concreto com agregados leves	0,5 a 15%	As resistências à compressão e à tração das misturas de concreto superaram o requisito mínimo da norma, confirmando a viabilidade do uso de lodo para produzir concreto com agregado leve.
Kizinievic et al., 2013 (Lituânia)	Cerâmica	5; 10; 20; 30 e 40%	A adição de 5% de lodo aumenta a densidade do corpo cerâmico de 5% a 14%, a resistência à compressão de 36% a 50%, reduz a absorção de água de 33% a 60%, e a porosidade de 19-45%. Com adição de 40%, diminui-se a densidade de 10% a 22%, a resistência à compressão de 43% a 49%, aumenta-se a absorção de água de 70% a 100% e a porosidade em cerca de 55%.
Teixeira et al., 2006 (Presidente Prudente, SP)	Cerâmica	0; 10; 20 e 30%	A incorporação do lodo, em geral, piora as propriedades físicas e tecnológicas do material cerâmico e os resultados obtidos para o lodo com Al foram sempre piores que os com Fe.
Pozzobon et al., 2010 (Foz do Iguaçu, PR)	Cerâmica	6; 8; 10; 12 e 15%	O lodo deve ser submetido a tratamento prévio, uma vez que <i>in natura</i> favorece a ocorrência de defeitos nas peças sinterizadas ⁶ . A incorporação de lodo à massa cerâmica altera sua coloração, o que pode ser explorado no uso artesanal.
Paixão et al., 2008 (Brumandinho, MG)	Cerâmica	2; 5 e 10%	A adição do lodo à massa de cerâmica vermelha em frações de 2 a 10%, em peso, causou diminuição da resistência à flexão do corpo seco a 110 °C. Já a calcinação e a cominuição do lodo possibilitaram aumentar a resistência à flexão em relação à incorporação do lodo bruto, diminuindo a severidade das micro trincas.
Oliveira e Holanda, 2008 (Campo dos Goytacazes, RJ)	Cerâmica	0; 5; 10 e 15%	Lodo adicionado em até 15%, em peso, à massa argilosa para fabricação de cerâmica vermelha não apresentou efeitos significativos sobre a microestrutura e as propriedades físico-mecânicas avaliadas (retração linear, absorção de água, massa específica aparente e tensão de ruptura à flexão).
Tartari et al., 2011 (Foz do Iguaçu, PR)	Cerâmica	4; 8; 12 e 16%	O lodo não pode ser usado como componente majoritário em massas cerâmicas. No entanto, pode ser usado em pequenas quantidades em massas argilosas (até o limite de 8%), nas condições de umidade reais de saída da centrífuga.
Vitorino et al., 2009 (Campo dos Goytacazes, RJ)	Cerâmica	0; 3; 5; 7 e 10%	A maior restrição está relacionada à redução da resistência mecânica da cerâmica. Deve-se incorporar quantidades que possibilitem à cerâmica alcançar os valores estipulados por norma para determinado tipo de produto.
Vieira et al., 2008 (Campo dos Goytacazes, RJ)	Cerâmica	0 e 10%	A incorporação de lodo de ETA possibilita o aparecimento de alumina e fase feldspática. Os resultados obtidos comprovam que a reciclagem de lodo de ETA em cerâmica argilosa deve ser realizada em pequenos percentuais para minimizar seu efeito deletério na qualidade da cerâmica.

⁶ Sinterização pode ser definida como um processo físico, termicamente ativado, que faz com que um conjunto de partículas de determinado material, inicialmente em contato mútuo, adquira resistência mecânica (SILVA e ALVES JUNIOR, 1998).

Tabela 2 - Síntese dos trabalhos que empregam lodo de ETA em produtos para IC.

(Continua)

Autor/Local	Emprego do Lodo	Teores utilizados	Principais Conclusões
Monteiro et al., 2008 (Campos de Goytacazes, RJ)	Cerâmica	0; 3; 5 e 10%	A incorporação de até 10%, em peso, de lodo à argila aumenta ligeiramente a absorção de água e diminui a resistência mecânica da cerâmica após a cozedura.
Martínez-García et al., 2012 (Jaen, Espanha)	Cerâmica	0; 1; 2,5; 5; 7,5; 10; e 15%	Este trabalho demonstrou que o setor da cerâmica pode ser um receptor do lodo de ETA, desde que este seja incorporado em baixas percentagens (até 5% em peso).
Pozzobon et al., 2010 (Foz do Iguaçu, PR)	Cerâmica Artística	12 e 15%	Para melhorar a sinterização e reduzir a porosidade aparente, a absorção de água e a ocorrência de defeitos em artefatos artísticos, o lodo deve ser seco e moído antes de ser incorporado à massa cerâmica.
Wolff et al., 2014 (Minas Gerais)	Cerâmica Estrutural	50; 55; 65; 75; 85 e 100%	A reciclagem deste tipo de resíduos em cerâmica estrutural pode ser tecnologicamente, economicamente e ambientalmente atraente, porque produz materiais com maior resistência mecânica, permite a reutilização dos lodos de ETA, reduz os custos de exploração de argila.
Rodríguez et al., 2010 (Barcelona, Espanha)	Argamassa	0; 10; 20; 25 e 30%	As argamassas feitas com cimento Portland (misturado com 10 a 30% de lodo) exibiu menor resistência mecânica do que a mistura controle.
Chatveera et al., 2006 (Tailândia)	Concreto	0; 10; 20; 30; 40; 60; 80 e 100%	Os teores utilizados de lodo substituem a água das misturas. A resistência à compressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade do concreto tendem a diminuir com um aumento da proporção de lodo. A resistência à compressão do concreto misturado com lodo está na faixa de 85-94% do concreto referência. O módulo de elasticidade do concreto misturado com lodo é maior do que o concreto referência.
Yague et al., 2005 (Barcelona, Espanha)	Concreto	0; 2,5; 5 e 10%	A adição de lodo reduz a resistência mecânica do concreto, o qual é inadequado para concreto estrutural.
Hoppen et al., 2006 (Curitiba, PR)	Concreto	3; 5; 7 e 10%	Apesar de ocorrerem reduções na qualidade do concreto com a incorporação do lodo de ETA com teores de 4 e 8%, sua utilização como forma de disposição final pode ser considerada viável técnica e ambientalmente.
Hoppen et al., 2005 (Curitiba, PR)	Concreto	3; 5; 7 e 10%	Nas condições e parâmetros adotados, os traços de concreto contendo até 5% de lodo podem ser aplicados em situações que vão desde a fabricação de artefatos, blocos e peças de concreto até a construção de pavimentos em concreto de cimento Portland (pavimento rígido).
Sales et al., 2011 (São Carlos, SP)	Concreto leve	1:6:4,5 (serragem, lodo e água)	A incorporação de lodo permitiu produzir um concreto não estrutural leve com massa específica aparente de 1847 kg/m ³ e resistência à compressão de 11,1 MPa.
Sales e Souza, 2009 (São Carlos, SP)	Concretos e Argamassas	1 a 5%	A produção de concretos e argamassas com a adição conjuntos de lodos ETA e agregados reciclados pode oferecer uma alternativa de reciclagem que é viável do ponto de vista da resistência à compressão axial e absorção de água.

Tabela 2 - Síntese dos trabalhos que empregam lodo de ETA em produtos para IC.

(Continua)

Autor/Local	Emprego do Lodo	Teores utilizados	Principais Conclusões
Chen et al., 2010 (China)	Eco Cimento	0 a 10%	A adição de 4 a 7% de lodo na produção de cimento contribui para a resistência à compressão. Metais pesados do lodo foram quase completamente incorporados aos clínqueres.
Fadanelli et al., 2010 (Ponta Grossa, PR)	Solo- cimento	3; 5; e 7%	Percebe-se que quando se adiciona lodo à mistura solo-cimento, há uma diminuição da qualidade do conjunto, aumentando o índice de retração volumétrica, afetando sua durabilidade.
Sales et al., 2010 (São Paulo)	Matrizes Cimentícias	100:600:450 (madeira, lodo e água)	O concreto produzido com o compósito de lodo de ETA e serragem de madeira pode ser usado em construções e edificações para reduzir a degradação ambiental, além disso, poderá reduzir a necessidade de extração de pedra britada natural de pedreiras.
Silva e Fungaro, 2011 Terra Preta, SP	Tijolo	5 e 10%	Verificou-se que a baixa resistência dos tijolos foi resultado, provavelmente, da granulometria inadequada do lodo de ETA para o tijolo cinza-lodo e também do baixo teor de cimento para o tijolo cinza-lodo-solo-cimento.
Fontanive et al., 2008 (Espírito Santo)	Tijolo Solo Cimento	--	A produção de tijolos em solo-cimento com lodo de ETA foi insatisfatória, devido à alta taxa de silte do lodo, o que o torna pouco permeável. O tijolo "desidratado" acaba-se apresenta-se facilmente quebradiço e fragmentado.
Lin et al., 2006 (Taipei, Taiwan)	Tijolos	70 a 95%	A adição de 80% de lodo sinterizado a 1150°C por 360 min pode gerar um tijolo com uma resistência à compressão de 256 kg/cm ² , com absorção de 2,78% e permeabilidade de 0,016 cm/s.
Hegazy et al., 2012 (Cairo, Egito)	Tijolos	0; 25 e 50%	É possível produzir tijolos, incorporando 50% de lodo de ETA, 25% de sílica ativa e 25% de cinza de casca de arroz.
Porras et al., 2005 (Campinas, SP)	Tijolos	5 e 10%	Apresentou características favoráveis à sua utilização para confecção de tijolos tipo solo-cimento.
Teixeira et al., 2011 (Presidente Prudente, SP)	Tijolos Cerâmicos	0; 10; 15 e 20%	Para temperatura de queima inferior a 1000°C é possível produzir tijolos cerâmicos com adição de 10% de lodo. Para temperaturas superiores, pode ser adicionado até 20%.
Porras et al., 2008 (Campinas, SP)	Tijolos estabilizados com cimento	10; 15; 20 e 25%	Nenhum tijolo produzido com a mistura de lodo atendeu às normas brasileiras de qualidade estrutural - dimensões, absorção de água e resistência à compressão.

Diante do exposto e face às divergências da literatura sobre a influência da adição de lodo de ETA nas propriedades de materiais de construção, especialmente concreto, sugere-se que novos estudos sejam conduzidos a fim de comprovar a viabilidade de uso deste resíduo na IC.

3 CONCRETO

O material de construção mais utilizado no mundo é o concreto. Não há material mais consumido pelo homem em tamanha quantidade, com exceção da água. Em 2013, nos Estados Unidos, 63 milhões de toneladas de cimento Portland foram convertidos em 500 milhões de toneladas de concreto, cinco vezes o consumo em peso do aço (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Segundo os mesmos autores, o consumo mundial total de concreto neste mesmo ano, foi estimado em três bilhões de toneladas. Além disso, devido a suas propriedades no estado fresco, especialmente a capacidade de se moldar a qualquer forma.

A popularidade do concreto, se deve a alguns fatores, como: versatilidade (facilidade na produção e no manejo, uma vez que o concreto é uma substância plástica - que pode ser moldada), durabilidade, economia (é um dos materiais mais baratos e comumente disponível em todo o mundo) e a alta resistência a água, o que faz dele o material ideal para resistir a ação da umidade (FALCETTA, 2015).

O concreto é um material composto, constituído por cimento, água, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (pedra ou brita) e ar. Pode também conter adições (cinza volante, pozolanas, sílica ativa, etc.) e aditivos químicos com a finalidade de melhorar ou modificar suas propriedades básicas (BASTOS, 2006).

Uma das propriedades considerada mais importante no controle de qualidade do concreto é a resistência à compressão, no entanto, em alguns casos práticos, a dureza e a permeabilidade podem ser mais interessantes (NEVILLE, 1997).

Porem para a tomada de decisão quanto a sua aplicação, faz-se necessário conhecer as propriedades deste material no estado fresco e endurecido, que são apresentadas a seguir.

3.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

A fase inicial do concreto fresco é compreendida por um período de 1 a 5 horas. Este é o intervalo de tempo em que o concreto deve ser misturado, transportado, lançado e adensado (BASTOS, 2006). As propriedades do concreto fresco que devem ser levadas em consideração estão representadas pela trabalhabilidade e pela consistência (HELENE e ANDRADE, 2007).

A trabalhabilidade é a propriedade do concreto fresco que identifica sua maior ou menor aptidão para ser empregado com determinada finalidade, sem perda de sua homogeneidade. Não se pode definir se um concreto é trabalhável sem se conhecer de antemão a finalidade e condições de contorno de sua aplicação (tipo de misturador, forma de lançamento e adensamento, dimensões e densidade da armadura da peça a ser concretada) (NEVILLE, 1997).

Assim sendo, segundo o autor, quando se trata do assunto trabalhabilidade do concreto, deve-se abordar os fatores internos que caracterizam sua reologia, ou seja, capacidade de deformar-se quando lhe é aplicado um esforço externo. Os fatores são a consistência que é o oposto da fluidez, e coesão, sendo o oposto da segregação.

A segunda propriedade do concreto fresco, consistência, é em função principalmente da quantidade de água adicionada ao concreto ou a presença de alguns tipos de aditivos como plastificantes e superplastificantes. Esta propriedade simplesmente indica quão “duro” ou “mole” está o concreto (HELENE e ANDRADE, 2007).

Para Mehta e Monteiro (2014), Bastos (2006) e Helene e Andrade (2007), os principais fatores que afetam a trabalhabilidade e consistência do concreto são apresentados a seguir:

- **Quantidade de água (relação água/materiais secos):** Quanto maior a quantidade de água, menor a consistência e coesão de um concreto.
- **Quantidade, tipo e finura do cimento:** Cimentos mais finos aumentam a demanda de água em função da maior área superficial e aumentam a coesão do concreto. Traços mais ricos em cimento mostrarão a mesma tendência. Cimentos contendo partículas mais arredondadas (com cinza volante, por

exemplo) podem aumentar a fluidez do concreto, quando se mantém constante a quantidade de água adicionada.

- **Proporção relativa entre cimento e agregados:** Concretos mais argamassados tendem a ser muito coesos e aumentam a demanda de água para a mesma consistência.
- **Granulometria e forma dos agregados:** Agregados com granulometria contínua, desde que não muito grossos, tendem a aumentar a coesão e a fluidez para uma dada quantidade de água adicionada. Agregados muito grossos diminuem a consistência e a coesão ao passo que os muito finos têm a tendência inversa (desde que a granulometria não seja totalmente uniforme). Quanto à forma, grãos arredondados aumentam a fluidez e grãos lamelares a diminuem.
- **Presença de material pulverulento:** A presença de pó nos agregados melhora a coesão dos concreto mas diminui sua consistência, devido aos fatores relacionados à área superficial da partícula.
- **Uso de aditivos:** Certos aditivos tais como, plastificantes, superplastificantes, incorporadores de ar, podem alterar significativamente a consistência e a coesão dos concretos.

Nota-se que a demanda de água, o teor de finos, a forma, dimensão e distribuição das partículas e o uso de aditivos são os principais intervenientes na trabalhabilidade do concreto.

3.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

A seleção de um material construtivo para uma aplicação específica tem que levar em conta sua capacidade de suportar a força aplicada. Tradicionalmente, a alteração que resulta da carga aplicada é chamada de deformação. A carga é chamada de tensão, que é definida como a força por unidade de área. A relação tensão-deformação nos materiais geralmente é expressa em termos de resistência, módulo de elasticidade, e ductilidade e tenacidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Na sequência serão abordadas as propriedades mecânicas de resistência a compressão, módulo de elasticidade, resistência a tração e as propriedades físicas de absorção e lixiviação.

3.2.1 Resistência à Compressão

A resistência é a medida da tensão exigida para romper determinado material. Baseado nesta resistência, medida aos 28 dias⁷, Mehta e Monteiro (2014) dividem o concreto em três categorias:

- Concreto de baixa resistência: resistência à compressão menor que 20 MPa;
- Concreto de resistência moderada: resistência à compressão entre 20 e 40 MPa (a mais utilizada em estruturas); e
- Concreto de alta resistência: resistência à compressão superior a 40 MPa.

Concretos com resistência à compressão superiores a 120 MPa são denominados concretos de “ultra resistência” ou “ultra alto desempenho” (CUAD) (TUTIKIAN et. al, 2011).

Segundo Neville (1997), a maioria das características desejáveis do concreto está relacionada com a resistência. Esta resistência aumenta com a idade do concreto, presença de umidade, composição química e características do cimento e adensamento do concreto, além de ser altamente influenciada pela relação água/cimento da mistura utilizada (SCANDIUZZI e ANDRIOLO, 1986).

Mehta e Monteiro (2014) destacam a importância da relação a/c, pois a maioria dos defeitos relacionados à resistência do concreto são decorrentes do excesso de água presente, uma vez que a resistência é inversamente proporcional à relação a/c.

Os agregados também conferem características à resistência. Para Petrucci (1993), a influência dos agregados miúdos na resistência é devida à granulometria, sendo que a do agregado graúdo está em função de sua forma e textura do grão. No caso dos agregados miúdos, quanto mais finos, mais superfícies

⁷ Idade de referência para o controle tecnológico do concreto, conforme NBR 5739 (ABNT, 2007).

específicas terão, exigindo assim uma maior quantidade de água para umidificar os grãos e, conseqüentemente, diminuindo a resistência.

O ensaio de resistência à compressão do concreto é feito por meio da moldagem de corpos de prova e é o mais comum de todos os ensaios de concreto endurecido, devido a sua facilidade de execução e, principalmente, à possibilidade de correlacionar esta propriedade com outras propriedades do concreto endurecido (BASTOS, 2006).

Segundo a NBR 5739 (ABNT, 2007), a aparelhagem necessária para a execução do ensaio deve ter a capacidade compatível com os ensaios a serem realizados, permitindo a aplicação controlada de carga sobre o corpo de prova, colocado entre os pratos de compressão. O prato que se desloca deve ter movimentação na direção vertical, mantendo paralelismo com o eixo vertical da máquina. O corpo de prova cilíndrico deve ser posicionado de modo que, quando estiver centrado, seu eixo coincida com o da máquina, fazendo com que a resultante das forças passe pelo centro.

3.2.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A resistência à tração do concreto não é a sua característica mais importante, porém pode ser o limitante de ruptura para uma estrutura, onde este tipo de sollicitação aparece, como vigas à flexão e pavimentos rígidos rodoviários. Neste tipo de teste de resistência, os CPs, em formato cilíndrico, são submetidos à cargas de compressão ao longo de duas linhas axiais diretamente opostas, num intervalo de 0,7 a 1,3 MPa até a ruptura do CP (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

De acordo com Neville (1997), além de ser um ensaio mais simples de ser realizado do que a tração direta, gera resultados mais uniformes, cerca de 5 a 12% maiores que a tração direta. Scanduzzi e Andriolo (1986), complementam que os fatores que influem nestes ensaios são os mesmos que influem no ensaio de resistência à tração direta.

3.2.3 Módulo de Elasticidade

Para Mehta e Monteiro (2014), as características elásticas de qualquer material são uma medida de sua rigidez. Apesar de o concreto não apresentar um comportamento linear, é necessária uma estimativa do módulo de elasticidade, isto é, a relação entre tensão aplicada e a deformação instantânea, dentro de um limite proporcional adotado, para que se possa, além de conhecer as tensões induzidas pelas deformações associadas aos efeitos ambientais, também calcular as tensões de projeto sob carga. O módulo de elasticidade do concreto é um dos parâmetros utilizados no cálculo estrutural e, sob o aspecto de projeto, é muito importante conhecer as propriedades elásticas do concreto para que se conheçam as deformações dos elementos estruturais que o concreto compõe.

Pelo fato de o concreto ser um material que não obedece à lei de Hooke, tanto sob esforços de compressão, como de tração, a determinação do módulo de elasticidade de concretos é mais complexa (SCANDIUZZI e ANDRIOLO, 1986). Segundo Mehta e Monteiro (2014) isso deve-se primeiro por ele não ser um material verdadeiramente elástico e, segundo, pelo fato de que nem as deformações nem as restrições são uniformes ao longo da peça de concreto.

A importância do conhecimento do parâmetro, módulo de elasticidade, tem aumentado muito recentemente, à medida que interfere nas propriedades de deformabilidade das estruturas. Existem expressões que correlacionam a resistência à compressão do concreto com seu módulo de elasticidade, pois sabe-se que são propriedades que caminham na mesma direção (BASTOS, 2006).

3.2.4 Absorção por Capilaridade

A absorção capilar é um processo de fixação de uma substância líquida ou gasosa no interior de outra sólida, pelo fenômeno de capilaridade, ocorrendo em materiais porosos que estejam com os poros secos ou parcialmente saturados. Este fenômeno consiste na ação de forças de atração dos poros do sólido sobre os líquidos que estão em contato com sua superfície. Mede-se pela absorção o volume

dos poros, que nada tem a ver com a facilidade com a qual um fluído pode penetrar no concreto, já que não existe uma relação necessária entre as duas quantidades (NEVILLE, 1997).

Para Mehta e Monteiro (2008) quanto menor o diâmetro dos capilares, maiores as pressões e, conseqüentemente, mais rápida a absorção de água pelo concreto. A água em pequenos capilares, de diâmetro entre 5 e 50 nm, exerce pressão hidrostática e sua remoção tende a induzir uma tensão de compressão sobre as paredes sólidas do poro capilar, causando contração do sistema.

Segundo Helene (1993), a absorção é uma das propriedades que regem o transporte dos íons, no interior do concreto. A absorção capilar é mais importante para a durabilidade que a permeabilidade, na avaliação da penetração de fluidos no concreto (CAMARINI, 1999).

Toda estrutura de concreto externa está sujeita a ciclos de molhagem e secagem e, como a absorção capilar trata do transporte de fluidos em vazios não saturados, esta propriedade tem grande influência no transporte de água e de outros agentes agressivos para o interior do concreto (NEVILLE, 1997).

A medição da absorção de água por capilaridade pelo concreto está normalizada pela NBR 9779 (ABNT, 2012), que utiliza corpos de prova cilíndricos ou prismáticos, e prescreve a secagem dos corpos de prova em estufa ($105\pm 5^{\circ}\text{C}$) por 72 horas e, em seguida fazem-se leituras de 3, 6, 24, 48 e 72 horas. Dessa forma fica claro que o grau de umidade dos corpos de prova, da umidade relativa do ar e da temperatura influenciam nos resultados.

3.2.5 Lixiviação

Uma vez que se aplica resíduos na fabricação de produtos cimentícios, o comportamento dos metais pesados e sua influência nas propriedades destes materiais devem ser avaliados. Neste sentido, a lixiviação de metais é um dos principais parâmetros a serem estudados visando avaliar a compatibilidade ambiental de tais materiais (JACOB et al., 2009).

A lixiviação, segundo Schaefer (2007), é um fenômeno que descreve a taxa que os constituintes perigosos ou indesejáveis são removidos de um resíduo por um

fluxo de água. Todavia, esta taxa é usualmente medida e expressa em termos da concentração de um ou mais constituintes no lixiviado.

Esta concentração determina o efeito do constituinte na vida dos organismos vivos, especialmente dos seres humanos, embora ela não prediga o efeito cumulativo provocado por uma exposição em um longo intervalo de tempo. A concentração é a base primária dos padrões de qualidade de água, especialmente os padrões de água potável e estes são, normalmente, a base dos padrões de lixiviação (CHAMIE, 1994).

A NBR 10.005 (ABNT, 2004) fixa os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) como classe I – perigosos - e classe II – não perigosos, tipo A (não inertes) e tipo B (inertes).

Atualmente, existem algumas normas que padronizam essa avaliação ambiental de materiais de construção, tanto em materiais granulares como em materiais monolíticos. No entanto, são todas normas estrangeiras originadas na França, Bélgica e Holanda. No Brasil, não são estabelecidos testes, normas ou protocolos que avaliem o potencial de lixiviação de materiais cimentícios que contenham resíduos. As normas da ABNT, NBR 10.005 e NBR 10.006, referem-se apenas aos protocolos de testes de lixiviação e solubilização, respectivamente, visando à sua classificação como resíduo inerte ou não inerte e a sua periculosidade (JACOB, 2012).

Segundo este autor, os mecanismos de transporte de um dado componente (a Figura 2 demonstra um esquema ilustrativo destes mecanismos) dentro da matriz cimentícia através da solução lixiviante se agrupam em três principais categorias: dissolução, lavagem superficial e difusão.

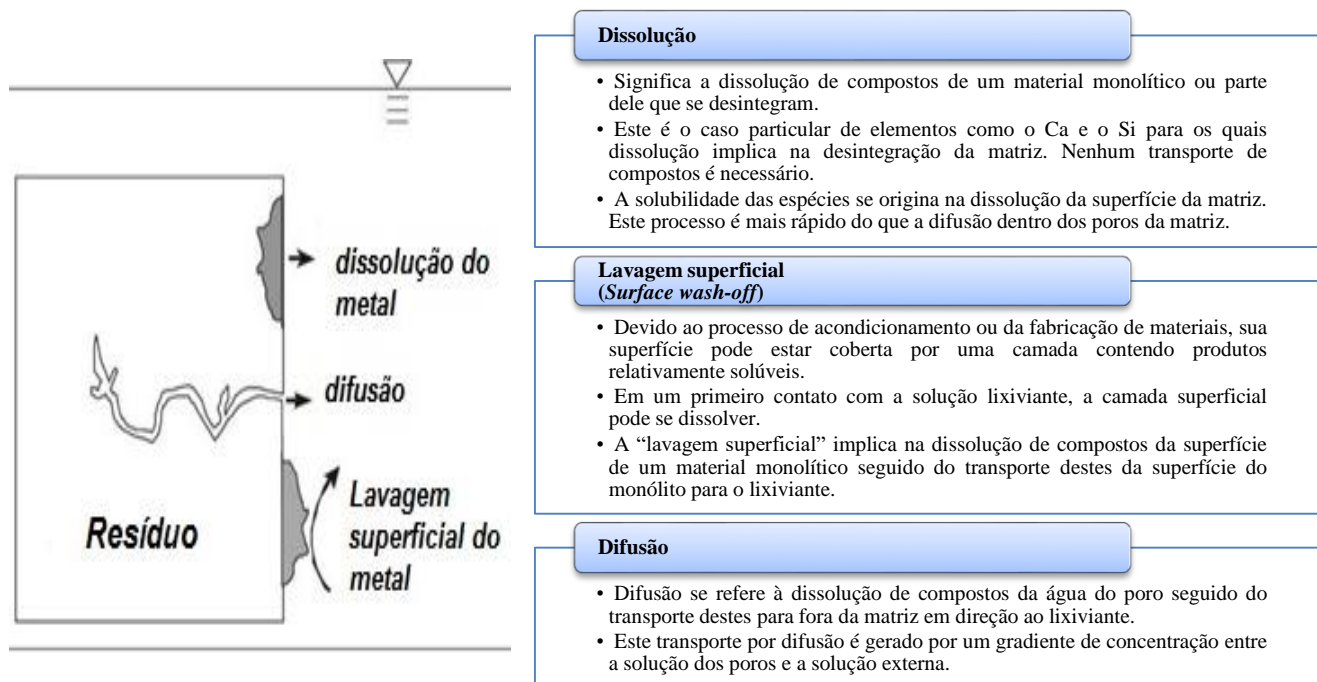


Figura 2 - Mecanismos de lixiviação.

Fonte: Adaptado de JACOB (2012) e SCHAEFER (2007).

Devido ao exposto, o estudo da lixiviação no concreto é importante indicador dos vários processos químicos e físicos de deterioração no concreto, pois a água é o principal agente de degradação do concreto, agindo como veículo de transporte de íons agressivos, e também fonte de processos químicos de degradação. O grau de deterioração está associado à permeabilidade do sólido e a velocidade de degradação está relacionada pelo tipo de concentração de íons na água e pela composição química do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 LOCAL DE ESTUDO

A ETA Tamanduá demonstrada pelas Figura 3, está localizada na Avenida das Cataratas, BR 469, Km 12 na cidade de Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil (25°34' S e 54°31' O).



Figura 3 - ETA Tamanduá Foz do Iguaçu, PR.

Fonte: Google Earth, 2014.

A ETA tem capacidade de produção diária de 21.600 m³ de água tratada. O manancial de abastecimento, o Rio Tamanduá (ver sub bacia do Rio Tamanduá na Figura 4), localizada entre os municípios de Santa Terezinha de Itaipu e Foz do Iguaçu, possui área de 14.534,09 hectares e um perímetro de 56,324 quilômetros, com uma extensão de cerca de 11.300 metros e largura média de 10 metros, pertencente a sub bacia à Bacia hidrográfica do Baixo Iguaçu (SANEPAR, 2014).

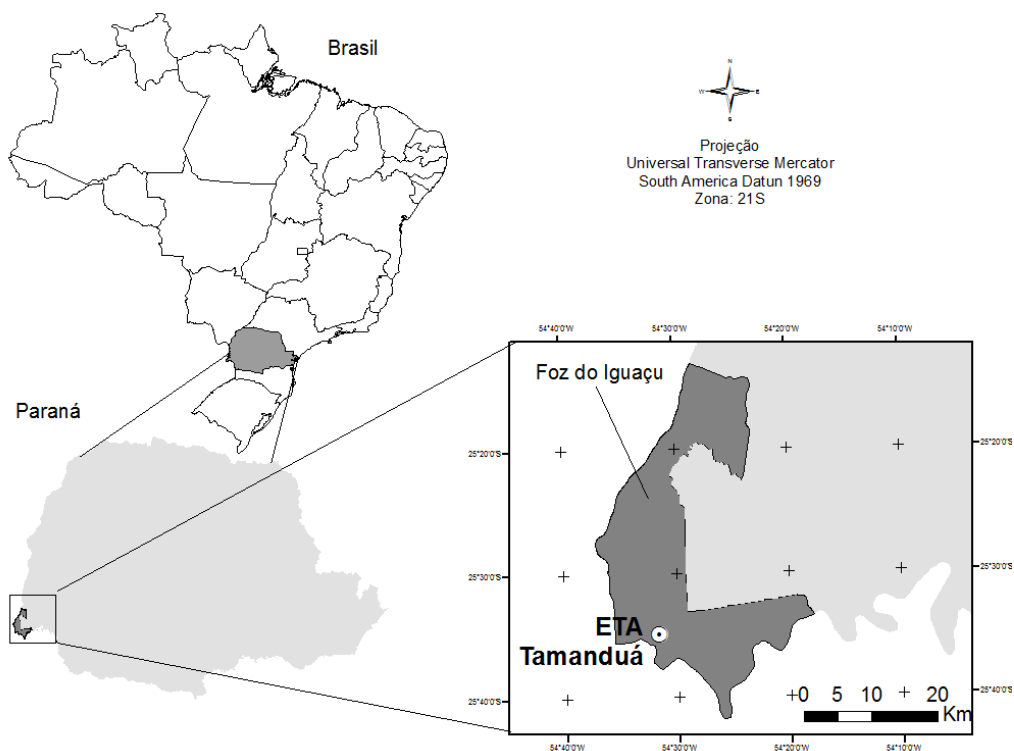


Figura 4 - Localização da área de estudo.

A ETA Tamanduá, cuja capacidade de tratamento é de $250 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, é projetada em dois módulos, com floclador, três decantadores e seis filtros cada um. A Figura 5, tem-se o fluxograma do processo contendo as etapas de tratamento de água nesta ETA, que consistem na captação de água bruta, no Rio Tamanduá, pré cloração (realizada conforme cronograma do Boletim de Tratamento Diário – BDT), correção de pH e alcalinidade, por meio da aplicação de cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) quando necessário.

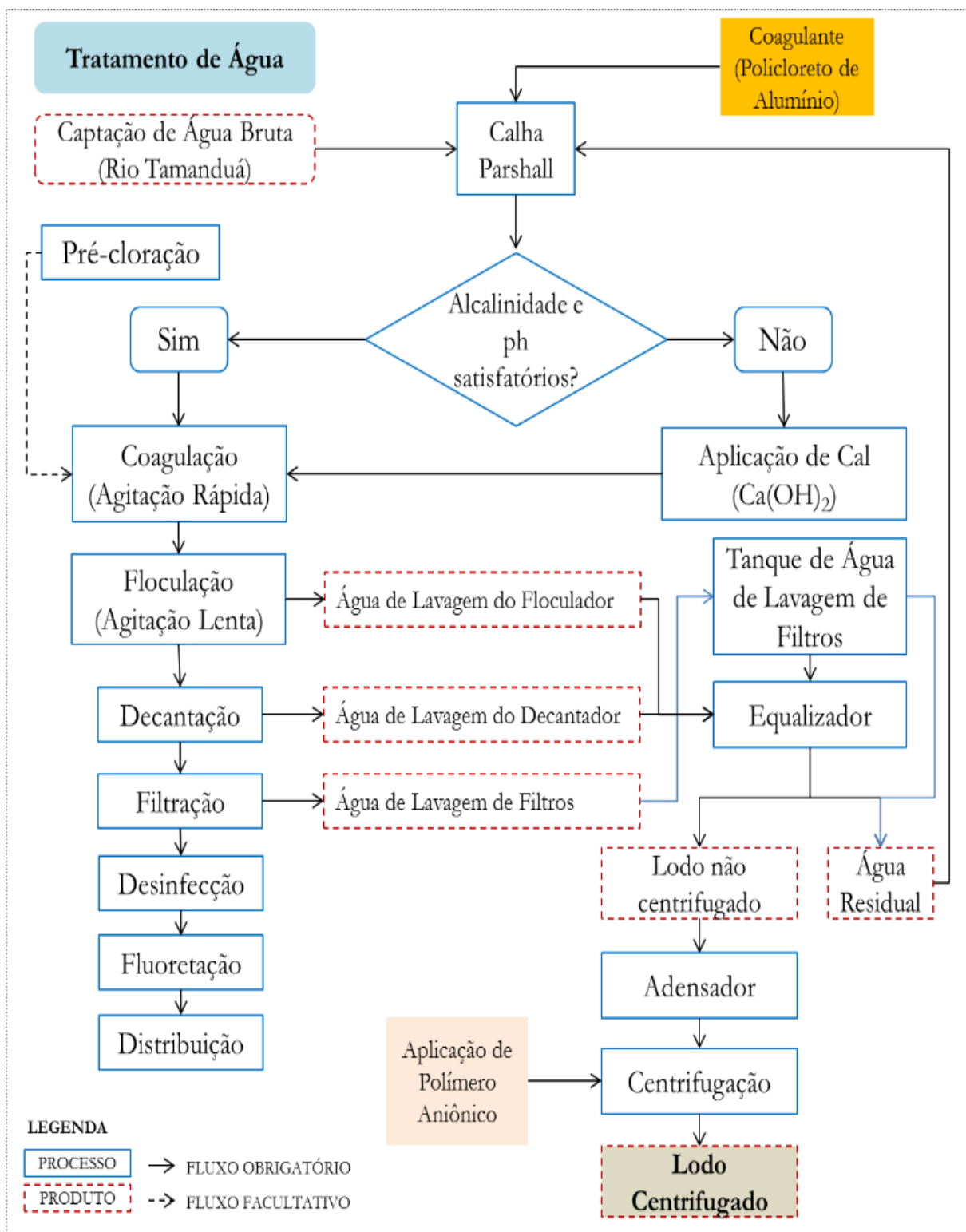


Figura 5 - Etapas do processo de tratamento de água na ETA Tamanduá.



Captação da água bruta no Rio Tamandua

Calha *parshal*, local onde são aplicados a pré cloração, correção de pH e a primeira etapa do tratamento, coagulação (agitação rápida), sendo o coagulante utilizado o PAC (Policloreto de Alumínio).



Floculadores (agitação lenta)



Decantadores (processo de sedimentação)



Filtros com camadas compostas de cascalho, pedregulho, areia e carvão.



Tanque de Armazenamento de Água de Lavagem dos Filtros e bombas para recirculação da água de lavagem.



Equalizador de lodo



Adensador de lodo



Centrífuga de Lodo e caçambas para recepção do lodo centrifugado

Quadro 3 – Imagens das Etapas do Tratamento de Água.

No processo, após a correção do pH, faz-se a **aplicação de coagulante** Policloreto de Alumínio - PAC⁸ ($Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$), na calha *parshal* para a agitação rápida, seguida pela **floculação**, com agitação lenta. Posteriormente passa-se pela fase de **decantação**, onde as partículas sólidas sedimentam e a água clarificada passa para a **filtração**. Então a água filtrada segue para a câmara de contato, onde será realizada a **desinfecção** pela aplicação de gás cloro (Cl_2), e, ainda, adição de flúor (Na_2SiF_6) para, em seguida, ser distribuída para a população (Ver Quadro 3 imagens dos processos citados).

A ETA Tamanduá é do tipo convencional completa, possuindo sistema de recirculação para água de lavagem. Em um tanque, armazena-se a água proveniente da limpeza dos filtros e, em outro, água proveniente da limpeza dos floculadores e decantadores que são lavados periodicamente conforme operação da estação de tratamento armazenados no tanque equalizador.

A **água de lavagem do floculador** e a **água de lavagem do decantador** são encaminhadas para o tanque de equalização, onde o lodo pela ação da gravidade, sedimenta, encaminhando-se o lodo para o **adensador** e o sobrenadante, **água residual**, retorna na *calha parshal* para tratamento.

A limpeza dos filtros, está relacionada a perda de carga, colmatação da carreira filtrante ou tempo de filtração de no máximo 36 horas. Essa água é encaminhada para o **tanque de água de lavagem de filtros**, onde o lodo decantado é bombeado para o **adensador**, e o sobrenadante (**água residual**) volta ao início do processo (*calha parshal*).

No **adensador**, ao acionar a **centrifugação**, o lodo é bombeado para a centrífuga onde recebe **aplicação de polímero aniônico**, gerando o produto **lodo centrifugado**, que é o resíduo decorrente do processo de tratamento da água, objeto desta pesquisa.

Na Figura 6 tem-se o lodo da ETA após processo de centrifugação, acondicionado em caçambas, onde foram coletadas as amostras para o estudo.

⁸ O PAC é um complexo polinuclear de íons de alumínio polimerizados, um tipo de polímero inorgânico de peso molecular medido em várias centenas de unidades combinado com pequenas quantidades de outros compostos (CICHY, 2001).



(a) Lodo no adensador (b) Lodo centrifugado.
Figura 6 - a) Lodo no adensador b) Lodo centrifugado.

4.2 LEVANTAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO LODO

4.2.1 Levantamento da Geração de Lodo

O volume de água aduzido e produzido anualmente, no período de 2004 a 2014 e a respectiva massa de lodo gerado na ETA Tamanduá é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Volume aduzido, produzido, e geração de lodo de ETA.

Ano	Volume Aduzido de Água (m ³)	Volume Produzido de Água (m ³)	Lodo de ETA (kg)
2004	6.163.489	5.974.430	7.550
2005	7.219.490	6.963.345	26.210
2006	7.524.574	7.253.288	14.670
2007	6.924.343	6.816.859	45.070
2008	6.694.461	6.646.969	265.740
2009	6.505.567	6.462.503	39.840
2010	5.845.535	5.813.202	37.250
2011	6.119.668	6.056.022	116.890
2012	6.199.162	6.154.314	85.230
2013	7.119.652	7.025.625	151.660
2014	7.434.424	7.271.322	101.580
Total	73.750.365	72.437.879	891.690

Fonte: Sanepar, 2014.

Verifica-se na Tabela 3 que os picos de maior geração de lodo ocorreram nos anos de 2008, 2011, 2013 e 2014 resultantes da elevada turbidez e cor da água bruta captada no período. Os demais valores na geração de lodo do período estudado estão correlacionados a manutenção da centrífuga na ETA, em seu correto funcionamento, e não necessariamente a qualidade da água bruta captada.

A produção de água potável resulta num alto consumo de produtos químicos, decorrentes da oscilação da qualidade do manancial utilizado para captação de água bruta. Em 2014 é visível o aumento de produção de água tratada atendendo o consumo populacional comparando-se aos demais anos do período selecionado. O montante gerado de lodo no período estudado demonstra a necessidade em se criar uma alternativa sustentável para disposição do lodo.

4.2.2 Coleta e Tratamento Inicial do Lodo

Para a coleta do lodo da ETA Tamanduá, foram estipulados três períodos do ano de 2014 demonstrados na Tabela 4, o primeiro período foi de janeiro a abril, o segundo período de maio a agosto, e o terceiro de setembro a dezembro. A coleta do material aconteceu de forma a obter uma amostra representativa do resíduo gerado nesta estação, conforme pode ser visto na Figura 6, aonde cada amostra tem volume de 3,6 L (lodo centrifugado), as quais foram acondicionadas em bombonas de acrílico com tampa, armazenadas no Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu, para preservação de suas propriedades e utilização posterior na dosagem para produção do concreto. A amostra de lodo utilizada no estudo foi obtida por meio de homogeneização de todas as amostras coletadas.

No período escolhido foram consideradas as variações das influências externas tais como precipitação, ventos, e temperatura, para garantir a homogeneidade das amostras e permitir a análise comparativa e suas interferências na amostra.

Tabela 4 - Coleta de amostras.

Período	Coleta	Mês (2014)	Nº de amostras*	Emprego
1º período	1	Janeiro a Abril	12	Caracterização e produção de concreto com lodo Úmido
2º período	2	Maio a Agosto	4	Caracterização, calcinação e produção de concreto com lodo Calcinado
3º período	3	Setembro a Dezembro	4	Produção de concreto com lodo Úmido

*A amostra representa volume de 3,6 litros de lodo centrifugado.

Previamente, a realização dos ensaios com o lodo ou sua utilização na composição do concreto, procedeu-se com processo de homogeneização, conforme demonstra a Figura 7 (b), das amostras coletadas, por meio de misturador mecânico (argamassadeira).



a)



b)

Figura 7 - a) Acondicionamento das amostras e b) lodo na argamassadeira.

As amostras da segunda coleta foram destinadas à caracterização e à calcinação, esta, realizada na empresa Cerâmica Foz, que em seu processo de fabricação de tijolos, utiliza fonte de calor de aproximadamente 900°C. O lodo, disposto em dois vasos de cerâmica, foi colocado no forno, juntamente com uma batelada de tijolos cerâmicos, onde permaneceu por uma semana. Este é o tempo necessário para aquecimento, queima e resfriamento dos produtos cerâmicos produzidos pela empresa, não sendo possível a abertura do forno antes da finalização do processo.

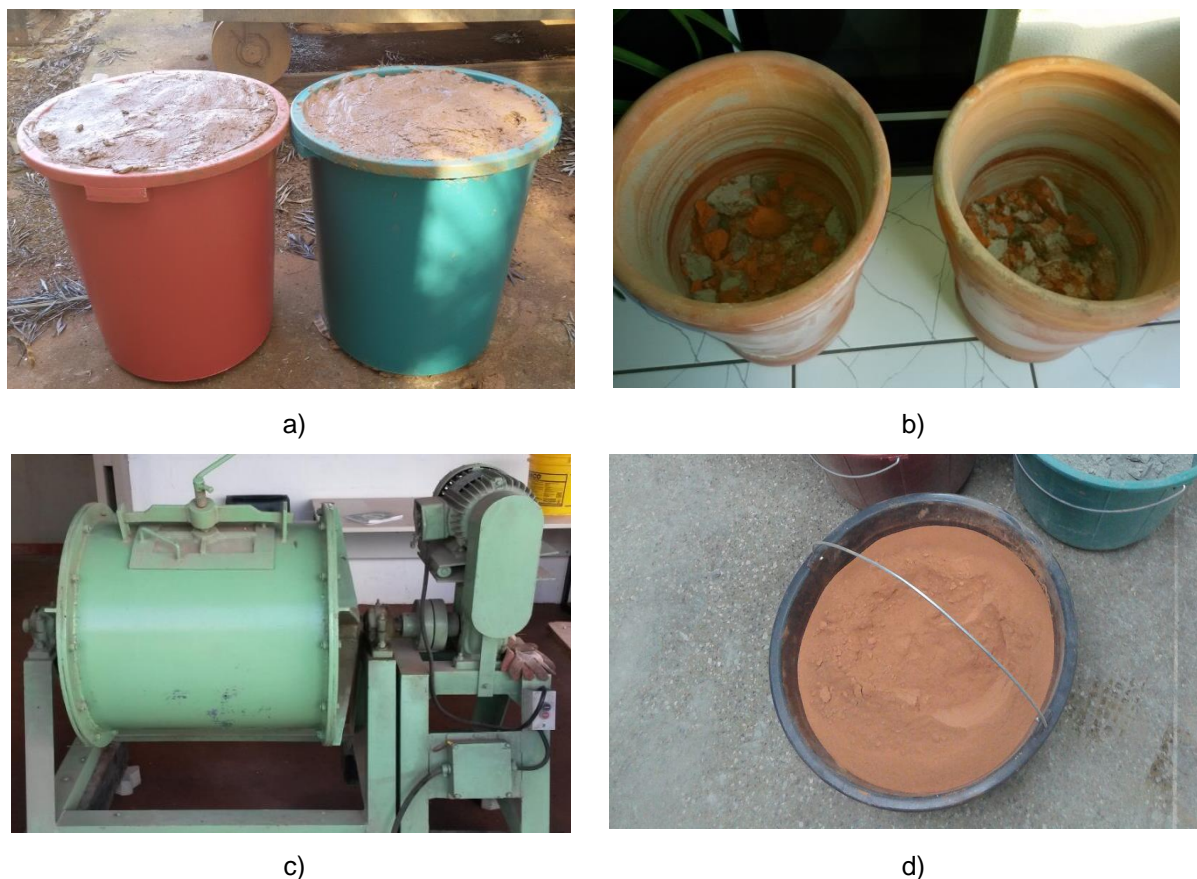


Figura 8 - a) Lodo antes da calcinação; b) Lodo após o processo de calcinação; c) moinho de bolas, d) lodo após moagem.

Após o processo de calcinação este material também foi encaminhado para caracterização. Para utilização na dosagem do concreto, após a calcinação, o lodo passou pelo processo de moagem a seco durante duas horas em moinho de bolas, marca Búfalo de 850 RPM, trifásico, no Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu, conforme demonstra a Figura 8. Esse processo fez-se necessário para desfazer os torrões formados durante a calcinação (Figura 8 “b”).

4.2.3 Caracterização das Amostras de Lodo

O lodo de ETA segundo a literatura (CARNEIRO e ANDREOLI, 2013 e DI BERNARDO, 2014), não apresenta uma composição padrão, tornando-se imprescindível sua caracterização, conforme parâmetros apresentados na Quadro 4.

Ensaio	Método/equipamento	Referência	Local
Umidade	Estufa	NBR 6457 (ABNT, 1986)	LTCI ¹
Sólidos Totais	Método Gravimétrico	NBR 10664 (ABNT, 1989)	Sanepar
Densidade	Método do Anel Volumétrico	Embrapa (1997)	LTCI ¹
Potencial Hidrogeniônico - pH	Método Potenciométrico	NBR 10005 e 10004 (ABNT, 2004)	SAAC ²
Parâmetros Inorgânicos	-	Standard Methods (APHA, 2005)	SAAC ²
Composição química	FRX	*	LAMIR ³
Análise mineralógica	DRX	*	LAMIR ³
Termogravimétrico	TG	*	UTFPR ⁴
Diâmetro médio	Granulometria a laser	*	LAMIR ³

Quadro 4 - Resumo de ensaios para caracterização do lodo.

¹ Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu.

² Solução Ambiental - Análises e Consultoria Ltda.

³ Laboratório de Análises Mineraias e Rocha - LAMIR.

⁴ Laboratório de Análises Térmicas e Espectrometria de Combustíveis e Materiais - UTFPR.

* Metodologia utilizada pelo Laboratório LAMIR - UFPR.

4.2.3.1 Determinações de umidade, sólidos totais, densidade e pH

Para a determinação de umidade, segundo NBR 6457 (ABNT, 1986) foram homogeneizadas cada uma das amostras manualmente, utilizando-se apenas uma pequena quantidade (aproximadamente 300 g). Pesou-se o cadinho com a amostra de lodo úmido que em seguida, foi colocada em estufa para secagem do material em temperatura de 105°C por 24 horas até obtenção da constância de massa.

Depois da secagem, o cadinho com o material foi pesado novamente, o resultado obtido foi registrado para posterior cálculo da umidade pela equação (1):

$$\frac{P_u - P_s * 100}{P_u - P_c} = \% \text{ Umidade} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

P_c = peso do cadinho;

P_u = peso do cadinho + lodo úmido;

P_s = peso do cadinho + lodo seco após 24 horas.

Para o ensaio de sólidos totais, seguiu-se a NBR 10664 (ABNT, 1989), método gravimétrico, utilizou-se uma cápsula de porcelana aferida, deixando-a em

mufla a ($550 \pm 50^{\circ}\text{C}$) por 1 hora, seguida por esfriamento em dessecador e pesagem em balança com precisão de 0,1 mg. A amostra foi transferida para uma cápsula de 200 mL, aferidos em proveta e evaporado em banho maria até a secura. Após a evaporação da amostra, secou-se a cápsula com resíduo, em estufa a $103-105^{\circ}\text{C}$ durante uma hora. Após o esfriamento em dessecador à temperatura ambiente, a amostra foi pesada até atingir a constância de massa de 0,1 mg.

Para o ensaio de densidade utilizou-se o método do anel volumétrico, segundo orientações do manual de métodos de análises do solo EMBRAPA (1997), que consistiu na utilização de recipiente de volume conhecido (V). Este recipiente foi pesado, descontando-se seu peso, obteve-se assim o peso do lodo (P). Para a determinação da densidade, ρ , do lodo, fez-se a divisão do peso, P, do lodo pelo volume, V, do recipiente, ou seja $\rho = P.V^{-1}$.

O pH foi determinado pelo método potenciométrico, por meio da análise do extrato lixiviado, conforme NBR 10.005 (ABNT, 2004) e NBR 10.004 (ABNT, 2004).

4.1.3.2 Análise química parâmetros inorgânicos

A determinação dos parâmetros analíticos inorgânicos foi conduzida pelo método *Standard Methods for Examination of Waste and Wastewater* (APHA, 2005), sendo realizado pelo Laboratório Solução Ambiental - Análises e Consultoria Ltda.

4.1.3.3 Fluorescência de raios x (FRX)

Segundo procedimentos do LAMIR, a composição química do lodo foi determinada em espectrômetro de fluorescência de raios-X modelo Axios Max, da marca PANalytical com software para interpretação SuperQ51, conforme Figura 9.

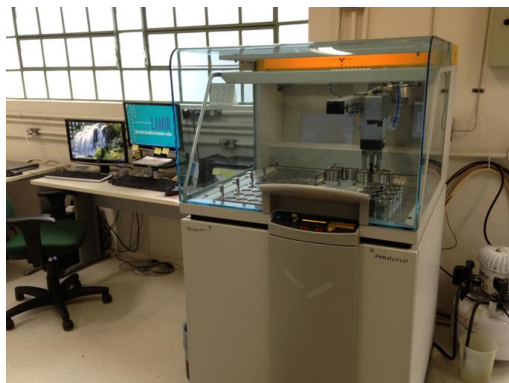


Figura 9 - Equipamento de Fluorescência de Raio X
Fonte: LAMIR, 2014.

O método utilizado para determinação semi-quantitativa foi de parâmetros fundamentais (FP). O procedimento de preparação da amostra foi o de pastilha prensada, amostra e cera orgânica, ensaio de perda ao fogo a 1.000°C e varredura química.

4.1.3.4 Difração de raios x (DRX)

A composição mineralógica do lodo foi obtida por Difração de Raios-X no LAMIR, em equipamento PANalytical, modelo EMPYREAN, conforme Figura 10, gerada a 40 kV e 40 mA usando radiação de Cu-K α ($\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$). A velocidade angular foi de 10 rpm e o intervalo de varredura foi de 2θ .

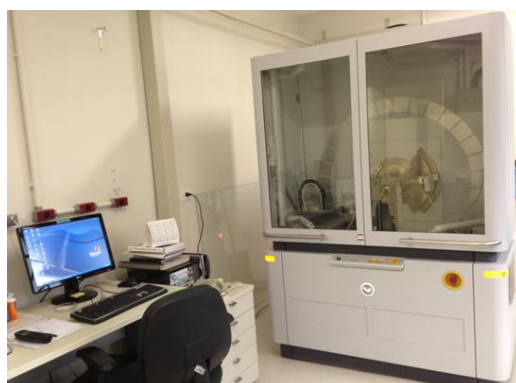


Figura 10 - Equipamento de Difração de Raio X.
Fonte: LAMIR, 2014.

Os valores de distância interplanar (d) das amostras foram comparados com padrões disponíveis no sistema *International Centre for Diffraction Data / Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (ICDD/JCPDS). Os argilominerais foram identificados por comparação das distâncias interplanares em diferentes condições de tratamento, amostra seca ao ar, calcinada a 550°C e solvatada com etilenoglicol.

4.1.3.5 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica (ATG) e a termogravimetria derivada (DTG) foram realizadas no Laboratório de Análises Térmicas e Espectrometria de Combustíveis e Materiais da UTFPR – Campus Medianeira.

O ensaio foi conduzido no intervalo de temperatura entre 50°C a 900°C , no equipamento de análise térmica simultânea (STA) marca Perckin Elmer modelo STA 6.000, em cadinho aberto de platina, sob atmosfera de O_2 com fluxo de $100 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ e taxa de aquecimento do forno de $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Para o ensaio utilizou-se a massa inicial de aproximadamente 9 mg de lodo úmido, a Figura 11 ilustra o equipamento.



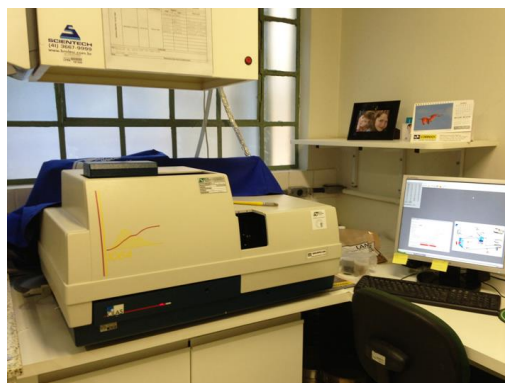
Figura 11 - Equipamento de Análise Térmica Simultânea (TG/DSC).

4.1.3.6 Distribuição granulométrica

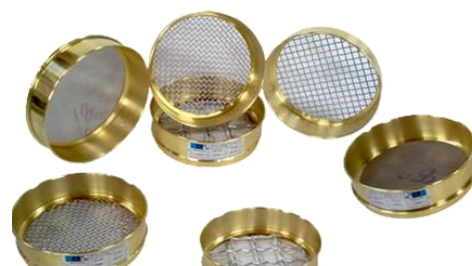
A análise de distribuição granulométrica foi realizada no LAMIR, empregando-se o procedimento misto de peneiramento mecânico e a laser. No processo mecânico foi empregado um jogo de peneiras com malhas de 5, 9, 16, 32 e 60 com aberturas variando entre 4 e $0,250 \text{ mm}$. Após o período de funcionamento

do conjunto de peneiras, realizaram-se as pesagens do material retido em cada peneira, em balança semi-analítica. O procedimento foi executado segundo a NBR 7.181 (ABNT, 1984).

No processo à laser, realizado no equipamento granulômetro Cilas 1.064 ilustrado pela Figura 12, verificou-se a faixa granulométrica compreendida entre 0,180 e 0,001 mm.



a)



b)

Figura 12 - a) Equipamentos de granulometria a laser b) Peneiras Bertel.
Fonte: LAMIR, 2014.

4.3 ESTUDO DE DOSAGEM DE CONCRETO

Para este estudo empregou-se agregado graúdo de origem basáltica com diâmetro máximo de 19 mm, massa específica de 2.700 kg.m^{-3} e massa unitária de 1.515 kg.m^{-3} .

Como agregado miúdo, empregou-se areia natural quartzosa com módulo de finura de 2,9, massa específica de 2.660 kg.m^{-3} e massa unitária de 1.490 kg.m^{-3} .

Como aglomerante foi utilizado o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI), com densidade de $3,1 \text{ g.cm}^{-3}$, a descrição dos ensaios nos agregados e suas referências estão descritas no Quadro 5.

O estudo de dosagem foi realizado com a finalidade de se analisar a influência da adição de diferentes teores de lodo úmido (LU) e lodo calcinado (LC),

em substituição à massa de areia natural, nas propriedades mecânicas e físico-químicas do concreto, especialmente da resistência à compressão axial.

Ensaio	Norma de Referência	Agregado	
		Miúdo	Graúdo
Granulometria, $D_{máx}$ e módulo de finura	NBR 248 (NM, 2003)	X	X
Massa Unitária	NBR 45 (NM, 2006)	X	X
Massa Específica	NBR 52 (NM, 2009)	X	
Massa Unitária Compactada	DNER 153 (1997)		X

Quadro 5 - Descrição dos ensaios nos agregados.

Conforme apresentado na Figura 13 (etapa 2), a substituição de lodo úmido por areia natural, foi conduzida em concretos de relação água/cimento de 0,45, 0,55 e 0,65, nos teores de 0, 5, 7 e 10%. Já o lodo calcinado foi avaliado em concretos de relação água/cimento de 0,55 para teores de substituição de areia natural por lodo de 0, 5, 10 e 20%.

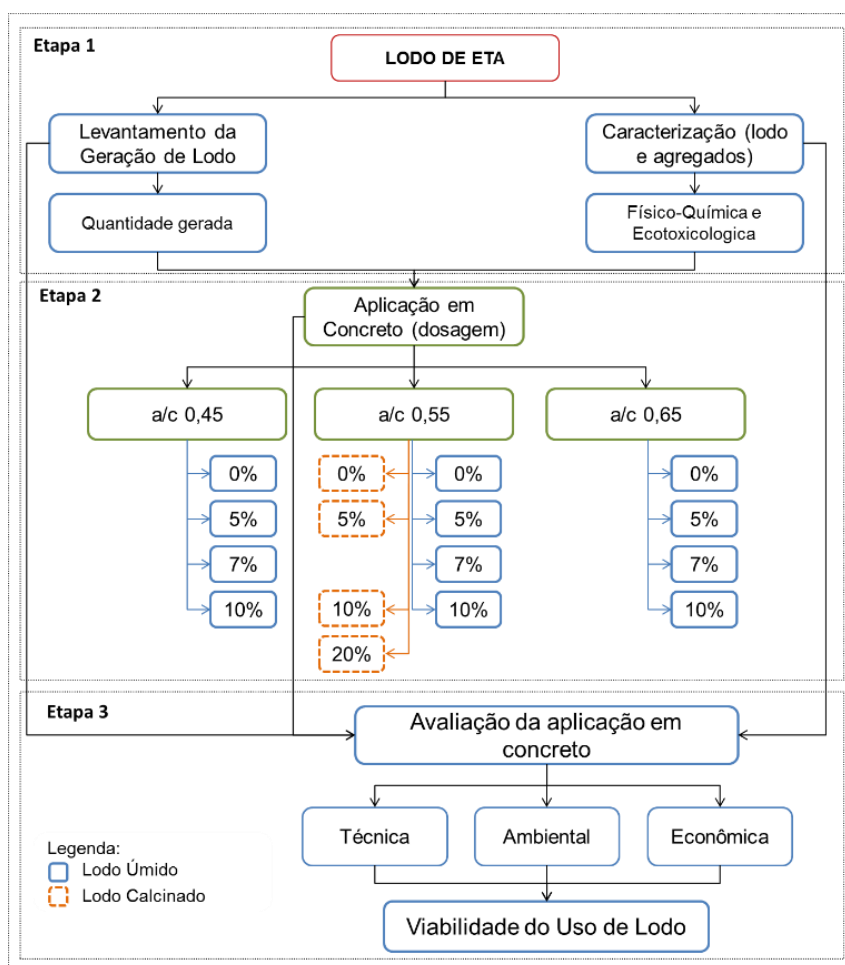


Figura 13 - Planejamento Experimental do Estudo.

Para obter as proporções dos materiais (traço) foi empregado o método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP, sendo na Tabela 5 apresentados os traços empregados e as quantidades necessárias para a produção de 40 litros de concreto.

Na dosagem, a quantidade total de água adicionada em cada traço foi corrigida em função do peso e do teor de umidade de lodo acrescentado, sendo ajustada na dosagem em função da trabalhabilidade do concreto, fixada em 6 ± 2 cm, medida pelo ensaio de consistência (*slump test*), conforme NBR 67 (NM, 1996).

Tabela 5 - Dosagem de concreto para lodo úmido e lodo calcinado.

Quantidade de Materiais (Kg)	0%	5%	7%	10%	0%	5%	7%	10%	0%	5%	7%	10%
Cimento	12,31	12,31	12,31	12,31	14,55	14,55	14,55	14,55	17,78	17,78	17,78	17,78
Areia	32,64	31,00	30,35	29,37	30,72	29,19	28,57	27,65	27,96	26,56	26,00	25,16
Brita	46,20	46,20	46,20	46,20	46,20	46,20	46,20	46,20	46,20	46,20	46,20	46,20
Lodo Úmido (LU)	0	6,04	8,46	12,09	0	5,69	7,97	11,38	0	5,18	7,25	10,36
Água (Inicial)*	8,00	3,59	1,82	0	8,00	3,85	2,19	0	8,00	4,22	2,71	0,44
Água (Correção)**	0,00	3,00	4,50	5,70	0,00	3,50	5,00	7,00	0,35	4,50	6,00	8,00
Água Total***	8,00	6,588	6,32	5,70	8,00	7,35	7,19	7,00	8,35	8,72	8,71	8,44
a/c _{final}	0,65	ND	ND	ND	0,55	ND	ND	ND	0,45	ND	ND	ND
Quantidade de Materiais (Kg)					0%	5%	10%	20%				
Cimento					14,55	14,55	14,55	14,55				
Areia					30,72	29,19	27,65	24,58				
Brita					46,20	46,20	46,20	46,20				
Lodo Calcinado (LC)					0	1,54	3,07	6,14				
Água (Inicial)*					8,00	8,00	8,00	8,00				
Água (Correção)**					0,00	1,00	1,78	4,00				
Água Total***					8,00	9,00	9,78	12,00				
a/c _{final}					0,55	0,62	0,76	0,81				

* Água inicial corresponde a água de dosagem, onde para as misturas com adição de lodo de ETA contava-se a água presente no lodo (umidade).

** Água de correção corresponde a água adicionada durante a mistura do concreto a fim de se obter a trabalhabilidade requerida.

*** Água total corresponde a soma da água inicial com a água de correção

ND – não determinada.

Para este estudo foram avaliadas as variáveis de respostas nos ensaios físicos para o estado endurecido e para o estado fresco, conforme Quadro 6.

CONCRETO	VARIÁVEIS	CORPOS DE PROVA (CP)		
		Quantidade (unidades)	Idade (dias)	Dimensão (cm)
Estado Fresco	<i>Slump test</i>	--	--	--
Estado Endurecido	Resistência à Compressão Axial (MPa)	2	7	(10 x 20)
		2	28	(10 x 20)
		2	60	(10 x 20)
		2	90	(10 x 20)
	Resistência à Tração por Compressão diametral (MPa)	3	28	(10 x 20)
	Módulo de Elasticidade (GPa)	3	28	(10 x 20)
	Absorção de Água (%)	3	28	(10 x 20)
	Lixiviação	1	28	(10 x 10)
Total de CPs		18 unidades	Totalizando 288 CPs	

Quadro 6 - Ensaio no estado fresco e endurecido.

Na dosagem foram confeccionados mais 2 CPs prismáticos de 10 cm de altura, 10 cm de largura e 30 cm de comprimento para o ensaio de carbonatação e análise microscópica em estudos futuros.

Para a mistura dos concretos foi utilizada betoneira com capacidade nominal de 400 litros e rotação do tambor de 28 rpm, sendo que em cada amassada constitui um volume total de mistura de 40 litros.

Os insumos foram pesados em balança digital, com precisão de 10 g, e, então, colocados na betoneira. Foram adicionados os agregados graúdos, seguidos dos agregados miúdos, lodo e metade da água prevista. Em seguida, adicionou-se o cimento e o restante da água (para enxaguar o balde de lodo foi utilizado o restante de água da dosagem e despejado na betoneira).



a)



b)

Figura 14 - a) CP sendo moldados com auxílio de vibrador b) CPs moldados.

O tempo de amassamento do concreto foi de, aproximadamente 15 minutos, com observação da trabalhabilidade do concreto (*slump test*) para verificar a necessidade ou não de mais água. Ao término deste tempo, e ao atingir o abatimento alvo, fez-se a moldagem dos CPs de acordo com a Figura 14, conforme recomendações da NBR 5.738 (ABNT, 2008).

Até as datas dos ensaios mecânicos e físico-químicos indicados no Quadro 6, os CPs foram mantidos em câmara úmida com umidade relativa mínima de 95%.

4.3.1 Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone - *Slump test*

Ao término das misturas de concreto, e antes da moldagem dos CPs de cada dosagem executada, foi realizado ensaio de abatimento do tronco de cone "*slump test*" (ver Figura 15), conforme instruções da NBR 67 (NM, 1998).

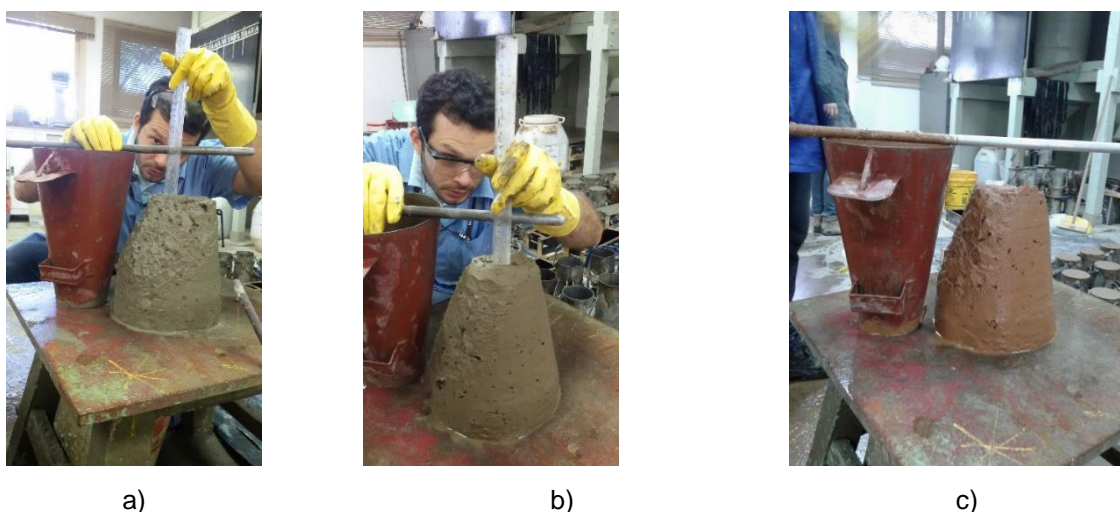


Figura 15 - a) mistura sem adição de lodo b) mistura com 5% de LU, c) mistura com 5% de LC.

Como o objeto do trabalho foi avaliar a influência da adição do lodo ao concreto, optou-se por corrigir a consistência das misturas produzidas de 6 ± 2 cm por meio da adição de água e não de aditivo químico (plastificante ou superplastificante).

4.3.2 Resistência à Compressão Axial

Após completarem o tempo de cura previsto (7, 28, 60 e 90 dias) para o ensaio, os CPs foram retificados com a finalidade de obtenção da regularidade das superfícies de aplicação de carga, de modo que o carregamento ocorra uniforme, observando-se procedimentos recomendados pela norma NBR 5.739 (ABNT, 2007).

A Figura 16 apresenta o equipamento retificador de faces e o aparelho utilizado para o ensaio de resistência à compressão.



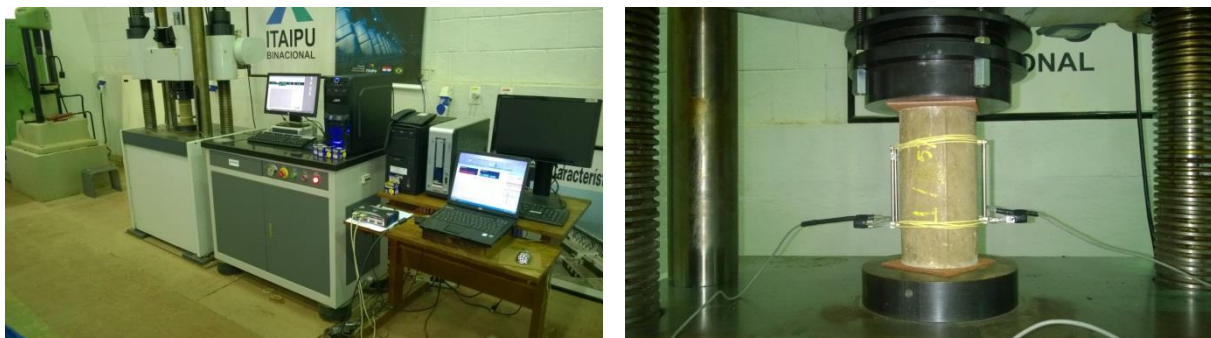
Figura 16 - a) Retificadora de faces do CPs b) Equipamento para ensaio de fc.

Neste ensaio, o CP de 10 x 20 cm, é colocado no centro do prato da máquina de ensaio e submetido a um carregamento progressivo até a ruptura, para o registro do valor da carga máxima.

4.3.3 Módulo de Elasticidade

Neste ensaio ver (Figura 17), os CPs cilíndricos de dimensão 10 x 20 cm, foram submetidos a uma aplicação de força (F) que corresponde a 30% da carga máxima necessária para sua ruptura (determinada pela ensaio de resistência à compressão axial), a fim de se verificar a sua elasticidade pelo módulo tensão fixa (σ_a).

A deformação do CP foi medida com a utilização de *clips gages* (medidores de deformação elétricos), instalados na lateral do CP, em posições diametralmente opostas (Figura 17 “b”).



a)

b)

Figura 17 - a) Aparelhagem para ensaio b) Clip-gages instalados no CP.

O módulo de elasticidade foi determinado conforme NBR 8.522 (ABNT, 2008), a partir da média dos resultados de 3 CPs.

4.3.4 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Para este ensaio utilizou-se o CP cilíndrico de 10 x 20 cm com idade de 28 dias, com o objetivo de verificar a ruptura no seu diâmetro. Para isto foi utilizada uma máquina universal de ensaios modelo *Tokyo Testing Machine MFG*, na qual o CP foi colocado com o eixo horizontal entre os pratos da prensa e submetido a uma carga de compressão contínua e velocidade constante ao longo das duas linhas axiais opostas até sua ruptura diametral, como mostra a Figura 18.



Figura 18 - Ensaio de Compressão diametral.

O ensaio seguiu a especificação da norma NBR 7.222 (ABNT, 1994), sendo realizado em três exemplares de cada traço.

4.3.5 Absorção de Água

A absorção de água por capilaridade dos concretos produzidos foi determinada seguindo a prescrição da NBR 9.779 (ABNT, 2012). Para cada traço, foram ensaiados três corpos de prova, após 28 dias de idade, sendo que o procedimento teve início com a colocação destes em estufa à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, até a constância de massa por aproximadamente 72 horas. Em seguida a estufa foi desligada, e os CPs permaneceram em seu interior para o resfriamento até a temperatura ambiente de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, conforme Figura 19 “a”.



a)

b)

Figura 19 - a) CP na estufa b) CP vedado com filme plástico no recipiente.

Após o resfriamento, os corpos de prova foram vedados com filme plástico, para garantir que a absorção de água por capilaridade acontecesse apenas pela base em contato com a água. Posteriormente, as amostras foram posicionadas, com a superfície em contato com a água, sobre suportes plásticos (estrado) em um recipiente de vidro adequadamente vedado (Figura 19 “b”), com abertura superior inferior a 1% da área. O ensaio foi conduzido em sala climatizada com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Junto ao recipiente de ensaio foi colocada uma régua para o devido monitoramento do nível da água, cuja constância foi mantida em 5 ± 1 mm.

Foram feitas pesagens dos corpos de prova, utilizando-se uma balança de resolução de 0,1 g, após retirada da estufa, antes de dispor no recipiente, e, após o período estipulado de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h contadas a partir da disposição dos CPs em contato com a água. Chegada a hora para a leitura de massa, para pesagem do corpo de prova, foi realizada num intervalo de 30 segundos, utilizando-se um pano úmido para retirar o excesso de água presente na base do corpo de prova de concreto. A absorção de água por capilaridade pôde, então, ser expressa pela equação 2:

$$C = \frac{(A - B)}{S} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

- C é a absorção de água por capilaridade, em g.cm^{-3} ;
- A é a massa do corpo de prova, em g, que permanece com uma das faces em contato com a água durante o período de tempo especificado;
- B é a massa, em g, do corpo de prova seco, assim que é atingida a temperatura ambiente de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, em g; e,
- S é a área da seção transversal em contato com a água, dada em cm^2 .

Assim que a última leitura foi realizada, os corpos de prova foram submetidos ao rompimento diametral em uma prensa mecânica (Figura 18), para que a altura da ascensão capilar máxima interna, chamada “franja”, pudesse ser observada.

4.3.6 Ensaio de Lixiviação

Para classificação química de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), avaliação da imobilização dos contaminantes, o comportamento dos metais pesados e sua influência nas propriedades destes materiais foram realizados o ensaio de lixiviação, segundo procedimentos da NBR 10.005 (ABNT, 2004) para análise de toxicidade, adaptando-se procedimento conduzido no estudo de Hoppen (2004).

Primeiramente, cada corpo de prova cilíndrico de 10 x 20 cm dos traços produzidos, após 28 dias de cura, foram cortados ao meio em uma marmoraria, gerando amostras cilíndricas de 10 x 10 cm, conforme demonstra Figura 20.

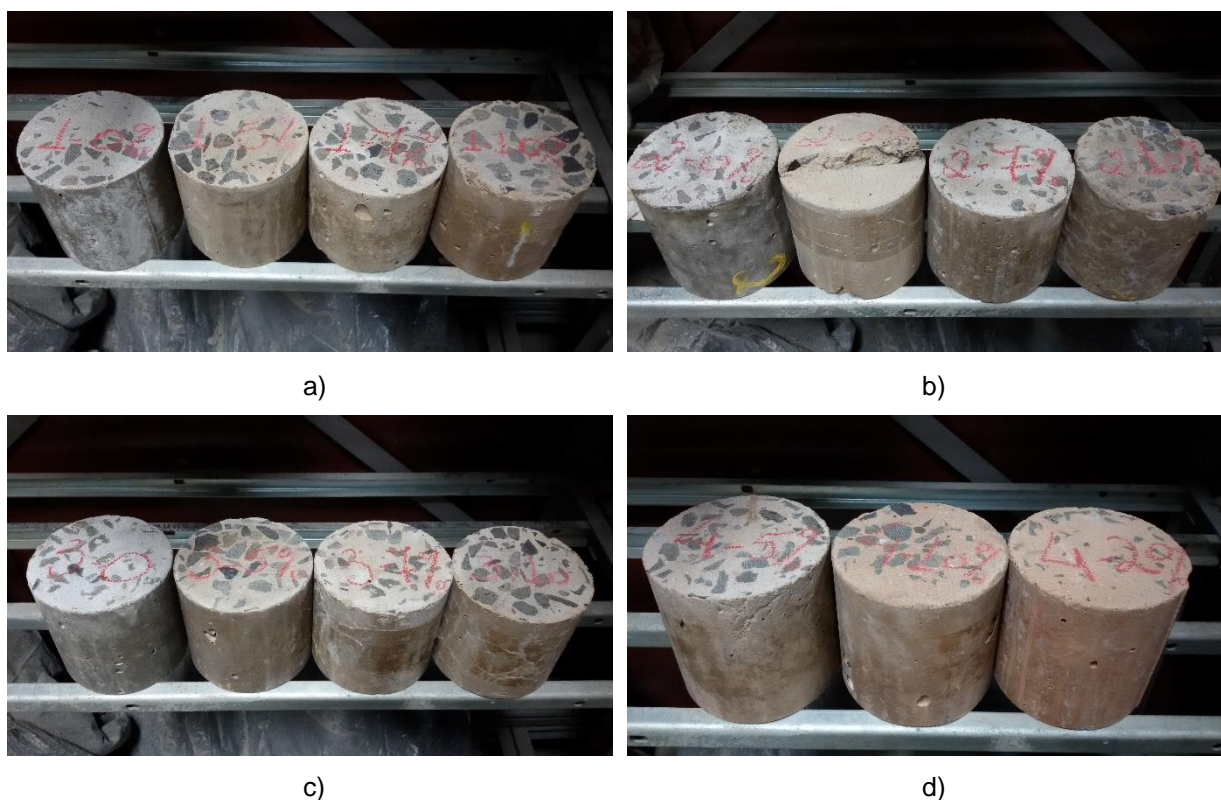


Figura 20 - a) CP a/c 0,65 b) CP a/c 0,55 LU c) CP a/c 0,45 e d) CP a/c 0,55 LC.

A lixiviação foi determinada, em presença de meio ácido, simulando possíveis acidentes. Em um frasco, foram colocados 1.000 mL com água deionizada e isenta de matéria orgânica mais solução lixiviante (ácido acético glacial). Para o meio ácido, elaborou-se uma solução de ácido acético a 4,5%, colocando meio CP para

cada uma das dosagens, imersos nesta solução, durante 10 dias, conforme Figura 21.

Após este período, parte da solução foi coletada e analisada com a finalidade de avaliar a toxicidade dos analitos (Ag, As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, V, Zn, Se, Ti, Ba, Sr), presentes nesta amostra (solução), após processo de lixiviação.

As análises foram realizadas no Laboratório de Análises Químicas Industriais e Ambientais (LAQIA), do Departamento de Química do Centro de Ciências Naturais e Exatas, da UFSM, por Espectrômetro de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS, do Inglês, *Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry*), marca PerkinElmer SCIEX, modelo ELAN® DRC II, PerkinElmer, EUA. O ICP-MS é equipado com nebulizador pneumático tipo Meinhard®, tipo "A" e tocha com tubo injetor de 2 mm (d.i.).

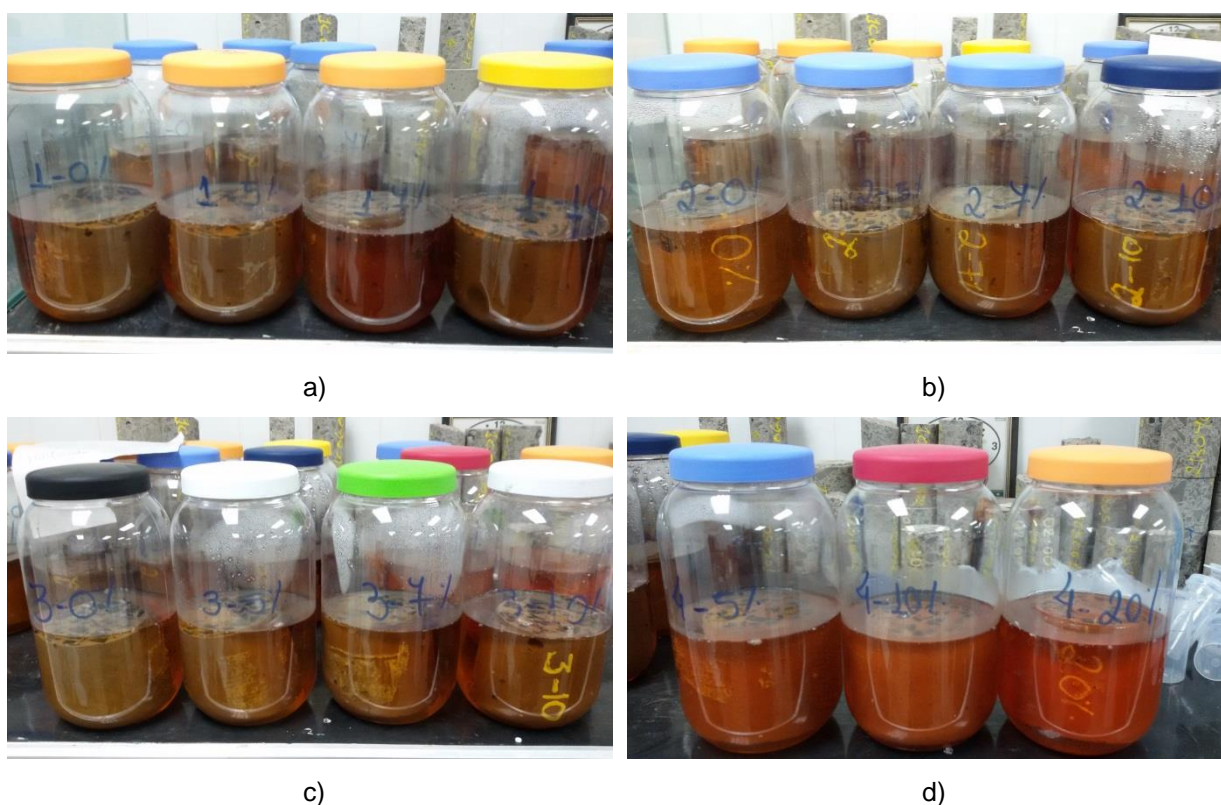


Figura 21 - Imersão do CP em ácido acético de relação: a) a/c 0,65 b) a/c 0,55 LU c) a/c 0,45 e d) a/c 0,55 LC.

Segundo informações do LAQIA, para a geração do plasma, foi utilizado gás argônio com 99,996% de pureza e para as determinações dos analitos seguiu-se as condições operacionais recomendadas pelo fabricante do equipamento.

4.4 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA, TÉCNICA E AMBIENTAL

O estudo de viabilidade econômica, técnica e ambiental foi conduzido conforme procedimentos adaptados da literatura (CORDEIRO, 1999 e HOPPEN, 2004).

4.4.1 Viabilidade Econômica

No estudo de viabilidade econômica considerou-se o valor de mercado do produto, estimando-se o custo de produção do concreto referência (custo de cada componente: areia, brita, cimento e água) frente à fabricação do concreto com adição do lodo úmido e/ou calcinado, considerando também o custo da disposição do lodo no aterro sanitário (quando o lodo é aproveitado, passa a não existir), do transporte, da calcinação, e moagem do lodo de ETA.

$$C_{\text{Concreto}} = C_c + C_a + C_b + C_{ag} - C_{disp} \pm C_{trans} + C_{cal} + C_m \quad \text{Equação 3}$$

$$C_{\text{energia}} = (C_{\text{cavaco e farelo}} \times \text{Quantidade} \times t) \quad \text{Equação 4}$$

$$C_{cal} = (C_{trans} + C_{energia}) \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

C_{concreto} = custo do concreto

C_c = Custo do Cimento

C_a = Custo da Areia

C_b = Custo da Brita

C_{ag} = Custo da Água

C_{disp} = Custo da disposição do lodo

C_{trans} = Custo com o Transporte do lodo

C_{cal} = Custo com a calcinação do lodo

C_m = Custo com a moagem do lodo

Para o custo com a calcinação do lodo (C_{cal}), foram considerados os valores para procedimentos informados pela empresa Cerâmica Foz, onde se faz o uso de cavaco e farelo para manter o aquecimento (energia) do forno à temperatura de 900°C, durante uma semana, conforme equações 4 e 5.

Para a estimativa do custo de moagem, utilizou-se a equação que considera a potência consumida (P, em Watts) do equipamento utilizado, multiplicando-a pelo tempo (t, em horas) que o material permaneceu no moinho. A potência nominal somente será consumida com carga nominal do moinho, sendo considerada a pior

condição. O valor foi obtido multiplicado pelo valor monetário, em reais, do kilowatts hora - kWh (C_{kWh}) praticado pela Companhia Paranaense de Energia Elétrica - COPEL.

$$C_m = P \times t \times C_{kWh} \quad \text{Equação 6}$$

4.4.2 Viabilidade Técnica

Já o estudo de viabilidade técnica considerou os resultados obtidos em ensaios das amostras (corpos de prova) dos concretos com diferentes teores de adição de LU ou LC, submetidos à avaliação das propriedades físico-químicas (absorção de água por capilaridade e lixiviação) e mecânicas (resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral). As amostras (CPs) foram avaliadas tendo como base seu desempenho conforme critério apresentado no Quadro 7 para avaliação das propriedade supracitadas.

Propriedades avaliadas	Decisão
Resistência à compressão (Fc)	Maior é melhor
Módulo de Elasticidade (E)	Maior é melhor
Resistência a tração (Ft)	Maior é melhor
Absorção de água (AA)	Menor é melhor

Quadro 7 - Avaliação técnica.

Para a propriedade de resistência à compressão (Fc), principal propriedade do concreto, com base na literatura e normas técnicas, foram estabelecidos os seguintes limites de avaliação: **Baixa**: $f_c < 25$ MPa (concretos não estruturais); **Moderada**: f_c entre 25 e 40 MPa e **Alta**: $f_c > 40$ MPa, sendo desejável misturas que possuam resistência na faixa moderada e alta (concretos considerados estruturais).

4.4.3 Viabilidade Ambiental

Por último, para a viabilidade ambiental por meio do ensaio de lixiviação, com a finalidade de assegurar a saúde humana e ambiental, foi avaliado se o concreto contendo lodo obteve êxito na imobilização dos contaminantes. Considerando na viabilidade ambiental, conforme Quadro 8, o atendimento aos itens de biossegurança, toxicidade, disposição final, atendimento a legislação vigente e a certificação ambiental.

Itens avaliados	Como?	Atende?	
		SIM	NÃO
A- Biossegurança	Ensaio de lixiviação.		
B- Toxicidade	Ensaio de lixiviação.		
C- Disposição final	Local de disposição.		
D- Legislação brasileira	Atendimento a Legislação.		
E- Certificação Ambiental	Certificação Ambiental.		

Quadro 8 - Avaliação ambiental.

Foram considerados também, os benefícios da utilização do lodo na produção de concreto, frente ao impacto ambiental da IC no consumo dos recursos naturais e energia na produção do concreto.

4.5 ANÁLISE DOS DADOS E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados das variáveis de resposta (Quadro 6) foram registrados e organizados em planilhas eletrônicas para tratamento das análises estatísticas.

A análise dos dados foi feita por análise de variância (ANOVA), com significância de 5%, utilizando-se o software Statistic. Pela análise de variância é possível se tomar uma decisão a respeito da diferença estatística existente nos resultados obtidos, o que permite verificar segundo Mucelin (2006), se existe diferença significativa entre as médias dos tratamentos e se estes fatores exercem influência em alguma variável dependente.

As conclusões referentes ao desenvolvimento experimental foram obtidas com base nos resultados dos ensaios analisados e interpretados em sua forma de gráficos e tabelas gerados assim como da análise de variância, comparados os tratamentos propostos no estudo com estudos realizados na literatura referente ao aproveitamento do lodo na IC.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE LODO

5.1.1 Umidade, Sólidos Totais, Densidade e pH

Na Tabela 6 são apresentados os valores de teor de umidade, densidade e sólidos totais para a primeira coleta das amostras. Verificou-se que o teor de umidade médio lodo úmido (LU) foi de 76,37% (23,63% de sólidos totais) para a primeira coleta, de 60% (40% de sólidos totais) para a segunda, e de 62% (38% de sólidos totais) para a terceira. Valores análogos aos encontrados por Tartari (2011) em pesquisa realizada na ETA objeto do estudo, com umidade de 74% e teor de sólidos de 26%, convalidando os resultados experimentais.

Tabela 6 – Resultado da umidade, densidade e sólidos totais na 1ª coleta.

Amostras	Umidade (%)	Sólidos Totais (%)	Densidade (g.cm-3)
1	74,94	25,05	1,21
2	66,76	33,24	1,22
3	80,31	19,69	1,13
4	80,32	19,68	1,18
5	74,44	25,55	1,18
6	78,75	21,25	1,19
7	78,06	21,94	1,11
8	79,52	20,48	1,23
9	78,5	21,49	1,09
10	80,02	19,98	1,17
11	71,49	28,5	1,15
12	73,29	26,71	1,2
<i>Média</i>	76,37	23,63	1,17
<i>Erro padrão</i>	1,23	1,23	0,01
<i>Mediana</i>	78,28	21,71	1,18
<i>Desvio padrão</i>	4,25	4,25	0,04
<i>Variância da amostra</i>	18,08	18,07	0,001

O teor de umidade tem influência direta na destinação e aplicação do lodo, especialmente para uso em produtos cimentícios, a quantidade de água para a

produção de materiais deve ser rigorosamente controlada, podendo ser um limitador na utilização deste resíduo para este fim.

A densidade média (ρ) do lodo úmido foi de $1,17 \text{ g.cm}^{-3}$ ($\sigma \pm 0,044$), valor muito próximo ao da água (é $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$) devido à alta umidade da amostra (76%). O valor encontrado neste estudo está dentro dos padrões usuais encontrados na literatura: densidade 1,061 a $1,189 \text{ g.cm}^{-3}$ para 25% de sólidos totais (RICHTER, 2001).

O valor médio encontrado para o teor de sólidos totais (23,63) está dentro dos limites relatados na literatura. Segundo Richter (2001) para desidratação mecânica do lodo por centrifugação, o teor varia entre 16 e 35% de sólidos totais.

5.1.2 Análise Química Parâmetros Inorgânicos

Na Tabela 7 são apresentados os dados referentes às análises do lixiviado do lodo. Os valores encontram-se dentro dos limites preconizados pela NBR 10.004 (ABNT, 2004). O valor de pH em água (7,9) confere características alcalinas ao material.

Tabela 7 - Parâmetros inorgânicos do lodo.

Analito	Limite máximo no lixiviado¹ (mg.L⁻¹)	Resultado (mg L⁻¹)
As	1,0	<0,0001
Al	NA ²	8,98
Ba	70,0	<0,005
Cd	0,5	0,04
Pb	1,0	0,63
Cr	5,0	0,02
F⁻	150,0	0,37
Hg	0,1	<0,0001
Ag	5,0	0,005
Se	1,0	<0,001

NOTA: ¹ Limite máximo no lixiviado conforme ABNT NBR 10.004 (2004).

² NA – não se aplica.

Não é incomum observar valores elevados de metais pesados no lodo, provenientes de produtos utilizados no processo de tratamento de água. Martínez-García (2012), estudando o lodo proveniente da ETA de Jaen (Sul da Espanha), observou elevados teores de Fe e Al, além da presença de Ca, Mg e Na, continha também componentes semelhantes à argila, que indicavam a possibilidade de

substituição desta matéria-prima (argila) pelo lodo, aplicado em seu estudo na composição de cerâmicas. Fadanelli e Wiecheteck (2010) também identificaram valores significativos de Al 32%, Fe 31%, Si 25%, no lodo da ETA Pitangui (Ponta Grossa – PR), devido ao coagulante utilizado. Tsutiya e Hirata (2001) sugere que a caracterização do lodo deve estar relacionada à alternativa de disposição final, e não apenas na caracterização dos parâmetros estabelecidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004); ressaltando que os parâmetros analisados permitem tão somente uma avaliação geral da qualidade do lodo, indicando possíveis usos, contudo, alguns parâmetros podem ser omitidos e/ou acrescentados.

5.1.3 Fluorescência de Raios-X (FRX)

Realizou-se a caracterização química do lodo por fluorescência de raios-X (FRX) das amostras coletadas em períodos distintos (ver Tabela 4), comparando-as com a pesquisa de Tartari (2011), na ETA em estudo.

Verificou-se perda ao fogo do lodo da ordem de 31% para a amostra da primeira coleta com LU (2014-A) e 23% para segunda amostra com LU (2014-B), e para o LC a perda ao fogo foi de 2,47% (2014-C). Esta perda ao fogo, deve-se possivelmente, à presença de águas intersticiais, hidroxilas dos argilominerais e dos hidróxidos existentes. Também, podem ter sido originado da volatilização de componentes da matéria orgânica conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Composição química do lodo.

Composição (%)																Estudo
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	Cl	V ₂ O ₅	Na ₂ O	CuO	ZrO ₂	P.F.	
24,2	23,2	17,9	1,9	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	-	0,1	0,1	0,1	< 0,1	31	2014-A
30,3	25,1	17,1	2,8	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	0,1	23,08	2014-B
38,6	33,6	20,4	3,4	0,1	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2		0,1	0,1	-	0,1	2,47	2014-C
24,1	31,6	18,6	2,2	2,8	-	-	-	-	0,3	-	-	-	-	-	20,4	2011*

*TARTARI (2011) – dados não entraram na determinação da média.

Verificou-se que a soma dos óxidos SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ na matriz correspondeu a cerca de 65% dos componentes químicos totais na primeira coleta (2014-A), a 72,5% na segunda coleta (2014-B), e 92,6% para o lodo calcinado

(2014-C), os valores da primeira e segunda coleta estão próximos ao encontrado por Tartari (2011) para os mesmos óxidos (74%). O autor afirma que estas concentrações elevadas, principalmente de SiO_2 e Al_2O_3 são esperadas devido à própria composição do material sedimentado no tratamento de água e do coagulante utilizado no processo de tratamento, que reflete diretamente na composição majoritária de Al.

A presença dos óxidos alcalinos (K_2O), alcalinos terrosos (MgO e CaO), TiO_2 e P_2O_5 justificam-se pelo uso do coagulante do policloreto de alumínio no tratamento de água e pela própria composição da água, a qual contém materiais em suspensão, como por exemplo, a areia e materiais argilosos.

Os resultados encontrados indicam que o lodo apresenta variações em suas características, que podem ser relacionadas com a variação sazonal, que tem relação direta com as interferências do clima, chuva e condições do solo. Justificando a importância da caracterização físico-química do lodo para o melhor destino e possível utilização em sua disposição.

5.1.4 Difração de Raios-X (DRX)

Para caracterização das fases cristalinas do lodo por difração de raios-X (DRX) foram realizadas nas amostras coletadas em períodos distintos (ver Tabela 4).

Nestas amostras foram identificadas, nos difratogramas apresentados (Figura 22), as fases cristalinas dos principais minerais: a caulinita, mineral de silicato de alumínio hidratado [$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$], o quartzo, mineral de óxido de silício (SiO_2), a goethita, mineral de óxido de ferro [$\text{FeO}(\text{OH})$], o rutilo, mineral composto de dióxido de titânio (TiO_2), a hematita, mineral composto de óxido de ferro (Fe_2O_3), e o anatásio, mineral composto de dióxido de titânio (TiO_2) indicando uma provável variabilidade na composição mineralógica do lodo.

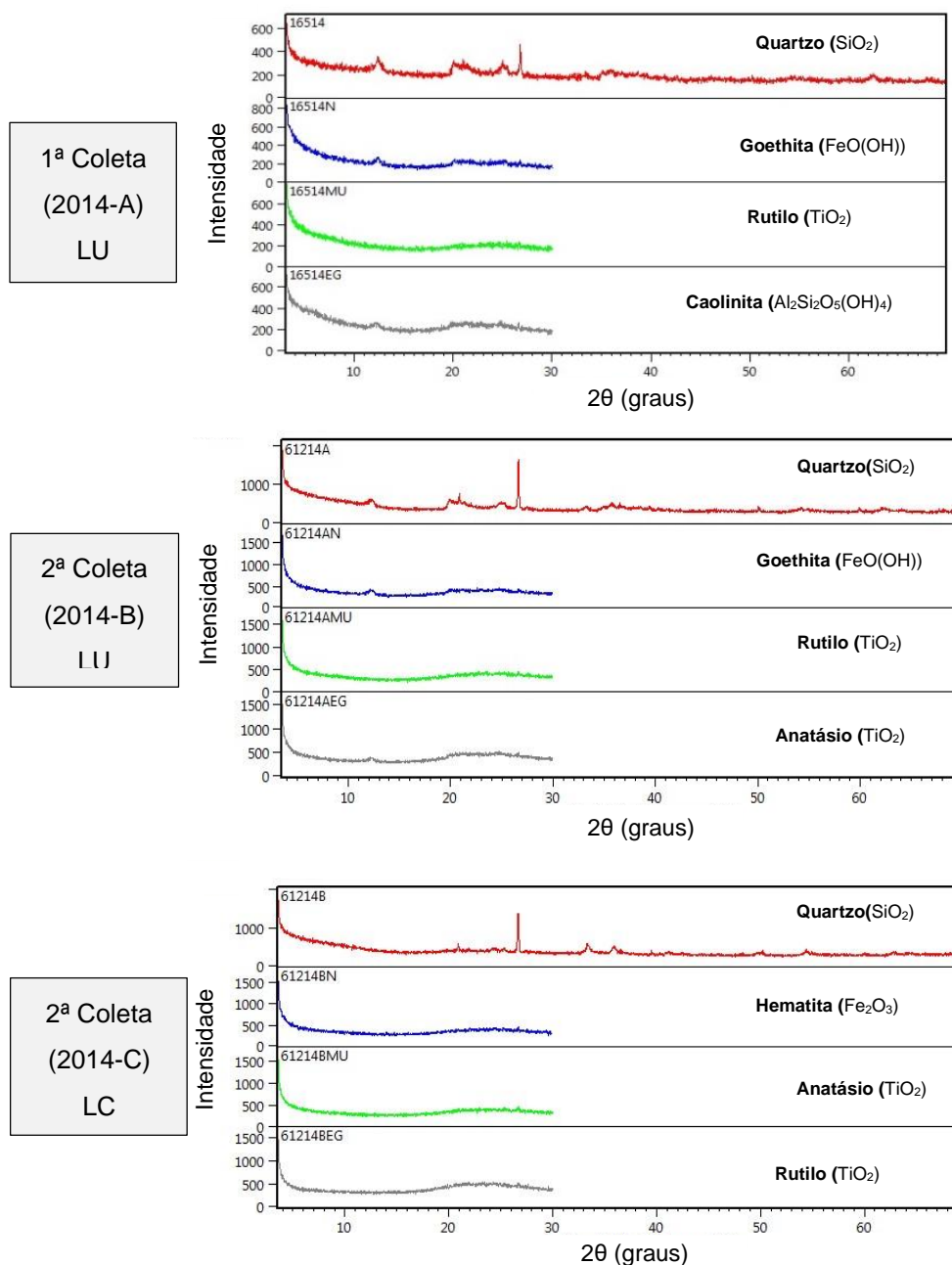


Figura 22 - Difratoigramas da análise de DRX.

Comparando o difratograma e as fases químicas encontradas no lodo da ETA Tamanduá é possível verificar uma maior concentração de sílica, alumínio e ferro, que também foi constatado pela análise de fluorescência de raios-X.

A presença destes elementos também é justificada pelo uso do coagulante policloreto de alumínio no tratamento de água e pela própria composição da água, a qual contém materiais em suspensão, como por exemplo, a areia e materiais argilosos.

5.1.5 Análise Termogravimétrica

O comportamento térmico do lodo úmido foi analisado por termogravimetria (TGA) e análise de diferencial térmico (DTA). No termograma (TG) apresentado na Figura 23 observa-se ao menos três etapas distintas de perda de massa com o aumento da temperatura: S1, S2 e S3. Na primeira etapa (S1) (temperatura de 0 a 110°C), observou-se que a perda de massa tem início simultaneamente ao começo da marcha (faixa de aquecimento), sendo caracterizada pela saída de umidade da amostra.

Na etapa S1, o teor de massa residual foi de 27%, indicando que cerca de 73% da massa da amostra era água. Esta perda de massa inicial era esperada, já que o lodo foi colocado sem tratamento térmico prévio para a análise e o ensaio de determinação do teor de umidade em estufa indicou um teor de umidade da amostra de aproximadamente 76%.

A segunda etapa (S2), cujo intervalo de temperatura foi de 110 a 500°C, envolveu a liberação de compostos voláteis e degradação de compostos orgânicos, o teor de massa liberada da amostra nesta etapa foi de aproximadamente 9,5%.

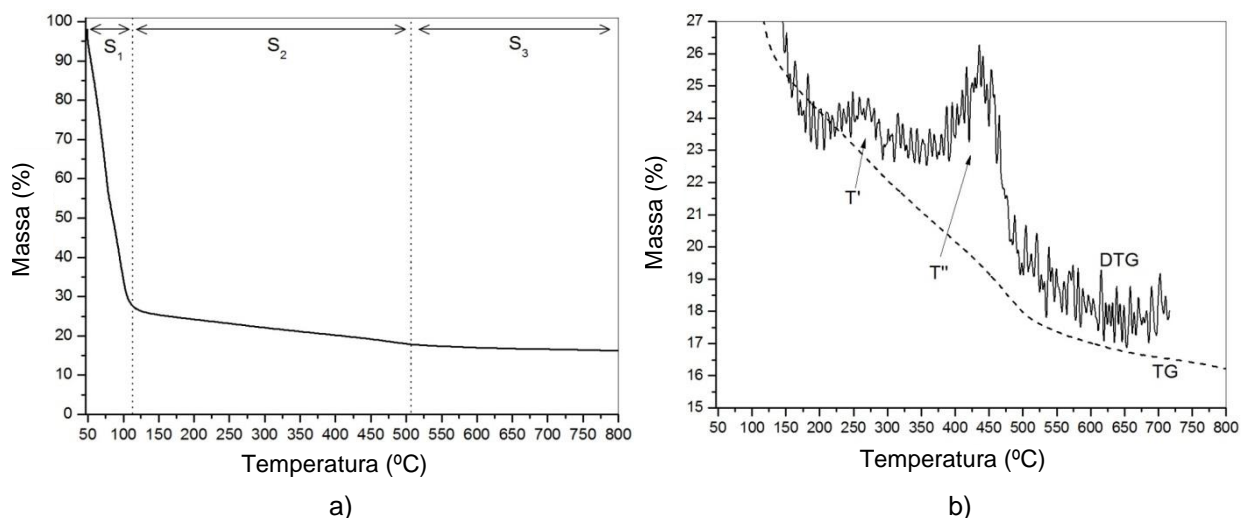


Figura 23 - a) Termograma (TG) b) (DTG) da amostra de LU.

A última etapa (S3) de perda de massa (temperatura de 500 a 800°C) caracterizou-se principalmente pela saída de CO_2 , proveniente da degradação dos carbonatos formados em S2, e da saída de outros óxidos não metálicos em menor

proporção. O teor de massa residual, composta principalmente por inorgânicos, ficou em torno de 16% da massa inicial.

Na Figura 23 (b) observa-se o intervalo de perda de massa das etapas S2 e S3. Na DTG (primeira derivada da curva TG) constata-se a ocorrência de dois picos de perda de massa T' e T'' cujo intervalo de temperatura foi de 180 a 300°C e de 370 a 500°C, respectivamente. Este ensaio indica que o tratamento térmico do lodo pode ser conduzido a temperaturas não muito elevadas (inferiores a 500°C).

5.1.6 Distribuição Granulométrica

A partir do ensaio de granulometria (Tabela 9 e pela Figura 24), foi possível a determinação das dimensões das partículas do lodo úmido, que foi seco, para retenção de suas partículas e suas respectivas porcentagens de ocorrência.

Os resultados apresentados no gráfico da Figura 24 foram obtidos com base na NBR 6502 (ABNT, 1995), que define os termos relativos aos materiais da crosta terrestre, rochas e solos.

Segundo a norma NBR 6502 (ABNT, 1995), as partículas são classificadas conforme seu diâmetro em pedregulhos ou cascalhos (diâmetro entre 2,0 e 60 mm), areias (diâmetro entre 0,06 e 2,0 mm), siltes (diâmetro entre 0,002 e 0,06 mm) e argilas (diâmetro menor que 0,002 mm).

Verifica-se que o lodo em estudo é formado por partículas distribuídas em uma faixa de diâmetro de 0,1 μm à 4000 μm , com 33,08% de cascalho fino, 58,9% de areia, 6,08% de silte e 1,91% de argila.

Conforme verificou Tartari (2011) com o lodo da ETA estudada, por meio das curvas granulométricas o lodo apresentou uma larga distribuição de tamanho de grão na faixa de 0,3 a 400 μm , com diâmetro médio de partículas de 64,6 μm . O autor, caracterizou o lodo como sendo uma matéria-prima que continha siltes inorgânicos, com elevada porcentagem de SiO_2 , na ordem de 24%, e matéria orgânica na faixa de 34%. Em seu estudo ainda, a distribuição granulométrica apresentou-se heterogênea, evidenciando três faixas bem características: argila (5,8%), silte (21,2%), e areia (73%).

Tabela 9 - Análise granulométrica a laser.

Malhas (tyler)	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% peso	% Acumulada		
				Acima	Abaixo	
5*	4,00	11,91	33,08	33,08	66,92	
9*	2,00	10,94	30,39	63,47	36,53	
16*	1,00	5,76	16,00	79,47	20,53	
32*	0,50	2,90	8,06	87,53	12,47	
60*	0,25	1,61	4,47	92,00	8,00	
Laser	0,180	0,00	0,00	92,00	8,00	
Laser	0,090	0,00	0,00	92,00	8,00	
Laser	0,063	0,00	0,01	92,01	7,99	
Laser	0,043	0,07	0,19	92,20	7,80	
Laser	0,036	0,07	0,19	92,39	7,61	
Laser	0,028	0,13	0,36	92,75	7,25	
Laser	0,020	0,24	0,68	93,43	6,57	
Laser	0,010	0,70	1,95	95,39	4,61	
Laser	0,006	0,45	1,26	96,65	3,35	
Laser	0,003	0,52	1,44	98,09	1,91	
Laser	0,001	0,49	1,37	99,46	0,54	
Laser	0,000	0,19	0,54	100,00	0,00	
Massa Final (g)		36,00	Finos abaixo #60 - Micrômetros			
			Diâmetro 10%	1,35	Diâmetro 90%	27,28
			Diâmetro 50%	7,87	Diâmetro médio	11,55

* Peneiramento mecânico.

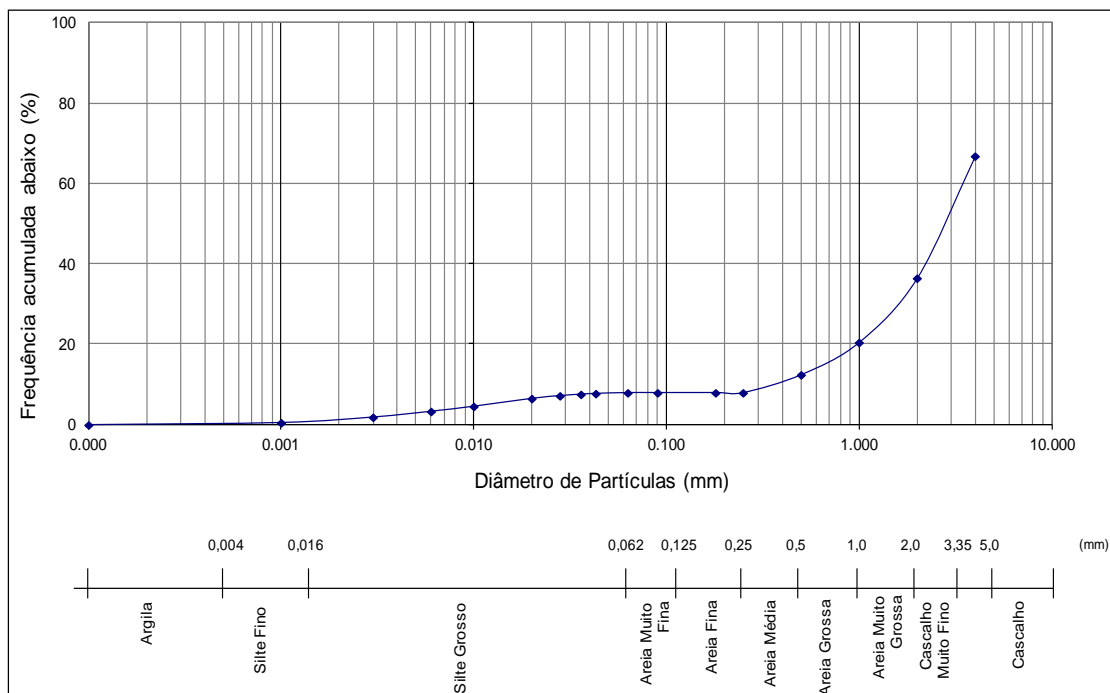


Figura 24 - Distribuição Granulométrica.

Aponta-se uma pequena variação em relação aos resultados encontrados por Tartari (2011), uma vez que o lodo em estudo possui teores inferiores de areias, siltes e argila de, aproximadamente, 20, 71 e 67%, respectivamente e um teor de cascalho de 33%, confirmando a variabilidade do lodo de ETA e a necessidade de caracterização para posterior indicação de sua utilização.

5.2 INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE LODO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO

5.2.1 Influência da Adição de Lodo no Concreto Fresco

Verificou-se que o incremento da adição de lodo de ETA, tanto úmido quanto calcinado, aumentou a demanda de água no concreto fresco (ver Tabela 5). Com a Figura 25, apresenta-se a adição inicial e final de água para cada mistura para atender o abatimento alvo de 6 ± 2 cm.

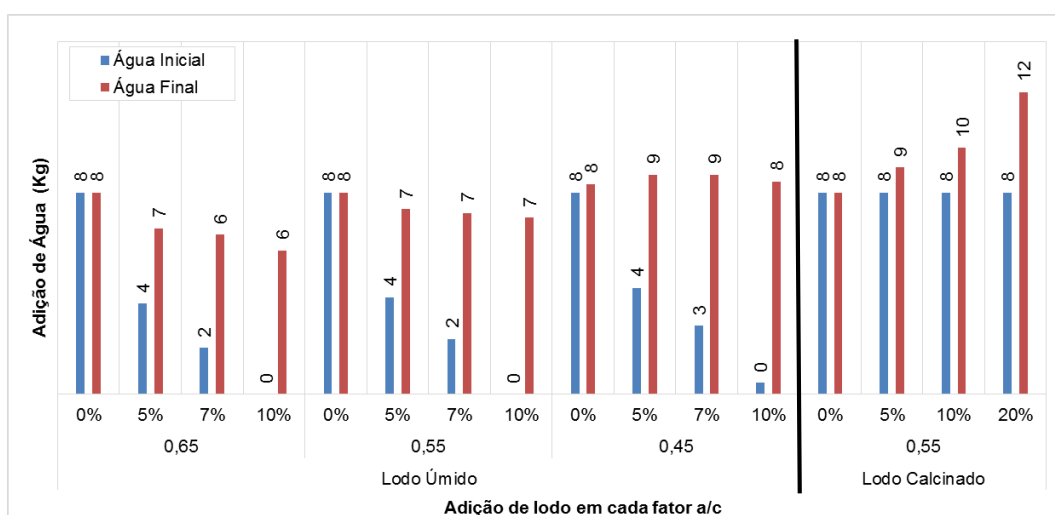


Figura 25 - Adição de Água Inicial e Final dos traços de concreto.

Para os concretos de referência (sem adição de lodo), para as 3 relações a/c em estudo com LU e para a mistura com LC, atingiu-se o abatimento desejado apenas com a água de dosagem.

Para os traços (Figura 26) em que se fez a substituição de lodo, tanto úmido quanto calcinado por areia, a demanda de água aumentou, sendo proporcional ao teor de lodo adicionado (quanto maior o teor de lodo, maior a demanda de água).

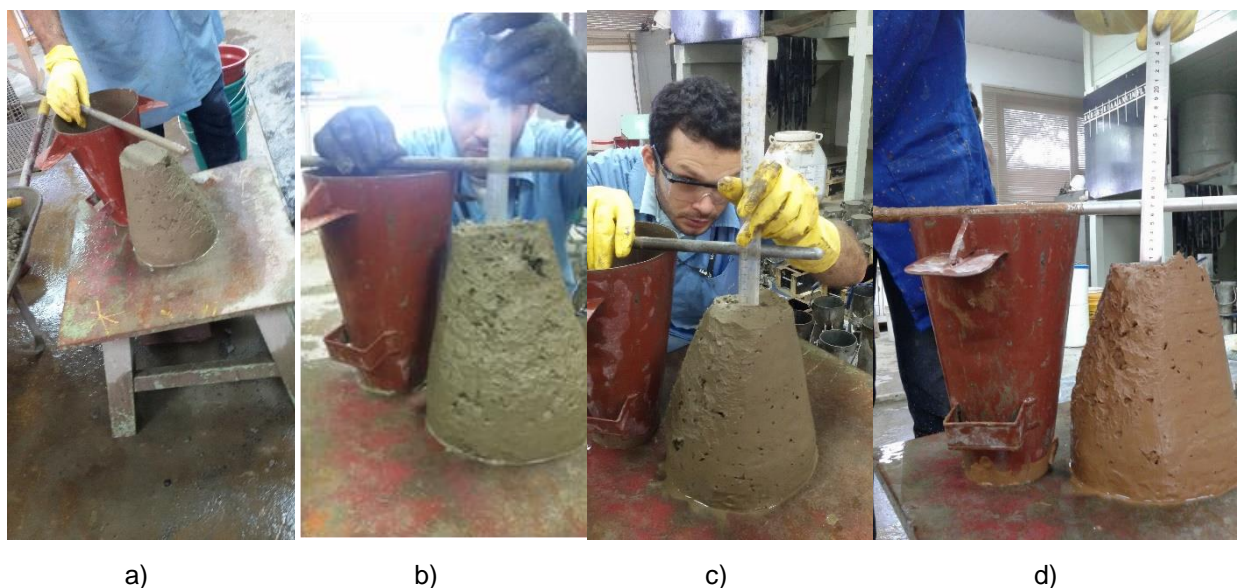


Figura 26 - Traço com adição de 5% de lodo a) a/c 0,65 b) a/c 0,55 LU c) a/c 0,45 e d) 0,55 LC.

Explica-se pelo caso das partículas de lodo possuir diâmetro inferior às da areia (ver granulometria), o que aumenta a área superficial das partículas, demandando uma maior quantidade de água para a obtenção da mesma trabalhabilidade. Também o fato do lodo úmido possuir matéria orgânica pode aumentar a coesão das partículas devido a formação de coloides.

Para o lodo calcinado (ver Figura 27) a demanda de água para a obtenção da trabalhabilidade desejada seguiu tendência linear crescente ($r^2 = 0,99$) em relação ao teor de lodo empregado na dosagem. Tal fato pode estar associado à área superficial das partículas ou a uma possível absorção de água pelo lodo.

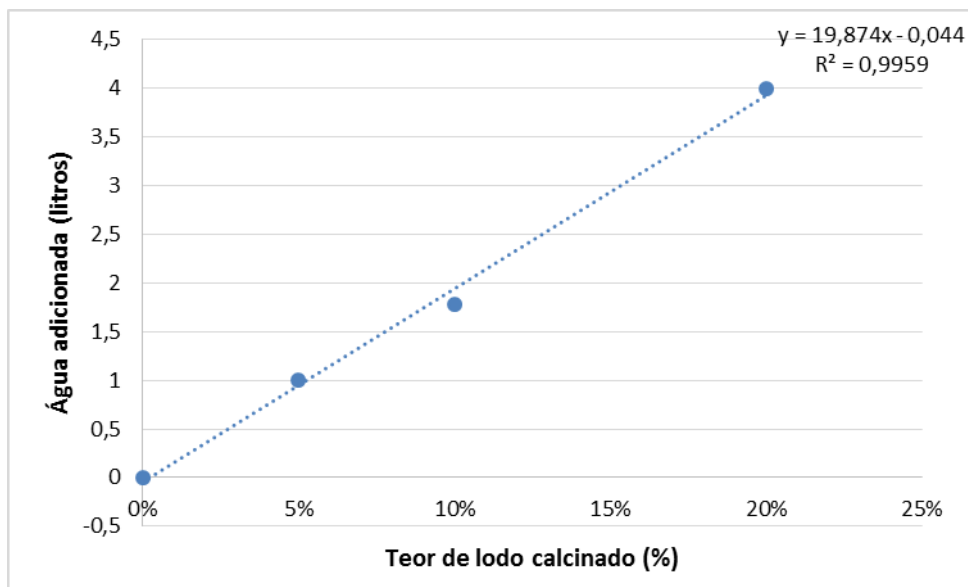


Figura 27 - Água adicionada para o fator a/c 0,55 LC.

A Figura 28, explica o comparativo entre os abatimentos de tronco de cone, das dosagens de concreto utilizando traços e fator água cimento diferentes.

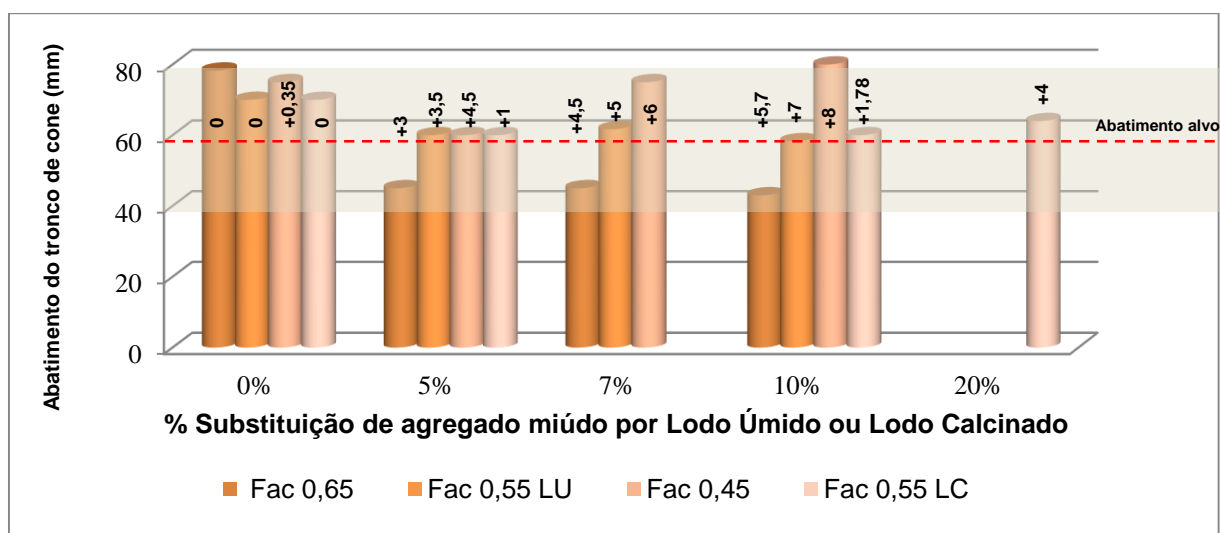


Figura 28 - Demonstrativo de resultados de abatimento de tronco de cone nas diferentes dosagens de concreto.

Em cada barra do gráfico indica-se a quantidade de água adicionada. Verificou-se que com o aumento do teor de lodo, tanto úmido quanto calcinado, aumentava-se a demanda de água do concreto para obtenção de um abatimento alvo de 6 ± 2 cm. Quanto menor a relação água cimento do concreto, maior foi a adição de água necessária para a correção da trabalhabilidade. Para o lodo

calcinado, a adição de água foi menor, porém no cálculo da dosagem considerou-se que a umidade do lodo era nula (zero), logo não se fez desconto da mesma da água inicial, ao contrário do realizado com o lodo úmido, a qual a água contida no lodo foi descontada da água de dosagem.

5.2.2 Coloração do Concreto com Adição de Lodo (LU ou LC)

Na dosagem, foram perceptíveis as diferenças em termos de coloração dos concretos produzidos, conforme pode ser observado na Figura 29.

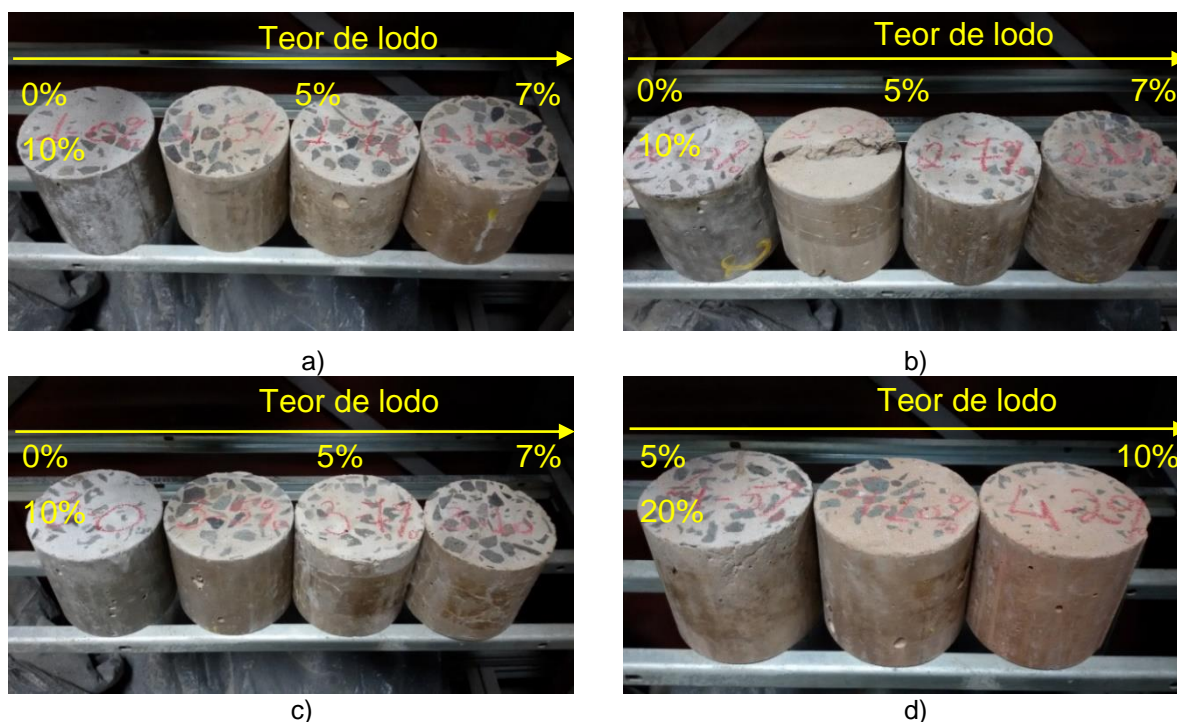


Figura 29 - Comparativo de coloração a) a/c 0,65 b) a/c 0,55 LU c) a/c 0,45 e d) 0,55 LC.

A partir do acréscimo de lodo em substituição ao agregado miúdo, a coloração passava de uma cor acinzentada (sem lodo) para uma tonalidade marrom/avermelhada. Tal fato pode estar associado às características de lodo (que possui elevado teor de matéria orgânica) e à sua composição química, (possui aproximadamente 18% de óxido de ferro), o que confere ao concreto uma coloração mais avermelhada. No lodo calcinado ficou mais evidente essa coloração, devido a maior adição de lodo ao concreto (até 20% neste estudo).

5.2.3 Influência da Incorporação do Lodo no Concreto Endurecido

5.2.3.1 Resistência à compressão axial (f_c)

Para este ensaio, foram utilizados CPs com idades de 7, 28, 60 e 90 dias, obtendo-se a resistência à compressão axial para cada traço, como observado na Figura 30.

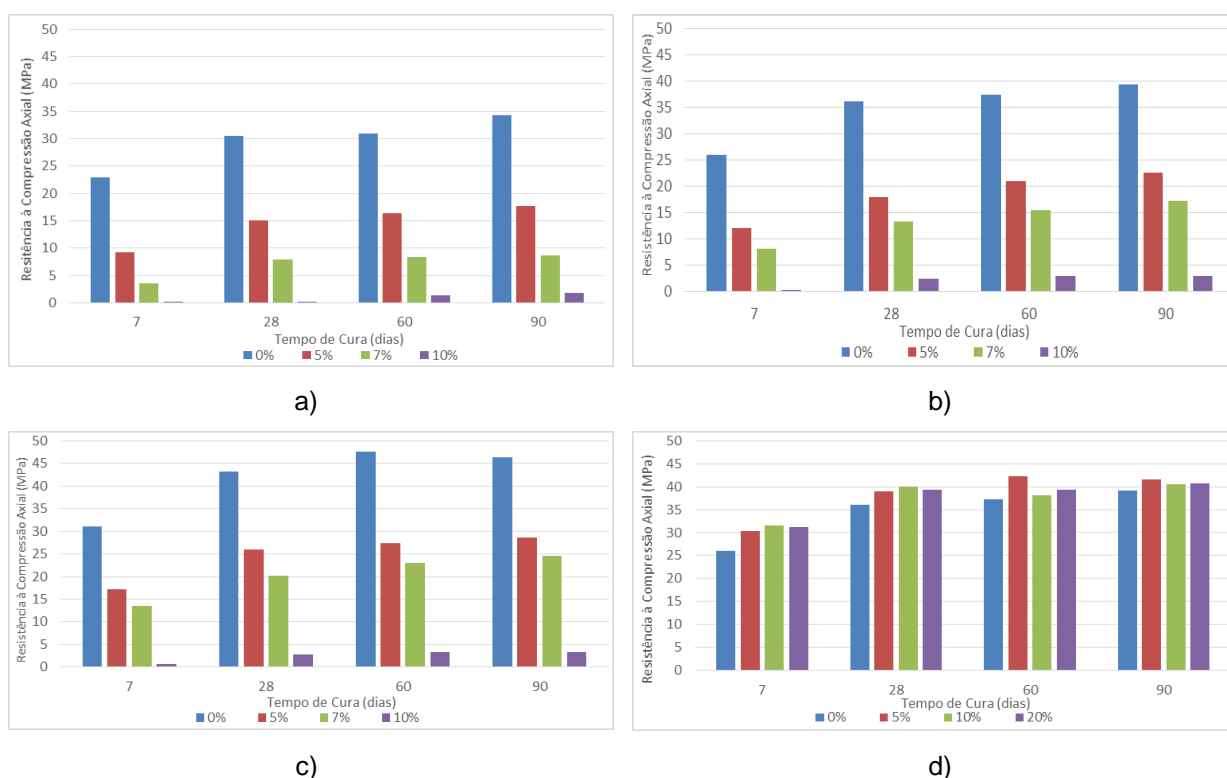


Figura 30 – Demonstrativo f_c para a) a/c 0,65 b) a/c 0,55 LU c) a/c 0,45 d) a/c 0,55 LC.

Verifica-se que o lodo úmido (Figura 30 a, b e c) possui influência negativa na resistência à compressão do concreto, sendo que quanto maior o teor de substituição menor a resistência atingida.

Concretos produzidos com 10% de lodo úmido praticamente não desenvolveram resistência (ver Figura 31), sendo que aos 90 dias estes não atingiram 5 MPa, inviabilizando assim a utilização do concreto produzido. Concretos com teores menores de substituição de 5 e 7% desenvolveram cerca de 50% e 40% da resistência do concreto referência, respectivamente, indicando que essa

alternativa é um limitante em concretos com fins estruturais, resultado este observado na literatura (YAGUE, 2005 e HOPPEN, 2006). Destaca-se que os concretos produzidos com teores de lodo de 7 e 10%, demandaram um tempo maior para desforma que os concretos com 5% e sem lodo (referência), o que corrobora para a não indicação de teores de lodo acima de 5% na produção de concretos estruturais.



Figura 31 - a) CP a/c 0,65 com 10% de adição de lodo úmido b) CP rompido no faceamento.

Na Figura 30 “d”, é possível verificar ainda, que a adição do lodo quando calcinado confere um pequeno incremento na resistência à compressão do concreto, em todas as idades controladas. Observa-se que os teores entre 5% e 10% tendem a conferir maior resistência que o concreto de referência, assim como, quando comparado com a adição de 20% de lodo.

A fim de constatar a significância das variáveis controladas (relação a/c, teor de lodo e idade) na resistência à compressão do concreto, fez-se a análise de variância dos dados (ANOVA).

Em função do projeto de experimentos (Figura 13), na Tabela 10 são apresentados os resultados da ANOVA para as misturas com lodo úmido. Com a Tabela 11 apresentam-se os resultados para as misturas de relação a/c 0,55, produzidas com lodo úmido e calcinado e, na Tabela 12, a ANOVA para as misturas produzidas apenas com lodo calcinado.

As análises foram conduzidas para um nível de significância de 95% (‘p-value’ menor do que 0,05 designa que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa a um nível de confiança de 95%).

Conforme Tabela 10, para os concretos com adição de lodo úmido a análise de variância indicou que apenas a relação a/c, o teor de lodo e a interação entre

estas variáveis foram significativas (ver Figura 32), confirmando a influência negativa do teor de lodo na resistência do concreto.

Tabela 10 - ANOVA do concreto produzido com adição de LU para f_c .

Variáveis	SQ	GDL	MQ	F_{calc}	Significância "p-value"
Relação a/c	1543,39	2	771,69	80,71	0,00000
Teor de lodo (%)	10051,23	3	3350,41	350,41	0,00000
Idade (dias)	18,43	2	9,22	0,96	0,39105
Relação a/c*Teor de lodo (%)	256,26	6	42,71	4,47	0,00178
Relação a/c*Idade (dias)	51,49	4	12,87	1,35	0,27185
Teor de lodo (%)*Idade (dias)	498,90	6	83,15	8,70	0,00001
Relação a/c*Teor de lodo (%)*Idade (dias)	286,23	12	23,85	2,50	0,01698
Erro	344,21	36	9,56		

GDL: Grau de Liberdade; SQ: Soma Quadrada; MQ: Média Quadrada = SQ/GDL; $F_{calc} = MQ_{modelo}/MQ_{resíduo}$; *p-value* = probabilidade (distribuição t de student).

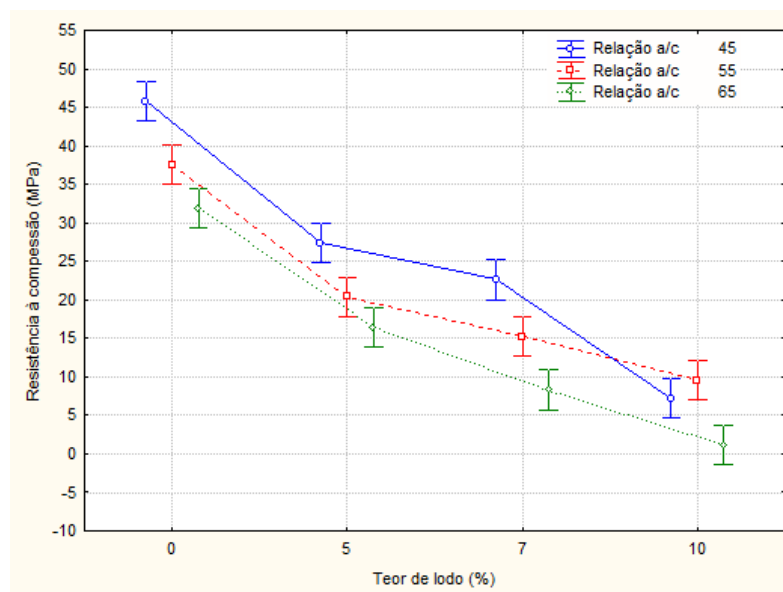


Figura 32 - Influência do teor de lodo e da relação a/c para f_c (MPa).

Para os concretos produzidos com lodo úmido e calcinado (Tabela 11), todas as variáveis (tipo de lodo, teor de lodo e idade) e a interação entre elas são significativas.

Já a análise de variância (ANOVA) das misturas com lodo calcinado verificadas na Tabela 12, indicou que as variáveis isoladas (teor de lodo calcinado (%) e idade, em dias) assim como a interação entre elas, não apresentam

significância estatística na resistência à compressão do concreto (*p-value* maior que 0,05).

Tabela 11 - ANOVA do concreto produzido com adição de LU e LC para fc.

Variáveis	SQ	GDL	MQ	F _{calc}	Significância "p-value"
Tipo Lodo	2789,07	1	2789,07	8385,41	0,00000
Teor de lodo (%)	1103,98	2	551,99	1659,57	0,00000
Idade (dias)	27,93	2	13,96	41,98	0,00000
Tipo Lodo*Teor de lodo (%)	1541,00	2	770,50	2316,52	0,00000
Tipo Lodo*Idade (dias)	78,04	2	39,02	117,31	0,00000
Teor de lodo (%)*Idade (dias)	322,11	4	80,53	242,11	0,00000
Tipo Lodo*Teor de lodo (%)*Idade (dias)	190,21	4	47,55	142,97	0,00000
Erro	7,98	24	0,33		

Tabela 12 - ANOVA do concreto produzido com adição de LC para fc.

Variáveis	SQ	GDL	MQ	F _{calc}	Significância "p-value"
Teor de lodo (%)	72,63	3	24,21	1,42	0,28620
Idade (dias)	6,27	2	3,13	0,18	0,83478
Teor de lodo (%)*Idade (dias)	119,89	6	19,98	1,17	0,38367
Erro	205,14	12	17,09		

Verifica-se na Figura 33 a influência significativa do teor e tipo de lodo úmido e calcinado na resistência à compressão do concreto. Nota-se que o lodo úmido apresenta maior influência na resistência que o calcinado, fato comprovado na ANOVA realizada com as misturas produzidas com lodo calcinado (ver Figura 34).

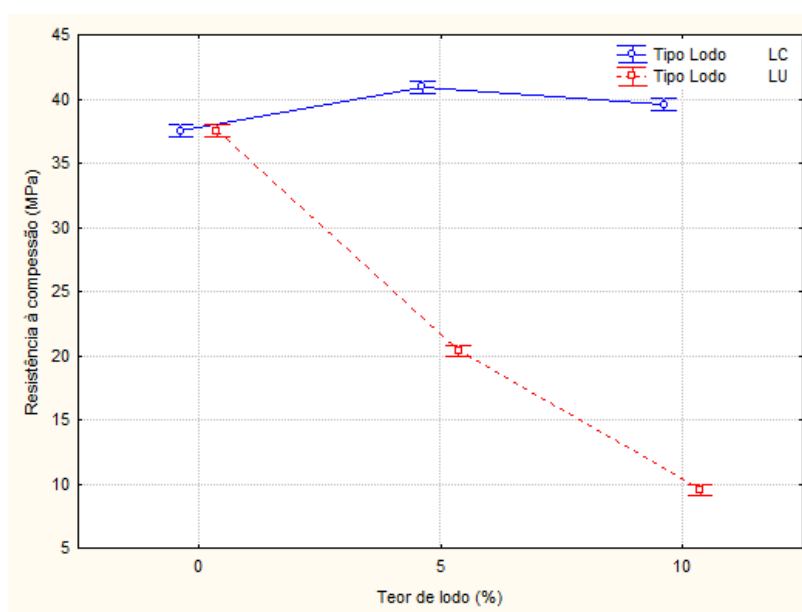


Figura 33 - Influência do teor de lodo e do tipo de lodo (LU x LC) na resistência à compressão (MPa).

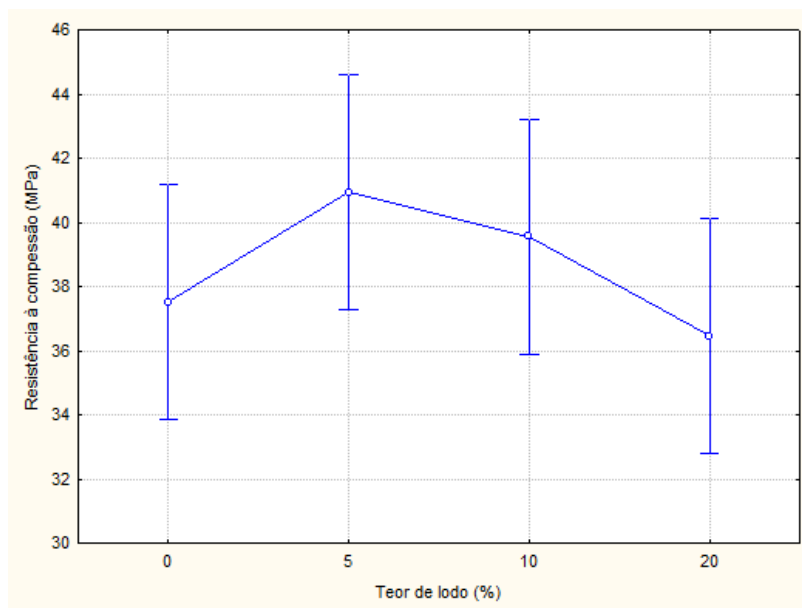


Figura 34 - Influência do teor de LC na resistência à compressão (MPa).

Na Figura 34, pode ser observada a influência do teor de lodo calcinado na resistência à compressão do concreto. Apesar da resistência apresentar diminuição com o aumento do teor de lodo, a mesma não é significativa do ponto de vista estatístico, a diferença encontra-se dentro do desvio padrão dos resultados.

5.2.3.2 Módulo de elasticidade

Na Figura 35, o gráfico explana o módulo de elasticidade (GPa) para cada fator a/c e sua respectiva dosagem (adição de lodo úmido e calcinado).

Nota-se que ao adicionar lodo úmido, independentemente do fator a/c, há uma redução significativa no módulo de elasticidade, o que já era esperado face a relação desta propriedade com a resistência à compressão do concreto, conforme apresentado na Figura 36. Observa-se que no aumento da resistência à compressão dos CPs ocorreu a elevação do módulo de elasticidade, sendo diretamente proporcional.

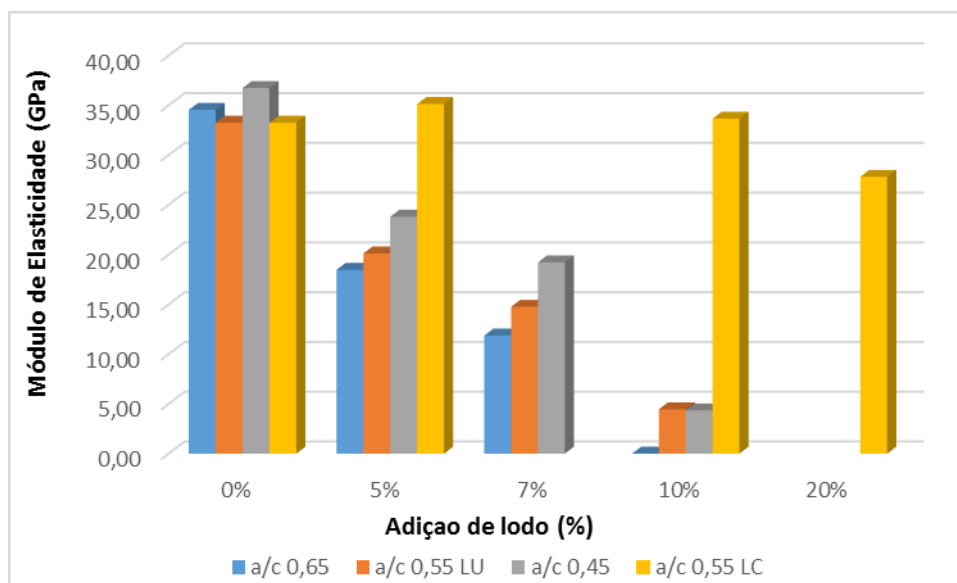


Figura 35 - Resultados do Ensaio de Módulo de Elasticidade (GPa).

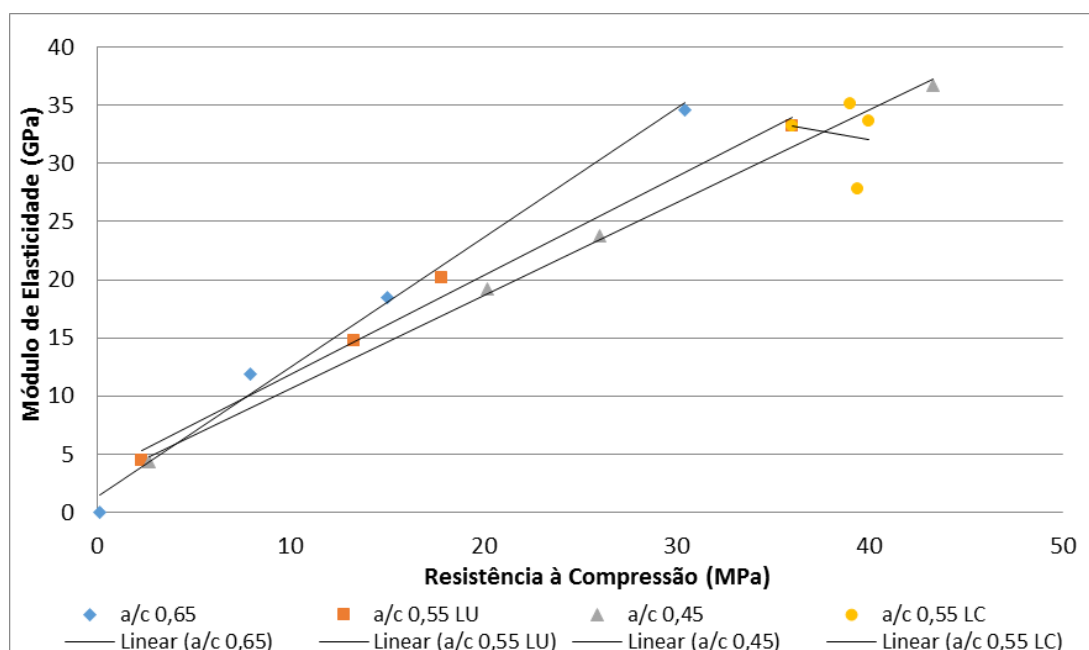


Figura 36 - Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos.

Observa-se que para o fator a/c 0,65 para o concreto referência resultou num módulo de elasticidade de 34 GPa. Com as adições de lodo houve uma redução de 46,52% para adição de 5%, de 65,63% para adição de 7% e 100% para a adição de 10% que se justifica pela impossibilidade de realização do ensaio devido a fragilidade do CP.

Com o fator a/c 0,55 LU, o concreto referência apresentou módulo de elasticidade de 33 GPa, com as adições de lodo reduziu-se 39,47%, 55,59% e 86,61%. Para o fator a/c 0,45, o concreto referência foi de 36 GPa, com as adições de lodo para as dosagens de 5%, 7% e 10% obteve-se uma redução no módulo de elasticidade de 35,19%, 47,68%, 88,18% respectivamente.

Já para o fator a/c 0,55 LC, o comportamento foi diferente, resultando num aumento de 5,68% já na primeira dosagem com adição de lodo calcinado, para as demais adições de LC os valores foram satisfatórios sendo de 33,66 GPa e 27,81 GPa para 10% e 20%.

5.2.3.3 Resistência à tração por compressão diametral

Percebe-se na Figura 37, o mesmo comportamento constatado na resistência à compressão, no qual os concretos produzidos com lodo calcinado apresentaram melhor desempenho à tração que os demais. Na Figura 38, apresentam-se dois corpos de prova após o ensaio de tração por compressão diametral.

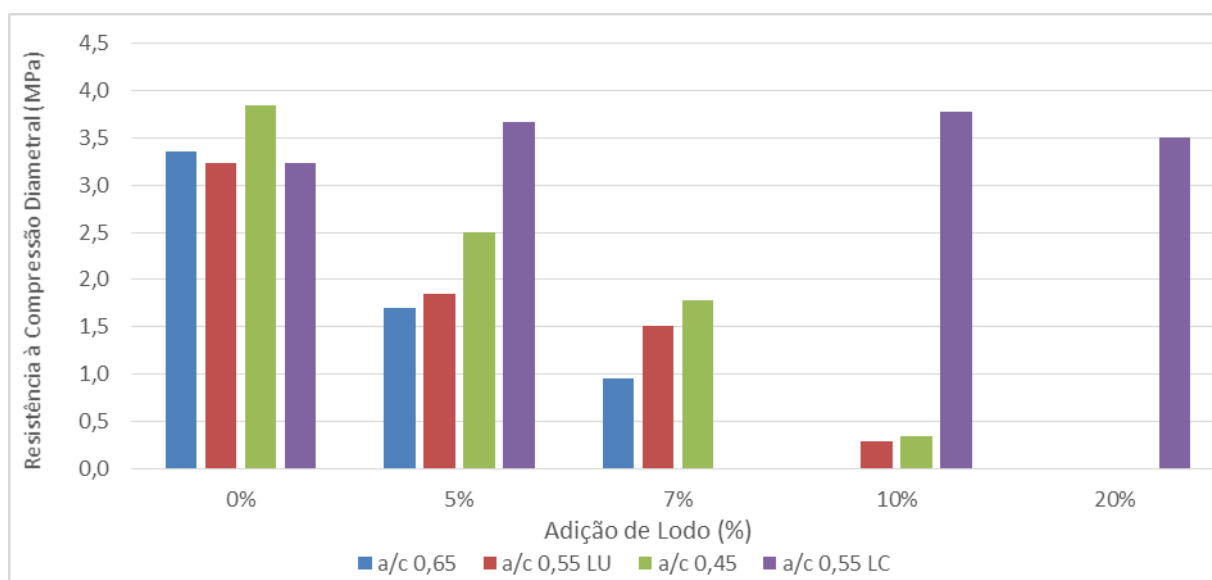


Figura 37 - Resistência à tração das diferentes dosagens com adição de lodo.



a) Concreto referência (sem lodo)

b) Concreto com adição de lodo

Figura 38 - Ensaio físico de resistência a tração diametral.

Para o concreto referência, sem adição de lodo, obteve-se uma resistência à tração por compressão diametral média de 3,42 MPa, com melhor resultado para o fator a/c 0,45 (3,85 MPa). Já para a dosagem com adição de 5% de lodo a resistência à tração média foi de 2,43 MPa, obtendo o melhor resultado na tração para o fator a/c 0,55 com lodo calcinado.

No resultado de tração com adição de 7% de lodo, a média encontrada foi de 1,42 MPa, com melhor resultado para o fator a/c 0,45 (Figura 37). Para a dosagem de 10%, os resultados de tração foram indeterminados, o CP quebrou antes do ensaio, devido a ruptura do CP no ajuste da máquina, sendo nulos para o fator a/c 0,65, devido sua fácil ruptura, 0,29 MPa para o fator a/c 0,55 com lodo úmido, 0,35 MPa para o fator a/c 0,45.

Já para misturas com lodo calcinado, a resistência à tração foi mais elevada, superando os valores obtidos no concreto referência. Para as misturas com 10% e 20% de lodo obteve-se, respectivamente 3,78 MPa e 3,50 enquanto que para o concreto de referência a resistência à tração foi de 3,24 MPa.

Segundo Metha e Monteiro (2014), a relação entre resistências à compressão e à tração é da ordem de 10 a 11% para concreto de baixa resistência, de 8 a 9% para o de média resistência e, de 7%, para o de alta resistência. Observe-se na Tabela 13 o atendimento da relação entre as resistências à compressão e à tração do concreto para as misturas com lodo calcinado. Já para os traços com lodo

úmido, apenas as dosagens referência (sem lodo) estão dentro da razão estabelecida por Metha e Monteiro (2014) para concretos de baixa resistência. Para o concreto com lodo úmido a relação é inferior a 8, enquanto que para o lodo calcinado é superior a 12.

Tabela 13 - Razão (%) entre resistência à tração e resistência à compressão.

Lodo Úmido												Lodo Calcinado			
a/c 0,65				a/c 0,55 LU				a/c 0,45				a/c 0,55 LC			
0%	5%	7%	10%	0%	5%	7%	10%	0%	5%	7%	10%	0%	5%	10%	20%
11	6	3	-	11	6	5	1	13	8	6	1	11	12	13	12

O valor médio da resistência à tração segundo Metha e Monteiro (2014) pode ser estimada pela equação 7, cujos resultados estão apresentados na Figura 39:

$$f_{ctm} = 0,3(f_{ck})^{\frac{2}{3}} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

f_{ctm} = resistência média a tração do concreto

f_{ck} = resistência à compressão do concreto

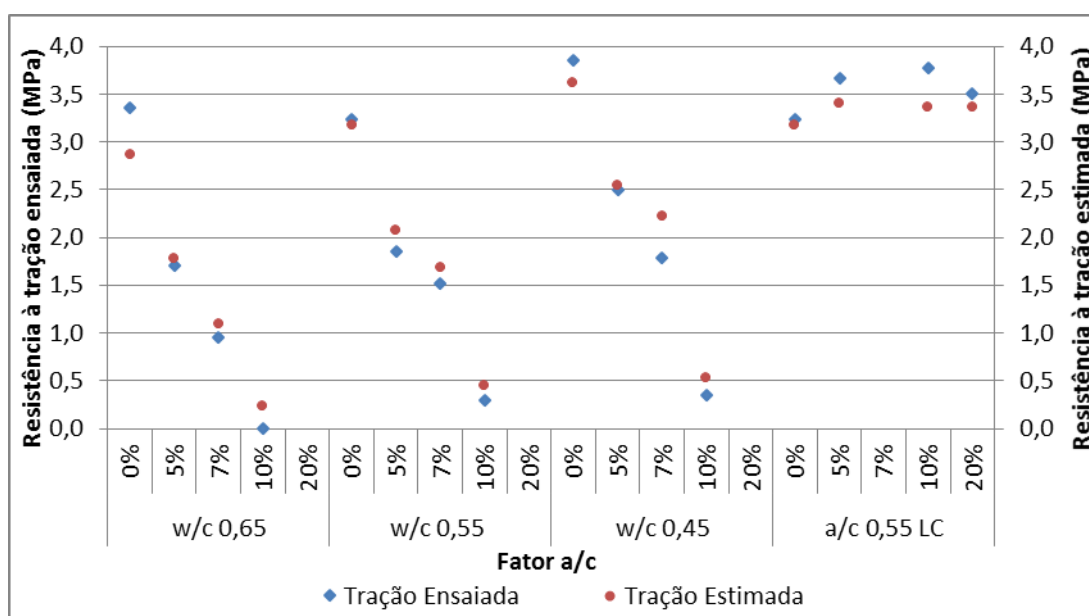


Figura 39 - Relação entre a resistência à tração ensaiada e à estimada com base na resistência à compressão.

Verificam-se na Figura 39 que a resistência à tração estimada a partir da resistência à compressão do concreto se assemelha à resistência à compressão ensaiada por meio do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, indicando a relação entre estas duas propriedades mesmo para concretos com substituição de agregado miúdo por lodo de ETA.

5.2.3.4 Absorção de água

Segundo Helene (1993) o ensaio de absorção é importante, visto que, o meio mais frequente de ingresso de agentes agressivos (como íons cloreto e CO₂) no concreto é por meio de sua rede de poros, podendo ter como vetor a água, sendo a forma mais frequente de ingresso de água para o interior do concreto o mecanismo de absorção capilar.

Por meio da análise do ensaio de absorção de água por capilaridade (ver Tabela 14 e Figura 40), foi possível observar que a absorção aumentou com o incremento na quantidade de lodo, tanto úmido quanto calcinado, para a maioria dos fatores água cimento estudado.

Tabela 14 - Resultado da A por capilaridade (g.cm⁻²) nos diferentes fatores a/c.

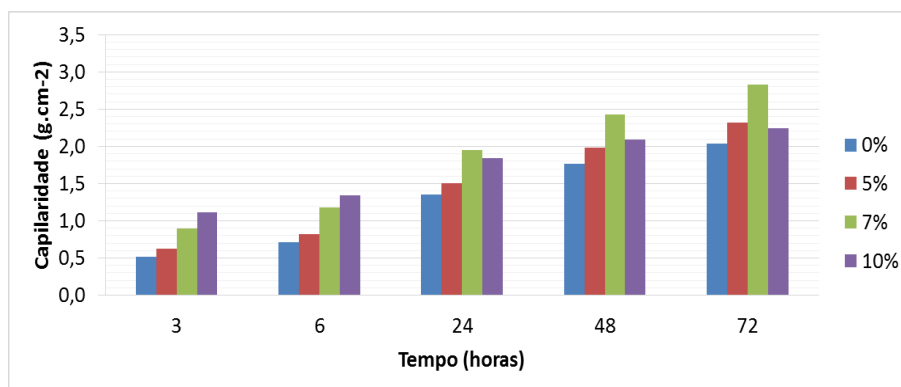
Fator a/c	Adição de lodo	Tempo de Absorção (h)				
		3	6	24	48	72
0,65 LU	0%	0,51	0,71	1,35	1,76	2,04
	5%	0,62	0,82	1,50	1,98	2,32
	7%	0,90	1,17	1,95	2,43	2,83
	10%	1,12	1,34	1,84	2,09	2,24
0,45 LU	0%	0,42	0,60	1,16	1,49	1,72
	5%	0,82	1,04	1,62	1,93	2,18
	7%	0,89	1,16	1,90	2,27	2,63
	10%	1,30	1,72	2,62	3,11	3,44
0,55 LU	0%	0,42	0,52	0,90	1,15	1,32
	5%	0,56	0,72	1,29	1,69	1,97
	7%	0,61	0,81	1,56	2,09	2,48
	10%	0,67	0,90	1,60	2,01	2,25
0,55 LC	0%	0,416	0,521	0,903	1,151	1,323
	5%	0,427	0,579	1,096	1,413	1,650
	10%	0,567	0,751	1,347	1,738	2,029
	20%	0,769	1,017	1,897	2,254	2,575

Para os concretos produzidos com lodo úmido (Figura 40 a, b e c), observa-se que quanto maior o teor de lodo empregado, maior a absorção de água, face à influência negativa do lodo na resistência à compressão do concreto. Também com o aumento da relação água/cimento observa-se o aumento da absorção, devido à sua influência nas propriedades micro estruturais do concreto.

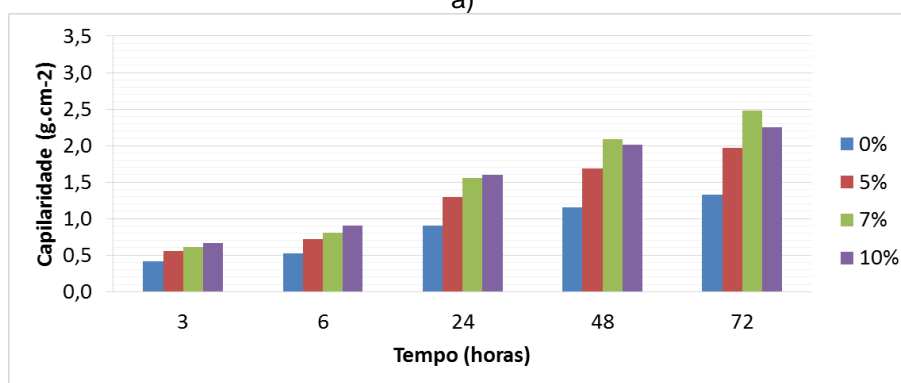
Verifica-se na Figura 40“d” que para o lodo calcinado, a absorção de água dos concretos com 5, 10 e 20% de lodo foi, respectivamente, 1,65, 2,03 e 2,57 g.cm⁻² superior ao de referência (1,32 g.cm⁻²).

Apesar do lodo calcinado não ter influenciado negativamente na resistência à compressão do concreto, influenciou na demanda de água para obtenção da trabalhabilidade alvo (ver Figura 28), ocasionando a adição de água, o que elevou a relação a/c de 0,55 para 0,62, 0,67 e 0,81 para dosagens com 5, 10 e 20% de adição de lodo, respectivamente (ver Tabela 5).

Como a porosidade do concreto é vinculada à relação a/c do concreto, possivelmente, as misturas com adição de lodo possuem maior porosidade que a referência, o que ocasionou a maior absorção de água.



a)



b)

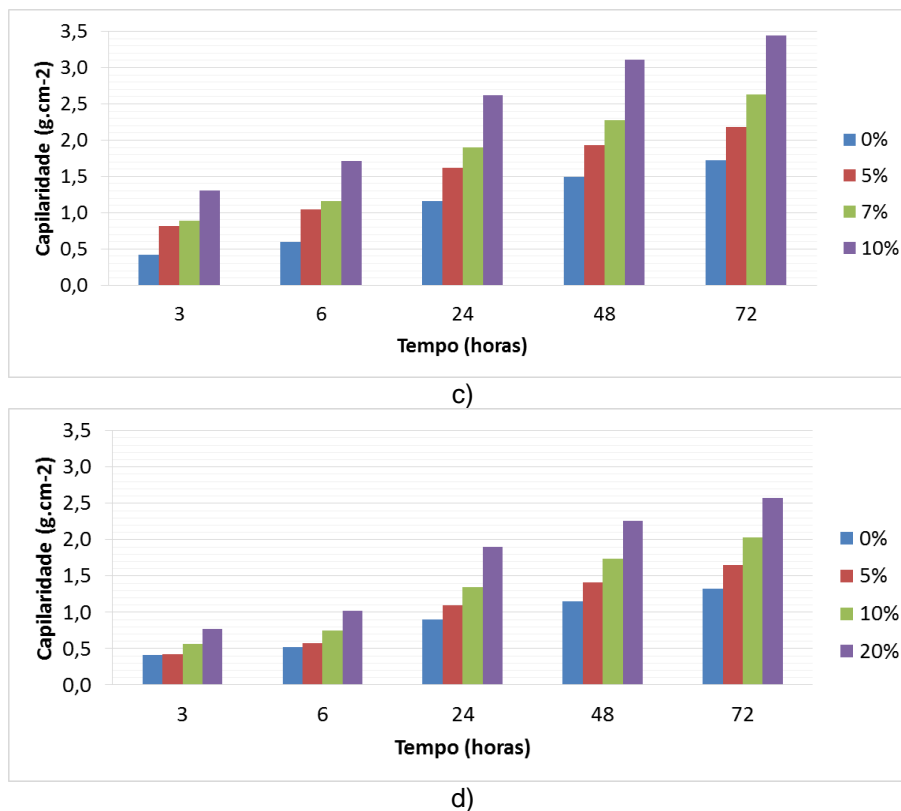


Figura 40 - Absorção por capilaridade a) a/c 0,65 b) a/c 0,55 LU c) a/c 0,45 d) a/c 0,55 LC.

Como a absorção aumentou para esses concretos, pode ser que os poros sofreram redução das dimensões, o que influenciou na maior subida de água por capilaridade. Essa é uma hipótese de análise, a outra é que aumentou a porosidade devido ao aumento da relação a/c.

Caso fosse empregado aditivo para o controle da trabalhabilidade em detrimento a adição de água, ter-se-ia possivelmente um ganho na resistência à compressão e na redução da porosidade da mistura.

Para efeito de verificação, ao final do ensaio de absorção por capilaridade (após 72h) foi realizada a aferição da altura de absorção de cada CP rompido por compressão diametral, conforme Figura 41.

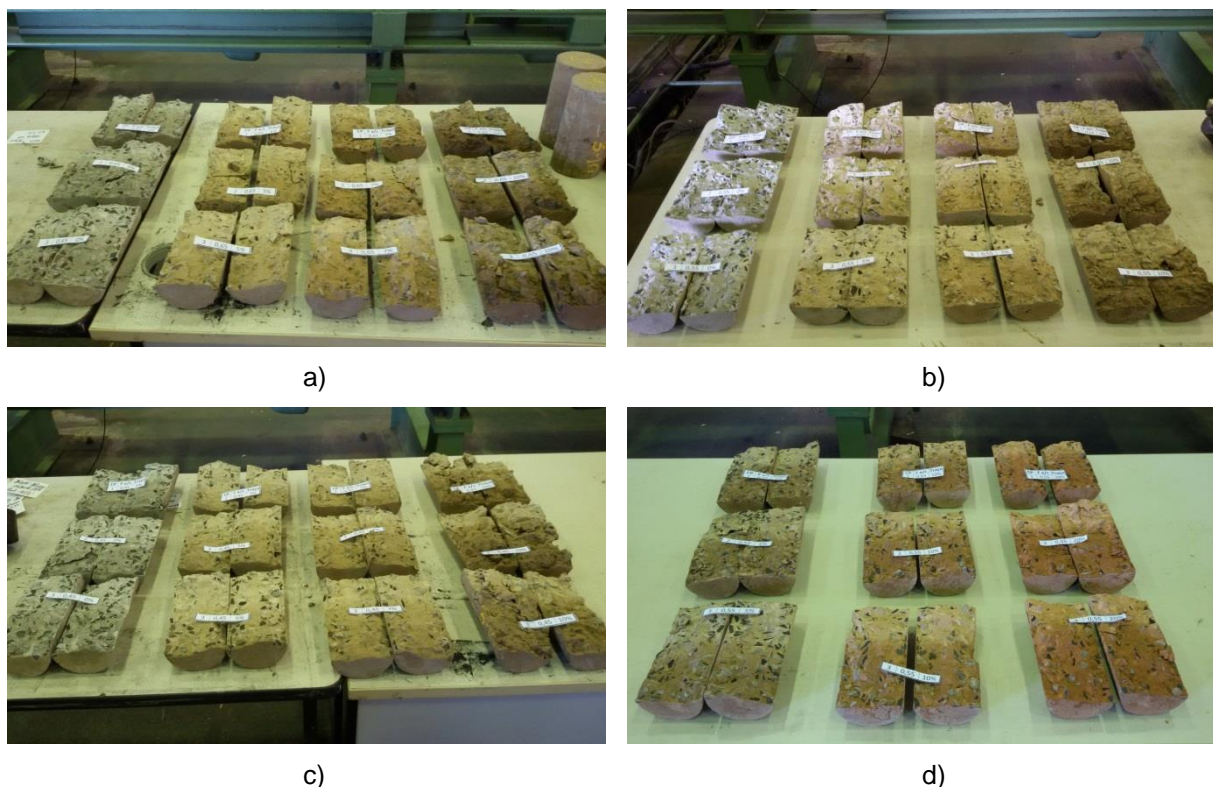


Figura 41 - CP rompidos no ensaio de absorção: a) Fator a/c 0,65 b) Fator a/c 0,55 LU c) Fator a/c 0,45 d) Fator a/c 0,55 LC.

Na verificação da altura constatou-se que a adição de lodo úmido nas relações a/c 0,65, 0,55 e 0,45, alterou significativamente a altura da absorção em cada CP, diminuindo a altura de absorção com o incremento de lodo. Já na dosagem com lodo calcinado, a adição de lodo, aumentou gradativamente a altura de absorção.

Conforme Tabela 15 e Figura 42, para os concretos com adição de LU a ANOVA indicou que as variáveis isoladas, relação a/c, teor de lodo e tempo foram significativas. A interação entre as variáveis relação a/c e tempo não foi significativa.

Tabela 15 - ANOVA do concreto produzido com adição de LU para A.

Variáveis	SQ	GDL	MQ	Fcalc	Significância "p-value"
Relação a/c	5,7449	2	2,8724	83,80	0,000000
Teor de lodo (%)	17,2081	3	5,7360	167,34	0,000000
Tempo (horas)	63,1126	4	15,7781	460,31	0,000000
Relação a/c*Teor de lodo (%)	4,4455	6	0,7409	21,62	0,000000
Relação a/c*Tempo (horas)	0,1706	8	0,0213	0,62	0,757935
Teor de lodo (%)*Tempo (horas)	1,2488	12	0,1041	3,04	0,000934
Relação a/c*Teor de lodo (%)*Tempo (horas)	1,5841	24	0,0660	1,93	0,011275
Erro	4,1133	120	0,0343		

GDL: Grau de Liberdade; SQ: Soma Quadrada; MQ: Média Quadrada = SQ/GDL; Fcalc = $MQ_{\text{modelo}}/MQ_{\text{resíduo}}$; p-value = probabilidade (distribuição t de student).

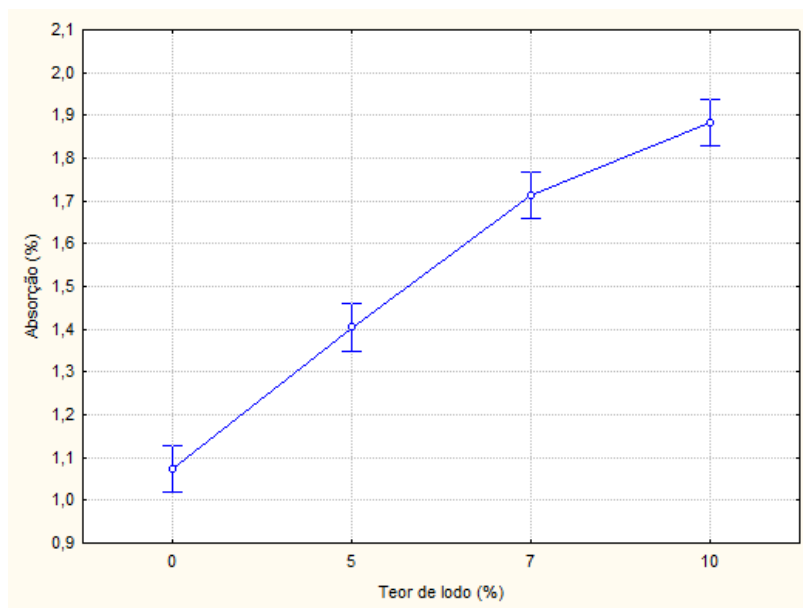


Figura 42 – Influência do teor de lodo na absorção do concreto.

Na Figura 43 apresentam-se a influência da adição de lodo úmido entre as variáveis teor de lodo e tempo (horas).

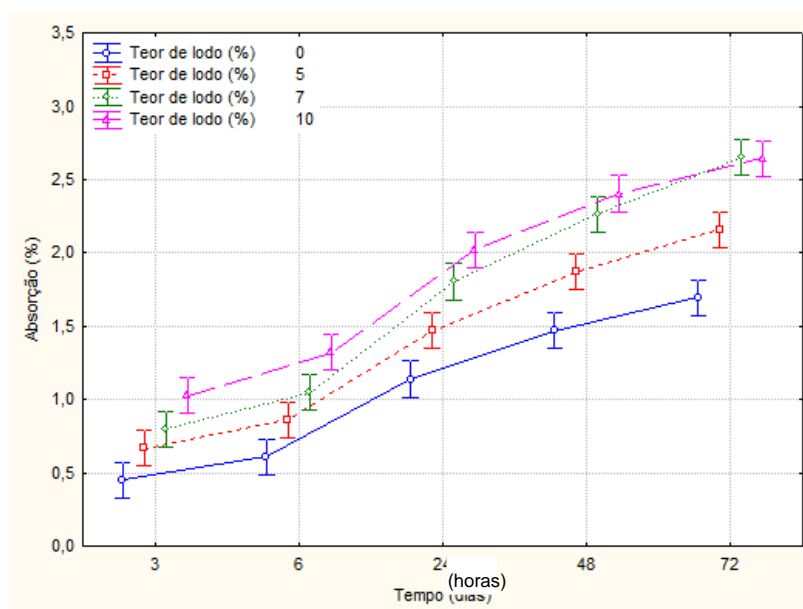


Figura 43 – Influência na relação do teor de lodo com o tempo (horas).

Para os concretos produzidos com lodo úmido e calcinado (Tabela 16), as variáveis (tipo de lodo, teor de lodo e tempo) são significativas. Já as interações

entre as variáveis tipo de lodo e tempo (horas), e a interação entre todas as variáveis não são significativas.

Tabela 16 - ANOVA do concreto produzido com adição de LU e LC para A.

Variáveis	SQ	GDL	MQ	F _{calc}	Significância "p-value"
Tipo Lodo	0,4225	1	0,4225	45,57	0,000000
Teor de lodo (%)	4,1074	2	2,0537	221,52	0,000000
Tempo (horas)	20,8116	4	5,2029	561,21	0,000000
Tipo Lodo*Teor de lodo (%)	0,2119	2	0,1060	11,43	0,000062
Tipo Lodo*Tempo (horas)	0,0431	4	0,0108	1,16	0,337033
Teor de lodo (%)*Tempo (horas)	0,8703	8	0,1088	11,73	0,000000
Tipo Lodo*Teor de lodo(%)*Tempo(horas)	0,0330	8	0,0041	0,44	0,889399
Erro	7,9800	24	0,3300		

Na Figura 44 verifica-se a influência do tipo de lodo (LU e LC) e na Figura 45 a influência da interação das variáveis teor de lodo e do tipo de lodo (LU x LC) na absorção de água do concreto. Nota-se que o lodo úmido obteve menor taxa de absorção frente ao lodo calcinado, sendo esta maior quanto mais elevada a adição do teor de lodo ao concreto.

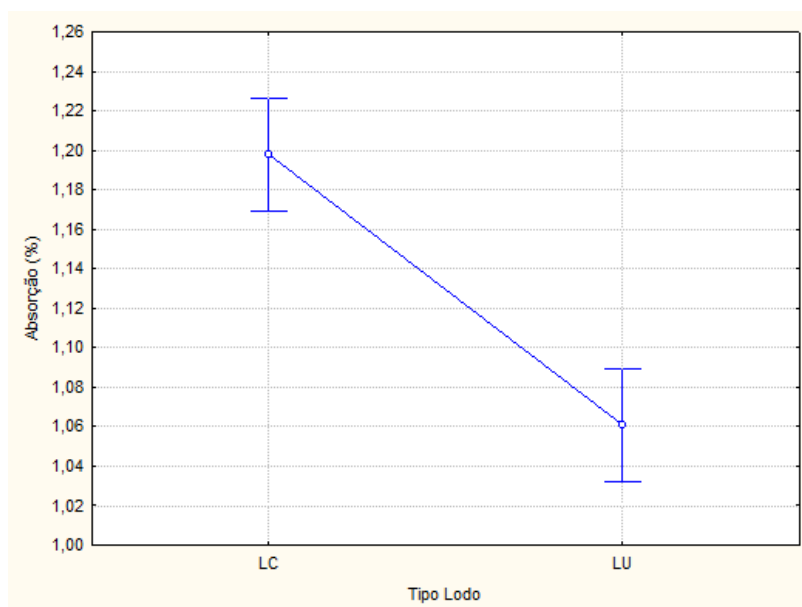


Figura 44 - Influência do tipo de lodo na absorção do concreto.

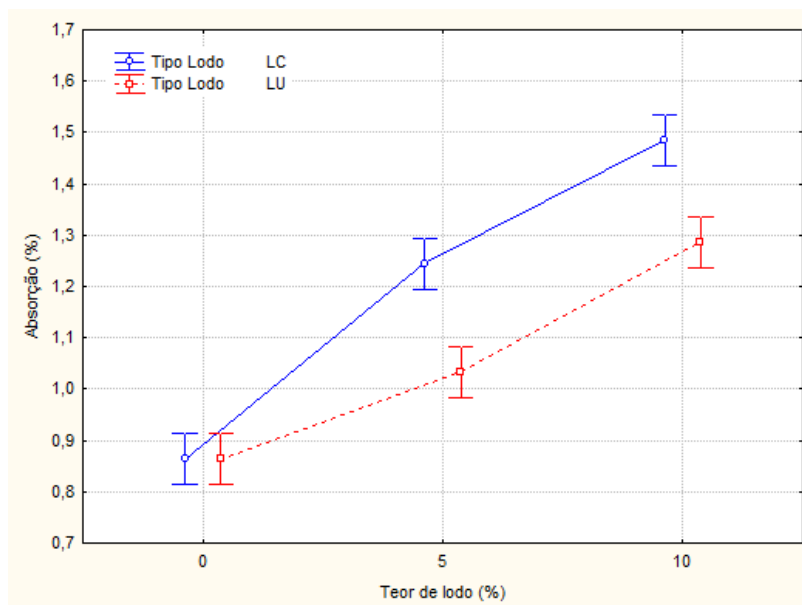


Figura 45 - Influência da interação do teor e do tipo de lodo (LU x LC) na A.

Já a análise de variância das misturas com lodo calcinado (Tabela 17), indicou que as variáveis isoladas, teor de lodo calcinado (%) e tempo, em horas, assim como a interação entre elas, apresentaram significância estatística na absorção de água por capilaridade do concreto.

Verifica-se na Figura 46 a influência negativa do teor de adição de lodo (%) calcinado na absorção de água no concreto. Na Figura 47, é possível notar essa influência negativa no resultado de absorção, sendo quanto maior a adição de lodo calcinado, maior a absorção do concreto.

Tabela 17 - ANOVA do concreto produzido com adição de LC para A.

Variáveis	SQ	GDL	MQ	F _{calc}	Significância " <i>p-value</i> "
Teor de lodo (%)	5,99225	3	1,99742	210,231	0,000000
Tempo (horas)	16,16178	4	4,04045	425,263	0,000000
Teor de lodo (%)*Tempo (horas)	1,00111	12	0,08343	8,781	0,000000
Erro	0,38004	40	0,00950		

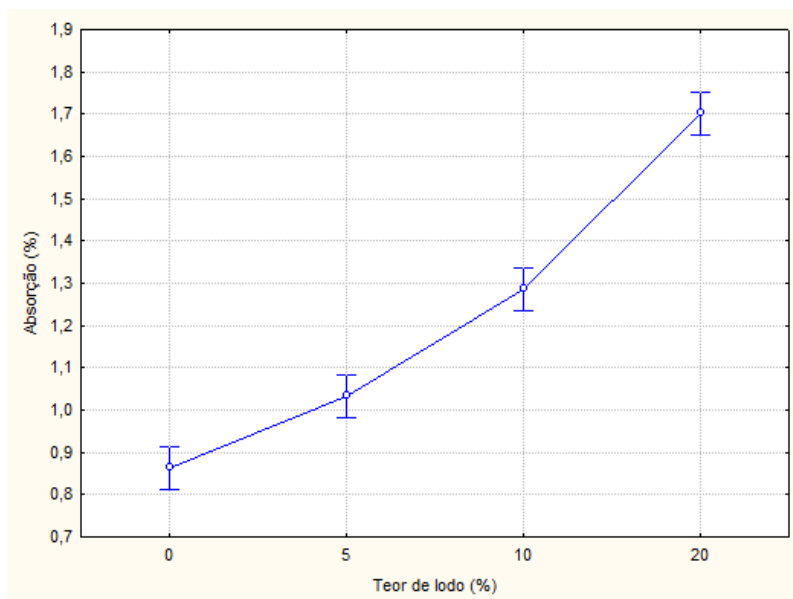


Figura 46 - Influência do teor de LC na absorção.

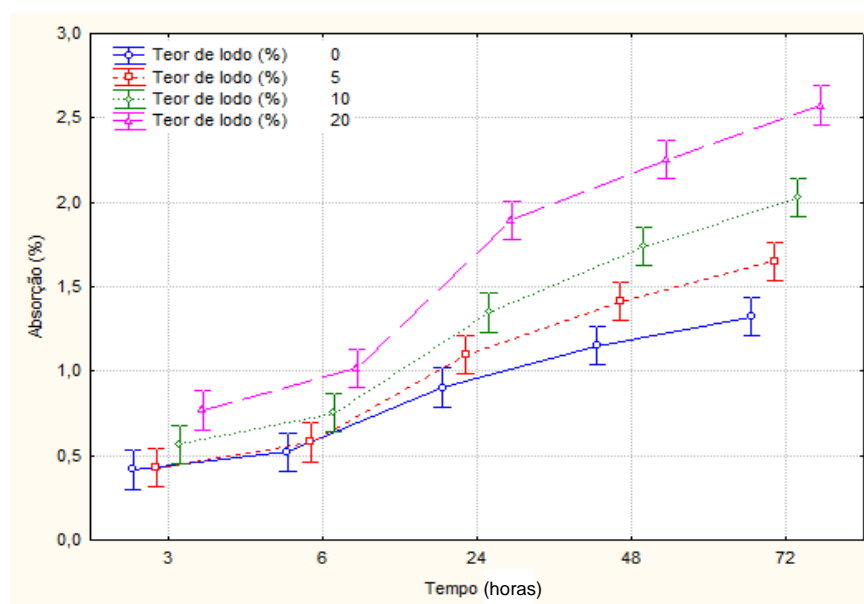


Figura 47 - Influência da interação do teor de lodo e do tempo (horas) na A.

5.2.3.5 Estudo da lixiviação

A partir da experimentação realizada foi possível obter os valores das concentrações de metais nos extratos lixiviados, para o concreto convencional e com o lodo de ETA encapsulado.

Por meio do ensaio de lixiviação em meio ácido (ácido acético glacial) segundo procedimentos adaptados de Hoppen (2004) e de acordo com os procedimentos das normas da NBR 10.004 e 10.005 (ABNT, 2004), o extrato

lixiviado do concreto produzido contendo lodo de ETA, assim como o do concreto convencional (sem lodo) foram classificados como não perigosos e não inertes. Na Tabela 18 são encontrados as concentrações das substâncias no extrato de lixiviado.

Tabela 18 - Resultado do teste de lixiviação.

Análitos	Concentração Média (mg.L ⁻¹) para 10 dias de contato com a solução.															
	a/c 0,65				a/c 0,55 LU				a/c 0,45				a/c 0,55 LC			
	0	5	7	10	0	5	7	10	0	5	7	10	0	5	10	20
Ag	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
As	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Ba	0,06	0,15	0,23	0,31	0,06	0,15	0,18	0,33	0,07	0,10	0,16	0,15	0,06	0,03	0,05	0,05
Bi*	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Co	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Cr	0,06	0,03	0,06	0,06	0,05	0,03	0,03	0,06	0,08	0,05	0,03	0,05	0,05	0,05	0,12	0,13
Cu	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,05
Mn	0,68	0,82	1,06	0,87	0,69	0,94	0,84	1,05	0,87	0,76	0,87	0,79	0,69	0,51	1,04	1,09
Mo*	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ni	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05	0,06	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,07	0,08
Pb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00
Se	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sn*	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
Sr*	2,51	2,50	2,87	3,37	2,48	3,42	2,78	4,69	3,38	3,22	3,27	4,11	2,48	1,41	2,60	2,60
Ti*	0,18	0,17	0,25	0,21	0,20	0,20	0,20	0,24	0,31	0,21	0,19	0,17	0,20	0,16	0,29	0,29
V	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,05	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,07	0,08
Zn	0,14	0,11	0,14	0,10	0,15	0,09	0,10	0,09	0,17	0,13	0,10	0,10	0,15	0,19	0,19	0,20

* Não são encontrados parâmetros de limite máximo para rio classe 2 na Portaria CONAMA 357 (2005).

Segundo os valores de limite máximo permitidos para determinadas substâncias no extrato do lixiviado pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), onde classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente, os resultados foram avaliados quanto ao seu atendimento.

Por meio do resultados para o extrato de lixiviado do concreto nas relações a/c (0,65, 0,55 LU e LC e 0,45), os analitos As, Cd, Pb, Cr, Ag e Se atenderam aos limites máximo permitidos (ver Tabela 19 e Tabela 7 com caracterização do lodo) para estas substâncias.

Tabela 19 - Limite máximo para extrato de lixiviado e Rio Classe 2.

Limite máximo permitido no extrato lixiviado (mg.L ⁻¹) - NBR 10.004 (ABNT, 2004)								
Ag	As	Ba	Cd	Cr	F ⁻	Hg	Pb	Se
5	1	70	0,5	5	150	0,1	1	1

Valor máximo dos elementos (mg.L-1) em Rio Classe 2 - CONAMA 357 (2005)												
Ag	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Se	V	Zn
0,01	0,01	0,7	0,001	0,05	0,05	0,009	0,1	0,025	0,01	0,01	0,1	0,18

Fonte: NBR 10.004 (ABNT, 2004) e CONAMA 357 (2005).

Caso essa lixiviação ocorresse em ambiente natural e entrasse em contato com cursos d'água, pode-se verificar pelos limites aceitáveis na legislação para as substâncias analisadas, que as analitos encontrados no extrato do lixiviado em sua grande maioria atendem ao limite aceitável, para rios de Classe 2 (todos os rios do estado do Paraná⁹), com exceção dos elementos manganês (Figura 48) e níquel (Figura 49), que resultaram em concentrações acima do valor máximo aceitável nesta portaria.

Para os elementos Mg e Ni, pode-se verificar que suas concentrações não foram diretamente afetadas com o incremento de lodo úmido ou calcinado, sendo sua concentração pouco alterada para cada teor de lodo adicionado tanto úmido tanto calcinado em comparação ao concreto referência.

Esses metais pesados constituem contaminantes químicos nas águas, pois em pequenas concentrações trazem efeitos adversos à saúde. O manganês, por exemplo, desenvolve coloração negra na água, enquanto o níquel, estudos recentes demonstram que é carcinogênico. Desta forma, podem inviabilizar os sistemas públicos de água, uma vez que as estações de tratamento convencionais não os removem eficientemente e os tratamentos especiais necessários são muito caros.

⁹ Portarias de Enquadramento dos cursos d'água do Estado do Paraná, classificando-as de acordo com a Resolução nº20 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA, de 18 de junho de 1986 (AGUAS PARANÁ, 2015).

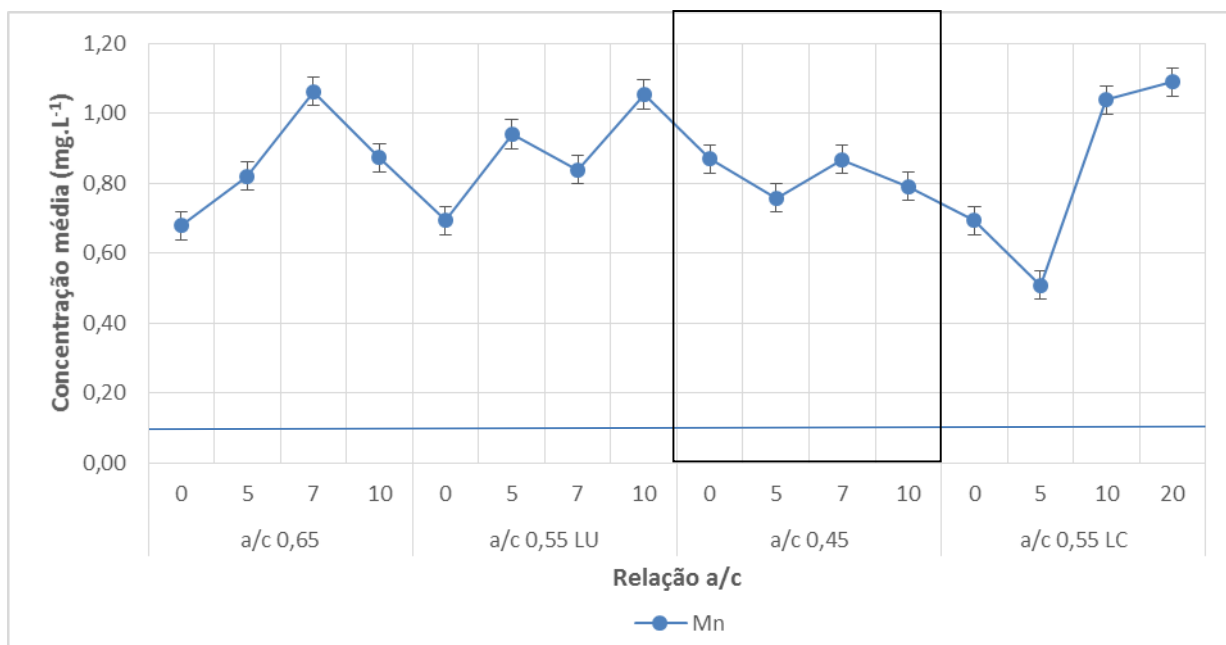


Figura 48 - Concentração do elemento Mn em cada dosagem.

Para o concreto com a/c 0,45 a concentração média foi inferior, ou seja, concretos com baixa porosidade dificultam a lixiviação destes compostos, comprovando então o que já é apresentado na literatura sobre o assunto.

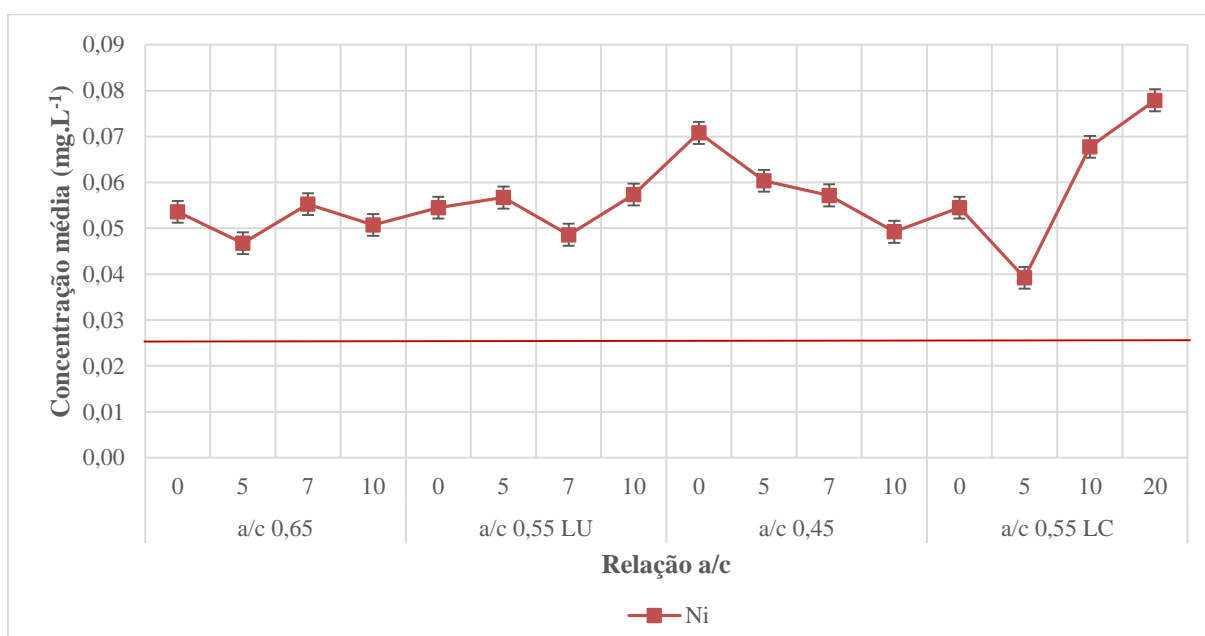


Figura 49 – Concentração do elemento Ni em cada dosagem.

Para alguns analitos como Bi, Mo, Sn, Ti e Sr (com “*” na Tabela 18) não são encontrados parâmetros de limite máximo para rio classe 2 na Portaria

CONAMA 357 (2005). As substâncias Bi, Mo, Sn possuem concentração muito baixa ou quase nula. Já para os analitos Ti e Sr as concentrações obtidas nos ensaios são mais elevadas, sugerindo-se maiores estudos sobre o efeito das mesmas.

5.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA, TÉCNICA E AMBIENTAL

5.3.1 Viabilidade Econômica

Para a viabilidade econômica, tem-se o custo de produção de 1 m³ de concreto referência em cada relação a/c, comparando-se com a fabricação do concreto com adição do lodo úmido ou calcinado. Primeiramente foi estimado o custo com o transporte e disposição do lodo no aterro sanitário conforme Tabela 20.

Tabela 20 - Custo da disposição do lodo gerado na ETA Tamandá.

Ano	Lodo de ETA (t)	Caçambas	Custo Total (R\$)
2004	7,55	3	540,00
2005	26,21	9	1.620,00
2006	14,67	5	900,00
2007	45,07	15	2.700,00
2008	265,74	89	16.020,00
2009	39,84	13	2.340,00
2010	37,25	12	2.160,00
2011	116,89	39	7.020,00
2012	85,23	28	5.040,00
2013	151,66	51	9.180,00
2014	101,58	34	6.120,00
Total	891,69	298	53.640,00

A coleta e transporte do lodo é realizada em caçambas com capacidade de 5 m³. Atualmente em Foz do Iguaçu, cobra-se R\$ 180,00 por caçamba, valor correspondente aos serviços de transporte (R\$ 120,00) e disposição no aterro sanitário (R\$ 60,00).

Para o custo com calcinação do lodo (ver equação 4), foram considerados os valores de custo da energia (equação 5), informados pela empresa Cerâmica Foz

em seus procedimentos¹⁰, onde são utilizados madeira (cavaco e farelo) para manter o aquecimento (energia) do forno a temperatura de 900°C, durante uma semana, conforme segue:

$$C_{energia} = \left(\frac{R\$48,00}{m^3} \times 0,09 m^3 \times 7 dias \right) = R\$ 30,24 \quad \text{Equação 4}$$

$$C_{cal} = \left(\frac{R\$120}{caçamba} + R\$ 30,24 \right) = R\$ 150,24 \quad \text{Equação 5}$$

Com resultado, tem-se um valor de custo de energia de R\$ 30,24 para calcinação do lodo. Custo devido a utilização de 0,64 m³ de cavaco e farelo, no período total de 7 dias, com um custo de R\$ 48,00/m³ de cavaco e farelo.

No valor com o custo da calcinação, tem-se o custo do transporte embutido, de R\$ 120,00 a caçamba somada ao custo de energia, totalizando um valor de R\$ 150,24. Cabe destacar que em escala industrial, o custo com a calcinação pode ser reduzido, a fim de viabilizar economicamente esse processo de tratamento do resíduo.

De posse dos dados técnicos do moinho de bolas, é possível estimar o custo da moagem, onde a potência de 1,5 CV, foi convertida a W, resultando no valor de 1103, 24 W. Como o valor do KWh da Copel custa R\$ 0,75741, tem-se:

$$C_m = 1,1032 KW \times 1 hora \times R\$ 0,75741 = R\$ 0,835 \quad \text{Equação 6}$$

Resolvendo a equação 6, tem-se o custo para moagem do lodo calcinado de R\$ 0,835 por hora. Como a moagem do material em estudo durou 2 horas, tem-se o custo de moagem de R\$ 1,67.

A partir das estimativas acima, é possível atender a segunda parte da equação 3:

$$C_{concreto} = C_C + C_a + C_b + C_{ag} - R\$ 60 \pm R\$ 120 + R\$ 150,24 + R\$ 1,67 = \quad \text{equação 3}$$

Para o cálculo do custo do concreto (primeira parte da equação 3), primeiramente, foi levantado o valor de cada insumo necessário para confecção de 1m³ do concreto convencional (referência), conforme Tabela 21. Na Tabela 22 (a/c 65), Tabela 23 (a/c 0,55 LU), Tabela 24 (a/c 0,45) e Tabela 25 (a/c 0,55 LC) apresentam-se os custos para de produção do concreto com adição de LU e LC.

¹⁰ Segundo informações obtidas com proprietário da Cerâmica Foz em Foz do Iguaçu – PR, são utilizados aproximadamente 120 m³.d⁻¹ para secar 350 t de argila.

Tabela 21 - Custo dos insumos para produção de concreto convencional.

Insumo	Quantidade	Custo Unitário*
Areia	1 m ³	R\$ 75,00
Brita	1 m ³	R\$ 50,00
Cimento CP ARI V	40 Kg	R\$ 28,00
Água	1 m ³	R\$ 26,77

*Valores cotados em fevereiro de 2015, com materiais de construção de Foz do Iguaçu.

Para atender totalmente a equação 3, na confecção do concreto com lodo úmido os valores com calcinação e moagem foram desconsiderados. Pois não são utilizados esses processos para tratamento do lodo nestas condições. O valor da caçamba é fixo, sendo que não importa a quantidade transportada o valor será de R\$ 120,00 por caçamba.

De acordo com a Tabela 22, para o concreto referência da a/c 0,65, tem-se o valor de R\$ 298,81. No aproveitamento do lodo, o custo com sua disposição foram subtraídos do valor para o traço ao qual ele foi adicionado, resultando nos custos de R\$ 290,92, R\$ 287,77 e R\$ 283,59, para a confecção de concretos com 5%, 7% e 10% de lodo úmido, respectivamente.

Tabela 22 - Custo da produção de concreto para a/c 0,65.

Mistura	Componente	Quantidade (kg/m ³)	Custo Unitário (R\$)	Custo para 1 m ³ de Concreto	
				Unitário	Total
a/c 0,65 Referência	Cimento CP ARI V	307,69	0,7/Kg	215,38	R\$ 298,81
	Areia	815,90	75/m ³	38,25	
	Brita	1155,00	50/m ³	39,83	
	Água	200,00	26,77/m ³	5,35	
a/c 0,65 5%	Cimento CP ARI V	307,69	0,7/Kg	215,38	R\$ 290,92
	Areia	775,11	75/m ³	36,33	
	Brita	1155,00	50/m ³	39,83	
	Água	89,70	26,77/m ³	2,40	
	Lodo Úmido	151,09	0,02/Kg disposição	-3,02	
a/c 0,65 7%	Cimento CP ARI V	307,69	0,7/Kg	215,38	R\$ 287,77
	Areia	758,79	75/m ³	35,57	
	Brita	1155,00	50/m ³	39,83	
	Água	45,58	26,77/m ³	1,22	
	Lodo Úmido	211,53	0,02/Kg disposição	-4,23	
a/c 0,65 10%	Cimento CP ARI V	307,69	75/m ³	215,38	R\$ 283,59
	Areia	734,31	50/m ³	34,42	
	Brita	1155,00	0,7/Kg	39,83	
	Água	0,00	26,77/m ³	0,00	
	Lodo Úmido	302,19	0,02/Kg disposição	-6,04	

Na Tabela 23, tem-se o mesmo valor de R\$ 335,73 para o concreto referência de a/c 0,55 LU. Já para o aproveitamento do lodo, o mesmo mecanismo foi utilizado descontando-se o custo com a disposição para cada traço adicionado lodo úmido, resultando no custo para utilização do lodo úmido na confecção do concreto para os traço com 5%, 7% e 10% em R\$ 328,31, R\$ 325,34 e R\$ 321,09.

Tabela 23 - Custo da produção de concreto para a/c 0,55 LU.

Mistura	Componente	Quantidade (kg/m ³)	Custo Unitário (R\$)	Custo para 1 m ³ de Concreto	
				Unitário	Total
a/c 0,55 Referência	Cimento CP ARI V	363,64	0,7/Kg	254,55	R\$ 335,73
	Areia	768,08	75/m ³	36,00	
	Brita	1155,00	50/m ³	39,83	
	Água	200,00	26,77/m ³	5,35	
a/c 0,55 5%	Cimento CP ARI V	363,64	0,7/Kg	254,55	R\$ 328,31
	Areia	729,67	75/m ³	34,20	
	Brita	1155,00	50/m ³	39,83	
	Água	96,17	26,77/m ³	2,57	
	Lodo Úmido	142,24	0,02/Kg disposição	-2,84	
a/c 0,55 7%	Cimento CP ARI V	363,64	0,7/Kg	254,55	R\$ 325,34
	Areia	714,31	75/m ³	33,48	
	Brita	1155,00	50/m ³	39,83	
	Água	54,63	26,77/m ³	1,46	
	Lodo Úmido	199,13	0,02/Kg disposição	-3,98	
a/c 0,55 10%	Cimento CP ARI V	363,64	0,7/Kg	254,55	R\$ 321,09
	Areia	691,27	75/m ³	32,40	
	Brita	1155,00	50/m ³	39,83	
	Água	0,00	26,77/m ³	0,00	
	Lodo Úmido	284,47	0,02/Kg disposição	-5,69	

Para a Tabela 24, tem-se o valor de R\$ 389,06 para o concreto referência de a/c 0,45. Utilizando-se o lodo úmido na produção de concreto, novamente tem-se o custo com a disposição desconsiderado, resultando no custo de produção para o concreto com adição de lodo úmido com 5% (R\$ 382,30), 7% (R\$ 379,60) e 10% (R\$ 375,54).

Tabela 24 - Custo da produção de concreto para a/c 0,45.

Mistura	Componente	Quantidade (kg/m ³)	Custo Unitário (R\$)	Custo para 1 m ³ de Concreto	
				Unitário	Total
a/c 0,45 Referência	Cimento CP ARI V	444,44	0,7/Kg	311,11	R\$ 389,06
	Areia	699,00	75/m ³	32,77	
	Brita	1155,00	50/m ³	39,83	
	Água	200,00	26,77/m ³	5,35	
a/c 0,45 5%	Cimento CP ARI V	444,44	0,7/Kg	311,11	R\$ 382,30
	Areia	664,05	75/m ³	31,13	
	Brita	1155,00	50/m ³	39,83	
	Água	105,51	26,77/m ³	2,82	
	Lodo Úmido	129,44	0,02/Kg disposição	-2,59	
a/c 0,45 7%	Cimento CP ARI V	444,44	0,7/Kg	311,11	R\$ 379,60
	Areia	650,07	75/m ³	30,47	
	Brita	1155,00	50/m ³	39,83	
	Água	67,71	26,77/m ³	1,81	
	Lodo Úmido	181,22	0,02/Kg disposição	-3,62	
a/c 0,45 10%	Cimento CP ARI V	444,44	0,7/Kg	311,11	R\$ 375,54
	Areia	629,10	75/m ³	29,49	
	Brita	1155,00	50/m ³	39,83	
	Água	11,01	26,77/m ³	0,29	
	Lodo Úmido	258,89	0,02/Kg disposição	-5,18	

Para o custo do concreto com lodo calcinado tem-se todos os fatores considerados pela equação 3, sendo os valores proporcionais para a quantidade calcinada e moída em cada traço, conforme a seguir:

$$C_{\text{Concreto}} = C_C + C_a + C_b + C_{ag} - R\$ 60 + R\$ 150,24 + R\$ 1,67 =$$

Da Tabela 25 tem-se o custo para o concreto referência de a/c 0,55 LC R\$ 335,73, já para o aproveitamento do lodo calcinado na confecção de concreto, tem-se um custo de R\$ 151,91 devido a calcinação e moagem da quantidade total de lodo sinterizado (268,83 Kg) para confecção de 1 m³ de concreto.

Tabela 25 - Custo da produção de concreto para a/c 0,55 LC.

Mistura	Componente	Quantidade (kg/m³)	Custo Unitário (R\$)	Custo para 1 m³ de Concreto	
				Unitário	Total
a/c 0,55 LC Referência	Cimento CP ARI V	363,64	0,7/Kg	254,55	R\$ 335,73
	Areia	768,08	75/m³	36,00	
	Brita	1155,00	50/m³	39,83	
	Água	200,00	26,77/m³	5,35	
a/c 0,55 LC 5%	Cimento CP ARI V	363,64	0,7/Kg	254,55	R\$ 351,15
	Areia	729,67	75/m³	34,20	
	Brita	1155,00	50/m³	39,83	
	Água	200,00	26,77/m³	5,35	
	Lodo Calcinado Moagem	38,40	150,24/calцинаção 1,67/moagem	21,46 0,24	
	Lodo Úmido*	224,00	0,02/Kg disposição	-4,48	
a/c 0,55 LC 10%	Cimento CP ARI V	363,64	0,7/Kg	254,55	R\$ 366,58
	Areia	691,27	75/m³	32,40	
	Brita	1155,00	50/m³	39,83	
	Água	200,00	26,77/m³	5,35	
	Lodo Calcinado Moagem	76,81	150,24/calцинаção 1,67/moagem	42,93 0,48	
	Lodo Úmido*	448,06	0,02/Kg disposição	-8,96	
a/c 0,55 LC 20%	Cimento CP ARI V	363,64	0,7/Kg	254,55	R\$ 397,41
	Areia	614,46	75/m³	28,80	
	Brita	1155,00	50/m³	39,83	
	Água	200,00	26,77/m³	5,35	
	Lodo Calcinado Moagem	153,62	150,24/calцинаção 1,67/moagem	85,85 0,95	
	Lodo Úmido*	896,12	0,02/Kg disposição	-17,92	

* Quantidade de lodo úmido equivalente ao lodo calcinado, o qual possui rendimento de 17 a 20%, conforme análise de TG e queima em forno de cerâmica.

De acordo com a Figura 50 verifica-se que com o incremento do teor de lodo úmido existe uma redução no custo para confecção do concreto. Já para o lodo calcinado houve um aumento expressivo para sua produção, devido ao custo com a calcinação e moagem para confecção do concreto, no gráfico o valor com adição de 7% de lodo calcinado foi estimado por equação polinomial ($y = 0,3817x^2 - 6,3275x + 330,82$) com $R^2 = 0,85$.

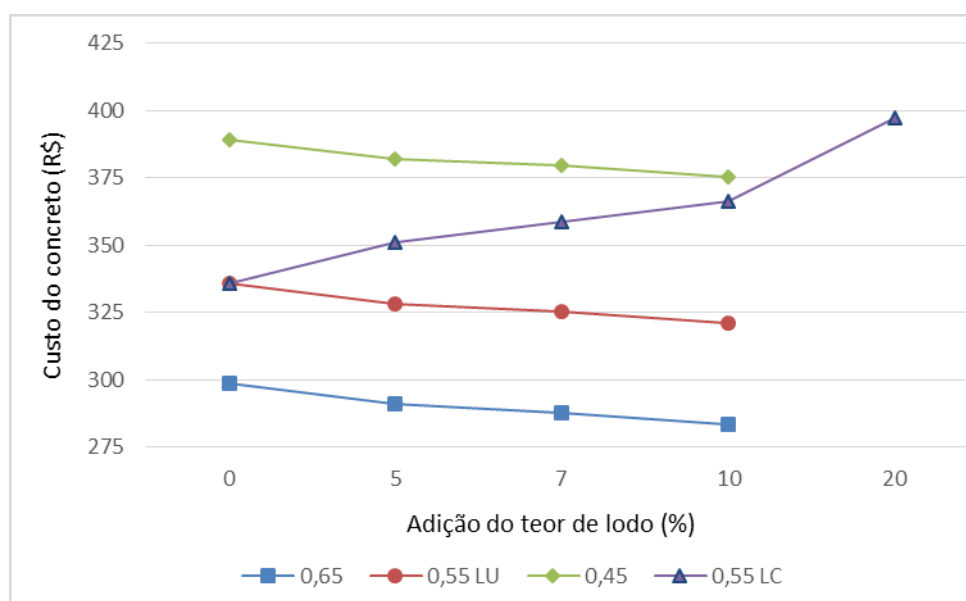


Figura 50 - Comparação do custo na confecção do concreto.

Devido às questões técnicas do forno disponível para queima, o lodo utilizado foi calcinado a 900°C. Pelo resultado da TG o material poderá ser calcinado a menores temperaturas (de 300 a 500°C), promovendo assim economia energética no processo de tratamento térmico do lodo. Tal fato resulta num melhoramento no aspecto ambiental da aplicação do lodo calcinado na produção de concretos.

5.3.2 Avaliação Técnica

Para avaliação técnica, de posse dos resultados (Tabela 26), de acordo com Mehta e Monteiro (2014), o concreto ensaiado é classificado (50%) como concreto com resistência moderada, seguido do concreto com baixa resistência (43,75%) e apenas 6,25% classificado como concreto com alta resistência. Os resultados sugerem a possibilidade de utilização desse concreto para diversas aplicações não estruturais na construção civil, permitindo o atendimento dos requisitos mínimos inerentes ao desempenho mecânico e à durabilidade.

Cabe salientar ainda, que o lodo calcinado elevou a resistência do concreto (mesmo com adição de água, o que elevou a relação a/c (conforme Tabela 5). Se fosse adicionado aditivo para controle de trabalhabilidade no concreto com LC, teria

elevado o f_c de forma significativa. Logo, pela análise isolada desta propriedade essa adição de LC não altera o desempenho mecânico do concreto. Somente o desempenho da absorção de água foi afetada com adição de lodo calcinado. Porém estudos mais aprofundados em relação à instabilidade química do concreto e à durabilidade (carbonatação, reação álcalis-agregado e cloretos) devem ser conduzidos a fim de confirmar se este pode ser empregado como concreto estrutural.

Tabela 26 - Classificação da resistência a compressão (f_{ck}) do concreto.

	a/c	%	Cura	f_{ck} (Mpa)	Classificação (Mehta e Monteiro, 2014)
Lodo Úmido	0,65	0	28	30,44	Concreto de resistência moderada
	0,65	5	28	15,05	Concreto de baixa resistência
	0,65	7	28	7,93	Concreto de baixa resistência
	0,65	10	28	0,16	Concreto de baixa resistência
	0,55	0	28	36,02	Concreto de resistência moderada
	0,55	5	28	17,86	Concreto de baixa resistência
	0,55	7	28	13,29	Concreto de baixa resistência
	0,55	10	28	2,28	Concreto de baixa resistência
	0,45	0	28	43,28	Concreto de alta resistência
	0,45	5	28	26,00	Concreto de resistência moderada
	0,45	7	28	20,18	Concreto de resistência moderada
	0,45	10	28	2,70	Concreto de baixa resistência
Lodo Calcinado	0,55	0	28	36,02	Concreto de resistência moderada
	0,55	5	28	39,02	Concreto de resistência moderada
	0,55	10	28	39,99	Concreto de resistência moderada
	0,55	20	28	39,36	Concreto de resistência moderada

Para as demais dosagens de concreto, têm-se as mais variadas opções de aplicação que podem ser utilizadas na construção civil, como a produção de contra pisos, produção de argamassas para assentamento de componentes e confecção de blocos de concreto não estrutural. Outras aplicações em que não se exijam resistências elevadas também podem ser indicadas, como guias, sarjetas e componentes de drenagem, entre outros elementos de infraestrutura urbana.

5.3.3 Viabilidade Ambiental

Para a viabilidade ambiental da produção de concreto com lodo de ETA, foram avaliados os itens quanto a toxicidade, disposição final, atendimento à legislação brasileira, e certificação ambiental, conforme Quadro 9.

Itens avaliados	Atende?		Como?
	SIM	NÃO	
A- Biossegurança	X		Ensaio de lixiviação
B- Toxicidade		X	Ensaio de lixiviação
C- Disposição final	X		Local de disposição
D- Legislação brasileira	X		Atendimento a Legislação
E- Certificação Ambiental	X		Certificação Ambiental

Quadro 9 - Resultado da avaliação ambiental.

Para o item A, Biossegurança, foi considerado o ensaio de lixiviação realizado na caracterização do lodo (ver capítulo 5.1.2) sendo um dos requisitos para atendimento da biossegurança no manuseio do concreto com lodo, garantindo assim a saúde humana em toda a produção, desde a coleta do lodo até sua aplicação no concreto.

No resultado de lixiviação do lodo, os analitos (Al, Ba, Cd, Pb, Cr, F⁻, Hg, Ag, Se) atenderam o limite máximo no lixiviado, de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004). A elevada concentração de Al é justificada pela aplicação do coagulante policloreto de alumínio. A preocupação com o Al, deve-se a forma iônica de Al⁺³ livre, que oferece maior risco ao ecossistema, visto que em determinadas concentrações podem ser tóxicas a grande maioria dos vegetais. Para os humanos existem estudos que relacionam o mal de Alzheimer à ingestão de elevadas concentrações de Al (CARNEIRO e ANDREOLI, 2013).

A Toxicidade foi avaliada por meio da lixiviação a concentração dos analitos, caso essa lixiviação ocorresse em ambiente natural e entrasse em contato com cursos d'água, foram avaliados os limites máximos permitidos, segundo a Portaria CONAMA nº 357 (2005). Para as substâncias analisadas, de acordo com a Tabela 18 as concentrações dos analitos atendem aos valores máximos permitidos para rios de classe 2, com exceção do manganês e níquel que apresentaram concentrações acima do permitido nesta portaria. Confirmou-se que os resultados

dos analitos para 88,89% foram favoráveis, indicando o concreto como forma de encapsular os contaminantes presente no lodo de ETA.

Com relação à Disposição final, foi constatado que a ETA Tamanduá destina seus resíduo ao Aterro Sanitário, por meio de contrato com empresas transportadora Verde Caçambas, a qual dá a disposição correta ao resíduo no aterro sanitário de Foz do Iguaçu.

Considerando a legislação brasileira, o aproveitamento deste resíduo não é apenas uma iniciativa para se preservar os recursos hídricos e o meio ambiente em geral, tampouco é uma ferramenta para criação de benchmark empresarial para as empresas de saneamento, é uma exigência definida na Lei n. 6.938 (1981), que instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente. Os executivos do saneamento podem ser enquadrados como poluidores, definidos no art. 3º, inciso IV, dessa mesma Lei. A Lei n. 9.605 (1998), chamada de Lei dos Crimes Ambientais, dispõe, em seu artigo 54 considera crime: “Causar poluição de qualquer natureza que resultem ou possam provocar danos à saúde humana, ou que provoque a morte de animais ou a destruição significativa da fauna”.

Quanto a certificação ambiental, que se dá mediante aos requisitos legais e outros, bem como, promove a melhoria da imagem das empresas, a Companhia de Saneamento do Paraná, buscou e obteve certificações ambientais, como a NBR ISO 14.001 (ABNT, 2004) e NBR ISO 31.000 (ABNT, 2009).

Tendo em vista que, no aspecto ambiental, quanto maior o teor de lodo adicionado melhor, as misturas que incorporam 20% de lodo de ETA calcinado apresentam melhor desempenho, uma vez que consomem maior volume de resíduo sem afetar de forma significativa a resistência à compressão do concreto, conforme indicado pela ANOVA (ver Tabela 12 e Figura 34).

Para efetivo aproveitamento do lodo em concreto como alternativa ambientalmente correta na disposição final, atendendo aos requisitos legais e ambientais, são necessárias tecnologias para secagem do lodo e para seu beneficiamento. Por meio de estudos e inovações tecnológicas que permitam a utilização do lodo de ETA para solucionar o problema com sua disposição final, será possível contribuir para amenizar a poluição de cursos d'água com os lodos de ETA. Essa iniciativa não só introduzirá novos materiais com grande potencialidade de uso como também proporcionará melhorias do ponto de vista ambiental.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos estudos realizados, verificou-se que o lodo de ETA pode ser aplicado na indústria da construção civil, sendo aproveitado como matéria prima para confecção de artefatos como cimento, argamassa, material cerâmico, concreto, e solo-cimento, contudo devem ser criteriosamente analisados, observando as normas técnicas específicas para garantia da eficácia, segurança e aplicabilidade.

De maneira geral, apesar de ocorrerem reduções na qualidade do concreto com a incorporação do lodo de ETA, sua utilização como forma de disposição final pode ser considerada viável.

A partir dos resultados deste trabalho, o qual tinha por objetivo analisar a viabilidade da utilização de lodo de Estação de Tratamento de Água (lodo de ETA) na produção de concretos sustentáveis, tem-se as seguintes considerações:

- a) Em relação ao volume de resíduos:
 - A ETA em estudo produziu no período de 2004 à 2014 um montante de 891,69 toneladas de lodo centrifugado.
- b) Em relação à caracterização:
 - O lodo apresentou teor de umidade e sólidos totais de:
 - 76% e 24% para o 1º período de coleta.
 - 60% e 40% para o 2º período de coleta.
 - 62% e 38% para o 3º período de coleta.
 - Obteve densidade média de $1,17 \text{ g.cm}^{-3}$ e pH de 7,93.
 - Os elementos que se encontram em maior abundância são: sílica (24% e 30% para o 1º e 3º período), alumina (23% e 25%) e hematita (17% para o 1º e 3º período). Essas concentrações elevadas de Al, Si e Fe, ocorrem devido ao uso do policloreto de alumínio como coagulante e os materiais argilosos e sílica presentes na água bruta.
 - A análise conjunta dos dados obtidos permitiu concluir que o lodo da ETA apresentou minerais de quartzo, caolinita e goethita, rutilo e anastásio, nas fases cristalinas (na análise de DRX), em sua maior proporção, com teores de sílica, alumínio e ferro mais elevados, que são características dos argilominerais, e em se tratando do alumínio, pode-se afirmar que sua

participação tem relação direta com a quantidade de coagulante, à base de policloreto de alumínio, utilizado no tratamento da água.

- Com o comportamento térmico do lodo, pela análise termogravimétrica observa-se a redução da amostra em torno de 83,88%. Confirmando o rendimento entre 17 e 20% na calcinação do lodo em forno de sinterização.
- c) Em relação à incorporação do lodo e sua influência nas propriedades do concreto:
- No estudo de dosagem de lodo de ETA em concreto observou-se que, com teores acima de 5% de adição de lodo úmido em relação ao peso seco da areia, o concreto não apresenta propriedades mecânicas para utilização estrutural, sendo a resistência inferior a 20 MPa;
 - Por meio do estudo de dosagens determinou-se que os concretos devem ser confeccionadas com teores de lodo úmido inferiores a 5%, para que possam atingir resistência.
 - Já para o concreto com lodo calcinado obteve-se resistências moderadas com f_c superior a 35 MPa.
 - Nos demais ensaios mecânicos: de elasticidade e resistência a tração, a adição de lodo úmido foi prejudicial para o concreto enquanto o concreto com lodo calcinado revelou resultados positivos.
 - No ensaio de absorção por capilaridade do concreto foi possível observar que a absorção aumentou com o incremento na quantidade de lodo, tanto úmido quanto calcinado, para a maioria dos fatores água cimento estudados.
 - Para o lodo calcinado, a absorção de água dos concretos foi superior ao com lodo úmido. Apesar do lodo calcinado não ter influenciado negativamente na resistência à compressão do concreto, este influenciou na demanda de água para obtenção da trabalhabilidade alvo, devido a maior porosidade do concreto.
 - Por meio do ensaio de lixiviação foi possível garantir a imobilização dos contaminantes, por meio do encapsulamento dos metais pesados no concreto.
- d) Em relação à viabilidade:
- Para uma melhor interpretação dos resultados da avaliação aplicada a produção de concreto com lodo úmido e lodo calcinado, tem-se no Quadro 10 onde são evidenciadas as respostas positivas e negativas de sua aplicação

em concreto perante a viabilidade econômica, técnica e ambiental.

Avaliação	Lodo Úmido - LU	Lodo Calcinado - LC
Econômica	+	-
Técnica	-	±
Ambiental	+	±

Quadro 10 - Resumo da avaliação econômica, técnica e ambiental

- O custo para confecção do concreto contendo lodo úmido diminui com o aumento no teor de lodo, enquanto com o lodo calcinado aumenta. Pode-se considerar que o custo com a calcinação do lodo e moagem em escala industrial possivelmente reduzirá seu custo, viabilizando economicamente seu aproveitamento.
- Em relação a viabilidade técnica, recomenda-se a confecção de concreto com adição de LU para usos não estruturais de até 5% de teor de lodo úmido. E para o LC recomenda-se o uso não estrutural com adição de até 20% de lodo calcinado, para concretos estruturais o uso do LC também poderá ser efetuado, desde que realizados mais estudos envolvendo também testes de durabilidade.
- Já em relação a viabilidade ambiental, por meio do ensaio de lixiviação foram constatados níveis de concentração das substâncias analisadas abaixo do limite máximo de acordo com procedimentos da NBR 10.004 (2004) e da Portaria CONAMA 357 (2005) para valores máximos permitidos em rios de classe 2. Sendo então confirmado sua biossegurança na utilização, e sua toxicidade, pois atende os requisitos legais, garantindo então a saúde humana e ambiental. Podendo o concreto ser utilizado como encapsulamento dos contaminantes presente no lodo.
- O gasto energético para sinterização do lodo e posterior moagem, deve ser considerado, sendo um fator desfavorável na confecção de concretos com lodo calcinado.
- Atualmente a disposição final do lodo atende aos requisitos legais, sendo destinado ao aterro sanitário. A Sanepar possui certificação ISO 14.001 e ISO 31.000 demonstrando preocupação com o gerenciamento ambiental de suas atividades.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Da realização deste trabalho, citam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- a) Avaliar o real efeito da influência da adição do lodo úmido na demanda de água do concreto, conduzindo estudos com lodo seco em estufa a 100°C.
- b) Conduzir estudos a fim de esclarecer os fatores que elevaram a demanda de água do concreto quando se adicionada o lodo calcinado. E avaliar a influência da adição de lodo calcinado empregando aditivo superplastificante para a correção da trabalhabilidade.
- c) Estimar a interferência da adição de lodo no concreto, de ETAs de bacias hidrográficas diferentes no estado do Paraná.
- d) Realizar estudos de microestrutura do concreto (como MEV e porosimetria) a fim de comprovar o efeito da adição de lodo na microestrutura das misturas produzidas, especialmente na porosidade.
- e) Medir a influência da adição de lodo calcinado a diferentes temperaturas (300, 500 e 700°C) e sua influência no custo de produção do concreto.
- f) Verificar outras formas e métodos para produção de lodo calcinado.
- g) Avaliar a influência do lodo calcinado nas propriedades de durabilidade do concreto.
- h) Realizar o ensaio de lixiviação em solução básica de hidróxido de sódio (NaOH) a fim de verificar o encapsulamento de metais pesados quando o concreto é exposto a ataque básico.
- i) Analisar a viabilidade econômica por meio do custo de produção frente ao valor agregado.

8 REFERÊNCIAS

ABCP, **Associação Brasileira de Cimento Portland**. Cimento CP V ARI. Disponível em <http://www.abcp.org.br/colaborativo-portal/perguntas-frequentes.php?id=22>. Acesso em 10 de dezembro de 2013.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos sólidos – Classificação, 2004.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, 2004.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10664**: Águas – Determinação de resíduos (sólidos) – método gravimétrico. Rio de Janeiro: 1989.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro: 1996.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos ou prismático de concreto. Rio de Janeiro: 2008.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. Rio de Janeiro: 2007.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: 2014.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – preparação para ensaio de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: 1986.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e Solos. Rio de Janeiro: 1995.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro: 1984.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: 1987.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7219**: Determinação de materiais pulverulentos nos agregados: Método de ensaio. Rio de Janeiro: 1987.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndrico. Rio de Janeiro: 1994.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**: Agregados em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro: 1982.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7810**: Agregado em estado compactado e seco – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro: 1983.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão – deformação. Rio de Janeiro: 2008.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Determinação da massa específica de agregado miúdo por meio do Frasco de Chapman. Rio de Janeiro: 1987.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: 2012.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: 1987.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9937**: Determinação da absorção e da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: 1987.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Determinação da composição granulométrica, 2003.

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

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 47**: Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco. Rio de Janeiro: 1998.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Determinação da massa específica e massa específica aparente, 2009.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: 1998.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 2001.

AGUAS PARANÁ. **Portarias de Enquadramento dos cursos d'água do Estado do Paraná.** Disponível em <http://www.aguasparana.pr.gov.br>. Acesso em: 10 de janeiro de 2015.

ANDREOLI, C. CARNEIRO, C. **A problemática da Geração e Disposição Final de Lodo de ETA.** In: CARNEIRO, C. ANDREOLI, C. V. (Coord.). Lodo de Estação de Tratamento de Água – Gestão e Perspectivas Tecnológicas. Curitiba, Sanepar, 2013. p. 179-222.

APHA, AWWA, and WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 21st Ed. American Public Health Association, Washington, D. C. 2005.

AWWA - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **Water quality and treatment.** In: _____. A handbook of community water supplies. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1999, cap 16, p. 16.1-16.51.

AZEVEDO NETTO, J. M. **Técnica de abastecimento e tratamento de água.** 2ed. São Paulo: CETESB/ASCETESB, v.1. 1987.

BARROSO, M.M.; CORDEIRO, J.S. (2001). **Problemática dos Metais nos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água.** 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES, 2001.

BASTOS, P. S. **Fundamentos do Concreto Armado.** Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. Bauru, SP. 2006.

BITTENCOURT, S. SERRAT, B. M. AISSE, M. M. MARIN, L. M. K. S. SIMÃO, C. C. **Aplicação de lodos de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto em solo degradado.** Eng Sanit Ambient | v.17 n.3 | jul/set 2012.

BRASIL. **Lei Federal nº 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. Diário oficial da União. Brasília, 02 de set. de 1981.

BRASIL. **Lei Federal nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998.** Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Diário oficial da União. Brasília, 17 de fev. de 1998.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei n 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providencias. Diário Oficial da União. Brasília, 03 de ago. de 2008.

BREHM, F. A. KULAKOWSKI, M. P. EVALDT, D. C. MORAES, C. A. M. PAMPANELLI, A. B. **Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 15-27, abr./jun. 2013.

CAMARINI, G. **Caracterização da durabilidade do concreto pela absorção de água.** In: 41º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Anais em CD. Salvador. 1999.

CARNEIRO, C. ANDREOLI, C. V. **Caracterização do Lodo de ETA gerado no Estado do Paraná.** In: CARNEIRO, C. ANDREOLI, C. V. (Coord.). Lodo de Estação de Tratamento de Água – Gestão e Perspectivas Tecnológicas. Curitiba, Sanepar, 2013. p. 131-178.

CHAMIE, S. **Encapsulamento de resíduos de lamas galvânicas através da solidificação em matriz de cimento.** Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.

CHATVEERA, B. LERTWATTANARUK, P. MAKUL, N. **Effect of sludge water from ready-mixed concrete plant on properties and durability of concrete.** In Cement and Concrete Composites. Volume 28, Pages 441-450, 2006.

CHATVEERA, B. LERTWATTANARUK, P. MAKUL, N. **Use Of Ready-Mixed Concrete Plant Sludge Water In Concrete Containing An Additive Or Admixture.** In Journal of Environmental Management. Volume 90, Pages 1901-1908, 2009.

CHEN, H. MA, X. DAI, H. **Reuse of water purification sludge as raw material in cement production.** In Cement and Concrete Composites. Volume 32, Issue 6, Pages 436–439, July 2010.

CICHY, K. A. M. **Policloreto de alumínio: uma opção para o tratamento de águas.** 2001. 27f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2001.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 357**, de 17 de março de 2005. Ministério do Meio Ambiente, 23p. 2005.

CORDEIRO, J. S. **Micro propriedades de Lodos Gerenciados em Decantadores de Estações de Tratamento de Água.** XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México. Memorias. 2002.

CORDEIRO, J. S. SALES, A. **Imobilização da fase sólida de lodos de estação de tratamento de água (ETAs).** In: Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final. PROSAB. Curitiba, 2001.

CORDEIRO, J.S. **Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs.** In: REALI, M.A.P., coord. Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

DI BERNARDO, L. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água.** Luiz Di Bernardo, Angela Di Bernardo Dantas, Paulo Eduardo Nogueira Voltan. São Carlos, LDiBe, 2012.

DNER. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER 153: Agregados em estado compactado seco - determinação da massa específica aparente**, 1997.

DVORAK, M. A. **Interferências no Processo de Tratamento das Águas de Recirculação de Lavagem dos Filtros: Estação de Tratamento de Água do Iraí – SANEPAR**. Monografia - Pós Graduação – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

DVORAK, M. A. **Reaproveitamento da Água de Lavagem de Filtros e Decantadores da ETA Passaúna**. Monografia – SPEI, Curitiba, 2004.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo / Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. – 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, 1997.

FADANELLI, L. WIECHETECK, G. K. **Estudo Da Utilização Do Lodo De Estação De Tratamento De Água Em Solo Cimento Para Pavimentação Rodoviária**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 2, no. 2, Ago, 2010.

FALCETTA, F. A. M. Materiais de Construção Civil. Disponível em: http://falcetta.eng.br/_resumos/eng4.pdf. Acesso em: 20 de abril de 2015.

FONTANIVE, A. OLIVEIRA, M. D. PAULA, R. R. C. **Avaliação da viabilidade de utilizar lodo de eta na Produção de tijolo solo-cimento como meio de Destinação final**. III Jornada de Iniciação Científica do Cefetes. I Jornada de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. 2008.

FREITAS, J. G. FILHO, S. S. F. PIVELI, R. P. **Viabilidade técnica e econômica da regeneração de coagulantes a partir de lodos de estações de Tratamento de água**. Revista Engenharia Sanitária Ambiental. Vol.10 - Nº 2 - abr-jun, 137-145, 2005.

GOMES, M. H. R. **Apostila de Mecânica dos Flúidos**. Universidade Federal de Juiz de Fora. 2015.

GOOGLE EARTH. **Foto de satélite de Foz do Iguaçu, Paraná Brasil**. Disponível em: <http://earth.google.com>. Acesso: 12 janeiro 2014.

GRANDIN, S. R.; ALEM SOBRINHO, P.; GARCIA JR., A. D. **Desidratação de Lodos Produzidos em Estações de Tratamento de Água**. In: 17º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Natal. v.2, p. 324-341. ABES, 1993.

GUERRA, R. C. **Caracterização e biodegradação de lodo de estação de tratamento de água para descarte em aterro sanitário**. Rio Claro. Universidade Estadual Paulista – UNESP, 2005. 81 p (Mestrado Ciências Biológica).

HEGAZY, B. E. E. FOUAD, H. A. HASSANAIN, A. M. **Incorporation of water sludge, silica fume, and rice husk ash in brick making**. In Advances in Environmental Research. Vol. 1, No. 1, Pages 83-96, 2012.

HELENE, P. ANDRADE, T. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Ed. G. C. Isaia - São Paulo: IBRACON, 2007.

HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 271f. Tese (Livre Docência em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, São Paulo, 1993.

HOPPEN, C. PORTELLA, K. ANDREOLI, C. SALES, A. JOUKOSKI, A. **Estudo de Dosagem para Incorporação do Lodo de ETA em Matriz de Concreto, como forma de disposição final**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES, 2005.

HOPPEN, C. PORTELLA, K. F. JOUKOSKI, A. BARON, O. FRANCK, R. SALES, A. ANDREOLI, C. V. PAULON, V. A. **Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental**. Revista Cerâmica, Vol. 51, 85-95, 2005.

HOPPEN, C. PORTELLA, K. F. JOUKOSKI, A. TRINDADE, E. M. ANDREÓLI, C. V. **Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento portland para reduzir o impacto ambiental**. Quim. Nova, Vol. 29, No. 1, 79-84, 2006.

HOPPEN, C. **Reciclagem de lodo de ETA centrifugado na construção civil, método alternativo para preservação ambiental**. Dissertação apresentada no Programa de Pós graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais da UFPR. Curitiba, 2004.

HUANG, C. H. WANG, S. Y. **Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate**. In Construction and Building Materials. Volume 43, Pages 174–183, June 2013.

JACOB, J. S. **Modelos de previsão da liberação de metais pesados em matrizes cimentícias produzidas com resíduos inorgânicos**. Dissertação de mestrado apresentada no Programa de pós graduação em Engenharia Civil da UFSC. Florianópolis, 2012.

JACOB, J. S. ROCHA, J. C. CHERIAF, M. SCHAEFER, C. O. **Análise da lixiviação de metais pesados em concretos produzidos com agregados reciclados**. V Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis – ELECS. Recife, 2009.

JANUÁRIO, G. F. **Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos de estações de tratamento de água da região metropolitana de São Paulo**. 222 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005

JOHN, V. M. ÂNGULO, S. C. **Aproveitamento de Resíduos na Construção**. Coletânea Habitare - vol. 4 - Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. 2003.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil - contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2000.

JOHN, V.M.J. **Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil**. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2. Anais. São Paulo, IBRACON, 1999. p.44-55. São Paulo, 1999.

KIZINIEVIC, O. ZURASKIENE, R. KIZINIEVIC, V. ZURASKAS, R. **Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products**. In Construction and Building Materials. Volume 41, Pages 464–473, April 2013.

KONDAGESKI, J. H. CARNEIRO, C. ANDREOLI, C. V. **Pesquisas Interdisciplinares e a Estruturação dos Estudos da rede Interinstitucional de Pesquisa em Lodo de Água**. In: CARNEIRO, C. ANDREOLI, C. V. (Coord.). Lodo de Estação de Tratamento de Água – Gestão e Perspectivas Tecnológicas. Curitiba, Sanepar, 2013. p. 47-66.

LAMIR. **Laboratório de Análises de Minerais e Rochas**. Disponível em <http://www.lamir.ufpr.br/portal/>. Acesso em 10/05/2014.

LEITE. B. M. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LIN, C. WU, C. H. HO, H. M. **Recovery of municipal waste incineration bottom ash and water treatment sludge to water permeable pavement materials**. In Waste Management. Volume 26, Issue 9, Pages 970–978, 2006.

LOVATO, P.S., POSSAN, E; DAL MOLIN, D.C.C., MASUERO, A.B., RIBEIRO, J.L. (2011) - **“Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes”**. Construction and Building Materials. n 26, 2011, p. 437-447, 2011.

MARTÍNEZ-GARCIA, C. ELICHE-QUESADA, D. PÉREZ-VILLAREJO, L. IGLESIAS-GODINO, F. J. CORPAS-IGLESIAS, F. A. **Sludge valorization from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry**. In Journal of Environmental Management. Volume 95, Supplement, Pages S343–S348, March 2012.

MEGDA, C. R. SOARES, L. V. ACHON, C. L. **Propostas de aproveitamento de lodos gerados em ETAs**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, 2005.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 1ª edição. São Paulo. IBRACON. 2008.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 2ª edição. São Paulo. IBRACON. 2014.

MONTEIRO, S. N. ALEXANDRE, J. MARGEM, J.I. SÁCHEZ, R. VIEIRA, C. M. F. **Incorporation of sludge waste from water treatment plant into red ceramic.** In Construction and Building Materials. Volume 22, Issue 6, Pages 1281–1287, June 2008.

MUCELIN, C. A. **Estatística elementar e experimental aplicada às tecnologias.** Medianeira, 2006. 245 p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 2ª ed., São Paulo, PINI, 1997.

NÓBREGA, C. C. PEREIRA, S. L. M. BARBOSA, G. **Caracterização do lodo residual das lagoas de lodo da estação de tratamento de água – estudo de caso: ETA – Gramame.** Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima. 4to Simposio Iberoamericano de Ingeniería de residuos (SIIR), 2011.

OLIVEIRA, E. M. HOLANDA, J. N. F. **Influência da adição de resíduo (lodo) de estação de tratamento de águas nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha.** Revista Cerâmica, Vol. 54, 167-173, 2008.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. **Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha.** Cerâmica. São Paulo, v. 50, n. 316, p. 324-330, 2004.

OYAMADA, G. P. G. **Tecnologia de Materiais de Construção.** Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. 2007.

PAIXÃO, L. C. YOSHIMURA, H. N. ESPINOSA, D. C. R. TENORIO, J. A. S. **Efeito da incorporação de lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa.** Revista Cerâmica, Vol. 54, 63-76, 2008.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção.** São Paulo, GLOBO, 1993.

PINOTTI, M. **Introdução a Mecânica dos Fluidos.** Universidade Federal de Minas Gerais. 2015.

PORRAS, A. ISAAC, R. L. MORITA, D. **Incorporação Do Lodo Das Estações De Tratamento De Água E Agregado Reciclado De Resíduo Da Construção Civil Em Elementos De Alvenaria - Tijolos Estabilizados Com Cimento.** Ciencia e Ingeniería Neogranadina, vol. 18, núm. 2, diciembre, 2008.

PORRAS, A. ISAAC, R. L. MORITA, D. M. **Viabilidade Técnica Da Incorporação Do Lodo Dos Decantadores Das Estações De Tratamento De Água 3 E 4 De Campinas Em Tijolos Estabilizados Com Cimento.** 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES, 2005.

POZZOBON, J. C. LUCAS, J. F. R. MORA, N. D. **Da Pesquisa À Extensão: Aproveitamento De Lodo De Eta Em Cerâmica Artística Na Região Trinacional.** SENAMA 2010 - I Seminário Nacional de Meio Ambiente e Extensão Universitária. UNIOESTE, 2010.

POZZOBON, J. C. MARAN, M. A. LUCAS, J. F. R. DÍAZ MORA, N. **Aplicação de Lodo de Estação de Tratamento de Água para a Produção de Cerâmica Artística.** 54º Congresso Brasileiro de Cerâmica – 2010.

RAMIREZ, K. G. POSSAN, E. BITTENCOURT, P. **Aproveitamento de lodo de ETA na Indústria da Construção Civil.** 5ª Reunião de Estudos Ambientais, Porto Alegre, 2015.

RICHTER, C. A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água.** São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2001.

ROCHA, J. C. CHERIAF, M. **Aproveitamento de Resíduos na Construção.** Coletânea Habitare - vol. 4 - Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. 2003.

RODRIGUEZ, N. RAMÍREZ, S. M. VARELA, M. T. B. GUILLEM, M. PUIG, J. LARROTCHA, E. FLORES, J. **Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: Characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions.** In Cement and Concrete Research. Volume 40, Issue 5, Pages 778–786, May 2010.

SABOGAL PAZ, L. P. DI BERNARDO, L. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água em função do Tratamento, Aproveitamento e Disposição dos Resíduos Gerados nas ETAs.** XXX Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Punta del Leste, Uruguay. 2006.

SABOGAL PAZ, L. P. **Modelo Conceitual de Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água para Abastecimento de Comunidade de Pequeno Porte.** Tese (doutorado). Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 509p. 2007.

SALES, A. SOUZA, F. R. ALMEIDA, F. C. R. **Mechanical properties of concrete produced with a composite of water treatment sludge and sawdust.** In Construction and Building Materials. Volume 25, Issue 6, Pages 2793–2798, June 2011.

SALES, A. SOUZA, F. R. **Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble.** In Construction and Building Materials. Volume 23, Issue 6, Pages 2362–2370, June 2009.

SALES, A. SOUZA, F. R. ALMEIDA, F. C. R. ZIMER, A.M. **Avaliação do Encapsulamento do lodo de ETA em Matrizes Cimentícias por meio da Análise dos Extratos Lixiviados.** Pluris, 2010.

SANDROLINI, F. FRANZONI, E. **Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants.** In Cement and Concrete Research. Volume 31, Issue 3, Pages 485–489, March 2001.

SANEPAR. **Sistema Corporativo de Controle Industrial.** Foz do Iguaçu, PR. 2014.

SCALIZE, P. S. DI BERNARDO, L. **Caracterização da Água de Lavagem dos Filtros Rápidos de Estações de Tratamento de Água e dos Sobrenadantes e Sedimentos Obtidos após Ensaio de Clarificação Utilizando Polímero Aniônico.** 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, 1999.

SCANDIUZZI, L. ANDRIOLO, F. R. **Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios.** Pini, São Paulo, 1986.

SCHAEFER, C. O. **Avaliação dos metais pesados presentes nos agregados reciclados de resíduos da construção e demolição (RCD) e influência no potencial de lixiviação de matrizes cimentícias.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis, 2007.

SILVA, A. G. P. ALVES JUNIOR, C. **A sinterização Rápida: sua aplicação, análise e relação com como técnicas inovadoras de sinterização.** Cerâmica [online]. 1998, vol.44, n.290, pp. 225-232. ISSN 1678-4553.

SILVA JR., A. P. ISAAC, R. L. **Adensamento por Gravidade de Lodo de ETA Gerado em Decantador Convencional e Decantador Laminar.** In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, XXVIII, 2002, Cancún – México. Anais... Cancún: AIDIS, 2002.

SILVA, CARLOS E. F. **Influência do Reaproveitamento da água de processo na estação de tratamento de água Passaúna.** Curitiba: Editora da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2005.

SILVA, E. T. MELO, W. J. TEIXEIRA, S. T. **Chemical attributes of a degraded soil after application of water treatment sludges.** Sci. agric. (Piracicaba, Braz.) [online]. Vol.62, n.6, pp. 559-563, 2005.

SILVA, M. FUNGARO, D. A. **Caracterização de Lodo de Estação de Tratamento de Água e Cinzas de Carvão Visando sua Utilização na Manufatura de Tijolo.** “CLEANER PRODUCTION INITIATIVES AND CHALLENGES FOR A SUSTAINABLE WORLD” São Paulo – Brazil – May 18th-20ndth – 2011.

SJOSTROM C. **Sustainable construction and performance based standards and codes.** In: Proceedings of the ASIA/PACIFIC conference on harmonization of durability standards and performance tests for components in buildings and infrastructure, v. 1, Bangkok; 1999.

SOGANCIOGLU, M. YEL, E. KESKIN, U. P. Y. **Utilization of andesite processing wastewater treatment sludge as admixture in concrete mix.** In Construction and Building Materials. Volume 46, Pages 150–155, September 2013.

SULLIVAN, C. TYRER, M. CHEESEMAN, C. R. GRAHAM, N. J. D. **Disposal of water treatment wastes containing arsenic — A review.** In Science of The Total Environment. Volume 408, Issue 8, Pages 1770–1778, 15 March 2010.

TARTARI, R. DÍAZ-MORA, N. MÓDENES, A. N. PIANARO, S. A. **Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. Parte I: Caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense.** Cerâmica vol.57 nº 343 São Paulo July/Aug./Sept. 2011

TARTARI, R. **Incorporação de lodo gerado na Estação de Tratamento de Água Tamanduá, como aditivo em massas para cerâmica vermelha.** Dissertação apresentada no Programa de pós graduação em Engenharia Química da Unioeste. Toledo, 2008.

TARTARI, R. MÓDENES, A. N. PIANARO, S. A. DÍAZ-MORA, N. **Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: Parte II: incorporação do lodo em mistura de argilas para produção de cerâmica vermelha.** Revista Cerâmica, Vol. 57, n. 344, 2011.

TAYLOR, H.F.W. **Cement chemistry.** London: Academic Press, 1990. 474 p.

TEIXEIRA, S. R. SANTOS, G. T. A. SOUZA, A. E. ALESSIO, P. SOUZA, S. A. SOUZA, N. R. **The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials.** In Applied Clay Science. Volume 53, Issue 4, Pages 561–565, October 2011.

TEIXEIRA, S. R. SOUZA, S. A. SOUZA, N. R. ALÉSSIO, P. SANTOS, G. T. A. **Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural.** Cerâmica vol. 52 São Paulo, 2006.

TSUTIYA, M. T. HIRATA, A.Y. **Aproveitamento e disposição final de lodos de Estações de tratamento de água do estado de São Paulo.** 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, 2001.

TUTIKIAN, B. F. ISAIA, G. C. HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho.** Concreto: Ciência e Tecnologia. IBRACON. cap. 36. 2011.

UCKER, F. E. BARROSO, L. B. LOPES, M. I. P. **Utilização do lodo gerado em indústria para a fabricação de argamassa.** Disc. Scientia. Série: Ciências Naturais e Tecnológicas, S. Maria, v. 11, n. 1, p. 106-114, 2010.

VIEIRA, C. M. MARGEM, J. I. MONTEIRO, S. N. **Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com lodo de ETA.** Revista Matéria, v. 13, n. 2, pp. 275 – 281, 2008.

VITORINO, J. P. MONTEIRO, S. N. VIEIRA, C. M. F. **Caracterização e incorporação de resíduos provenientes de Estação de Tratamento de Água em cerâmica argilosa.** Revista Cerâmica, Vol. 55, 385-392, 2009.

VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

WOLFF, E. SCHWABE, W. K. CONCEIÇÃO, S. V. **Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics.** In Journal of Cleaner Production. June 2014.

YAGUE, A. VALLS, S. VÁZQUEZ, E. ALBAREDA, F. **Durability of concrete with addition of dry sludge from waste water treatment plants.** In Cement and Concrete Research. Volume 35, Issue 6, Pages 1064–1073, June 2005.

YEN, C. TSENG, D. H. LIN, T. T. **Characterization of eco-cement paste produced from waste sludges.** In Chemosphere. Volume 84, Issue 2, Pages 220–226, June 2011.

APÊNDICES

A – Cronograma dos Ensaios Físicos

Para utilização do Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu – LTCI na Itaipu Binacional fez-se necessário a elaboração de cronograma de trabalho para a realização dos ensaios físicos por pessoal altamente capacitado e acompanhamento.

Tabela 27 - Cronograma de ensaios físicos.

Programação de Dosagem e Ensaios Físicos				
Dosagens para o traço de a/c 0,65 (LH)	Data	Resistência à Compressão	Resistência à tração	Módulo de Elasticidade
Pesagem para 4 misturas (LH)	13/01/15			
Dosagem	14/01/15			
Desmoldagem	15/01/15			
CP 7 dias	21/01/15	2 CPs		
CP 28 dias	11/02/15	2 CPs	3 CPs	3 CPs
CP 60 dias	15/03/15	2 CPs		
CP 90 dias	14/04/15	2 CPs		
Dosagens para o traço de a/c 0,55 (LH)	Data	Resistência à Compressão	Resistência à tração	Módulo de Elasticidade
Pesagem para 4 misturas (LH)	15/01/15			
Dosagem	16/01/15			
Desmoldagem	19/01/15			
CP 7 dias	23/01/15	2 CPs		
CP 28 dias	13/02/15	2 CPs	3 CPs	3 CPs
CP 60 dias	17/03/15	2 CPs		
CP 90 dias	16/04/15	2 CPs		
Dosagens para o traço de a/c 0,45 (LH)	Data	Resistência à Compressão	Resistência à tração	Módulo de Elasticidade
Pesagem para 4 misturas (LH)	21/01/15			
Dosagem	22/01/15			
Desmoldagem	26/01/15			
CP 7 dias	29/01/15	2 CPs		
CP 28 dias	19/02/15	2 CPs	3 CPs	3 CPs
CP 60 dias	23/03/15	2 CPs		
CP 90 dias	22/04/15	2 CPs		

Tabela 27 - Cronograma de ensaios físicos.

(Continuação)

Dosagens para o traço de a/c 0,55 (LC)	Data	Resistência à Compressão	Resistência à tração	Módulo de Elasticidade
Pesagem para 4 misturas (LC)	23/01/15			
Dosagem	03/02/15			
Desmoldagem	04/02/15			
CP 7 dias	10/02/15	2 CPs		
CP 28 dias	03/03/15	2 CPs	3 CPs	3 CPs
CP 60 dias	04/04/15	2 CPs		
CP 90 dias	04/05/15	2 CPs		

B – Resultados dos Ensaio Físicos

Tabela 28 - Resultados dos ensaios físicos.

	a/c 0,65				a/c 0,55 LU				a/c 0,45				a/c 0,55 LC				
	0%	5%	7%	10%	0%	5%	7%	10%	0%	5%	7%	10%	0%	5%	10%	20%	
fc (MPa)	7	22,67	9,14	4,05	0,09	25,85	12,39	8,14	0,15	31,39	17,18	13,83	0,60	25,85	30,62	32,31	31,62
		23,11	9,45	3,18		26,15	11,74	8,17	0,15	30,77	17,26	13,04	0,70	26,15	30,02	30,74	30,77
28		29,86	14,97	7,99	0,17	35,38	17,93	13,38	2,28	43,93	26,01	20,08	2,56	35,38	39,01	40,04	39,61
		31,03	15,12	7,87	0,14	36,66	17,79	13,21	2,28	42,64	25,99	20,28	2,84	36,66	39,04	39,94	39,11
60		30,84	16,48	8,39	1,35	36,71	20,98	15,73	3,10	48,42	26,60	23,35	3,17	36,71	43,23	37,38	37,91
		31,02	16,41	8,37	1,27	37,93	20,75	14,88	2,62	46,95	28,12	22,75	3,50	37,93	41,18	39,01	40,68
90		33,56	17,98	8,22	1,85	39,51	22,45	17,48	2,95	46,27	27,77	24,55	3,50	39,51	41,68	39,83	40,61
		34,91	17,36	8,99		38,96		16,91		46,60	29,59	24,72	3,07	38,96	41,50	41,08	40,85
ft (MPa)		10,32	5,60	2,76		11,68	6,40	4,72	0,86	12,62	8,03	5,61	1,13	11,68	11,70	11,64	11,48
	28	10,88	5,62	2,84		11,74	5,44	5,14	0,94	12,11	8,18	5,81	1,12	11,74	12,76	13,26	10,50
E (Gpa)		11,08	5,16	3,54		7,66	5,90	4,68	0,98	12,23	7,78	5,74	1,08	7,66	10,76	11,38	11,66
	28	34,53	19,58	11,74	0,00	34,89	20,67	15,85	3,63	36,19	23,54	19,89	4,13	34,89	37,18	33,82	27,25
		35,24	16,72	10,44	0,00	32,68	20,24	12,92	5,18	36,19	24,33	19,20	4,76	32,68	33,85	32,85	27,92
		33,86	19,11	13,42	0,00	32,17	19,43	15,50	4,54	37,83	23,54	18,56	4,13	32,17	34,36	34,32	28,27