

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GABRIELLA HILLESHEIM

**ESTUDO SOBRE O USO DO LODO DAS ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ÁGUA COMO SUBSTITUIÇÃO DE
PORCENTAGENS DO CIMENTO EM MATRIZES DE CONCRETO
NÃO ESTRUTURAL**

CAMPO MOURÃO

2018

GABRIELLA HILLESHEIM

**ESTUDO SOBRE O USO DO LODO DAS ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ÁGUA COMO SUBSTITUIÇÃO DE
PORCENTAGENS DO CIMENTO EM MATRIZES DE CONCRETO
NÃO ESTRUTURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, para obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientador (a): Prof. Dr^a. Fabiana Goia Rosa de Oliveira.

CAMPO MOURÃO

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

ESTUDO SOBRE O USO DO LODO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA COMO SUBSTITUIÇÃO DE PORCENTAGENS DO CIMENTO EM MATRIZES DE CONCRETO NÃO ESTRUTURAL

Por

Gabriella Hillesheim

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 10h 30 do dia 14 de dezembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes
(UTFPR)

**Prof. Dr. Tiago Tadeu Amaral de
Oliveira**
(UTFPR)

**Prof^a. Dr^a. Fabiana Goia Rosa de
Oliveira**
(UTFPR)
Orientadora

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil: **Prof^a. Dr^a. Paula Cristina de Souza**

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

AGRADECIMENTOS

Se hoje estou aqui, é porque em algum momento alguém me apoiou. Nessa vida passamos por muitas etapas marcantes e, quando elas chegam ao fim, é um dever e prazer reconhecer e ser grato explicitamente àqueles que nos ajudaram e incentivaram de alguma forma. Para eles, então, eis aqui meu reconhecimento:

Nada mais justo que primeiramente agradecer a Deus pela minha vida, saúde, pela família maravilhosa e pelas oportunidades que tive. Por me ensinar que nenhum caminho é tão árduo que não se possa seguir em frente e aprender com as dificuldades. E, principalmente, por me mostrar que com fé nada é impossível.

Agradeço também à minha família, em especial aos meus pais Mari e Marcelo Hillesheim, que em momento algum mediram esforços para a realização desse sonho e que mesmo de longe se fizeram presente em todos os momentos, me dando forças inclusive quando pensei em desistir. À minha vó Leila, por todas as vezes que ela segurou a minha mão e me aconselhou a sempre seguir o caminho do bem, mesmo que fosse mais longo e difícil. Às minhas irmãs Júlia e Valentine, por proporcionarem momentos de descontração, junto com nosso cachorrinho Benício. E ao meu vô Valdemar e vó Anastácia, pelas incontáveis orações.

A todos os professores que passaram pela minha vida acadêmica e que colaboraram de alguma forma para minha formação profissional, todos eles foram de extrema importância. Entretanto, um agradecimento especial à minha orientadora Prof^a. Dr^a. Fabiana Goia Rosa de Oliveira, que me auxiliou e orientou em todo o processo desse estudo, apesar de todos os contratemplos. E também ao Fábio, técnico de laboratório, por todas as dicas e assistências oferecidas.

Às minhas amigas de infância Bianca, Camila, Emília, Heloísa, Luiza, Mariana e Nataele que, apesar de toda distância, sempre estiveram dispostas a ouvir os meus lamentos e celebrar minhas conquistas.

Agradeço de forma especial aos amigos que cultivei em Campo Mourão, não só pelas festas ou pelos cafés na cantina, mas principalmente pela amizade incondicional e pelo companheirismo até mesmo nos piores dias. A vocês, Ana, André, Gilberto, Guto, Henrique, Leonardo, Pinhão, Taynah e Vanessa, o meu muito obrigado!

Ao Vitor, que me cedeu um espaço especial em sua vida. Esteve presente em momentos críticos e me emprestou seu ombro amigo em todos eles.

À SANEPAR, que concedeu o material necessário para esse estudo.

E por fim, mas não menos importante a todos aqueles que não foram citados, mas que contribuíram direta ou indiretamente na realização deste trabalho e para minha formação acadêmica.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

(Albert Einstein).

RESUMO

HILLESHEIM, G. **Estudo sobre o uso do lodo das estações de tratamento de água como substituição de porcentagens do cimento em matrizes de concreto não estrutural**. 2018. 75f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2018.

A degradação do meio ambiente e dos recursos hídricos tem aumentado com o passar dos anos, tendo em vista que com o aumento da população a demanda de água potável e a má qualidade dos rios exigem maiores concentrações de produtos químicos nas Estações de Tratamento de Água (ETAs), acarretando em uma maior geração de resíduos, denominados lodo das ETAs. A destinação correta desse lodo vem sendo uma preocupação há anos e uma das alternativas mais comumente utilizadas para o descarte deste resíduo é sua disposição em cursos d'água, mesmo ele sendo considerado um resíduo sólido e podendo causar sérios impactos ambientais. Com o intuito de apresentar uma disposição mais correta a este lodo, que é um grande agente poluidor, esse estudo tem como objetivo a co-disposição deste resíduo, seco e moído, em matrizes de concreto não estrutural substituindo-se porcentagens de cimento, cuja extração também causa impactos ambientais. Para isso, utilizou-se um concreto referência (sem substituição de lodo) e traços com substituição de 5, 10 e 15% de lodo em relação ao peso do cimento. Foram avaliadas as propriedades do concreto fresco, através da trabalhabilidade, e endurecido, com ensaios de resistência à compressão e absorção de água. A análise dos dados permitiu concluir que todas as dosagens são viáveis do ponto de vista da resistência à compressão, podendo ser aplicados em situações que vão desde a fabricação de blocos até a construção de pavimentos rígidos. Em relação à trabalhabilidade, porém, as misturas acima de 10% de substituição podem ser aplicadas em situações em que essa característica não seja um parâmetro primordial. Em geral, a substituição de porcentagens de cimento por lodo seco e moído se mostrou viável tanto no âmbito ambiental, quanto econômico.

Palavras-chave: Concreto. Lodo de ETA. Sustentabilidade.

ABSTRACT

HILLESHEIM, G. **Study on the use of sludge from water treatment plants as replacement of percentages of cement in non-structural concrete matrices.** 2018. 75 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2018.

The degradation of the environment and water resources has increased over the years, given that with increasing population the demand for drinking water and the poor quality of rivers require higher concentrations of chemicals at Water Treatment Stations (WTSs), leading to a higher generation of waste, called WTS sludge. The correct disposal of this sludge has been a concern for years and one of the most commonly used alternatives for the disposal of this waste is its disposal in waterways, even though it is considered a solid waste and can cause serious environmental impacts. In order to give a more correct disposition to this sludge, which is a great polluting agent, this study aims at the co-disposal of this residue, dry and ground, in non-structural concrete matrices, replacing cement percentages. extraction also causes environmental impacts. For this, a concrete reference (without mud substitution) and traces with substitution of 5, 10 and 15% of sludge in relation to the weight of the cement was used. The properties of the fresh concrete were evaluated through the workability and hardened, with tests of resistance to compression and water absorption. The analysis of the data allowed concluding that all the dosages are feasible from the point of view of the compressive strength, being able to be applied in situations that go from the manufacture of blocks until the construction of rigid pavements. Regarding the workability, however, mixtures above 10% of substitution can be applied in situations where this characteristic is not a primordial parameter. In general, the substitutions of percentages of cement by dry and ground sludge proved to be feasible both in the environmental and economic spheres.

Keywords: Concrete. Sludge from water treatment plant (WTS). Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama dos fatores que influenciam a permeabilidade do concreto.	26
Figura 2 – Evolução do consumo aparente de cimento ao longo do tempo, em milhões de toneladas.	29
Figura 3 – Fluxograma de geração de lodo em uma Estação de Tratamento de Água.	32
Figura 4 – Disposição final de lodos de ETA nos Estados Unidos.	33
Figura 5 – Lodo coletado na SANEPAR.	38
Figura 6 – Disposição do lodo antes da secagem.	38
Figura 7 – Disposição do lodo depois da secagem em estufa.	39
Figura 8 – Moagem do lodo e seu estado final.	39
Figura 9 – Volume do recipiente com lodo.	41
Figura 10 – Volume do Frasco de Chapman com lodo.	43
Figura 11 – Queima da areia para a obtenção da umidade relativa do material (a) e pesagem final da areia (b).	44
Figura 12 – Imersão do agregado graúdo.	46
Figura 13 – Resumo das etapas essenciais para calcular o traço do concreto.	47
Figura 14 – Processo de moldagem (a), desmoldagem (b) e cura dos concretos (c).	53
Figura 15 – Método da medida do abatimento.	54
Figura 16 – Corpos de prova retificados.	55
Figura 17 – Ensaio de resistência à compressão.	56
Figura 18 – CP's na estufa para secagem.	58
Figura 19 – Medida do abatimento do concreto referência.	59
Figura 20 – Parâmetros da plasticidade do concreto fresco através do ensaio do slump test.	59
Figura 21 – Medida do abatimento do concreto com 5% de lodo.	60
Figura 22 – Medida do abatimento do concreto com 10% de lodo.	61
Figura 23 – Medida do abatimento do concreto com 15% de lodo.	61
Figura 24 – Média da resistência à compressão do concreto em função do teor de lodo.	63
Figura 25 – Porcentagem de redução das resistências em função do teor de lodo no traço.	64

Figura 26 – Variação da porcentagem de absorção de água em função do teor de lodo na dosagem.....	67
Figura 27 – Porcentagem de redução da absorção de água em função do teor de lodo na dosagem.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do concreto de acordo com o <i>slump test</i> e sua respectiva recomendação de uso.....	24
Tabela 2 – Resumo da pesagem do lodo úmido e seco.	40
Tabela 3 – Granulometria do agregado miúdo para uma amostra de 500g.	42
Tabela 4 – Determinação da granulometria da brita para uma amostra de 1000g....	45
Tabela 5 – Resumo das informações necessárias para o cálculo do traço a partir da caracterização dos materiais e da determinação das propriedades desejadas para o concreto.....	49
Tabela 6 – Estimativa do consumo de água por metro cúbico de concreto em função do Diâmetro Máximo Característico do Agregado e do Abatimento da mistura.	49
Tabela 7 – Volume do agregado graúdo compactado por metro cúbico de concreto.	50
Tabela 8 – Quantidade de insumos corrigidos em função da umidade dos materiais para a confecção de 15 litros de concreto para cada teor de lodo.	52
Tabela 9 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão nos CP's com 0% de lodo aos 14 dias.	62
Tabela 10 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão nos CP's com 5% de lodo aos 14 dias.	62
Tabela 11 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão nos CP's com 10% de lodo aos 14 dias.	62
Tabela 12 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão nos CP's com 15% de lodo aos 14 dias.	62
Tabela 13 – Resistências médias, desvio padrão para cada dosagem e seus respectivos coeficientes de variação.	63
Tabela 14 – Resistência à compressão de argamassas de cimento e areia, com e sem lodo calcinado.....	64
Tabela 15 – Resistência média à compressão da argamassa aos 28 dias em função da porcentagem de bagaço de cana substituídos.	65
Tabela 16 – Peso dos CP's após a retirada da cura saturada.	66
Tabela 17 – Peso dos CP's após 24 h em estufa.....	66
Tabela 18 – Peso dos CP's após 48 h em estufa.....	66
Tabela 19 – Peso dos CP's após 72 h em estufa.....	66

Tabela 20 – Peso dos CP's após imersão.	66
Tabela 21 – Média do peso seco e saturado após 72 h dos CP's.....	67
Tabela 22 – Resultados do ensaio da absorção de água.	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Art.	Artigo
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CP	Corpo de prova
CBC	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar
DMC	Diâmetro Máximo Característico
ETA	Estação de Tratamento de água
EUA	Estados Unidos da América
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
NM	Norma MERCOSUL
PAC	Policloreto de Alumínio
pH	Potencial Hidrogênico
PR	Paraná
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SP	São Paulo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
MPa	Mega Pascal (pressão)
CO ₂	Dióxido de carbono
CaO	Óxido de cálcio (cal)
SiO ₂	Dióxido de silício (sílica)
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio (alumina)
Fe ₂ O ₃	Óxido férrico
MgO	Óxido de magnésio
SO ₃	Anidrido sulfúrico
Na ₂ O	Óxido de sódio
K ₂ O	Óxido de potássio
°C	Graus Celsius
h	Hora (s)
P_c	Peso do cadinho
P_u	Peso do cadinho com lodo úmido
P_s	Peso do cadinho com lodo seco
ρ_{lodo}	Massa específica do lodo
M	Massa
L_f	Leitura final
L_i	Leitura inicial
Σ	Somatório
MF	Módulo de finura
ρ_m	Massa específica do agregado miúdo
M_i	Peso inicial da areia úmida
M_s	Peso da areia seca
(B)	Peso da amostra saturada com superfície seca
(C)	Peso da amostra imersa em água
(A)	Massa seca do agregado
ρ_{seco}	Massa específica da brita na condição seca
ρ_{sss}	Massa específica da brita na condição saturada com superfície seca

f_{ck}	Resistência característica à compressão
$f_{a/c}$	Relação água/ cimento
f_{cj}	Resistência de dosagem aos j dias
f_{c28}	Resistência à compressão aos 28 dias
sd	Desvio padrão
M_c	Massa unitária compactada do agregado graúdo
ρ_b	Massa específica da brita
ρ_c	Massa específica do cimento
ρ_a	Massa específica da água
C_a	Consumo de água por metro cúbico de concreto
C_c	Consumo de cimento por metro cúbico de concreto
V_c	Volume compactado de agregado graúdo
C_b	Consumo de brita por metro cúbico de concreto
C_m	Consumo de agregado miúdo por metro cúbico de concreto
V_m	Volume de areia
\geq	Maior igual
f_c	Resistência à compressão
F	Força
D	Diâmetro
s	Desvio padrão amostral
x_i	Valor na posição i no conjunto de dados
\bar{x}	Média aritmética dos dados
n	Número de amostras
C_v	Coefficiente de variação
M_{sat}	Massa do corpo saturado
M_s	Massa do corpo seco
\emptyset	Diâmetro
$f_{c,14}$	Resistência à compressão aos 14 dias
$f_{cm,14}$	Resistência à compressão média aos 14 dias

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo Geral	20
2.2 Objetivos Específicos	20
3 JUSTIFICATIVA	21
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
4.1 Concreto	22
4.1.1 Propriedades do concreto fresco.....	23
4.1.2 Propriedades do concreto endurecido.....	24
4.2 Cimento Portland	26
4.2.1 Composição do cimento Portland.....	27
4.2.2 Clínquer.....	28
4.3 Impactos Ambientais Gerados Pelo Consumo de Cimento	29
4.4 Resíduos	30
4.5 Lodo da Estação de Tratamento de Água	31
4.6 Alternativas para Disposição Final do Lodo	32
4.6.1 Aplicação em solos	33
4.6.2 Disposição em aterros sanitários	34
4.6.3 Incineração.....	35
4.6.4 Reaproveitamento do lodo de ETA na engenharia civil.....	35
5 MATERIAL E METODOS	37
5.1 Coleta do Lodo	37
5.2 Caracterizações do lodo	40
5.2.1 Determinação da umidade do lodo.....	40
5.2.2 Determinação da massa específica real do lodo.....	41
5.3 Caracterização da Matéria Prima	42
5.3.1 Agregado miúdo	42
5.3.2 Agregado graúdo.....	45
5.3.3 Aglomerante hidráulico.....	47
5.4 Cálculo da Dosagem	47
5.5 Moldagem dos Corpos de Prova	52
5.6 Propriedades do Concreto	54

5.6.1 Determinação da trabalhabilidade	54
5.6.2 Resistência à compressão	55
5.6.3 Absorção de água por imersão	57
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
6.1 Trabalhabilidade Do Concreto	59
6.2 Resistência à Compressão	62
6.3 Absorção de Água.....	65
7 CONCLUSÕES	70
REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

É inegável que a água é o elemento que proporciona a vida em nosso planeta e que a qualidade de vida é diretamente proporcional à qualidade da água tratada. Entretanto, com o crescente aumento das cidades, a demanda de água potável é cada vez maior, aumentando assim a geração de resíduos provenientes do tratamento de água nas Estações de Tratamento de Água (ETA).

De fato, a destinação correta de resíduos sólidos tem sido um dos maiores desafios do Brasil. Porém, a partir de 1997 com a criação das leis de Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 9.433/97) e a Lei de Crimes Ambientais (Lei nº 9.605/98), esse panorama começou a mudar, e a destinação correta dos lodos passou a ser responsabilidade dos produtores dos resíduos. Tendo pena prevista de reclusão de um a cinco anos, formas corretas para a disposição final do lodo deverão ser aplicadas o quanto antes pelos produtores de resíduos. (CORDEIRO, 2001).

Com o propósito de descartar corretamente esses resíduos, são apresentadas algumas alternativas viáveis tais como: disposição em solos, aterros sanitários, incineração dos resíduos e aplicações industriais como fabricação de materiais cerâmicos, cimento e outros materiais de construção.

Nesse contexto, vale ressaltar que os materiais utilizados para a fabricação do cimento Portland são provenientes de fontes naturais não renováveis e que, além disso, o cimento Portland é um aglomerante para a fabricação do concreto conhecido e utilizado mundialmente em volumes elevados. Em outras palavras, o consumo desenfreado do cimento pode resultar em uma forte estagnação das fontes destes materiais, sendo assim, de extrema importância apresentar materiais de substituição alternativos para a fabricação desse composto (MODRO, 2008).

Conseqüentemente, Richter (2001) aponta que a composição química do lodo é equivalente à do cimento e, segundo Morales e Dantas (1995), ao utilizar as cinzas desse resíduo é possível reduzir os custos da fabricação desse material indispensável na construção civil. Por fim, convém evidenciar que nos Estados Unidos da América (EUA) e em outros países desenvolvidos a utilização das cinzas do lodo na fabricação de cimento e construção de massas asfálticas já são amplamente utilizadas entre as empresas de saneamento

Por essas razões, este trabalho visará à utilização do lodo das estações de tratamento de água como substituição ao cimento na fabricação de matrizes de concreto, podendo esta ser uma opção viável no âmbito econômico e ambiental para o descarte correto desse resíduo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar o efeito da substituição do cimento Portland por lodo da ETA nas propriedades físicas e mecânicas de concretos com aplicações não estruturais.

2.2 Objetivos Específicos

Visando atingir o objetivo geral foram formulados os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar a umidade e densidade do lodo;
- Adicionar porcentagens do lodo seco e moído como substituição do cimento ao concreto;
- Realizar ensaios de resistência à compressão, absorção da água e trabalhabilidade do concreto em corpos de prova de concreto com e sem lodo;
- Avaliar e concluir os resultados obtidos com os ensaios.

3 JUSTIFICATIVA

Com o crescimento das cidades e da exigência de melhores condições de vida da população, a demanda de água potável tem aumentado. Nesse contexto, devido à falta de gestão dos mananciais, a qualidade da água dos rios tem se degradado paulatinamente, exigindo maiores concentrações de produtos químicos para seu tratamento adequado, conseqüentemente isso faz com que a geração de resíduos provenientes das Estações de Tratamento de Água aumente.

Esses resíduos, denominados de lodos das ETAs, têm sido dispostos de forma inadequada na maioria das vezes em cursos de água sem nenhum tratamento prévio. Os métodos para tratamento desses resíduos existem, entretanto raramente são usados, principalmente pelo alto custo envolvido. Contudo, com a criação de leis mais severas, esse panorama começou a mudar. Em razão disso, são apresentadas algumas formas para disposição final desse lodo como a aplicação em solos, aterros sanitários, incineração dos resíduos e utilização como matéria-prima em alguns setores industriais, todavia alguns desses processos não são tão viáveis no ponto de vista econômico (HOPPEN et al, 2005).

Portanto, a busca por soluções vantajosas ambientalmente e economicamente continua sendo um desafio. Dessa maneira, a possibilidade de incorporar o lodo da ETA como substituição de porcentagens de cimento em matrizes de concreto pode ser uma alternativa viável, uma vez que, segundo Richter (2001), o lodo possui componentes químicos semelhantes aos do cimento. Através disso é possível reduzir significativamente o consumo de cimento, que possui um elevado custo em obras de engenharia civil, e destinar de forma correta esse resíduo.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Concreto

Presente na maioria das obras projetadas para a melhoria da qualidade de vida neste planeta, o concreto faz parte significativa da evolução do homem. Sua importância é tão eloquente que o consumo *per capita* de concreto tornou-se um dos parâmetros de medidas do progresso das nações (ALVES, 2002).

A primeira idealização do concreto surgiu no Império Romano, 300 anos antes de Cristo, com a descoberta da cal pozolânica. O concreto romano era uma combinação de cacos de pedras calcárias (como mármore), areia, cal, pozolanas e água (BUNDE, 2016).

A pozolana é um material silicoso de origem vulcânica e, de acordo com Pedrosa (2009), os romanos descobriram que ao misturar a cinza vulcânica das proximidades do vulcão Vesúvio – chamada pozolana – com a cal hidratada obtinham uma cal que endurecia quando misturada com água, denominada de cal pozolânica. A cal hidratada, por sua vez, é o óxido de cálcio resultante da calcinação de rochas calcárias que, na presença de água transforma-se em hidróxido de cálcio.

Nesse contexto, o concreto hidráulico moderno é o composto resultante da mistura homogênea de cimento, agregados – grãos ou miúdos – e água, podendo ou não conter aditivos (PEDROSO, 2009). Os aditivos são elementos destinados à melhoria de propriedades específicas do concreto, tais como trabalhabilidade, aumento de resistência, aumento da impermeabilidade da massa, redução do calor de hidratação, entre outros (PERTRUCCI, 1998).

O conjunto de cimento mais água recebe a denominação de “pasta” que, ao envolver os agregados grãos e miúdos, juntamente com espaços cheios de ar, dá origem ao concreto fresco. Quando endurecido, esse conjunto é modernamente denominado de matriz e possui alta resistência à compressão (BAUER, 2008).

Segundo Pertrucci (1998), a pasta tem como função: envolver os agregados, de modo que encha os vazios formados por eles, possibilitar o manuseio da massa fresca e dar resistência ao concreto endurecido. Já os agregados são materiais inertes que constituem cerca de 60 a 80% do concreto, conseqüentemente reduzindo seus custos, uma vez que o agregado é mais barato que a pasta cimentícia (ANDOLFATO, 2002).

Portanto, a grande vantagem do concreto se dá pela pasta que, depois de endurecida, mesmo que submetida à água, não se modifica mais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002), os espaçamentos entre moléculas são preenchidos através dos agregados, fazendo com que o material tenha uma distribuição granulométrica perfeita, sendo maleável no início da reação, e resistente ao final. Essa propriedade faz com que o concreto seja um composto propício para a base estrutural das construções. (LIMA, et al, 2014).

Todavia, as características do concreto dependem não somente da qualidade e proporção das matérias constituintes, mas também da mão de obra que irá realizar a mistura. Muito diferente do aço, que é fabricado sob condições controladas industrialmente, o concreto é, na maioria das vezes, produzido nos canteiros de obra. Mesmo que se possa assegurar a qualidade do cimento através do fabricante, já diria Neville (2016, p.1): “[...] não é o cimento o material de construção, e sim o concreto. O cimento está para o concreto assim como a farinha está para o bolo, sendo a qualidade do bolo dependente do cozinheiro”.

Apesar da possibilidade do concreto ser produzido por uma empresa de concreto pré-misturado e, com isso, aumentar sua qualidade, o transporte, adensamento e manuseio influenciam em larga escala a qualidade final do produto. Portanto, além de escolher o material adequado, o projetista deve estar totalmente familiarizado com o cimento e suas características químicas, de produção e lançamento (NEVILLE, 2016) para que o concreto possa ser utilizado da melhor forma possível.

Em vista disso, o cimento Portland é o mais utilizado dentro do mercado das construções. Com a função de unir os agregados e proporcionar resistência, o cimento é o principal componente do concreto (CABRAL; AZEVEDO, 2016).

4.1.1 Propriedades do concreto fresco

Uma das características mais importantes na qualidade do concreto, sem dúvida, é a sua resistência. Entretanto, em alguns casos, a permeabilidade e sua consistência podem ser mais interessantes (NEVILLE, 2016). Segundo Sobral (2000), não se pode produzir um concreto endurecido de qualidade sem que suas propriedades no estado plástico sejam satisfatórias, sendo a mais importante delas a

trabalhabilidade, uma vez que engloba várias propriedades fundamentais do concreto fresco.

A trabalhabilidade do concreto nada mais é que uma característica relacionada à consistência do concreto fresco. Ela é fundamental para determinar a facilidade com que o concreto pode ser colocado em fôrmas sem segregar (ANDOLFATO, 2002) e, de acordo com Geyer e Sá (2006), para cada situação de concretagem deve-se aplicar uma trabalhabilidade adequada, a fim de se obter um produto final de qualidade. Dessa forma, Pertrucci (1998) reuniu os dados da ASTM e de ensaios de outros pesquisadores e estabeleceu algumas indicações úteis de uso em relação ao limite da trabalhabilidade. Sendo assim, na Tabela 1 é apresentada de forma simplificada a classificação do concreto segundo o valor em centímetros do *slump test* e sua respectiva recomendação de uso.

Tabela 1 – Classificação do concreto de acordo com o *slump test* e sua respectiva recomendação de uso.

CONSISTÊNCIA	<i>Slump Test</i> (cm)	TIPOS DE USO
Seca	0 – 2	Estrutura de concreto armado ou protendido. Vibração energética.
Rija	2 – 5	Estruturas de concreto. Vibração normal.
Plástica (média)	5 – 12	Estruturas de concreto. Adensamento manual
Úmida	12 – 20	Estruturas de concreto, paredes. Adensamento manual.
Fluída	20 – 25	Concreto inadequado para qualquer uso.

Fonte: Adaptado PERTRUCCI (1998, p.93).

O *slump test* é um dos ensaios realizados para a obtenção da trabalhabilidade. No Brasil, para a obtenção dessa medida, também chamada de abatimento do tronco de cone, utiliza-se mais comumente a NBR NM 67: 1998.

Com isso, pode-se dizer que a noção de trabalhabilidade é muito mais subjetiva do que física, uma vez que a consistência é o componente físico mais importante dessa propriedade (SOBRAL, 2000). Ou seja, é um fator definido pela maior ou menor facilidade no manuseio (OLIVEIRA, 2008a).

4.1.2 Propriedades do concreto endurecido

Para o concreto endurecido, a propriedade mais valorizada por projetistas e por engenheiros de controle de qualidade é a resistência. Sendo assim, vale ressaltar que a resistência de um material é definida como a capacidade de resistir a

esforços sem se romper (MEHTA; MONTEIRO, 2008) e que, de acordo com Bauer (2008), o concreto é considerado sólido apenas a partir do tempo da pega.

Em vista disso, Oliveira (2008b) define o tempo de pega como um fenômeno que compreende a evolução das propriedades mecânicas da pasta no início da evolução de endurecimento, devido ao processo químico de hidratação do cimento. Em outras palavras, o tempo de pega é artificialmente definido como o momento em que a pasta adquire uma consistência imprópria para seu manuseio.

Posto isso, Pedroso (2009) sugere que os concretos podem ser classificados em relação a sua resistência à compressão, a partir da NBR 8953, como:

- a) Concreto de baixa resistência: menos de 20 MPa;
- b) Concreto de resistência normal: de 20 a 50 MPa;
- c) Concreto de alta resistência: acima de 50 MPa.

A durabilidade, porém, também é um fator importante para os concretos endurecidos. Essa qualidade é definida por Verçosa (2008, p.8) como “a capacidade que os corpos apresentam de permanecerem inalterados com o tempo”. Em vista disso, uma das propriedades que está diretamente ligada a esse fator é a permeabilidade, uma vez que a durabilidade do concreto irá depender da facilidade, ou dificuldade, de penetração de fluidos em seu interior (NEVILLE, 2016).

Dentre outros aspectos, a permeabilidade do concreto corresponde à quantidade de água que atravessa uma superfície (OLIVEIRA, 2008b). Em vista disso, Mehta e Monteiro (2008) demonstraram a partir de estudos de porosimetria por intrusão de mercúrio, em pastas de cimento hidratadas com diferentes relações água/ cimento, que a redução na porosidade capilar total está associada à redução de grandes poros na pasta de cimento e que a relação água/ cimento e o grau de hidratação são fatores determinantes para a porosidade capilar.

Além disso, outras causas podem influenciar direta ou indiretamente a permeabilidade do concreto, afetando de alguma forma a durabilidade desse material. Por essas razões, Oliveira (2008b) esquematizou os diversos fatores que influenciam na permeabilidade do concreto, demonstrado na Figura 1, e salienta que geralmente as condições que melhoram a resistência do concreto também tendem a melhorar a impermeabilidade.

Figura 1 – Diagrama dos fatores que influenciam a permeabilidade do concreto.



Fonte: OLIVEIRA (2008b, p.309).

4.2 Cimento Portland

De forma sucinta, o cimento pode ser descrito como um material aglomerante constituído principalmente por compostos de calcário que, misturados com água, reagem quimicamente criando uma pasta moldável e posteriormente rígida, adquirindo resistência e durabilidade.

Embora utilizado de muitas formas anteriormente, a patente do cimento portland foi criada originalmente em 1824, pelo inglês Joseph Aspdin, (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002) que, conforme Neville (2016) utilizou-se de uma mistura de calcário e argila moída aquecida até a extinção do CO_2 , entretanto o aquecimento não alcançava as temperaturas de clinquerização. O material foi denominado “cimento Portland” devido sua semelhança, em cor e resistência, com a pedra de Portland, uma ilha situada no sul da Inglaterra.

Já em 1845, Isaac Johnson conseguiu produzir o protótipo do cimento moderno, calcinando uma mistura de argila e giz até a clinquerização, de modo que as reações para a formação de compostos de alta capacidade cimentante (clínquer)

ocorressem (NEVILLE, 2016). E é esse elemento que possui a propriedade química de que, na presença de água, o cimento primeiramente fique pastoso e depois endureça, fazendo com que seja considerado um aglomerante hidráulico muito resistente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002).

No Brasil, as normas que regem o padrão do cimento são determinadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – e, com base na ABNT e no Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO –, a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP – é a entidade pública que afere a qualidade dos cimentos produzidos no país. Ou seja, quando um saco de cimento apresenta um selo de qualidade ABCP, ele deve conter todas as características e propriedades ditadas pelas normas em vigor (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002) conferindo, assim, um material de alta qualidade e confiabilidade.

4.2.1 Composição do cimento Portland

Segundo Oliveira (2008c), os constituintes fundamentais do cimento Portland são a cal (CaO), a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3), o óxido férrico (Fe_2O_3), magnésia (MgO), e uma pequena parcela de anidrido sulfúrico (SO_3) que é adicionada após a queima dos compostos, para retardar o tempo de pega. Pertrucci (1998) define o tempo de início de pega como o tempo decorrido desde a adição de água até o início da perda de plasticidade do material.

Também são encontrados no cimento parcelas de óxido de sódio (Na_2O) e óxido de potássio (K_2O) em menores parcelas, que constituem os álcalis do cimento (OLIVEIRA, 2008c).

A queima dessas matérias primas em um forno giratório, de grande diâmetro e comprimento, sob uma temperatura de até 1450°C gera o clínquer, que inicialmente se apresenta na forma de pelotas e, após um brusco resfriamento, pode ser finamente moído, virando um pó (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002).

4.2.2 Clínquer

Em virtude das considerações anteriores, no geral, o clínquer é a mistura heterogênea dos compostos produzidos por reações a alta temperatura, entre óxido de cálcio e sílica, alumina e óxido de ferro (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Sendo constituído essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio e proporções de sulfato de cálcio natural, o clínquer é um produto granuloso, resultante da calcinação desses materiais até a sua temperatura de fusão inicial (OLIVEIRA, 2008c).

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (2002), o clínquer é o principal componente do cimento Portland e está presente em todos os tipos de cimento Portland, que variam conforme as adições presentes nos diferentes tipos de cimento. As adições são outras matérias primas que, quando misturadas ao clínquer, permitem a concepção dos diversos cimentos presentes no mercado atualmente. Essas matérias primas são o gesso, as escórias de alto-forno, pozolanas e materiais carbonáticos (Filler). No Quadro 1 apresentam-se os cinco diferentes tipos de cimento Portland existentes no Brasil e suas respectivas composições e siglas.

Quadro 1 – Composição dos tipos de cimento Portland.

Tipo de cimento portland	Sigla	COMPOSIÇÃO (% em massa)			
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)
Comum	CP I	100	-		
	CP I-S	99-95	1-5		
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10
	CP II-F	94-90	-	-	6-10
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	-	-	0-5

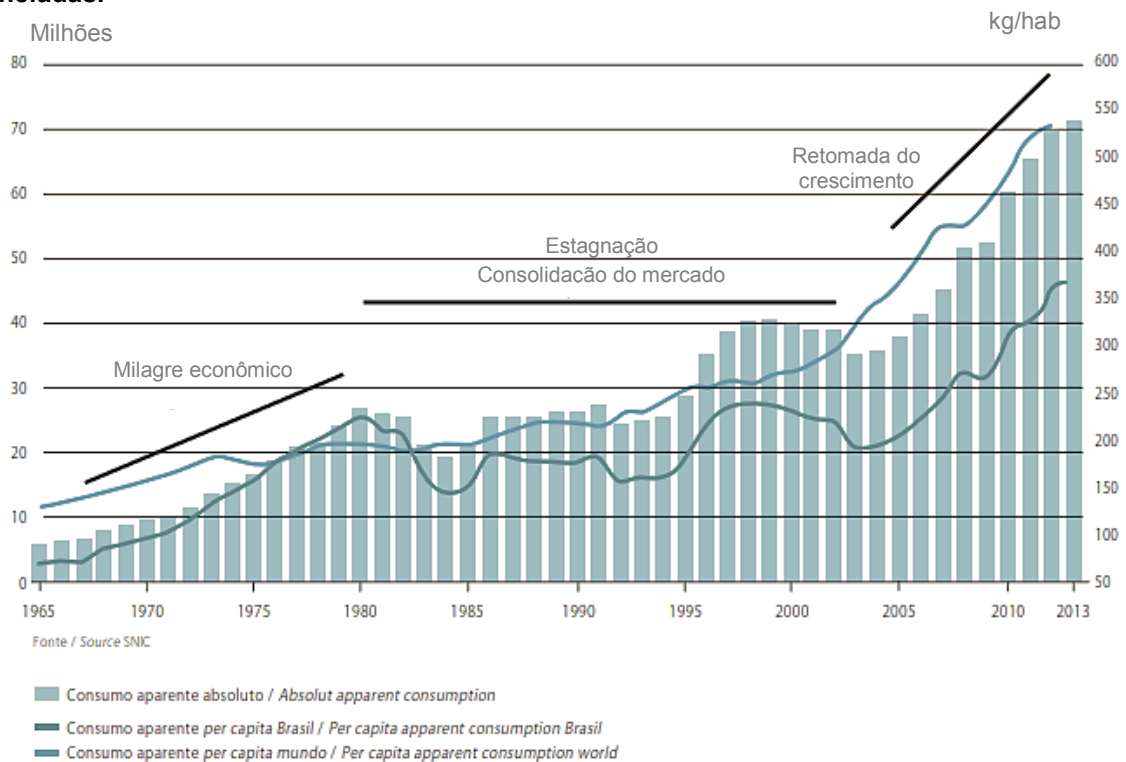
Fonte: Adaptado ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (2002, p.10-12).

4.3 Impactos Ambientais Gerados Pelo Consumo de Cimento

Atualmente, mesmo após mais de um século da criação do primeiro cimento Portland, ele continua sendo conhecido mundialmente como um dos principais materiais de construção civil. Misturado com agregados, água e, muitas vezes, outros materiais pozolânicos, conseguiu-se o que nem os gregos e romanos acharam que seria possível: aprimorar a matéria utilizada para construir o Panteão e o Coliseu, em Roma, que até hoje são consideradas maravilhas da construção.

E é nesse contexto que a indústria do cimento vem crescendo a cada ano, tanto no quesito consumo quanto em inovações. Foi a partir da metade do século XIX que seu desenvolvimento aumentou devido aos avanços na qualidade dos fornos, que fizeram com que o clínquer ficasse mais uniforme, e aos estudos da proporção mais adequada para se obter um clínquer mais resistente (PEDROSO, 2009). Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, em 2013, foram consumidas 71 milhões de toneladas no território brasileiro, resultando num consumo *per capita* de 353 kg/hab/ano, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Evolução do consumo aparente de cimento ao longo do tempo, em milhões de toneladas.



Fonte: SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (2013).

Esse dado, porém, é preocupante uma vez que a ameaça da mudança climática é considerada um dos maiores problemas ambientais da sociedade atual. Sabe-se que o CO_2 é um dos principais gases de efeito estufa e que a emissão desses gases está pontualmente ligada à queima de combustíveis fósseis, ou seja, a produção do cimento é diretamente proporcional à produção de CO_2 , devido à calcinação do calcário sob altas temperaturas para a obtenção do clínquer (WORRELL et al, 2001).

Além disso, segundo Worrell et al (2001), o consumo de energia pela indústria de cimento é estimado em cerca de 2% do consumo global de energia primária, ou quase 5% do consumo total de energia industrial global, tendo em vista que o processo de moagem e preparação das matérias primas demandam um trabalho energético intensivo.

No Brasil, a energia é obtida a partir da tecnologia hidroelétrica, não gerando a emissão direta de CO_2 através desse processo. Entretanto, esse tipo de obtenção de recurso energético acaba gerando outros impactos ambientais gravíssimos, tais como a transformação de áreas florestais em lagos artificiais o que, ao fim do processo, contribui indiretamente com o ciclo global do carbono (JOHN, 2000).

Outra preocupação acerca do crescente aumento da demanda de cimento é a maior necessidade de matérias primas para sua produção, sendo as jazidas naturais de minério uma fonte de recursos limitada (COSTA et al, 2013). Segundo John (2000), além do risco de esgotamento desses recursos, é notável que a atividade extrativa prejudique a fauna e a flora.

4.4 Resíduos

Os resíduos são definidos pela NBR 10.004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004) como os resíduos sólidos ou semissólidos resultantes de atividades industriais, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, etc. Nessa definição enquadram-se os lodos provenientes das Estações de Tratamento de Água, de equipamentos e instalações de controle de poluição. Esses elementos possuem particularidades as quais tornam seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d'água inviável.

Com o intuito de que não causem nenhum mal a população e ao meio ambiente, esses resíduos devem ser descartados de forma correta. Para isso, a

normativa vigente classifica os resíduos como Resíduos Classe I e Resíduos Classe II, sendo eles perigosos e não perigosos, respectivamente.

Nesse aspecto, o lodo das ETAs é classificado como um resíduo Classe II – A, ou seja, é um resíduo não inerte e não perigoso. Entretanto, sua disposição não deve ser feita em cursos d'água, uma vez que isso acarretaria em uma maior poluição dos mananciais que, posteriormente irão precisar de mais produtos químicos para sua clarificação e, com isso, a destinação incorreta desse resíduo iria paulatinamente aumentar a degradação dos recursos hídricos.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) Art. 3º inciso VII determina que a destinação final ambientalmente adequada para esses resíduos inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sistema Nacional do Meio Ambiente – SISNAMA.

4.5 Lodo da Estação de Tratamento de Água

Partículas coloidais e em suspensão na forma de materiais inertes como argila, areia, silte, pedaços de vegetais, microrganismos e frações de matéria orgânica são comumente encontrados nos mananciais. Esses elementos proporcionam cor e turbidez à água bruta, fazendo com que ela seja imprópria para o consumo. Dessa forma, para tornar-se potável, a água passa por processos de coagulação, floculação, sedimentação, flotação e filtração para a retirada dessas impurezas (FIGUEIREDO NETO, 2011).

Segundo Di Bernardo (2005) a tecnologia do tratamento da água depende da sua qualidade em estado bruto, sendo esse o fator decisivo para a escolha do tratamento adequado. Essas tecnologias podem ser divididas em dois grupos: sem coagulação química e com coagulação química, e ambas podem ou não ser precedidas de um pré-tratamento, dependendo do estado da água bruta.

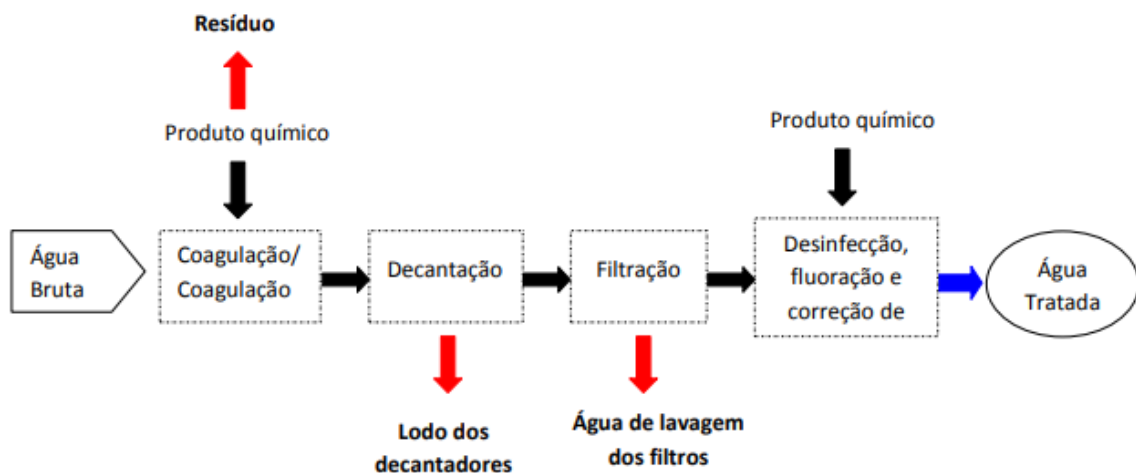
Todavia, o tratamento em ciclo completo – ou sistema tradicional – é o mais utilizado dentre as estações no Brasil. Nesse sistema são utilizados sais de alumínio ou de ferro, para a desestabilização das partículas coloidais, os quais através de câmaras de mistura se dispersam e formam flocos com tamanho e massa suficientes para a posterior remoção desse material segmentado nos decantadores, os quais

são grandes tanques que armazenam esses flocos por um determinado período de tempo (CORDEIRO, 1999).

Em seguida, a água é encaminhada para filtros de clarificação final, tendo em vista que alguns flocos não são completamente sedimentados na decantação. “Assim, grande parcela dos flocos fica retida nos decantadores e outra parcela, nos filtros” (CORDEIRO, 1999). Dessa forma, as estações de tratamento de água transformam a água imprópria para o consumo em água potável. Contudo, para que a transformação de água bruta em água potável ocorra, são gerados resíduos que ficam acumulados nos decantadores e na água de lavagem dos filtros: o lodo.

O processo da clarificação da água bruta e geração de lodo são demonstrados de forma sucinta no fluxograma da Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma de geração de lodo em uma Estação de Tratamento de Água.



Fonte: FIGUEIREDO NETO (2011, p. 23).

4.6 Alternativas para Disposição Final do Lodo

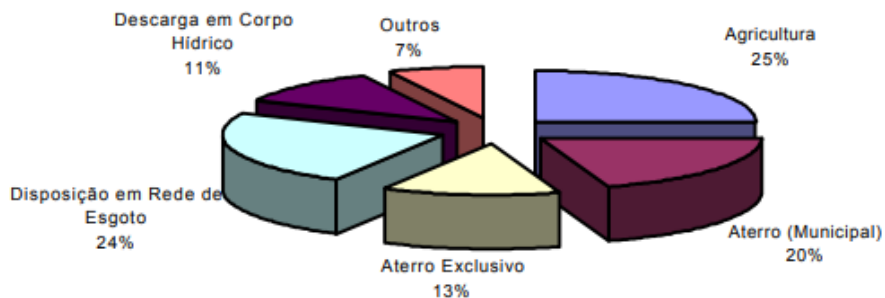
Como dito anteriormente, o lodo residual das estações de tratamento de água é o produto da clarificação da água bruta. Esse lodo é definido pela NBR 10.004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004) como resíduos sólidos não inertes e não perigosos, de Classe II A, porém que não devem ser lançados na rede pública de esgotos ou corpos de água, a menos que seja inviável outra forma de destinação final.

Dependendo da forma utilizada para a limpeza da água nos tanques, os lodos podem permanecer nos decantadores por até 60 dias ou apenas algumas horas,

para que em seguida sejam descartados ao meio ambiente, sendo mais comumente lançados aos corpos de água próximos das ETAs (CORDEIRO, 1999). Diante desse panorama Hoppen (2004) relata que os órgãos ambientais têm questionado essa prática, tendo em vista o risco à saúde pública.

Nos EUA, a disposição em solos é utilizada em larga escala por diversas empresas de saneamento. A disposição é feita em maiores porcentagens na agricultura (Figura 4), visto que a aplicação em solos agrícolas gera benefícios como melhoria do solo, ajuste de pH, aumento da capacidade de retenção de água e melhoria de condições de aeração do solo. Todavia, alguns estudos mostraram que esse lodo, quando aplicado em solos agrícolas, pode reagir e impossibilitar a plantação, fazendo-se necessárias a utilização de outros tipos de descarte (TSUTIYA; HIRATA, 2001).

Figura 4 – Disposição final de lodos de ETA nos Estados Unidos.



Fonte: AWWARF¹ (1999) apud TSUTIYA; HIRATA (2001, p. 4).

Em vista disso, algumas alternativas são apresentadas para a disposição final do lodo, tais como: aplicação no solo, aterros sanitários, incineração dos resíduos, aplicação em materiais para construção civil, entre outras (COSTA, 2011).

4.6.1 Aplicação em solos

Para a aplicação do lodo da ETA como substituição do solo, o lodo deve funcionar como um solo, sem prejudicar o meio ambiente. Portanto, a caracterização

¹ 1 AWWARF. **Commercial Application and Marketing of Water Plant Residuals**. American Water Works Association Research Foundation, 1999.

das propriedades físicas e químicas é imprescindível (DAYTON; BASTA, 2001). Conforme Figueiredo Neto (2011), os estudos da característica do resíduo em cada região são necessários para que se estabeleça a quantidade máxima de lodo a ser disposta ao meio ambiente sem que ofereçam riscos.

Segundo Tartari et al (2011), essas características podem variar conforme o gerenciamento do processo de tratamento, métodos de operação do sistema, dosagem e qualidade dos produtos químicos utilizados e da frequência da limpeza dos decantadores e filtros. Nesse vértice, Botero (2008) caracterizou lodos gerados na ETA de Jaboticabal – SP e avaliou a fertilidade, a determinação de micro e macro nutrientes e metais potencialmente tóxicos presentes no lodo. Seus resultados demonstraram que o lodo possui elevados teores de matéria orgânica e apresentam alto potencial agrícola.

Com efeito, apesar de conter alto teor de matéria orgânica, a maioria dos casos, os lodos das ETAs não são altamente atrativos para disposição direta no solo, uma vez que contém altos teores de metais pesados em sua composição, como, por exemplo, o alumínio proveniente do processo de coagulação (TARTARI, 2008).

4.6.2 Disposição em aterros sanitários

De acordo com Wagner e Pedroso (2014), a disposição do lodo da ETA em aterros sanitários é comumente utilizada no Brasil, principalmente por cidades de pequeno e médio porte, tendo em vista que os aterros são relativamente perto e, com isso, o custo de transporte se torna viável.

Para essa disposição ser uma opção segura para a saúde pública e ambiental, o aterro deve ser devidamente projetado e operado. No caso de aterros já existentes e preparados, a disposição do lodo desidratado implica em custos de transporte e disposição. Já para aterros exclusivos, os custos envolvem a implantação, operação e transporte até o local (TARTARI, 2008).

Portanto, a maior dificuldade dessa alternativa é que nem sempre o aterro sanitário está preparado para a co-disposição do lodo de ETA e a construção de um aterro exclusivo para esta finalidade não é aconselhável, devido seu alto custo de implantação (WAGNER; PEDROSO, 2014).

4.6.3 Incineração

Apesar de reduzir significativamente o volume final do lodo, a incineração é uma alternativa muito dispendiosa, por necessitar desidratar o lodo e não resolver integralmente o problema, já que as cinzas geradas devem ser dispostas em aterros (TARTARI, 2008).

4.6.4 Reaproveitamento do lodo de ETA na engenharia civil

De fato, a busca por vias economicamente viáveis para a disposição final do lodo é um grande desafio no Brasil e no mundo (IWAKI, 2017), entretanto já têm sido notadas algumas pesquisas acerca do uso desse material em aplicações no solo, nas indústrias, disposição em aterros sanitários e em produtos da construção civil.

Nesse contexto, os estudos acerca da produção de materiais cerâmicos com o lodo das ETAs têm sido bastante promissores, ao passo que tendem a reduzir o uso das argilas, um recurso natural não renovável. Segundo Oliveira e Holanda (2008) o resíduo da ETA pode ser comparado, quanto a sua composição, com as argilas já utilizadas no processo de fabricação de materiais cerâmicos, uma vez que, quando seco, esse resíduo se apresenta rico em argilominerais, silte e areia.

Por iguais razões, os estudos de Teixeira et al (2006) introduziram o lodo da estação de tratamento de Presidente Prudente – São Paulo – na produção de tijolos e telhas cerâmicas que, apesar de permanecerem dentro dos limites aceitáveis de tensão de ruptura à flexão e de absorção de água, pioraram suas propriedades com a adição do lodo.

Já Oliveira e Holanda (2008), utilizando o lodo da ETA de Campos dos Goytacazes – Rio de Janeiro –, demonstraram que ao adicionar até 15% do resíduo em peso a uma massa de cerâmica vermelha não são apresentados efeitos significativos sobre as propriedades avaliadas (retração linear, absorção de água, massa específica aparente e tensão de ruptura à flexão).

Diante desse quadro, Junior (2011), ao comparar as características do lodo produzido na Unidade Piloto da Estação de Tratamento de Água de Botafogo, situada em Igarassu – Pernambuco –, com as características dos tijolos utilizados em alvenarias convencionais, constatou que do ponto de vista da resistência o resíduo apresenta valores quase duas vezes maiores que os valores da amostra do

tijolo, isto é, o lodo se mostrou, mais uma vez, um material de enorme potencial de reaproveitamento nas indústrias cerâmicas.

Em contrapartida, visando eliminar a etapa de secagem do lodo e, conseqüentemente, seus custos, Hoppen et al (2005) verificaram a viabilidade da incorporação do lodo *in natura* em corpos de prova de concreto. A análise conjunta concluiu que nos traços de concreto contendo até 5% de substituição do peso do agregado miúdo por lodo, o material mostrou-se bastante promissor. Apesar de comprometer a qualidade do concreto a alternativa foi considerada viável do ponto de vista econômico e ambiental, uma vez que reduz significativamente o consumo de cimento e promove a diminuição da incorporação do lodo nos corpos de água.

Nesse vértice, convém notar que por apresentar os principais componentes do cimento em sua composição (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , e Fe_2O_3), os lodos também podem ser usados para substituir, em certa proporção, as matérias primas na fabricação do cimento (RICHTER, 2001). Em comentário a essa questão Morales e Dantas (1995) apontam que o lodo incinerado a temperaturas entre 700°C e 800°C houve uma perfeita homogeneização nas misturas com o cimento Portland, atendendo as exigências facultativas de tempo de início de pega e apresentando resistência mecânica adequada para cimentos com substituição de até 35% de lodo em sua fabricação.

Ribeiro (2012), por sua vez, ao avaliar o uso de diferentes concentrações do lodo da ETA de Campo Mourão – PR como substituição de porcentagens de 5, 10 e 15% da areia em argamassas, pode concluir que a incorporação de 10% de lodo como substituição do agregado miúdo permitiu um aumento de resistência quando comparado à argamassa branca, manteve os valores de resistência à elasticidade e, mesmo absorvendo 1% a mais de água que a argamassa referência, se mostrou uma opção viável para o descarte correto do lodo.

Desse modo, outra alternativa que se mostrou viável, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental, foi a substituição da areia com teores de 10% e 15% de lodo em pisos pré-moldados de concreto, que por apresentarem uma resistência média acima de 25 MPa podem ser usados em pavimentos para pedestres e tráfego leve de veículos (CASTRO, 2014).

5 MATERIAL E METODOS

A metodologia do trabalho foi realizada basicamente em quatro etapas. A primeira foi a coleta, secagem e caracterização do lodo recolhido. Em seguida fizeram-se as caracterizações das matérias primas utilizadas para a confecção dos concretos e o cálculo da dosagem.

Dando prosseguimento, a terceira etapa foi a moldagem dos corpos de prova de concreto conforme as premissas da NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015). E, por fim, a última etapa foi a realização dos ensaios necessários para a obtenção dos resultados esperados.

5.1 Coleta do Lodo

O lodo utilizado para a realização deste trabalho foi recolhido na Estação de Tratamento de Água da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) de Campo Mourão – PR. A ETA é do tipo convencional, ou seja, a limpeza da água bruta é feita através de ciclos completos com as etapas de tratamento sendo, respectivamente, a correção do pH, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação. Vale ressaltar que a correção do pH é feita com adição de Geocálcio e a coagulação pelo reagente Policloreto de Alumínio (PAC)

Os resíduos são gerados da limpeza dos decantadores e filtros, os quais são grandes tanques que armazenam esses flocos por um determinado período de tempo (CORDEIRO, 1999). Na ETA onde se recolheu o material para estudo, essa limpeza é realizada três vezes por semana e são descartados em uma lagoa de decantação.

Para facilitar a coleta adaptou-se uma tubulação na saída de descarga dessa lagoa de decantação e o material foi despejado em um tonel com capacidade para 50 litros no final de cada semana. A substância coletada possui inicialmente 3% de material sólido, portanto, para que se obtivesse uma consistência mais pastosa e menos líquida, o material foi decantado por aproximadamente quatro meses (Figura 5). Após a coleta e decantação, o material foi recolhido e levado ao laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) no campus Campo Mourão no dia 17 de setembro de 2018.

Figura 5 – Lodo coletado na SANEPAR.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Esse lodo foi aplicado ao concreto como substituição de porcentagens do cimento, para isso, foi imprescindível que ele fosse seco e moído até atingir uma granulometria ideal para ser incorporado à massa de concreto. Em vista disso, após a coleta, encaminhou-se o lodo já decantado para o laboratório, onde foi disposto em formas (Figura 6) e colocado em estufa durante 48 h para secagem.

Figura 6 – Disposição do lodo antes da secagem.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Ao secar, o material ficou rígido e quebrou-se em pedaços grandes (Figura 7) que, com a ajuda de um almofariz, foi finamente moído até se alcançar a granulometria desejada (Figura 8).

Figura 7 – Disposição do lodo depois da secagem em estufa.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Figura 8 – Moagem do lodo e seu estado final.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

5.2 Caracterizações do lodo

A caracterização do lodo foi feita por meio das análises da umidade relativa e do peso específico real do material, para que mais tarde fosse feita a correção do traço e da porcentagem de lodo e cimento em função dessas características.

5.2.1 Determinação da umidade do lodo

A determinação da umidade do lodo foi feita adaptada segundo GREENBERG (1992) e, para isso, foram utilizados três recipientes refratários com uma pequena parcela de lodo. Primeiramente os recipientes foram pesados vazios, anotando-se o peso. Depois disso, pesou-se cada refratário com o lodo úmido, também anotando seu peso. Em seguida os refratários foram levados a uma estufa, na qual permaneceram por aproximadamente 48 horas sob uma temperatura de 110 °C para sua secagem.

Com o material seco, o recipiente foi pesado novamente para a anotação do seu peso seco. A partir disso, fez-se um resumo dos pesos obtidos com o ensaio, que foram representados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Resumo da pesagem do lodo úmido e seco.

Nº do recipiente	P _c (g)	P _u (g)	P _s (g)
3	5,24	12,23	11,80
18	4,95	12,51	12,04
20	5,19	15,35	14,75

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

A partir desses valores, foi feito o cálculo da umidade do lodo de cada recipiente refratário através da Equação 1:

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

em que:

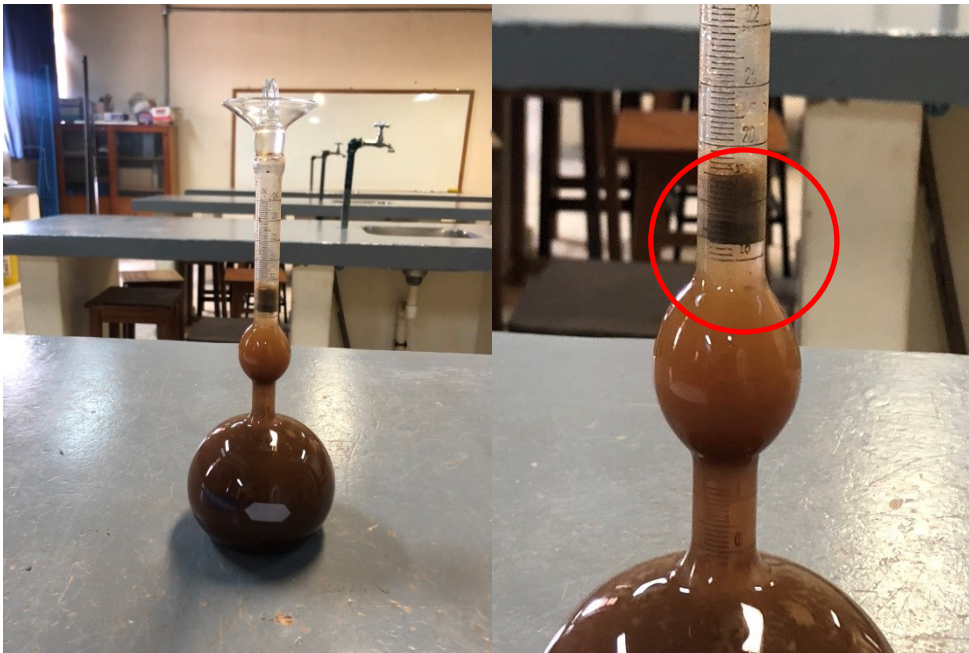
- P_c = peso do cadinho (recipiente refratário);
- P_u = peso do cadinho + lodo úmido;
- P_s = peso do cadinho + lodo seco.

Dessa forma, com a média dos valores obtidos, a umidade do lodo obtida foi de 6,09%.

5.2.2 Determinação da massa específica real do lodo

A determinação da massa específica do lodo foi realizada segundo as premissas da NBR NM 23 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001). Para isso, em um frasco volumétrico de “Le Chatelier” foi adicionado água até a marca de 0,4 cm³, adotando-se como leitura inicial (L_i). Depois disso, foi adicionado 40,36 g de lodo seco no mesmo recipiente, com o auxílio de um funil de haste curta, causando um deslocamento do líquido até a marca de 18,3 cm³ (Figura 9).

Figura 9 – Volume do recipiente com lodo.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Os volumes inicial e final foram 0,4 cm³ e 18,3 cm³, respectivamente. Com isso, o cálculo da massa específica real desse lodo pode ser determinado conforme a Equação 2.

$$\rho_{\text{todo}} = \frac{M}{L_f - L_i} \quad \text{Equação (2)}$$

em que:

- ρ_{todo} = massa específica;
- M = Massa;
- L_f = leitura final;
- L_i = leitura inicial.

Sendo assim, a massa específica obtida foi de $\rho_{\text{todo}} = 2,25 \text{ g/cm}^3$.

5.3 Caracterização da Matéria Prima

Os agregados miúdos e graúdos foram fornecidos pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná do campus Campo Mourão e, para caracterizar esses materiais, foi imprescindível a verificação da massa específica do agregado miúdo através, a massa específica do agregado graúdo segundo a e suas respectivas distribuições granulométricas.

5.3.1 Agregado miúdo

A caracterização da granulometria da areia foi determinada seguindo os princípios da NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). Para o ensaio foi necessário uma balança de precisão, um peneirador automático e uma série de peneiras. O ensaio foi realizado como descreve a norma e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Granulometria do agregado miúdo para uma amostra de 500g. (continua)

PENEIRA # (mm)	PESO RETIDO (g)	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
4,8	2	0,40%	0,40%
2,4	2	0,40%	0,80%
1,2	16	3,20%	4,00%
0,6	77	15,40%	19,40%
0,3	200	40,00%	59,40%

Tabela 2 – Granulometria do agregado miúdo para uma amostra de 500g. (conclusão)

PENEIRA # (mm)	PESO RETIDO (g)	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
0,15	195	39,00%	98,40%
FUNDO	8	1,60%	100,00%
TOTAL	500	100,00%	

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

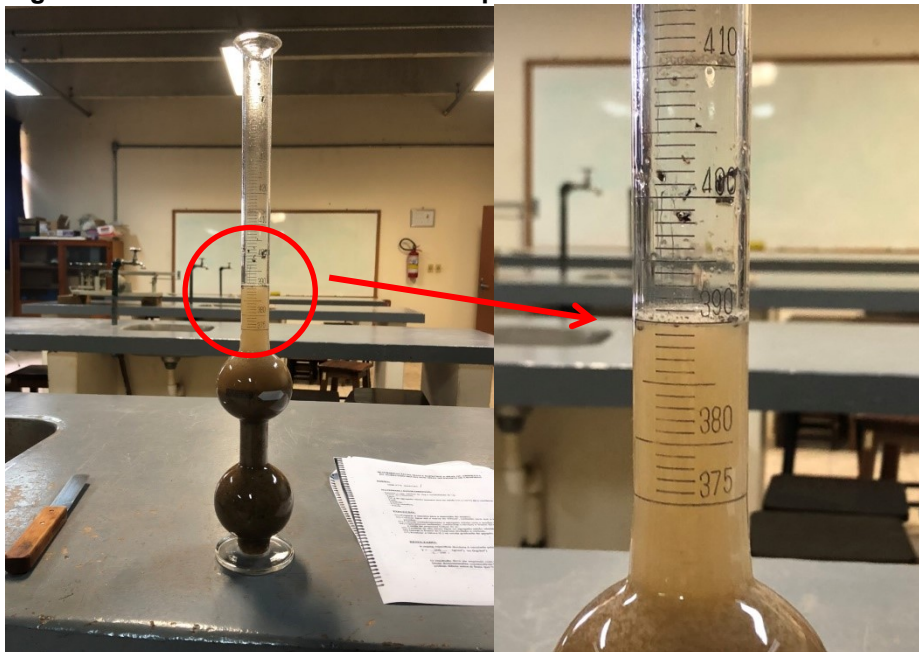
A partir disso, o módulo de finura (MF) da areia pode ser calculado através da Equação 3.

$$\frac{\sum \% \text{ Retida acumulada} - (\text{fundo})}{100} = \text{MF} \quad \text{Equação (3)}$$

A areia ensaiada obteve um MF= 1,82 que, pela norma utilizada, classifica-se como areia fina.

A massa específica real da areia, por sua vez, foi calculada através da NBR 9776 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987). Nesse ensaio primeiramente despejou-se 200 cm³ de água em um Frasco de Chapman e em seguida, com o auxílio de um funil, adicionou-se 500 g de areia fazendo com que o volume final da água subisse para 390 cm³.

Figura 10 – Volume do Frasco de Chapman com lodo.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Com isso, a massa específica real da areia pode ser calculada através da Equação 4, e o resultado obtido foi de $\rho_m = 2,63 \text{ g/cm}^3$.

$$\rho_m = \frac{500}{L_f - 200} \quad \text{Equação (4)}$$

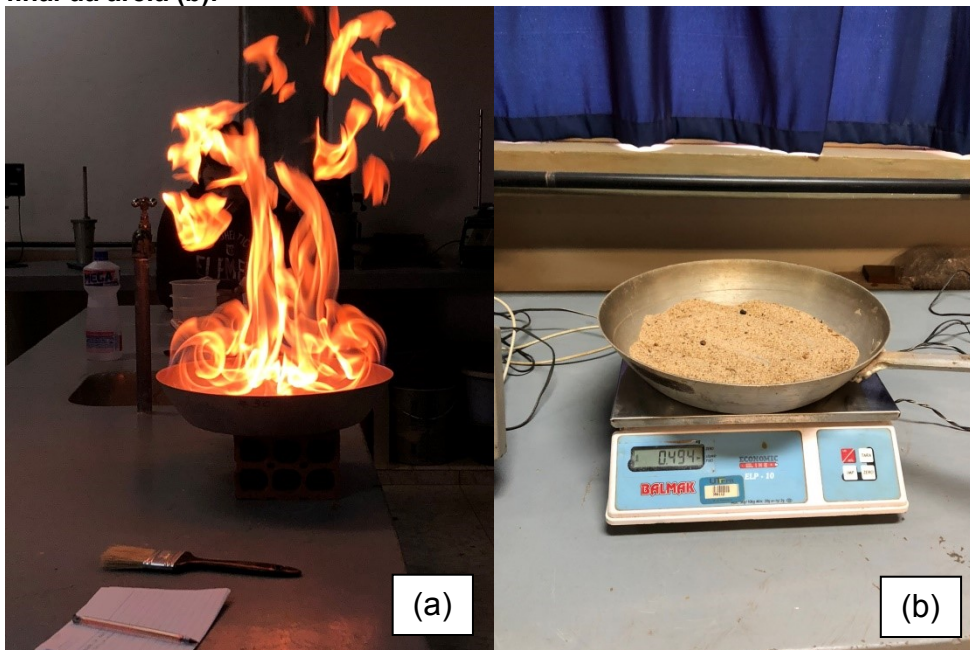
Em que L_f é a leitura final do Frasco de Chapman.

Para a obtenção da umidade da areia, primeiramente pesou-se 500 g do material. Em seguida, a amostra foi colocada em uma frigideira, regada com álcool e ateou-se fogo na mistura (Figura 11). Quando o fogo cessou a areia foi pesada novamente e a umidade da areia, em porcentagem, foi dada a partir da Equação 5:

$$\left(\frac{M_i - M_s}{M_s} \right) \times 100 \quad \text{Equação (5)}$$

Em que M_i é o peso inicial da areia úmida e M_s é o peso da areia após a secagem com fogo.

Figura 11 – Queima da areia para a obtenção da umidade relativa do material (a) e pesagem final da areia (b).



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Com base nesse ensaio, a umidade relativa da areia calculada foi de 1,2%.

5.3.2 Agregado graúdo

A determinação da granulometria da brita também foi feita segundo a NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003) e os resultados dos ensaios estipulados por essa norma foram representados pela Tabela 4. Com isso, o módulo de finura da brita utilizada foi de 3,04.

Nesse aspecto, para a determinação da Dimensão Máxima Característica (D.M.C.) analisa-se a coluna da “% Retida Acumulada” (Tabela 4) no sentido das maiores peneiras para as menores. O primeiro valor maior que 5% indica uma abertura de peneira, logo a D.M.C é igual a abertura de peneira imediatamente superior, que resultou em um diâmetro máximo igual a 19 mm, classificada como brita 1.

Tabela 4 – Determinação da granulometria da brita para uma amostra de 1000g.

PENEIRA # (mm)	PESO RETIDO (g)	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA
25*	0	0,00%	0,00%
19	0	0,00%	0,00%
12,5*	86	8,60%	8,60%
9,5	875	87,50%	96,10%
6,3*	34	3,40%	99,50%
4,8	3	0,30%	99,80%
FUNDO	2	0,20%	100,00%
TOTAL	1000	100,00%	

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Ademais, com o intuito de obter a massa específica real da brita, fizeram-se os ensaios determinados pela NBR 9937 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987), ou seja, depois de peneirar o material na peneira 4,8 mm, desprezou-se o material passante e o material acumulado na peneira foi lavado e seco em estufa até atingir sua constância de massa.

Em seguida, ao ser retirada da estufa, a amostra foi resfriada até a temperatura ambiente, foi imersa em água e depois de 24 h, retirou-se a amostra da água e espalhou-a sobre um pano absorvente, promovendo a retirada da água superficial de cada partícula. Na sequência, a amostra saturada com superfície seca foi pesada e seu peso foi anotado (B).

Depois disso, a amostra (B) foi colocada dentro de um cesto imerso em água, conforme demonstrado na Figura 12. Vale ressaltar que o cesto e a corrente utilizada para a imersão da amostra foram previamente zerados na balança. Com isso pode-se anotar o peso da amostra imersa (C).

Por fim, a amostra foi seca até obter sua constância de massa e pesada, sendo essa a massa do agregado (A). A partir dessas etapas, foi possível calcular a massa específica da brita na condição seca através da Equação 6 e a massa específica da brita na condição saturada com superfície seca pela Equação 7.

$$\rho_{\text{seco}} = \frac{A}{B-C} \quad \text{Equação (6)}$$

$$\rho_{\text{sss}} = \frac{B}{B-C} \quad \text{Equação (7)}$$

Figura 12 – Imersão do agregado graúdo.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Em virtude dos ensaios realizados, a massa específica da brita foi de $\rho_b = 2,91$ g/cm³.

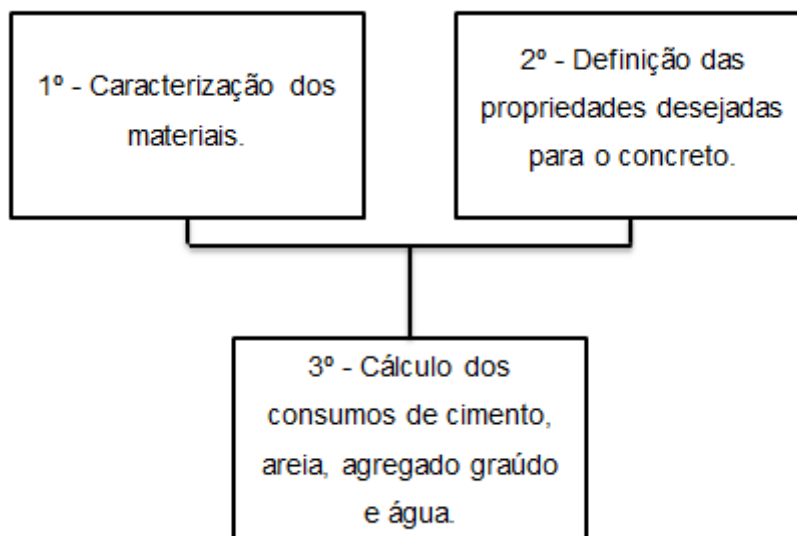
5.3.3 Aglomerante hidráulico

O aglomerante hidráulico escolhido como foi o cimento CP – V ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial) da marca Cauê, que possui massa específica de $3,12 \text{ g/cm}^3$, tendo em vista que esse cimento apresenta uma alta resistência inicial já nos primeiros dias de vida, em função da dosagem diferenciada de calcário e argila em sua produção e por sua granulometria mais fina.

5.4 Cálculo da Dosagem

O cálculo do traço foi embasado no Método de Dosagem de Concreto da ABCP e, segundo o autor desse método, o engenheiro Publio Penna Firme Rodrigues (1998), o procedimento de dosagem é composto por três etapas, conforme o esquema da Figura 13.

Figura 13 – Resumo das etapas essenciais para calcular o traço do concreto.



Fonte: Adaptado RODRIGUES (1998).

A primeira etapa corresponde à caracterização da matéria-prima disponível, em seguida a fixação das propriedades desejadas para o concreto, tanto endurecido quanto em seu estado fresco, corresponde à segunda etapa e, por fim, a terceira etapa consiste na determinação do consumo dos materiais, ou seja, a dosagem propriamente dita.

Em vista disso, o traço foi calculado com o intuito de obter-se um concreto com um $f_{ck} = 25$ MPa e abatimento entre 8 e 10 cm.

No método da ABCP, inicialmente deve-se fixar o fator água/ cimento ($f_{a/c}$) e para isso recomenda-se, como forma mais precisa, o emprego das curvas de Abrams. Este item leva em consideração a relação entre a resistência normal do cimento e a resistência de dosagem (f_{cj}), ambos aos 28 dias.

Portanto, com base na Equação 8, calculou-se a resistência de dosagem do concreto aos 28 dias (f_{c28}) considerando o desvio-padrão (sd) em função das condições de preparo do concreto. Segundo a NBR 12655 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), quando o cimento e os agregados são medidos em massa e a água medida em volume, o desvio-padrão a ser adotado é igual a 4,0 MPa.

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \times sd \quad \text{Equação (8)}$$

sendo:

- f_{cj} = resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias, expressa em megapascals (MPa);
- f_{ck} = resistência característica do concreto à compressão, aos j dias, expressa em megapascals (MPa);
- Sd = desvio-padrão da dosagem, expresso em megapascals (MPa).

ou seja:

$$f_{c28} = 25 + 1,65 \times 4,0 \cong 32 \text{ MPa}$$

A partir disso foi possível determinar o $f_{a/c} = 0,58$ a partir da Curva de Abrams.

Em seguida as informações necessárias para o cálculo do traço foram resumidas através da Tabela 5 para que, posteriormente, fossem encontradas mais facilmente.

Tabela 5 – Resumo das informações necessárias para o cálculo do traço a partir da caracterização dos materiais e da determinação das propriedades desejadas para o concreto.

CÁLCULO P/ CONCRETO DE 25MPA (CPV-ARI)		und
F_{cj} = F_{ck} + 1,65*sd	32	MPa
Resistência do cimento aos 28 dias	50	MPa
Diâmetro máximo do agregado graúdo	19	mm
Módulo de finura do agregado miúdo (MF)	1,82	
Massa unitária compacta do agregado graúdo (M_c)	1,40	Kg/dm ³
Massa específica real do agregado miúdo (ρ_m)	2,632	g/cm ³
Massa específica real do agregado graúdo (ρ_b)	2,915	g/cm ³
Slump test	9 ± 1	cm
Massa específica do cimento (ρ_c)	3,12	g/cm ³
Massa específica do lodo (ρ_{lodo})	2,25	g/cm ³
Massa específica da água (ρ_a)	1,00	g/cm ³

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Feitas essas considerações, foi possível calcular o consumo do cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, finalizando a terceira – e última – etapa do cálculo da dosagem. Dessa forma, a partir da Tabela 6 determinou-se o consumo de água por metro cúbico de cimento (C_a) em função do diâmetro máximo do agregado graúdo e do abatimento determinado.

Tabela 6 – Estimativa do consumo de água por metro cúbico de concreto em função do Diâmetro Máximo Característico do Agregado e do Abatimento da mistura.

ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO				
	GRAÚDO				
	9,5 mm	19 mm	25 mm	32 mm	38 mm
40 a 60 mm	220 l/m ³	195 l/m ³	190 l/m ³	185 l/m ³	180 l/m ³
60 a 80 mm	225 l/m ³	200 l/m ³	195 l/m ³	190 l/m ³	185 l/m ³
80 a 100 mm	230 l/m ³	205 l/m ³	200 l/m ³	200 l/m ³	290 l/m ³

Fonte: RODRIGUES (1998).

Com os valores de C_a e $f_{a/c}$ foi possível calcular o consumo de cimento (C_c) através da Equação 9.

$$C_c = \frac{C_a}{f_{a/c}}$$

Equação (9)

em que:

- C_c é o consumo de cimento em m^3 ;
- C_a é o consumo de água em l/m^3 ;
- $f_{a/c}$ é o fator água/ cimento.

Depois disso determinou-se, de acordo com a Tabela 7, o volume compactado de agregado graúdo (V_c) por m^3 de concreto, que é dado em função da dimensão máxima do agregado graúdo (19 mm) e do módulo de finura da areia (1,82), ou seja, $V_c = 0,770$.

Tabela 7 – Volume do agregado graúdo compactado por metro cúbico de concreto.

MÓDULO DE FINURA DA AREIA	DIÂMETRO MÁXIMO DO AGREGADO GRAÚDO (mm)				
	9,5	19	25	32	38
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: RODRIGUES (1998).

Em seguida, foi calculado o consumo de agregado graúdo (C_b) por meio da Equação 10.

$$C_b = V_c \times M_c$$

Equação (10)

sendo:

- C_b = consumo de agregado graúdo (Kg/m^3);
- V_c = volume compactado por m^3 ;
- M_c = massa unitária compactada do agregado graúdo em kg/m^3 .

Uma vez calculados os consumos de cimento, brita e água, foi possível obter o consumo de agregado miúdo (C_m) através da Equação 12, que é resultado da multiplicação do volume de areia (V_m) – dado pela Equação 11 – pela massa específica da areia:

$$V_m = 1 - \left(\frac{C_c}{\rho_c} + \frac{C_b}{\rho_b} + \frac{C_a}{\rho_a} \right) \quad \text{Equação (11)}$$

sendo:

- V_m = volume de agregado miúdo;
- ρ_c = massa específica do cimento;
- ρ_b = massa específica do agregado graúdo;
- ρ_a = massa específica da água.

$$C_m = \rho_m \times V_m \quad \text{Equação (12)}$$

em que:

- C_m = consumo de agregado miúdo (kg/m^3);
- ρ_m = massa específica do agregado miúdo;

Após essas etapas, finalmente é possível definir o traço, ou seja, representar a proporção dos insumos em relação à massa de cimento. Para isso utilizou-se a Equação 13:

$$\text{Traço} = \frac{C_c}{C_c} : \frac{C_m}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : \frac{C_a}{C_c} \quad \text{Equação (13)}$$

Em resumo, o traço obtido foi de 1: 2,32: 3,05 kg/m^3 de cimento, areia e brita, respectivamente, enquanto que o $f_{a/c}$ foi determinado através da Curva de Abrams, sendo igual a 0,58.

5.5 Moldagem dos Corpos de Prova

Para contemplar os objetivos deste trabalho foram verificadas as características do concreto quanto a sua resistência à compressão, conforme a NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018), absorção de água, seguindo a NBR 9778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987), e trabalhabilidade, segundo a NBR NM 67 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998).

Em virtude disso, foram moldados sete corpos de prova (CPs) cilíndricos para um concreto referência, que serviu de base comparativa para os resultados, e sete CPs para cada porcentagem de lodo substituído no traço, totalizando 28 CPs cilíndricos, tendo em vista que o *slump test* não necessita desse tipo de CPs para sua verificação e que foram definidas três porcentagens diferentes de adição do lodo.

As porcentagens foram definidas como 5%, 10% e 15% de lodo seco e moído para adicionar ao concreto como substituição do cimento. Tendo em vista que os corpos de prova utilizados possuem 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura e levando em conta o traço calculado seriam necessários 10,99 litros de concreto, entretanto, por prevenção, calculou-se a quantidade de insumos para a confecção de 15 litros de concreto para cada traço.

Também foi essencial corrigir a quantidade de água e areia em função da umidade do agregado miúdo. Vale lembrar que a umidade da areia foi calculada anteriormente sendo igual a 1,2%, portanto na Tabela 8 demonstra-se a quantidade de insumos totais utilizados conforme suas respectivas porcentagens de lodo.

Tabela 8 – Quantidade de insumos corrigidos em função da umidade dos materiais para a confecção de 15 litros de concreto para cada teor de lodo.

QUANTIDADE DE MATERIAIS PARA CONFECÇÃO DE 15 LITROS DE CONCRETO					
Teor de lodo (%)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Lodo (kg)
0%	5,30	12,44	16,17	3,03	0
5%	5,04	12,44	16,17	2,88	0,265
10%	4,77	12,44	16,17	2,73	0,530
15%	4,51	12,44	16,17	2,58	0,795
TOTAL (kg)	19,62	49,76	16,17	11,22	1,590

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Nota-se que a quantidade de água diminui respectivamente conforme a substituição de cimento por lodo. Isso ocorre porque, mesmo que o lodo estivesse substituindo parte do aglomerante, foi mantida a relação água/ cimento e não água/aglomerante. Esse fator foi considerado para que a resistência não fosse afetada bruscamente.

Já a correção da quantidade de areia em função da umidade do lodo não foi feita, uma vez que o lodo não é um material comumente utilizado nas construções. Dessa forma, esse aspecto foi necessário para a observação da reação do material sem nenhuma alteração de dosagem.

Sendo assim, os concretos foram preparados em uma betoneira com capacidade de 120 litros, os insumos foram devidamente pesados para uma maior precisão nos traços e o adensamento da massa foi feito através de uma mesa vibratória. Os corpos de prova foram moldados conforme as exigências da NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015) no dia 6 de novembro de 2018 e após 24 h da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e colocados em processo de cura saturada durante 14 dias, tendo em vista que a idade deve ser contada a partir da hora da moldagem (Figura 14).

Figura 14 – Processo de moldagem (a), desmoldagem (b) e cura dos concretos (c).



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

5.6 Propriedades do Concreto

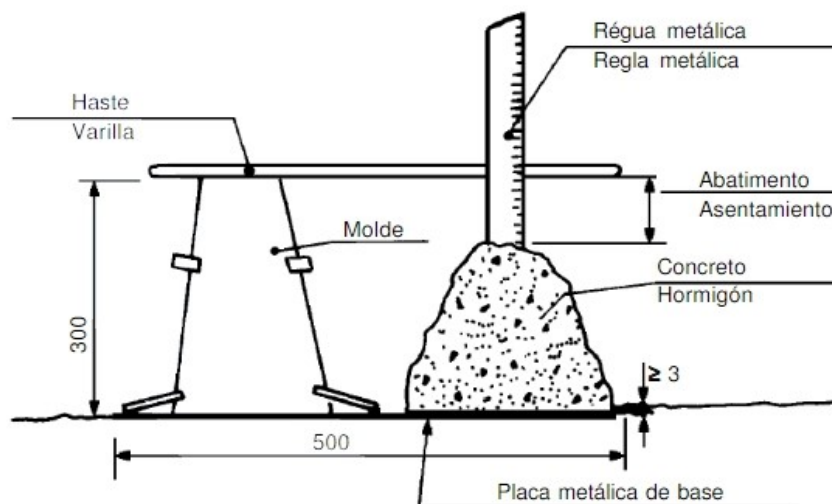
5.6.1 Determinação da trabalhabilidade

Para a avaliação da trabalhabilidade de cada mistura de concreto utilizou-se do ensaio de abatimento do tronco de cone “*slump test*” conforme a NBR NM 67 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998). O ensaio foi realizado após a mistura de cada concreto e antes da moldagem dos corpos de prova cilíndricos, evitando desperdícios de material.

Para realizar o ensaio foi necessário um corpo de prova com o formato de tronco de cone oco, com a base maior igual a 200 mm de diâmetro, base menor igual a 100 mm e 300 mm de altura. Possui em sua parte superior duas alças posicionadas à 2/3 da altura total e uma mesa metálica para o apoio do molde.

Neste procedimento, o concreto foi colocado no corpo de prova, com a menor abertura para cima, que foi preenchido com três camadas de concreto. Entre uma camada e outra o concreto foi apiloado 25 vezes, com uma haste de socamento padronizada com 16 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento. Após o preenchimento total do cone, o molde foi retirado cuidadosamente na direção vertical e, imediatamente após isso, foi aferida a trabalhabilidade do concreto pela diferença de altura entre o molde e a altura do eixo do corpo de prova desmoldado, demonstrado na Figura 15.

Figura 15 – Método da medida do abatimento.



Fonte: NBR NM 67 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998).

5.6.2 Resistência à compressão

Passados os 14 dias em cura saturada os CP's foram retirados da estufa e retificados mecanicamente antes dos ensaios, ou seja, foi retirada uma fina camada de material dos CP's de modo que suas superfícies obtivessem bases planas e perpendiculares ao seu eixo longitudinal, conforme demonstrado na Figura 16.

Figura 16 – Corpos de prova retificados.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Depois de retificados, os corpos de prova foram aferidos quanto seu diâmetro e altura por um paquímetro com exatidão de $\pm 0,1$ mm. O diâmetro utilizado para o cálculo da área de seção transversal do CP foi determinado pela média de dois diâmetros medidos ortogonalmente na metade da altura do CP e a altura foi medida sobre seu eixo longitudinal.

As amostras foram rompidas à compressão, segundo a NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018), imediatamente após a preparação das bases dos CP's, no dia 21 de novembro de 2018, utilizando-se de uma prensa hidráulica de classe 1, devidamente calibrada e atendendo os valores máximos admissíveis determinados pela NBR ISO 7500-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016).

Antes de iniciar os ensaios, foi verificado se as bases do equipamento e as faces dos CP's estavam limpas e secas. Feito isso, o corpo de prova foi

cuidadosamente centralizado no prato inferior com o auxílio dos círculos concêntricos da prensa, observado na Figura 17.

Figura 17 – Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Na sequência, foi aplicado no centro do CP um carregamento contínuo e sem choques, numa velocidade constante de carregamento de, aproximadamente, 0,5 MPa/ s. Essa velocidade só foi interrompida quando houve ruptura da amostra, indicada por uma queda de força. Após a ruptura, a resistência à compressão deve ser calculada através da Equação 14:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad \text{Equação (14)}$$

na qual:

- f_c é a resistência à compressão, expressa em MPa;
- F é a força máxima alcançada, em N; e
- D é o diâmetro do corpo de prova, em mm.

A fim de avaliar a variação dos resultados do ensaio estimou-se o desvio padrão amostral para cada teor de lodo, uma vez que o desvio padrão é uma

medida que expressa o grau de variação de um conjunto de dados, ou seja, o quanto esse conjunto de dados é uniforme. Essa estimativa é obtida a partir da Equação 15:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad \text{Equação (15)}$$

em que:

- s é o desvio padrão amostral;
- x_i é o valor na posição i no conjunto de dados;
- \bar{x} é a média aritmética dos dados;
- n é o número de amostras.

Com isso, sabe-se que quanto mais próximo de zero for o resultado do desvio padrão, mais uniforme será o conjunto de dados avaliado.

O desvio padrão, porém, é bastante afetado pela magnitude dos dados, ou seja, não é uma medida resistente. Portanto, para a comparação da variabilidade de dois conjuntos foi calculado o coeficiente de variação das amostras, geralmente expresso em porcentagem, dado pela Equação 16:

$$C_v = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\% \quad \text{Equação (16)}$$

na qual:

- C_v é o coeficiente de variação;
- s é o desvio padrão;
- \bar{x} é a média da amostra.

5.6.3 Absorção de água por imersão

Esse procedimento foi realizado conforme a metodologia descrita na NBR 9778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987). Isto é, foram necessários três CP's de cada traço de concreto que, após a cura, foram

devidamente identificados e secos em estufa por 72h (Figura 18), fazendo-se sua pesagem a cada 24 h em uma balança de precisão.

Figura 18 – CP's na estufa para secagem.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Depois da secagem e resfriamento, as amostras foram mantidas com 1/3 de seu volume imerso na água nas primeiras 4 h e 2/3 nas próximas 4 h, e em seguida foram completamente imersas por 64 h, totalizando 72 h de imersão. Após completar a saturação, os corpos de prova foram pesados novamente e a absorção de água, em porcentagem, foi obtida pela Equação 17.

$$\left(\frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s}\right) \times 100 = \% \text{ de absorção de água} \quad \text{Equação (17)}$$

Sendo que M_{sat} é a massa do corpo saturado e M_s a massa do corpo seco.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Trabalhabilidade Do Concreto

O primeiro ensaio foi feito com o concreto referência, que correspondeu conforme o planejado no calculo do traço. Essa massa apresentou um abatimento de 10 cm e pode ser observado na Figura 19.

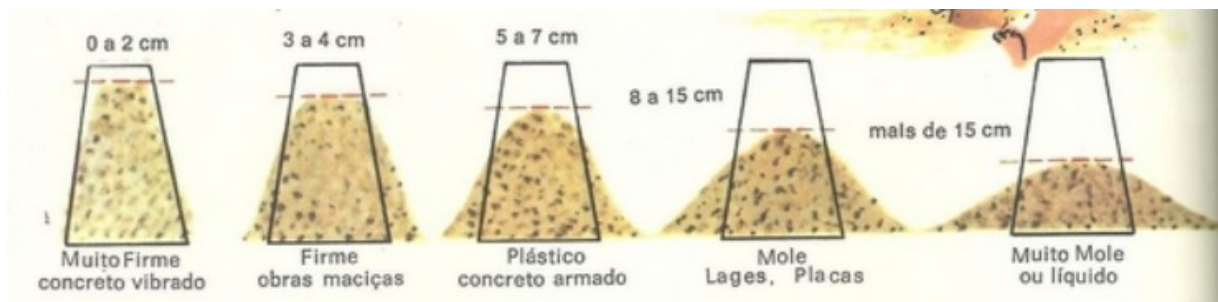
Figura 19 – Medida do abatimento do concreto referência.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Esse concreto pode ser considerado mole uma vez que, segundo L'hermite (1967), a medida do recalque em centímetros mede a plasticidade da mistura. Os parâmetros de plasticidade podem ser observados na Figura 20.

Figura 20 – Parâmetros da plasticidade do concreto fresco através do ensaio do slump test.



Fonte: L'HERMITE (1967).

Em seguida, mediu-se o abatimento de tronco de cone do concreto com 5% de lodo e, conforme demonstrado na Figura 21, o resultado foi de 7 cm, ou seja, houve uma diminuição significativa de 3 cm, quando comparado com o concreto referência. Possivelmente essa diferença foi consequência da redução da quantidade de água adicionada na mistura, tendo em vista que essa parcela é relacionada diretamente com a quantidade de cimento utilizada, portanto, ao retirar 5% de cimento para a substituição do resíduo, a água também foi reduzida proporcionalmente.

Figura 21 – Medida do abatimento do concreto com 5% de lodo.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Dando prosseguimento, fez-se o teste no concreto com 10% de substituição do cimento pelo lodo e foi possível observar, novamente, uma redução de plasticidade. A medida do recalque desse concreto foi de 6,7 cm, e pode ser observada na Figura 22.

Equiparando esse resultado com o concreto referência tem-se uma diferença significativa, entretanto quando comparado com o concreto com 5% de lodo, a redução foi mínima, podendo ser igualmente considerado como um concreto plástico. Segundo Mehta e Monteiro (2008), concretos com abatimentos até 75 mm são recomendados para obras de pavimentação, lajes, parede de fundações, entre outras funcionalidades.

Figura 22 – Medida do abatimento do concreto com 10% de lodo.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Por fim, foi feito o teste no concreto com teor de 15% de lodo, o qual apresentou a maior diferença nos resultados, com medição igual a 3,5 cm, apresentado na Figura 23. Essa diferença se deu pelo fato da diminuição de água elevada em relação à mistura inicial.

Figura 23 – Medida do abatimento do concreto com 15% de lodo



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

6.2 Resistência à Compressão

Após a realização dos ensaios, os resultados obtidos por meio da Equação 6 foram expressos na Tabela 9, Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 9 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão nos CP's com 0% de lodo aos 14 dias.

CP	Ø médio (mm)	Área (mm ²)	Força (kN)	$f_{c, 14}$ (MPa)
1	100,60	7948,51	199,0	25,04
2	100,25	7893,29	205,3	26,01
3	100,10	7869,69	184,6	23,46
4	100,70	7964,32	193,8	24,33

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Tabela 10 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão nos CP's com 5% de lodo aos 14 dias.

CP	Ø médio (mm)	Área (mm ²)	Força (kN)	$f_{c, 14}$ (MPa)
1	100,65	7956,41	207,8	26,12
2	100,00	7853,98	187,2	23,84
3	100,80	7980,14	189,8	23,78
4	100,15	7877,55	185,3	23,52

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Tabela 11 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão nos CP's com 10% de lodo aos 14 dias.

CP	Ø médio (mm)	Área (mm ²)	Força (kN)	$f_{c, 14}$ (MPa)
1	100,00	7853,98	177,2	22,56
2	100,00	7853,98	187,2	23,84
3	99,95	7846,12	185,4	23,63
4	100,35	7909,05	192,5	24,34

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Tabela 12 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão nos CP's com 15% de lodo aos 14 dias.

CP	Ø médio (mm)	Área (mm ²)	Força (kN)	$f_{c, 14}$ (MPa)
1	99,20	7728,81	189,6	24,53
2	100,00	7853,98	179,5	22,85
3	100,45	7924,82	195,4	24,66
4	100,35	7909,05	175,6	22,20

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Portanto, a média aritmética da resistência à compressão dos corpos de prova para cada teor de lodo foi apresentada na Tabela 13, bem como seus

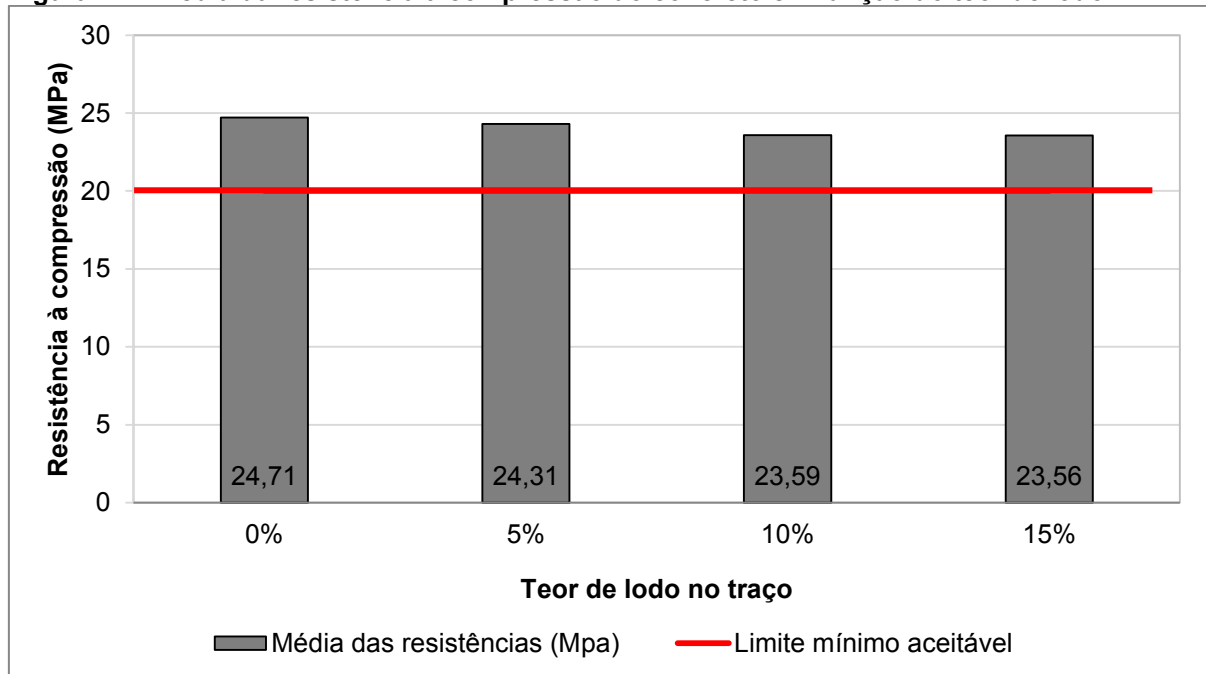
respectivos desvios padrões e coeficientes de variação amostral. Já a variação dessas médias foi demonstrada na Figura 24.

Tabela 13 – Resistências médias, desvio padrão para cada dosagem e seus respectivos coeficientes de variação.

	Teor de lodo na dosagem			
	0%	5%	10%	15%
$f_{cm, 14}$ (MPa)	24,71	24,31	23,59	23,56
Desvio padrão	1,081	1,180	0,748	1,223
Coeficiente de variação (C_v)	4%	5%	3%	5%

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Figura 24 – Média da resistência à compressão do concreto em função do teor de lodo.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

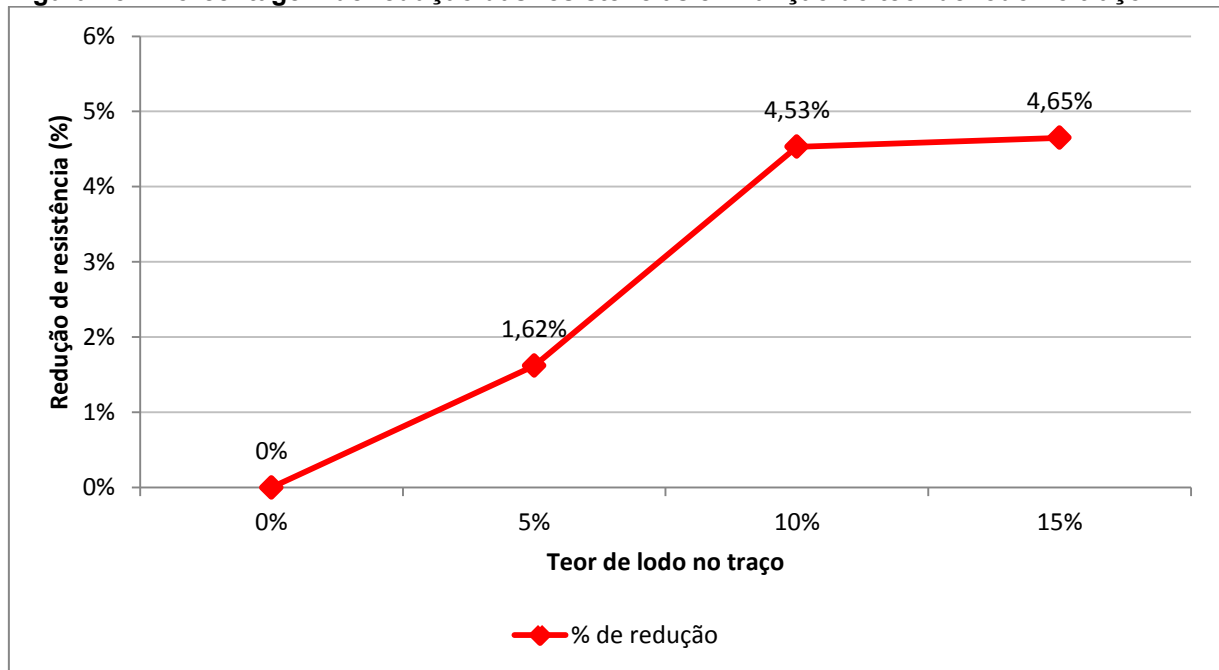
A partir desses dados, observa-se um pequeno decréscimo de resistência à medida que foi aumentado o teor de lodo no traço. Essa diminuição de resistência é diretamente proporcional à quantidade de cimento substituída por lodo na dosagem, ou seja, quanto maior o teor de lodo, menor a quantidade de cimento e, conseqüentemente, menor a resistência.

Essa diminuição ocorre pelo fato da retirada de parte do aglomerante hidráulico, que proporciona a resistência do concreto. Entretanto, todos os concretos superaram o limite mínimo aceitável de 20 MPa para obras de engenharia civil,

mostrando um desempenho adequado até mesmo nos concretos com 15% de substituição.

Em função disso, na Figura 25 demonstrou-se a porcentagem de redução das resistências à compressão em relação ao concreto referência.

Figura 25 – Porcentagem de redução das resistências em função do teor de lodo no traço.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Nesse vértice, Morales e Dantas (1995) ensaiaram corpos de prova de argamassa produzidos com cimento e substituição parcial por lodo calcinado, sob uma temperatura de 750°C, nas porcentagens de 0%, 15%, 25% e 35% e também obtiveram quedas de resistência, demonstradas na Tabela 14.

Tabela 14 – Resistência à compressão de argamassas de cimento e areia, com e sem lodo calcinado.

Idade (dias)	Resistência à Compressão (MPa)			
	0%	15%	25%	35%
3	26,8	21,2	15,0	9,8
7	35,0	28,8	20,4	14,5
28	47,4	47,5	41,8	35,9
56	45,7	50,1	44,5	36,9
70	44,2	45,7	49,8	40,9
180	45,2	47,5	53,1	52,0
912	40,2	49,0	54,6	51,0

Fonte: MORALES E DANTAS (1995, p. 27).

Mesmo assim, Morales e Dantas (1995) verificaram que na idade de 7 dias apenas a amostra com 35% de lodo calcinado esteve abaixo do limite de 20 MPa. Também se notou que com o aumento da idade das argamassas a resistência mecânica das amostras com lodo calcinado foi gradativamente aumentando, sendo que a porcentagem ideal para resistências a longo prazo é de 25%. Com isso concluíram que o processo é viável tecnicamente para adições de até 25%.

Hoppen et al (2005), por sua vez, incorporou o lodo das ETAs *in natura* como substituição parcial de porcentagens de areia e cimento, deixando a consistência do concreto fresco ser um fator variável no cálculo da dosagem e obteve resultados satisfatórios, mesmo com decréscimos significativos de resistência à compressão. Segundo os autores, apesar da queda brusca de resistência, os teores de substituição abaixo de 7% podem ser utilizados para fins não estruturais, pois os valores estão acima do limite mínimo aceitável.

É notável que a adição ou substituição de parcelas do concreto por materiais orgânicos refletem na redução da resistência. Entretanto, quando essas reduções não decrescem drasticamente podem ser consideradas viáveis, tanto no âmbito econômico quanto ambiental. É o caso dos ensaios de Marcos et al (2008), que substituiu porcentagens do cimento Portland por cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) em argamassa. Os resultados estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resistência média à compressão da argamassa aos 28 dias em função da porcentagem de bagaço de cana substituídos.

CBC (%)	Resistência Média aos 28 dias (MPa)
0%	47,8
10%	48,0
20%	46,9
30%	40,7

Fonte: MARCOS et al (2008, p. 355).

6.3 Absorção de Água

Após a cura, três corpos de prova foram identificados, pesados e colocados em estufa a uma temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, e foram pesados a cada 24 h até completar 72 h. Os pesos foram anotados e são demonstrados na Tabela 16, Tabela 17, Tabela 18 e Tabela 19.

Tabela 16 – Peso dos CP's após a retirada da cura saturada.

CP	PESO DOS CP'S (kg)			
	0%	5%	10%	15%
1	3,968	3,906	3,829	3,793
2	3,999	3,912	3,892	3,825
3	3,950	4,016	3,863	3,807

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Tabela 17 – Peso dos CP's após 24 h em estufa.

CP	PESO DOS CP'S (kg)			
	0%	5%	10%	15%
1	3,831	3,766	3,660	3,641
2	3,860	3,766	3,727	3,674
3	3,799	3,874	3,699	3,640

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Tabela 18 – Peso dos CP's após 48 h em estufa.

CP	PESO DOS CP'S (kg)			
	0%	5%	10%	15%
1	3,786	3,729	3,611	3,603
2	3,817	3,731	3,680	3,640
3	3,758	3,845	3,657	3,609

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Tabela 19 – Peso dos CP's após 72 h em estufa.

CP	PESO DOS CP'S (kg)			
	0%	5%	10%	15%
1	3,768	3,704	3,597	3,590
2	3,800	3,706	3,674	3,624
3	3,741	3,827	3,648	3,594

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Após as 72 h em estufa, esses corpos de prova foram resfriados e então foram imersos de acordo com a NBR 9778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987) e, ao totalizar 72 h de imersão foram pesados novamente e os resultados obtidos foram expressos na Tabela 20.

Tabela 20 – Peso dos CP's após imersão.

CP	PESO DOS CP'S (kg)			
	0%	5%	10%	15%
1	3,947	3,880	3,786	3,742
2	3,980	3,893	3,804	3,783
3	3,925	4,001	3,829	3,760

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

A média dos valores pesados em kg foram resumidos e apresentados na Tabela 21. Vale ressaltar que para o cálculo do percentual de umidade nas amostras só são utilizados os valores saturados após a imersão de 72 h, portanto, os valores pesados das amostras com 1/3 e 2/3 de seu volume imersos foram desprezados.

Tabela 21 – Média do peso seco e saturado após 72 h dos CP's.

CONDIÇÃO DO CP	PESO DOS CP'S (kg)			
	0%	5%	10%	15%
Antes da imersão	3,770	3,746	3,640	3,603
Após 72 h de imersão	3,951	3,925	3,806	3,762

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

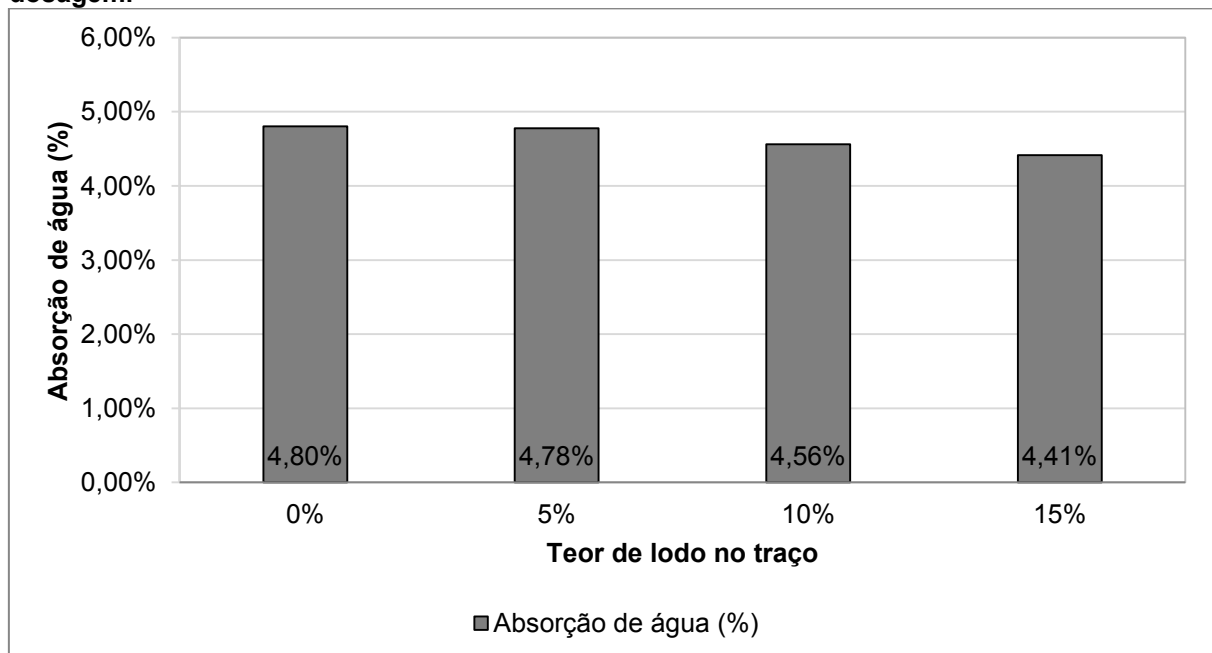
A partir disso, a porcentagem de absorção de água foi calculada através da Equação 14 e seus resultados foram representados na Tabela 22 e na Figura 26.

Tabela 22 – Resultados do ensaio da absorção de água.

	Teor de lodo na dosagem			
	0%	5%	10%	15%
% de absorção de água	4,80%	4,78%	4,56%	4,41%

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

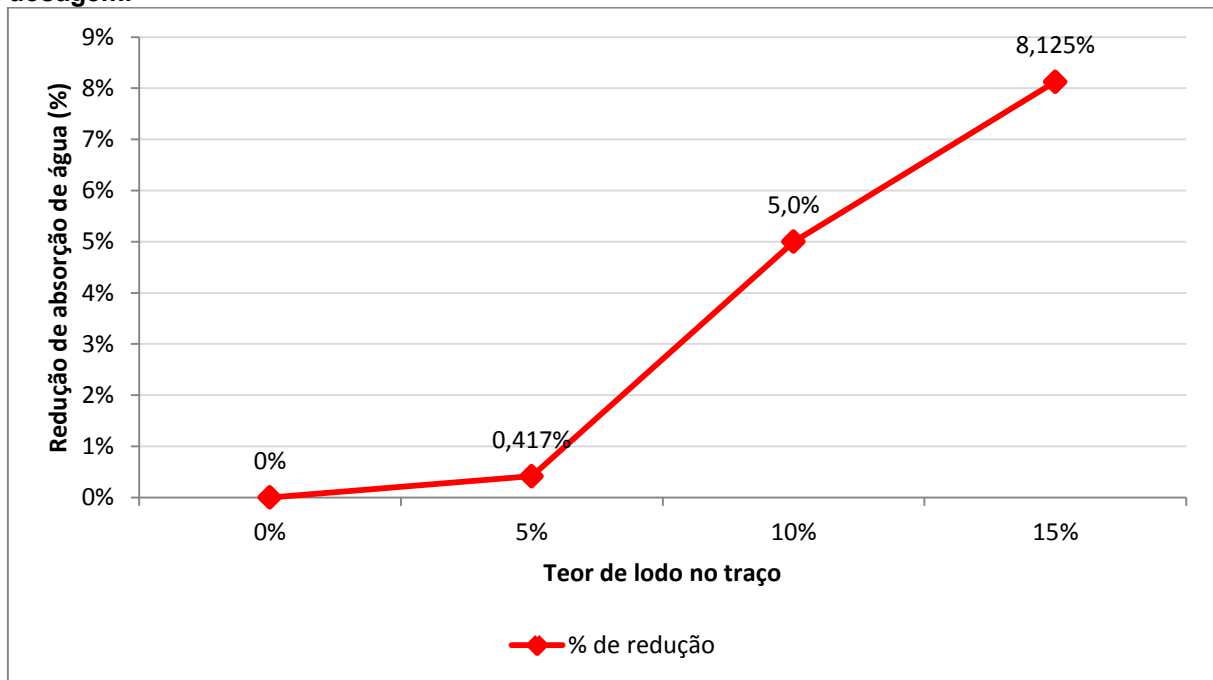
Figura 26 – Variação da porcentagem de absorção de água em função do teor de lodo na dosagem.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Pode ser observado um decréscimo de absorção conforme o aumento da porcentagem de lodo na dosagem, sendo a maior diferença no concreto com 15% de cimento substituído por lodo, chegando a uma diferença de 8,13% na absorção quando comparado com o concreto referência. A porcentagem de redução da absorção de água em função do teor de lodo é demonstrada na Figura 27.

Figura 27 – Porcentagem de redução da absorção de água em função do teor de lodo na dosagem.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2018).

Mehta e Monteiro (2008), baseados no trabalho de Powers, relacionaram corpos de prova com diferentes $f_{a/c}$ e constataram que essa relação é diretamente proporcional à capilaridade da pasta de cimento. Isto é, quanto menor a relação água/ cimento menor é a sua porosidade capilar.

Em geral, os fatores que tendem a melhorar a resistência à compressão dos concretos têm um efeito bom na impermeabilidade. Um exemplo disso é a proporção dos finos presentes na mistura, tendo em vista que quanto maior a quantidade de finos, mais impermeável será o concreto, e os cuidados no adensamento, uma vez que a uniformidade do concreto é responsável pelo índice de vazios da amostra (OLIVEIRA, 2008b).

Por essas razões, a explicação mais provável para a diminuição da absorção de água dos concretos é de que ou lodo, devido a sua granulometria, promove uma

redução de índices de vazios, causando a diminuição da porosidade do concreto e consequentemente reduz o índice de absorção, ou a redução do fator água/ cimento, nos concretos com substituição de cimento por lodo, pode ter interferido na porosidade capilar total das amostras.

No que se diz respeito à durabilidade da pasta de cimento, a impermeabilidade se torna um fator primário (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Em vista disso, esses resultados são satisfatórios do ponto de vista da durabilidade, uma vez que isso pode vir a reduzir a possibilidade de ingresso de elementos prejudiciais ao concreto como, por exemplo, íons de cloreto e sulfato (HOPPEN, 2004). Todavia, por ser um material orgânico, seria necessário um estudo mais aprofundado sobre durabilidade de concretos com incorporação de lodo da ETA.

7 CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados obtidos, pôde-se verificar uma redução na resistência à compressão dos concretos em que o cimento foi substituído parcialmente por porcentagens de lodo da ETA. Todavia, mesmo com uma pequena redução, as resistências se mostraram maiores que o limite mínimo de 20 MPa.

Devido os resultados da trabalhabilidade do concreto, constata-se que as porcentagens até 10% de substituição de cimento por lodo podem ser aplicadas em fabricações de artefatos de concreto não estrutural como, por exemplo, blocos de concreto, tampa de concreto para cobertura de fossas, argamassas de assentamento ou, até mesmo, a construção de pavimentos em concreto de cimento Portland (pavimento rígido). Já para os teores acima deste, a utilização é destinada apenas para aplicações em que a trabalhabilidade não seja primordial como: contrapisos, blocos e placas de vedação, peças decorativas, pavimentos residenciais, entre outras aplicações.

Os ensaios de absorção de água apresentaram resultados satisfatórios e, com isso, indicam uma possível melhora na durabilidade do material, pois ao reduzir a permeabilidade diminui-se a incidência de materiais agressivos ao concreto. Porém, para a utilização desse concreto para fins estruturais seria necessária a realização de estudos mais aprofundados visando à probabilidade de corrosão das armaduras, além de que, por ser um material orgânico, o lodo poderá apresentar problemas futuros de outra natureza.

Conclui-se então que a substituição do cimento por porcentagens de lodo da ETA é uma alternativa viável tanto economicamente, uma vez que promove reduções consideráveis no cimento, que é o material de maior custo dentre os insumos do concreto, quanto ambientalmente, tendo em vista que a redução do consumo de cimento acarretará na diminuição das quantidades de minérios extraídos das jazidas para a fabricação do cimento, tal como o CO₂ durante o aquecimento dos minérios para a obtenção do clínquer, além de ser uma optativa correta para a disposição final do lodo.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J D. **Manual de tecnologia do concreto**. Editora da UCG. Goiânia, 2002.
- ANDOLFATO, R. P. **Controle tecnológico básico do concreto**. Ilha Solteira, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO *PORTLAND*. **Guia básico de utilização do cimento *Portland***. 7 ed. São Paulo, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: 1987 – Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:1998 – Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: 2004 – Resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 71f. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:2018 – Concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 13 f, 2018
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:2015 – Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: 2015 – Concreto de cimento Portland – preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776: 1987 – Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman**. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9937: 1987 – Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: 2003 – Agregados: determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23: 2001 – Cimento portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 7500- 1: 2016 – Materiais metálicos – Calibração e verificação de máquinas de ensaio estático uniaxial**. Rio de Janeiro, 2016.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 1 v.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 12/12/2018.

BOTERO, G.W. **Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectiva de aplicação agrícola**. 2008. 97f. Dissertação (Pós-graduação em Química) – Universidade Estadual Paulista, 2008.

BUNDER, J. **O concreto: sua origem, sua história**. 2016. 20 f. Pós-graduação (Tecnologia e Arquitetura) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

CABRAL, S. C; AVEZEDO, M. A. Materiais alternativos para o cimento Portland. **Revista científica vozes do vale**. n. 10, p. 1-16, 2016.

CASTRO, C. E. C. **Uso de lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) para fabricação de pavimentos pré-moldados de concreto**. 2014. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

CORDEIRO, J. S. Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos das ETAs. In: REALI, M. A. P.– **Noções Gerais de Tratamentos e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 1999. Capítulo 1, p. 1-18.

CORDEIRO, J. S. Processamento de lodos de estações de tratamento de água (ETAs). In: ANDREOLI, C, V. – **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RIMA, ABES, 2001. Capítulo 5, p. 121-142.

COSTA, A.J.C da. **Análise da viabilidade de utilização de lodo de ETA coagulado com cloreto de polialumínio (PAC) composto com areia como agregado miúdo em concreto para recomposição de calçadas: estudo de caso na ETA do município de Mirassol – SP**. 2011. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

COSTA, E.B. da; NOBRE, T.R.S; GUERREIRO, A.Q; MANCIO, M; KIRCHHEIM, A.P. Clínter Portland com reduzido impacto ambiental. **Ambiente Construído**. v. 13, n. 2, p. 75- 86, 2013.

DAYTON, E.A; BASTA, N.T. *Characterization of Drinking Water Treatment Residuals for Use as a Soil Substitute*. **Water Environment Research**. v. 73, n. 1, p. 51-57, 2001.

DI BERNARDO, L; DI BERNARDO, A. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2 ed. Editora rima, São Carlos, 2005.

FIGUEIREDO NETO, A. **Utilização de Lodo de estação de tratamento de água na produção de mudas de árvores com ocorrência no serrado**. 2011. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

GEYER, A. L. B; SÁ, R. R. Importância do controle de qualidade do concreto no estado fresco. **Real Mix**, Aparecida de Goiânia, ano 2, n. 2, jun de 2006. Disponível em: <http://www.realmixconcreto.com.br/downloads/Ano2_informativo_internet.pdf> . Acesso em: 11/12/2018.

GREENBERG, A. E.; AWWA; APHA; WEF. **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. 18 ed. Washington, D. C: *American public health association*, 1992.

HOPPEN, C. **Reciclagem do lodo de ETA centrifugado na construção civil, método alternativo para preservação ambiental**. 2004. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

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

IWAKI, G. Destinação final do lodos de ETAs e ETEs. **Portal tratamento de água**. Barueri, 2017. Disponível em <<https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/destinacao-final-de-lodos-de-etas-e-etes/>>. Acesso em: 02/10/2017.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 113 f. Tese (Livre Docência) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo.

JÚNIOR, B.S. **Caracterização de resíduos de estação de tratamento de água e estudo de reaproveitamento na indústria cerâmica vermelha**. 2011. 73f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

L'HERMITE, R. **Ao pé do muro**. SENAI. Distrito Federal, 1967.

LIMA, C.I. V; COUTINHO, C. O. D; AZEVEDO, G. G. C; BARROS, T. Y. G; TAUBER, T. C; LIMA, S. F. Concreto e suas inovações. **Ciências exatas e tecnológicas**. v. 1, n. 1, p. 31-40, 2014.

MARCOS, O.P; TINÔCO, I.F.F; RODRIGUES, C.S; SILVA, E.N; SOUZA, C.F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 13, n. 3, p. 353-357, 2009.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. Editora IBRACON, São Paulo, 2008.

MODRO, N.L.R. **Desenvolvimento e caracterização de concreto de cimento Portland contendo resíduos poliméricos de PET**. 2008. 102f. Dissertação (Mestrado em engenharia de processos) – Universidade da Região de Joinville, Joinville.

MORALES, G; DANTAS, F. A. S. Verificação e avaliação da reatividade pozolânica da cinza de lodo de esgoto da cidade de Londrina. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**. 38f, São Paulo, 1995.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. Editora Bookman, Porto Alegre, 2016.

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

OLIVEIRA, H.M de. Propriedades do concreto fresco. In: BAUER, L.A.F. **Materiais de Construção**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008a, p. 267-283, 1 v.

OLIVEIRA, H.M de. Propriedades do concreto endurecido. In: BAUER, L.A.F. **Materiais de Construção**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008b, p. 284-313, 1 v.

OLIVEIRA, H.M de. Cimento Portland. In: BAUER, L.A.F. **Materiais de Construção**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008c, p. 35-62, 1 v.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto & construções: Instituto Brasileiro de Concreto - IBRACON**. n, 53, p. 14-19, 2009.

PERTRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13 ed. Editora Globo, São Paulo, 1998.

RIBEIRO, R. F. **Estudo de dosagem de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) em argamassa**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2012.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. Editora Edgar Blucher LTDA, São Paulo, 2001.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de Dosagem do Concreto**. ET-67. 3 ed. São Paulo: IBRACON - Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO. **Relatório Anual 2013**. 2013. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2013.pdf>. Acesso em: 11/12/2018.

SOBRAL, H.S. **Propriedades do concreto fresco**. ET-15. 5 ed. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 2000.

TARTARI, R. **Incorporação de lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, como aditivo em massas para cerâmica vermelha**. 2008. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo.

TARTARI, R; DIAZ-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**. n. 57, p. 288-293, 2011.

TEIXEIRA, S. R; DE SOUZA, S. A; DE SOUZA, N.R; ALÉSSIO, P; SANTOS, G. T. A. Efeito da adição do lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural. **Cerâmica**. n. 52, p. 215-220, 2006.

TSUTIYA, M.T.; HIRATA, A.Y. Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21, 2001, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABES, 2001. p. 1-9.

VERÇOSA, E.J. Introdução. In: BAUER, L.A.F. **Materiais de Construção**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008, p. 1-10, 1 v.

WAGNER, L. F; PEDROSO, K. **Disposição de resíduos das estações de tratamento de água**. *TechnoEng*, v. 1, n. 9, 2014.

WORRELL, E.; PRICE, L.; MARTIN, N.; HENDRIKS, C.; MEIDA, L.O. *Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry*. **Annual Review Energy and the Environment**. v. 26, n. 1, p. 303- 29, 2001.