

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

RUBIA LANA BRITENBACH MEERT

CONCRETO COM INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ÁGUA *IN NATURA* COMO AGREGADO MIÚDO

Joinville

2019

RUBIA LANA BRITENBACH MEERT

CONCRETO COM INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ÁGUA *IN NATURA* COMO AGREGADO MIÚDO

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Daniel Hastenpflug

Joinville

2019

RUBIA LANA BRITENBACH MEERT

CONCRETO COM INCORPORAÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ÁGUA *IN NATURA* COMO AGREGADO MIÚDO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Banca Examinadora:

Dr. Daniel Hastenpflug
Orientador
Presidente

Dr. Helena Paula Nierwinski
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Me. Juliana Cristina Frankowiak
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Me. Valéria Bennack
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Antes de mais nada, agradeço à Deus, meu Pai querido, que a cada instante demonstra seu infinito amor e sua infindável graça por mim. Sem Ele, nada seria possível. Absolutamente nada.

Aos meus pais, Janice e Rosmélío pelo incansável apoio à minha jornada acadêmica. Por todo o sacrifício que tiveram para me proporcionar educação, pelos ensinamentos, lições e valores que me concederam, e principalmente pelo amor que sempre me deram. Amo vocês com todo o meu coração. Dedico essa vitória a vocês.

Ao meu querido irmão Richardt. Meu querido caçula, que sempre compreendeu meus sonhos e sempre me deu suporte para conquista-los, mesmo sabendo das concessões que isso nos causaria.

Meus agradecimentos especiais ao meu excelentíssimo esposo, Tiago. Meu melhor amigo, companheiro de todas as horas. Sempre me apoiando, me incentivando e me fortalecendo com a sua fé, mansidão e principalmente, amor. Obrigada por tudo. Eu te amo de todo o meu coração.

Ao professor Daniel Hastenpflug pela orientação, pelo suporte nas atividades realizadas em laboratório, por todos os ensinamentos a mim concedidos e por sua dedicação constante em me ajudar a realizar tudo com o máximo zelo. Meu muito obrigado.

À professora Valéria Bennack pelo seu suporte quanto a agendamentos de ensaios que foram primordiais para este trabalho.

À professora Helena Paula Nierwinski pelo apoio na correção gramatical e formatação.

Ao meu querido amigo e colega de laboratório Dênio Ferreira, pela colaboração e apoio em diversas etapas do trabalho.

Aos meus colegas de sala de aula e grandes amigos que conquistei nessa jornada, Aline Achy, Bianca Gabardo, Felipe Souza, Gabriela Heizen, Geandle Fagundes, Maria Eduarda Paul e Victor Hugo Dagnoni, por o todo apoio durante a graduação, pelos momentos de estudos compartilhados, descontrações e risadas que me proporcionaram. Vocês ajudaram a tornar o processo muito mais prazeroso.

À Companhia Águas de Joinville por me proporcionarem uma experiência de estágio, na qual culminou neste trabalho. Pela concessão de amostras do lodo de ETA e dados técnicos que enriqueceram o estudo.

À empresa Perville por ceder sua prensa hidráulica, tornando possível a realização do ensaio de resistência à compressão.

À UNISOCIESC pela liberação de seu laboratório e equipamentos que tornou possível a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

À Votorantim pelo fornecimento do cimento.

RESUMO

O tratamento de água para consumo gera uma grande quantidade de resíduo o lodo de estação de tratamento de água. Este rejeito normalmente é descartado em rios, o que pode gerar impactos ambientais tais como assoreamento, alteração da fauna e da flora local. Como forma de aproveitamento deste dejetos, o presente estudo avalia a influência do uso do lodo de estação de tratamento de água (Lodo de ETA), *in natura*, como substituição da areia natural em concretos de cimento Portland, nos teores de 0, 5, 10 e 20% (REF, F05, F10 e F20), em massa. Para avaliar a influência da incorporação do Lodo de ETA nas propriedades do material cimentício no estado fresco, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump test*). Já no estado endurecido, foi avaliada a porosidade aberta, massa específica, absorção de água, resistência à compressão e à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e carbonatação. Observou-se uma crescente redução (de até 50%) da consistência do concreto à medida que se aumentou o teor de substituição. Já no estado endurecido, percebeu-se aumentos constantes da porosidade aberta das amostras com o aumento da adição do lodo de ETA. Como consequência, observou-se uma redução na densidade das formulações e aumento na absorção de água. A resistência à compressão, aos 7, 28 e 91 dias reduziu de maneira contínua, apresentando decréscimos de aproximadamente 27 a 64% ao longo do tempo e à medida que se introduziu lodo de ETA. Já a resistência à tração por compressão diametral seguiu a mesma tendência, ocorrendo uma redução que varia de 29 a 66%. O módulo de elasticidade reduziu frente a adição do lodo em proporções de 17 a 52%. No ensaio de carbonatação, observou-se que a amostra F20 foi 100% carbonatada aos 45 dias de exposição. Sendo assim, concluiu-se que o teor limite de aplicação do lodo de ETA úmido como substituinte do agregado miúdo ao concreto estudado é de 10%.

Palavras-chaves: Concreto. Lodo de ETA. *Slump test*. Resistência à compressão e à tração. Módulo de elasticidade. Carbonatação.

ABSTRACT

The treatment of drinking water generates a large amount of waste, as the sludge from water treatment plant. These tailing are usually deposited in rivers, which can generate environmental impacts such as silting, alteration of local fauna and flora. As a way of exploiting this waste, the present study evaluates the influence of the use of sludge from water treatment plant (ETA sludge), in nature, as a substitution of natural sand in concrete of Portland cement, at levels of 0, 5, 10 and 20% (REF, F05, F10 e F20) by weight. In order to evaluate the influence of the incorporation of ETA sludge on the properties of the cementitious material in the fresh state, slump tests were made. In the hardened state, was evaluated the open porosity, density, water absorption, strength and tensile strength, elasticity modulus and carbonation. There was an increasing (up to 50%) reduction in concrete consistency as the substitution content increased. In the hardened state, constant increases in the open porosity of the samples were observed in addition to the ETA sludge. Therefore, a reduction in density of the formulations and increase in water absorption was observed. The compressive strength at 7, 28 and 91 days reduced continuously, showing decreases of approximately 27 to 64% over time and as ETA sludge was introduced. The tensile strength due to diametrical compression followed the same trend, with a reduction varying from 29 to 66%. The elasticity modulus reduced with the addition of sludge in proportions of 17 to 52%. At carbonation test, looked that F20 was 100% carbonated in the 45 days of exposition. Therefore, it is concluded that the limit level of sludge ETA application as substituted of sand in concrete study is 10%.

Keywords: Concrete. Sludge from water treatment plant. Flowability. Strength. Tensile Strength. Elasticity modulus. Carbonation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo convencional de tratamento de água.	18
Figura 2 – Processos de desidratação.	20
Figura 3 – Fluxograma do procedimento experimental.....	35
Figura 4 – a) Calha Parshall com unidade de mistura rápida; b) Floculador hidráulico; c).....	37
Figura 5 – a) Calha Parshall com unidade de mistura rápida; b) Floculador hidráulico; c).....	38
Figura 6 - a) Cimento CPV ARI; b) Agregado miúdo; c) Lodo de ETA úmido e d) Brita.	38
Figura 7 – Curva granulométrica da brita.....	40
Figura 8 - a) Peneirador vibratório e peneiras e b) Curva granulométrica do agregado miúdo.	41
Figura 9 – a) Moinho de bolas; b) Jarro 300 ml; c) Esferas e d) Estufa.....	42
Figura 10 - Difração de raios-X do lodo de ETA.	43
Figura 11 – a) Peneirador vibratório e peneiras e b) Curva granulométrica do Lodo.	44
Figura 12 – Granulometria da areia e lodo de ETA.	45
Figura 13 – a) Betoneira 120 litros; b) Corpos de prova confeccionados.	49
Figura 14 – Equipamentos <i>slump test</i>	50
Figura 15 – a) Cura saturada; b) Retífica; c) Prensa compressão simples e d) Prensa tração por compressão diametral.	51
Figura 16 – Execução do ensaio de módulo de elasticidade.	52
Figura 17 – a) Abatimento de REF e b) Abatimento de F10.....	56
Figura 18 – Influência do teor de lodo de ETA nas propriedades físicas.....	57
Figura 19 – Relações propriedades físicas. a) Densidade x Absorção; b) Porosidade x Densidade e c) Porosidade x Absorção.	58
Figura 20 – Relação linear da resistência à compressão x teor de lodo de ETA.....	60
Figura 21 – Influência do teor de lodo e da idade dos CPs.	62
Figura 22 - Resistência à tração por compressão diametral.	63
Figura 23 – Relação linear do módulo de elasticidade x teor de lodo de ETA.	64
Figura 24 – Relação linear da penetração de carbonatação x tempo de exposição.	65
Figura 25 – Regiões carbonatadas (em cinza).	66
Figura 26 – Comparativo da porosidade a frente de carbonatação.....	66
Figura 27 – Influência do teor de lodo e da idade dos CPs.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química de alguns lodos de ETA.	21
Tabela 2 – Classificação dos agregados quanto ao módulo de finura.	28
Tabela 3 - Relação entre o índice de consistência e trabalhabilidade.	29
Tabela 4 – Resistência à compressão média do concreto aos 28 dias (em MPa) de acordo com o tipo de cimento e relação a/c.	31
Tabela 5 – Caracterização física do cimento CPV ARI.	39
Tabela 6 – Características físicas da brita 0.	40
Tabela 7 - Características físicas do agregado miúdo.	41
Tabela 8 – Composição química lodo da ETA pelo FRX.	42
Tabela 9 - Características físicas do lodo de ETA.....	44
Tabela 10 – Parâmetros de entrada para desdobramento do traço.	46
Tabela 11 - Obtenção de H.	46
Tabela 12 – Obtenção do teor de argamassa.	46
Tabela 13 – Dosagens adotadas.....	48
Tabela 14 – Normas dos ensaios realizados.	49
Tabela 15 - Equações utilizadas para os cálculos das propriedades físicas.....	51
Tabela 16 - Resultados Slump Test.	55
Tabela 17 - Ensaio de Arquimedes (Propriedades físicas).	56
Tabela 18 – ANOVA do concreto produzido.....	62
Tabela 19 – ANOVA do concreto produzido.....	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Processos no tratamento convencional da água.....	18
Quadro 2 – Alternativas de aplicação / destinação final do lodo de ETA.....	22
Quadro 3 – Trabalhos realizados com emprego do lodo de ETA.	23
Quadro 4 – Tipos de cimento e suas composições em massa.	26
Quadro 5 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.	27
Quadro 6 – Limites da distribuição granulométrica do agregado graúdo.	27
Quadro 7 – Composição do cimento Portland de alta resistência inicial.	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – Água/cimento

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al₂O₃ – Alumina

CERMAT – Núcleo de Pesquisas em Materiais Cerâmicos e Compósitos

cm – Centímetros

CP – Corpo de prova

DRX – Difração de Raios-X

ETA – Estação de Tratamento de Água

ETL – Estação de tratamento de lodo

ETR – Estação de Tratamento de Resíduo

F05 – Formulação com 5% de lodo de ETA

F10 – Formulação com 10% de lodo de ETA

F20 – Formulação com 20% de lodo de ETA

FRX – Fluorescência de Raios-X

g – Gramas

g/cm³ - Gramas por centímetro cúbico

IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto

km – Quilômetros

L/s – Litros/segundo

LDCM – Laboratório de desenvolvimento e caracterização de materiais

mm – Milímetro

MPa – Megapascal

NBR – Norma brasileira

pH – Potencial hidrogeniônico

PVC - Policloreto de vinila

REF – Referência

rpm – Rotações por minuto

SC – Santa Catarina

SiO₂ – Sílica

SST – Sólidos Suspenso Totais

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	Objetivo Geral.....	15
1.1.2	Objetivos Específicos.....	16
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	17
2.1.1	Processos convencionais de ETAs.....	17
2.1.2	Geração do lodo de ETA.....	19
2.1.3	Características do lodo de ETA.....	20
2.1.4	Alternativas à aplicação do lodo de ETA.....	21
2.1.5	Emprego do lodo de ETA na construção civil.....	23
2.2	CONCRETO.....	25
2.2.1	Propriedades do concreto.....	28
2.2.1.1	Propriedade no estado fresco.....	28
2.2.1.2	Propriedades no estado endurecido.....	30
2.2.1.2.1	Resistência à Compressão Axial Simples.....	30
2.2.1.2.2	Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	31
2.2.1.2.3	Módulo de Elasticidade.....	32
2.2.1.2.4	Carbonatação.....	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1	LOCAL DE FORNECIMENTO DO LODO DE ETA.....	36
3.2	MATERIAIS.....	37
3.2.1	Água.....	38
3.2.2	Cimento.....	38
3.2.3	Agregado graúdo.....	39
3.2.4	Agregado miúdo.....	40
3.2.5	Lodo de ETA.....	41
3.3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	45
3.3.1	Dosagem do concreto.....	45
3.3.1.1	Traço de referência.....	45
3.3.1.2	Traços com adição de lodo de ETA.....	48

3.3.2	Confeção dos Corpos de Prova.....	48
3.3.3	Ensaio realizados.....	49
3.3.4	Ensaio no Estado Fresco – <i>Slump Test</i>	49
3.3.5	Ensaio no Estado Endurecido	50
3.3.5.1	Propriedades Físicas	51
3.3.5.2	Resistência à Compressão Axial Simples.....	51
3.3.5.3	Resistência à Tração por Compressão Diametral	52
3.3.5.4	Módulo de Elasticidade Estático	52
3.3.5.5	Carbonatação Acelerada	53
3.3.6	Análise de Variância (ANOVA).....	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
4.1	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO.....	55
4.1.1	Slump Test.....	55
4.2	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO.....	56
4.2.1	Propriedades Físicas	56
4.2.1.1	Relações entre as propriedades físicas.....	58
4.2.2	Resistência à Compressão Axial Simples.....	59
4.2.3	Resistência à Tração por Compressão Diametral	62
4.2.4	Módulo de Elasticidade Estático	63
4.2.5	Carbonatação Acelerada	64
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
6	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento das cidades e da maior exigência de qualidade de vida, o consumo de água potável tem aumentado nas últimas décadas. Em contrapartida, a deficiência de políticas públicas de gestão de mananciais e a ausência, muitas vezes, de consciência sobre as questões ambientais, tem resultado na redução da qualidade da água bruta, obrigando as Estações de Tratamento de Água (ETA) a utilizarem produtos químicos no processo de tratamento, elevando a geração de resíduos sólidos, especialmente o Lodo de ETA (RAMIREZ, 2015).

Segundo Di Bernardo (2012), 37,7% dos municípios brasileiros geram lodo de ETA, e cerca de 67,4% descartam o resíduo em cursos hídricos, geralmente, sem qualquer tratamento. De acordo com Nóbrega (2011), o Brasil gera, em média, cerca de 762.500 m³/dia de resíduos nas ETAs convencionais.

De acordo com Carneiro e Andreoli (2013) a composição química dos lodos de ETA pode variar de acordo com alguns fatores, como:

- Tipologia e qualidade dos mananciais utilizados para captação;
- Bacia hidrográfica onde o rio de captação se encontra (substrato geológico, tipo de solo, tipologia florestal, relevo e declividade);
- Uso e ocupação do solo;
- Fatores climáticos; e
- Coagulante utilizado no tratamento de água.

Além do possível impacto ambiental que o lodo de ETA pode acarretar, este pode causar também riscos à saúde humana devido a presença de agentes patogênicos (SCALIZE; DI BERNARDO, 1999) e de metais pesados em sua composição (BARROSO; CORDEIRO, 2001). Dessa forma, destaca-se mais uma vez, a real importância da correta destinação ou aproveitamento deste resíduo.

Segundo Leite (2001), a reciclagem de resíduos pode ser uma ótima opção para controlar e/ou minimizar danos causados pelo consumo de matérias primas e energia. Neste sentido, a indústria da construção civil, tem se mostrado cada vez mais promissora na utilização de diferentes resíduos gerados por outras indústrias (ou pela própria). Cabe apenas avaliar a viabilidade deste processo, tanto de forma econômica, quanto executiva e ambiental.

Um dos produtos mais consumidos na construção civil é o concreto, sendo este amplamente utilizado em todo o mundo há décadas, de forma cada vez mais expressiva. Por esse motivo, seu processo de fabricação vem evoluindo, a fim de atender as necessidades, como a resistência mecânica exigida, a qualidade, a durabilidade e o menor custo (HAGEMANN, 2011). Em razão deste alto consumo, a quantidade de matérias primas provenientes de recursos naturais é significativa, assim como a energia utilizada para sua fabricação, o que conseqüentemente, gera ainda mais impactos ambientais (ZHANG, 2014).

Uma das soluções para a redução dos impactos ambientais gerados pelo tratamento de água e também pelo emprego do concreto, está na aplicação do lodo de ETA no setor da construção civil, que pode resultar na mitigação de danos à natureza. Alguns estudos do emprego de lodo de estação de tratamento de água em materiais cimentícios, normalmente calcinado, como substituição do cimento (RAMIREZ, 2015).

Neste sentido observa-se que há poucos trabalhos científicos referentes à aplicação deste resíduo em sua forma úmida (*in natura*), o que justificam novos estudos. Desta forma, será possível garantir maior confiabilidade deste uso, assim como, maior domínio e conhecimento da alternativa, de forma a viabilizá-la.

Diante do exposto, a introdução do lodo de ETA *in natura* na fabricação de produtos à base de cimento, como o concreto, pode ser uma alternativa para correta destinação deste resíduo. Desta forma, este trabalho tem como objetivo principal determinar a influência do emprego de lodo de ETA *in natura* como agregado miúdo nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido a partir de ensaios mecânicos (resistência à compressão e à tração na compressão diametral), ensaio de fluidez (abatimento do tronco de cone-*slump test*), propriedades físicas (porosidade, densidade e absorção de água) e durabilidade (carbonatação).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente estudo tem como objetivo avaliar a utilização de lodo de Estação de Tratamento de Água (lodo de ETA) úmido (*in natura*) em substituição ao agregado miúdo na produção de concretos. Avaliar-se-á as propriedades nos estados fresco e endurecido das amostras executadas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o lodo a partir de análises físico-químicas;
- Avaliar a influência da incorporação do lodo *in natura* nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido (resistência à compressão, à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e carbonatação).

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho será dividido em cinco capítulos. O primeiro, como já apresentado, contém a Introdução, na qual apresentou-se a problemática, justificativa, metodologia e os respectivos objetivos, geral e específico.

No capítulo 2, é exposta a Fundamentação Teórica. Neste capítulo é descrito o processo de tratamento de água, geração de resíduos decorrente do tratamento, propriedades do lodo, assim como propriedades e características de concretos no geral.

O capítulo 3 apresenta a metodologia adotada, bem como os materiais e equipamentos utilizados.

No capítulo 4 são expostos os Resultados e Discussões obtidos a partir das análises realizadas.

Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as considerações finais e com elas, a verificação dos objetivos adotados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo estão dispostos assuntos e definições relevantes sobre o tema estudado. A fundamentação teórica está subdividida em tópicos relacionados ao Lodo de ETA e tópicos específicos para caracterização de concretos. Entre os assuntos relacionados ao lodo de ETA, destacam-se os processos convencionais utilizados nas estações de tratamento de água, processo de geração deste resíduo, suas principais características, as alternativas à aplicação do lodo na construção civil e os principais empregos já utilizados no setor.

Quanto à fundamentação teórica relativa a concretos, serão tratados neste tópico as suas principais propriedades no estado fresco e endurecido, destacando-se a influência do lodo de ETA em cada característica avaliada. A propriedade no estado fresco que será aqui citada é a trabalhabilidade. Quanto as propriedades do estado endurecido, serão aqui apresentadas: resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, propriedades físicas, módulo de elasticidade e carbonatação.

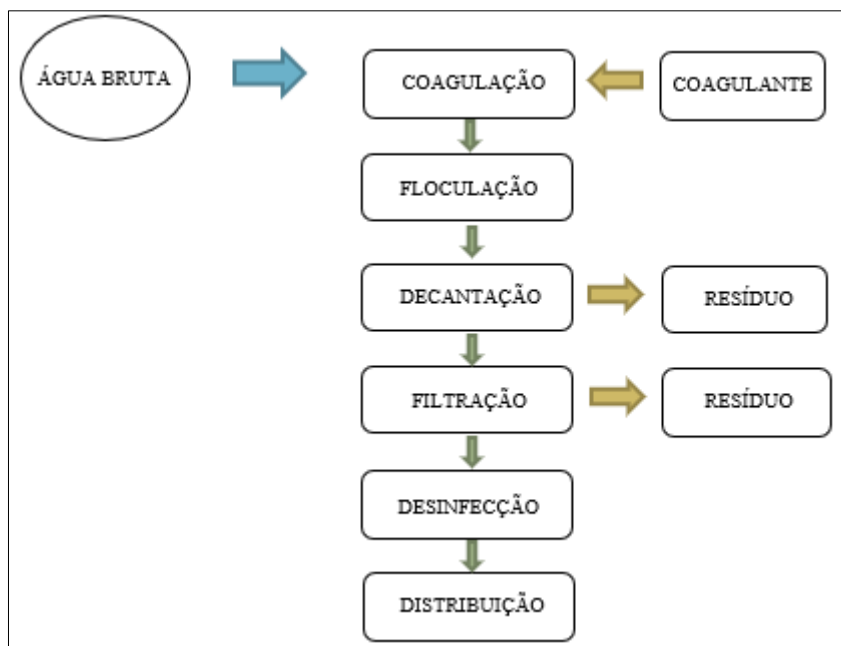
2.1 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

2.1.1 Processos convencionais de ETAs

Com o intuito de atender à população com água potável de qualidade, faz-se necessário realizar processos específicos que envolvem a captação da água bruta, seu tratamento, reserva e por fim, distribuição (RAMIREZ, 2015). Estima-se que no Brasil existem aproximadamente 7500 Estações de Tratamento de Água (ETAs) (GODOY; SALAMONI; ROHDEN, 2017).

Devido ao grau elevado da turbidez, cor e a presença de materiais coloidais nas águas brutas, a maioria das ETAs adotam o sistema convencional de tratamento: mistura rápida (coagulação), mistura lenta (floculação), decantação, filtração, desinfecção e fluoretação (Figura 1) (DI BERNARDO, 2012). No Quadro 1 estão apresentadas breves descrições de cada uma destas etapas.

Figura 1 – Processo convencional de tratamento de água.



Fonte: Adaptado de Godoy, Salamoni e Rohden (2017).

Quadro 1 – Processos no tratamento convencional da água.

Processo	Definição
Coagulação	Processo onde são formados coágulos, promovendo um estado de equilíbrio eletrostaticamente instável das partículas, no seio da massa líquida. Os coagulantes mais usados neste processo são sais de alumínio ou ferro. No Brasil o coagulante mais utilizado é sulfato de alumínio. A coagulação depende da temperatura, pH, cor, turbidez, sólidos totais dissolvidos, força iônica, tamanho das partículas, etc.
Floculação	Ocorre imediatamente após a coagulação. Consiste no agrupamento das partículas eletricamente desestabilizadas (coágulos) de forma a gerar flocos, suscetíveis a serem removidos nas etapas de decantação e filtração.
Decantação/ Sedimentação	É o processo de separação das partículas suspensas mais pesadas devido a ação da gravidade. Estas partículas sofrem um movimento descendente, depositando-se no fundo, formando um lodo que é removido periodicamente.
Filtração	Compreende o processo de remoção das partículas suspensas, colóides e microrganismos presentes na água que escoam através de um meio filtrante, sendo as impurezas ali retidas. Este sistema de filtros é frequentemente composto por pedras, areia e carvão antracito.
Desinfecção	É habitualmente realizada com a adição de cloro a fim de remover ou inativar microrganismos patogênicos presentes na água.
Fluoretação	Nesta etapa há a adição de compostos de flúor às águas de abastecimento públicos, com o intuito de fornecer uma maior saúde dental aos seus usuários.

Fonte: Adaptado de Ramirez (2015).

Como resultado dos processos citados, é obtida a água potável, própria para o consumo humano. Também há a geração do resíduo na Estação de Tratamento de Água, o lodo de ETA.

2.1.2 Geração do lodo de ETA

No processo de tratamento de água convencional, o lodo é produzido em dois momentos: na etapa de decantação e posteriormente na etapa de lavagem dos filtros (RAMIREZ, 2015). Segundo Porras (2007), o volume de lodo proveniente dos decantadores na ETA corresponde de 60 a 95% do total do lodo gerado. Já na água da lavagem dos filtros, de 5 a 40%.

A geração de resíduo provenientes das ETAs vem aumentando nos últimos anos e tem se tornado um grande problema às companhias de água. Porém atualmente em muitos casos os sistemas de abastecimento se restringem apenas ao produto final, a água potável, não dando a atenção necessária à produção do resíduo sólido gerado no final deste processo. A problemática quanto à disposição deste resíduo deve ser analisada de forma íntegra, avaliando-se tanto a produção, tratamento e disposição deste (DI BERNARDO, 2012).

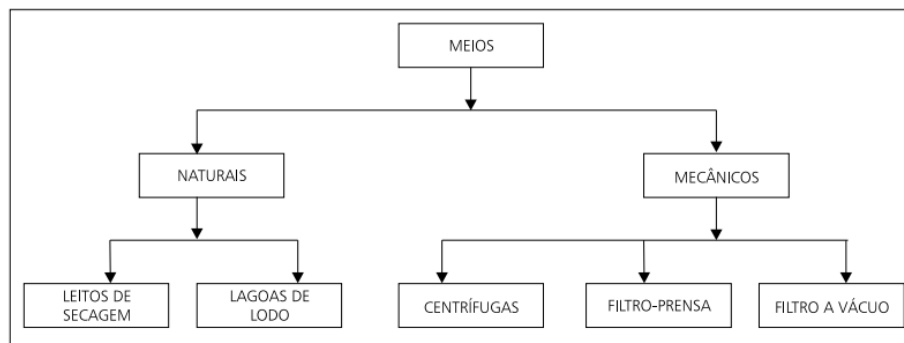
O processo de disposição do lodo de ETA acontece na maioria das vezes por meio de corpos hídricos próximos, procedimento inadequado, ou em aterros sanitários de lixo urbano, procedimento extremamente custoso. Dessa forma, achar um meio de aproveitamento deste resíduo se torna crucial e necessário às companhias de tratamento de água a fim de garantir minimização de custos (RAMIREZ, 2015).

Segundo Di Bernardo (2011), os métodos utilizados para tratamento de resíduos provenientes de ETAs podem incluir: equalização, regularização de vazão, condicionamento, adensamento, desaguamento e em alguns casos, secagem e incineração. Segundo o autor, a regularização de vazão é necessária toda vez que a Estação de Tratamento de Resíduos (ETR) não funciona por meio de lagoas. Este processo ocorre a partir do uso de reservatórios que admitem a vazão de saída do lodo de ETA do processo de lavagem de filtros e descargas dos decantadores. Ainda segundo Di Bernardo (2011), após o enchimento do tanque receptor/clarificador/adensador, aciona-se o equipamento de mistura (agitadores) e, dependendo da quantidade de Sólidos Suspensos Totais (SST), é necessário adicionar proporções de polímero aniônicos variando de 2 a 5 mg pol./g SST de forma a promover um aumento dos SST.

Quanto ao processo de desaguamento (ou desidratação), este pode ocorrer a partir do uso de centrífuga, filtro prensa de esteira, prensa de placas e prensa de parafuso. Estes são os procedimentos mais comuns adotados nas ETRs segundo Di Bernardo (2011). De acordo com Reali et al. (1999), a desidratação ou remoção de parcela de água do lodo, tem por objetivo a

redução do volume deste. A Figura 2 mostra esquematicamente os meios usuais utilizados neste processo segundo o autor.

Figura 2 – Processos de desidratação.



Fonte: Reali et al. (1999).

A definição do tipo de sistema a ser adotado depende de diversos fatores, como: área disponível para implantação, custo de área e dos equipamentos, distância da estação até o destino final, condições climáticas, necessidade de condicionamento, entre outros (REALI, 1999).

2.1.3 Características do lodo de ETA

Segundo Ramirez (2015), o lodo de ETA é composto de água, sólidos suspensos e coloides presentes na água bruta, acrescido ainda de produtos específicos utilizados no processo de tratamento de água. De acordo com Silva e Isaac (2002), este resíduo é caracterizado como um fluido não-newtoniano, volumoso e tixotrópico, ou seja, muda sua viscosidade, apresentando-se em seu estado gel quando em repouso e relativamente líquido quando agitado.

O lodo de ETA é constituído de compostos orgânicos e inorgânicos como algas, bactérias, vírus, areais, argila, siltes, cálcio, magnésio, ferro, manganês e etc (GRANDIN; ALEM SOBRINHO; GARCIA JR, 1993). Segundo Silva, Bidone e Marques (2000) a composição química do lodo apresenta, também, hidróxidos de alumínio, em grande quantidade, advindos da introdução de produtos químicos e/ou polímeros condicionantes, utilizado no processo de tratamento.

Segundo Di Bernardo (2011), a quantidade e qualidade de resíduos produzidos nas ETAs dependem de diversos fatores, entre eles:

- Qualidade da água bruta e tecnologias adotadas no tratamento;
- Características da coagulação: tipo e dosagem do coagulante utilizado;

- Uso, característica e dosagem do auxiliar de coagulação;
- Uso do oxidante;
- Uso de carvão ativado pulverizado;
- Método de limpeza dos decantadores;
- Técnica de lavagem dos filtros;
- Habilidade dos operadores;
- Automação de processos e operações na ETA;
- Reuso da água recuperada no sistema de tratamento.

De acordo com Andreoli e Carneiro (2013), a composição química do lodo de ETA varia em função da tipologia e qualidade dos mananciais onde a água é captada, dos aspectos inerentes à bacia hidrográfica, o uso e ocupação do solo, dos fatores climáticos e do tipo de coagulante utilizado no tratamento. Segue na Tabela 1 diferentes composições químicas de lodos de diferentes ETAs de acordo com referências literárias.

Tabela 1 – Composição química de alguns lodos de ETA.

Autor	Local	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	K₂O	Na₂O	P.F
Rossetto (2017)	Joinville	57,12	32,64	2,26	0,08	0,59	2,13	< 0,05	2,62
Lin (2006)	Taiwan	53,60	20,90	6,60	0,30	1,90	2,90	0,97	ND
Chen et al. (2010)	China	52,10	19,90	6,29	1,68	1,38	2,90	0,97	ND
Hoppen et al. (2005)	Curitiba	16,55	13,07	4,15	0,43	0,15	0,06	0,04	49,79
Portella et al. (2003)	Curitiba	14,10	23,62	8,39	0,33	0,15	0,11	< 0,02	49,01

Fonte: A autora, 2019. ND: Não Determinado.

Dessa forma fica evidente a variabilidade das propriedades químicas de lodos de ETA em função dos fatores supracitados. Logo, é possível concluir uma dificuldade de padronizar aplicações a este resíduo. Para tal, é preciso constantemente caracterizá-lo de forma a garantir o cumprimento da utilização deste à aplicação desejada. Segundo Reali et al. (1999) devido a essa grande diferença entre resíduos gerados em diferentes estações de tratamento de água, há a necessidade de equacionar o problema de forma quase individualizado.

2.1.4 Alternativas à aplicação do lodo de ETA

Conforme Hoppen (2004), definir a destinação final para o lodo de uma estação de tratamento de água é uma das obrigações mais difíceis de ser realizada pelo administrador da empresa de saneamento. Essa dificuldade se dá pelo fato de ser necessário realizar o transporte

do resíduo, bem como atender as restrições do meio ambiente. Dentre as opções possíveis para a destinação de lodos de ETAs destacam-se: lançamentos em cursos d'água, aplicação no solo, disposição em aterro sanitário, incineração, fabricação de cimento e tijolos, e reciclagem em matriz de concreto (HOPPEN et al, 2005).

O lançamento em corpos hídricos pode ser realizado dependendo de certas restrições e da liberação de órgãos ambientais. Esta autorização é função das características e volume do curso d'água. Existem certas restrições, pois essa prática pode alterar a biota aquática e causar degradação da água e sedimentos devido à presença de contaminante nos coagulantes usados no processo de tratamento (RICHTER, 2001).

Segundo Megda et al. (2005) em vários lugares do mundo o tratamento e disposição do lodo de ETA vem sendo utilizado como uma forma de aumento de receita e principalmente, redução de custos às companhias de água e saneamento, assim como redução dos impactos ambientais. Uma das formas de economia neste processo é o aproveitamento do lodo para outras atividades, como: cultivo de grama comercial, compostagem, plantação de cítricos, auxiliar de turbidez e construção civil (Quadro 2).

Quadro 2 – Alternativas de aplicação / destinação final do lodo de ETA.

Destinação final	Características da destinação
Cultivo de grama comercial	O cultivo de grama normalmente é realizado em 5 etapas: preparação do solo, semeadura, crescimento da grama, colheita e transporte. O lodo de ETA pode ser aplicado em sua fase líquida ou após a desidratação. No primeiro caso, o lodo pode ser aplicado tanto na fase de preparação do solo quanto na fase de crescimento da grama. Já para o segundo caso, o lodo pode ser aplicado apenas na fase de preparação do solo.
Compostagem	Atualmente, as pesquisas estão sendo direcionadas para o uso de lodos de ETAs em compostagem, utilizando-se o sistema em leiras, juntamente com restos vegetais, resíduos sólidos domésticos e biossólidos. A adição de lodos de ETAs na compostagem tem mostrado alguns benefícios como ajuste da umidade, fornecimento de traços de minerais, ajuste de pH e servindo, por outra parte, como material para o aumento do volume de composto.
Plantação de cítricos	Nos EUA, os solos onde são cultivadas as plantas cítricas, como laranja e limão, normalmente têm deficiência de ferro. Este elemento é fundamental para o crescimento de culturas de cítricos e pode ser suprido através da aplicação de lodos de ETAs. Entretanto é necessário que a estação de tratamento utilize o sulfato férrico como coagulante. A aplicação de lodo de ETA tem mostrado eficiência quanto outros produtos comerciais, normalmente utilizados para provisão de ferro ao solo.
Auxiliar de turbidez	Uma alternativa de baixo custo nos processos de tratamento de água, é o aproveitamento dos lodos gerados nos decantadores das ETAs como auxiliares nos processos de coagulação e floculação em água bruta de baixa turbidez.

Quadro 2 – Alternativas de aplicação / destinação final do lodo de ETA.

(Continua)

Destinação final	Características da destinação
Construção civil	A possibilidade de reunir os rejeitos advindos do lodo de ETAs em conjunto com os resíduos da construção civil, no intuito de estudar formas de utilização dos mesmos, poderá ser uma interessante estratégia no sentido de minimizar os impactos ambientais gerados por estes dois setores, destacando-se as seguintes aplicações: concreto para contrapiso, argamassa de assentamento não-estrutural e blocos de concreto não-estrutural.

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

2.1.5 Emprego do lodo de ETA na construção civil

Verifica-se no Quadro 3 que diversos trabalhos foram realizados visando a utilização do lodo de ETA na construção civil. A maioria dos trabalhos objetiva o emprego do resíduo em materiais cimentícios e cerâmicos, com predominância de teores médios de lodo, satisfatórios às aplicações desejada, abaixo de 10%, sendo este adicionado na grande maioria das vezes como material inerte (agregado), em seu estado seco (seco em estufa a temperatura média de 105°C).

Quadro 3 – Trabalhos realizados com emprego do lodo de ETA.

Autor/Local	Aplicação/Teores	Principais resultados
Ramirez, 2015 (Foz do Iguaçu)	Concreto (LU e LC) 5, 7, 10 e 20% (w% areia)	A partir dos resultados obtidos constatou-se que a adição de até 20% de LC propiciou aumento nas propriedades mecânicas do concreto, podendo ser empregado em concretos estruturais, desde que realizados estudos de durabilidade. Já a adição de lodo de ETA úmido reduziu significativamente a resistência do concreto, sendo indicado do ponto de vista técnico um teor de substituição de até 5% para aplicações em concretos, desde que não estruturais.
Gastaldini et al, 2015 (Santa Maria)	Concreto (LC) 5 a 30% (w% cimento)	Os resultados indicam que o uso de Lodo de ETA calcinado melhora a resistência de misturas de concreto quando comparado com concreto com cinza de casca de arroz ou sílica ativa.
Hoppen, 2004 (Curitiba)	Concreto (LU) 3, 4, 5, 7, 8 e 10% (w% areia)	No ensaio de resistência à compressão aos 28 dias todos os CPs alcançaram valores inferiores a 27 MPa, atendendo as exigências de fabricação. A comparação dos valores obtidos do concreto com e sem adição do lodo demonstram uma redução nas suas propriedades à medida em que o lodo é acrescido. No entanto, esta redução na qualidade não opõe a utilização do lodo em concretos.

LU: Lodo úmido; LS: Lodo seco; LC: Lodo calcinado.

Quadro 3 – Trabalhos realizados com emprego do lodo de ETA.

(Continua)

Autor/Local	Aplicação/Teores	Principais resultados
Yague et al., 2004 (Barcelona)	Concreto (LS) 0, 2,5, 5 e 10% (w% concreto)	Os concretos foram submetidos a diferentes tipos de ataques acelerados, a fim de avaliar o desempenho a longo prazo. Os seguintes testes foram feitos: Ciclos úmidos / secos combinados utilizando água doce, água do mar e água contendo 5% de sulfatos; Envelhecimento acelerado em autoclave; Carbonatação acelerada. O desempenho do concreto contendo lodo de ETA foi aceitável.
Rosseto, 2017, (Joinville)	Argamassa geopolimérica (LS) 10, 15, 20 e 25% (w% aglomerante)	Concluiu-se que no estado endurecido quando o lodo é adicionado em forma de substituição existe uma redução da resistência à compressão e flexão em relação a formulação de referência. No caso de adição, todas as amostras apresentaram um aumento da resistência à compressão e flexão.
Chen et al., 2010 (China)	Eco cimento (LS) 0 a 10%	A adição de 4 a 7% de lodo na produção de cimento contribui para a resistência à compressão. Metais pesados do lodo foram quase completamente incorporados aos clínqueres.
Alqam et al., 2011 (Jordânia)	Azulejos (LS) 10, 20, 30, 40 e 50% (w% cimento)	O estudo concluiu que os azulejos produzidos, com exceção do com 50% de lodo em substituição ao cimento, cumpriram os requisitos de resistência à ruptura de 2,8 MPa. O ensaio de lixiviação indicou que este fenômeno é insignificante à aplicação.
Lin et al., 2006 (Taiwan)	Tijolos (LC) 70 a 95%	A adição de 80% de lodo sinterizado a 1150°C por 360 min pode gerar um tijolo com uma resistência à compressão de 256 kg/cm ² , com absorção de 2,78% e permeabilidade de 0,016 cm/s.
Chaves, 2007 (Campinas)	Tijolos e blocos de concreto para vedação (LS e LU) 0 a 25%	Os resultados mostraram que a umidade do lodo influenciou significativamente na qualidade dos tijolos tipo solo-cimento, sendo possível sua confecção somente com teor de umidade abaixo de 50% de sólidos totais. Referente aos blocos tipo concreto não estruturais (vedação), com até 3% de lodo seco ou 1% de lodo úmido, agregado de entulho nas duas matrizes avaliadas (concreto e cerâmica) e 10% de cimento, poderiam servir de base para uma produção industrial, sendo destinados à infraestrutura urbana.
Pozzobon et al., 2010 (Foz do Iguaçu, PR)	Cerâmica (LS) 6; 8; 10; 12 e 15%	O lodo deve ser submetido a tratamento prévio, uma vez que <i>in natura</i> favorece a ocorrência de defeitos nas peças sinterizadas. A incorporação de lodo à massa cerâmica altera sua coloração, o que pode ser explorado no uso artesanal.
Paixão et al., 2008 (Brumandinho, MG)	Cerâmica (LS e LC) 2, 5 e 10%	A adição do lodo à massa de cerâmica vermelha em frações de 2 a 10%, em peso, causou diminuição da resistência à flexão do corpo seco a 110 °C. Já a calcinação e a cominuição do lodo possibilitaram aumentar a resistência à flexão em relação à incorporação do lodo bruto, diminuindo a severidade das micro trincas.
Tartari et al., 2011 (Foz do Iguaçu, PR)	Cerâmica (LU) 4; 8; 12 e 16%	O lodo não pode ser usado como componente majoritário em massas cerâmicas. No entanto, pode ser usado em pequenas quantidades em massas argilosas (até o limite de 8%), nas condições de umidade reais de saída da centrífuga.
Kizinievic et al., 2013 (Lituânia)	Cerâmica (LC) 5; 10; 20; 30 e 40%	A adição de 5% de lodo aumenta a densidade do corpo cerâmico de 5% a 14%, a resistência à compressão de 36% a 50%, reduz a absorção de água de 33% a 60%, e a porosidade de 19-45%. Com adição de 40%, diminui-se a densidade de 10% a 22%, a resistência à compressão de 43% a 49%, aumenta-se a absorção de água de 70% a 100% e a porosidade em cerca de 55%.

LU: Lodo úmido; LS: Lodo seco; LC: Lodo calcinado.

Quadro 3 – Trabalhos realizados com emprego do lodo de ETA.

(Continua)

Autor/Local	Aplicação/Teores	Principais resultados
Oliveira e Holanda, 2008 (Campo dos Goytacazes, RJ)	Cerâmica (LS) 0; 5; 10 e 15%	Lodo adicionado em até 15%, em peso, à massa argilosa para fabricação de cerâmica vermelha não apresentou efeitos significativos sobre a microestrutura e as propriedades físico-mecânicas avaliadas (retração linear, absorção de água, massa específica aparente e tensão de ruptura à flexão).
Vitorino et al., 2009 (Campo dos Goytacazes, RJ)	Cerâmica (LS) 3; 5; 7 e 10%	A maior restrição está relacionada à redução da resistência mecânica da cerâmica. Deve-se incorporar quantidades que possibilitem à cerâmica alcançar os valores estipulados por norma para determinado tipo de produto.
Vieira et al., 2008 (Campo dos Goytacazes, RJ)	Cerâmica (LS) 0 e 10%	A incorporação de lodo de ETA possibilita o aparecimento de alumina e fase feldspática. Os resultados obtidos comprovam que a reciclagem de lodo de ETA em cerâmica argilosa deve ser realizada em pequenos percentuais para minimizar seu efeito deletério na qualidade da cerâmica.
Martínez-García et al., 2012 (Jaen, Espanha)	Cerâmica (LS) 0; 1; 2,5; 5; 7,5; 10; e 15%	Este trabalho demonstrou que o setor da cerâmica pode ser um receptor do lodo de ETA, desde que este seja incorporado em baixas percentagens (até 5% em peso).

Fonte: Da autora, 2019. LU: Lodo úmido; LS: Lodo seco; LC: Lodo calcinado.

A partir da literatura apresentada, percebe-se que são poucos estudos referentes à produção de concretos com utilização do lodo de ETA, em seu estado úmido, como agregado miúdo. Assim, vale a pena destacar a importância de realizar estudos mais aprofundados para esta aplicação, de forma a viabilizá-la em aspectos econômicos e ambientais.

2.2 CONCRETO

O concreto é qualquer produto ou massa que é produzido a partir do uso de um meio cimentante, sendo este geralmente a reação entre cimento hidráulico e água. O concreto pode ser produzido com vários tipos de cimento e também conter pozolanas (sílica ativa, cinzas volantes, escória de alto forno, etc), adições minerais, agregados de concreto reciclado, aditivos, polímeros e fibras (NEVILLE E BROOKS, 2013).

Devido suas propriedades de versatilidade, durabilidade e desempenho, resultando em uma vida útil adequada às construções a um custo competitivo, o concreto é o material estrutural mais utilizado na indústria da construção civil (ISAIA, 2011). Estima-se que o consumo de concreto atualmente seja em torno de 11 bilhões de toneladas cúbicas ao ano (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

O concreto de cimento hidráulico é composto basicamente por aglomerante, agregados e água. O aglomerante é formado por uma mistura de cimento e água. O cimento Portland,

segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), é composto por clínquer e adições. O clínquer, principal componente do cimento, é formado por calcário e argila, sendo este obtido a partir da clínquerização em um forno a temperatura de 1450°C. Além disso, com o intuito de evitar a pega instantânea do cimento, é adicionado também em sua composição o gesso. Algumas outras adições podem ser utilizadas, variando assim o cimento comercial final a ser formado, conforme exposto no Quadro 4.

Quadro 4 – Tipos de cimento e suas composições em massa.

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma brasileira
		Clínquer + gesso	Escória de alto forno granulada	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático	
Comum	CP I	100	-			NBR 5732/91
	CP I-S	99-95	1-5			
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578/91
	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	NBR 5735/91
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736/99
Alta resistência inicial	CP V-ARI	100-95	-	-	0-5	NBR 5733/91

Fonte: Adaptado de ABCP (2002).

Os agregados podem ser classificados em dois tipos: miúdos e graúdos. Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009) a diferença se dá pela granulometria, ou seja, pela quantidade de material passante e retido em diferentes aberturas de malha de peneiras. Segundo a norma, o agregado miúdo é o material passante na peneira com abertura de malha de 4,75 mm e retido na de 150 µm. O agregado graúdo é o material passante na peneira de abertura 75 mm e retido na de 4,75 mm. Além disso, há limites de distribuição granulométrica para os agregados, conforme consta nos Quadro 5 e Quadro 6.

Quadro 5 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISSO 3310-1)	Porcentagens em massa retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

Notas:
¹ O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90
² O módulo de finura da zona utilizável varia de 2,90 a 3,50

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009).

Quadro 6 – Limites da distribuição granulométrica do agregado graúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISSO 3310-1)	Porcentagens em massa retida acumulada				
	Zona granulométrica (d/D) ¹ / Tipo				
	4,75/12,5 (Brita 0)	9,5/25 (Brita 1)	19/31,5 (Brita 2)	25/50 (Brita 3)	37,5/75 (Brita 4)
75 mm	-	-	-	-	0-5
63 mm	-	-	-	-	5-30
50 mm	-	-	-	0-5	75-100
37,5 mm	-	-	-	5-30	90-100
31,5 mm	-	-	0-5	75-100	95-100
25 mm	-	0-5	5-25	87-100	-
19 mm	-	2-15	65-95	95-100	-
12,5 mm	0-5	40-65	92-100	-	-
9,5 mm	2-15	95-100	-	-	-
6,3 mm	40-65	-	-	-	-
4,75 mm	80-100	-	-	-	-
2,36 mm	95-100	-	-	-	-

¹ Zona granulométrica corresponde à menor (d) e maior (D) dimensões do agregado graúdo.

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009).

Os agregados são também classificados de acordo com o seu módulo de finura, sendo este obtido pela análise do ensaio de granulometria, conforme apresentado na Tabela 2 (BAUER, 2008). Esta classificação é comumente utilizada para agregados miúdos.

Tabela 2 – Classificação dos agregados quanto ao módulo de finura.

Classificação	Módulo de finura
Muito finas	$1,35 < MF < 2,25$
Finas	$1,71 < MF < 2,78$
Médias	$2,11 < MF < 3,28$
Grossas	$2,71 < MF < 4,02$

Fonte: Bauer, 2008.

2.2.1 Propriedades do concreto

As propriedades do concreto podem ser avaliadas em seu estado fresco e endurecido. A propriedade mais importante do concreto em seu estado fresco é a trabalhabilidade. Em seu estado endurecido, o concreto é comumente avaliado em relação a sua resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade e durabilidade (carbonatação, lixiviação de metais).

2.2.1.1 Propriedade no estado fresco

Segundo Bastos (2006), a fase inicial do concreto fresco é compreendida por um período de 1 a 5 horas. É neste período que o concreto deve ser misturado, transportado, lançado e adensado. Logo, ter o conhecimento do estado fresco é extremamente importante. As propriedades deste estado, que devem ser levadas em consideração, segundo Helene e Andrade (2007), são a trabalhabilidade e consistência.

Segundo Limeira (2000), um concreto trabalhável apresenta características adequadas ao uso que se destina e ao método de lançamento, adensamento e acabamento, sem apresentar segregação ou exsudação. Este pode ser avaliado através do parâmetro de consistência do concreto fresco. A consistência pode ser definida como sendo a maior ou menor capacidade do concreto de se deformar sobre a ação de sua própria massa (ação da gravidade). Para esta quantificação o ensaio de abatimento de cone é considerado o mais adequado, também conhecido como *slump test*, sendo este realizado de acordo com ABNT/NBR NM 67 de 1998. Como resultado deste ensaio tem-se a medida do índice de consistência.

Neville (1997) indica relações entre o índice de consistência e trabalhabilidade, conforme consta na Tabela 3.

Tabela 3 - Relação entre o índice de consistência e trabalhabilidade.

Trabalhabilidade	Abatimento (mm)
Abatimento zero	0
Muito baixa	5 a 10
Baixa	15 a 30
Média	15 a 75
Alta	80 a 155
Muito alta	160 ao desmoronamento

Fonte: Neville, 1997.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), Bastos (2006) e Helene e Andrade (2007), a trabalhabilidade e coesão dos concretos variam de acordo com alguns parâmetros específicos, sendo estes:

- **Quantidade de água (em relação aos sólidos totais):** quanto maior a quantidade de água, menor a consistência e coesão de um concreto;
- **Quantidade, tipo e finura do cimento:** cimentos mais finos aumentam a necessidade de água, isso porque a área superficial é maior, assim como a coesão. Em dosagens com mais cimento, isso também é perceptível. Além disso, cimentos com partículas mais arredondadas (com cinza volante por exemplo), aumentam a fluidez do concreto, quando se mantém constante o teor de água;
- **Teor de argamassa (relação cimento com os agregados):** quanto maior o teor de argamassa nas dosagens de concreto, maior será a coesão, aumentando a demanda de água para a mesma consistência;
- **Granulometria e forma dos agregados:** traços com agregados de granulometria constante, desde que não muito grossa, tendem a proporcionar um aumento na coesão e na fluidez dos concretos, para uma dada quantidade de água adicionada à mistura. Agregados muito grossos diminuem a consistência e coesão ao passo que os finos tendem ao processo inverso, desde de que a granulometria não seja totalmente uniforme. Quanto ao formato dos grãos, os arredondados aumentam a fluidez, e os lamelares, diminuem;
- **Presença de material pulverulento:** a presença de pó nos agregados aumenta a coesão, diminuindo a consistência. Isso porque há um aumento da área superficial das partículas;
- **Uso de aditivos:** aditivos como plastificantes, superplastificantes, incorporadores de ar, podem alterar significativamente a consistência e coesão na trabalhabilidade dos concretos.

Conclui-se que a quantidade de água, teor de finos, forma, dimensão e distribuição dos grãos e uso de aditivos são os principais intervenientes na trabalhabilidade de concretos.

Trazendo para a aplicação desejada neste estudo, e com conhecimento da granulometria do lodo de ETA, espera-se que, ao passo que haja a introdução do lodo nas misturas, haverá um aumento do teor de finos, logo, um aumento na coesão e redução na consistência.

2.2.1.2 *Propriedades no estado endurecido*

A aplicação de um determinado material é definida a partir da sua capacidade de suportar uma dada carga. A aplicação dessa carga, chamada de tensão (força por unidade de área) resulta em uma deformação. A relação tensão-deformação dos materiais é expressa em termos de resistência, módulo de elasticidade, ductilidade e tenacidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A seguir serão abordadas as principais propriedades do concreto em seu estado endurecido como resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e carbonatação.

2.2.1.2.1 *Resistência à Compressão Axial Simples*

Segundo Limeira (2000), dentre as propriedades do concreto no estado endurecido, a resistência à compressão é considerada a mais relevante na avaliação do mesmo. A resistência à compressão é obtida a partir do ensaio de compressão axial, sendo o valor obtido aos 28 dias de cura o índice geral de resistência do concreto. As recomendações para realização deste ensaio estão descritas na ABNT/NBR 5738 (2015). Baseado nesta resistência, Mehta e Monteiro (2014) dividem o concreto em categorias como:

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

Segundo Scandiuzzi e Andriolo (1986), a resistência à compressão varia com a idade do concreto, presença de umidade, composição química e características do cimento e

adensamento do concreto. Além disso, esta resistência é altamente influenciada pela relação água/cimento da mistura executada.

O Instituto Brasileiro de Concreto (IBRACON, 2010) apresentou relações entre a resistência à compressão de concretos com a presença de água, relação água/cimento, e o tipo de cimento utilizado. Estas relações estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Resistência à compressão média do concreto aos 28 dias (em MPa) de acordo com o tipo de cimento e relação a/c.

Classificação do cimento	Relação água/cimento				
	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
CP I 32	28	32	37	41	47
CP II 32	24	28	31	35	39
CP II 40	28	32	36	41	46
CP III 32	23	27	31	36	41
CP III 40	27	32	37	42	49
CP IV 32	24	28	32	36	41
CP V ARI RS	30	33	38	42	46
CP V ARI	33	38	42	47	53

Nota: Agregados de origem granítica, diâmetro máximo dos agregados de 25 mm, abatimento entre 50 e 70 mm, concretos com aditivo plastificante normal.

Fonte: IBRACON (2010).

Os agregados também influenciam na resistência à compressão. No caso dos agregados miúdos, estes influenciam a resistência a partir da sua granulometria, já os agregados graúdos, a partir de sua forma e textura do grão. No caso dos agregados miúdos, quanto mais finos forem, mais superfície específica terão, exigindo assim uma maior presença de água, acarretando numa redução na resistência.

Considerando novamente na aplicação do lodo de ETA em concretos como agregado miúdo, sabe-se que o lodo possui partículas mais finas que os agregados miúdos comumente utilizados, logo, as misturas com o resíduo exigirão uma maior quantidade de água. Se assim ocorrer, espera-se uma redução na resistência à compressão em relação a amostra de referência.

2.2.1.2.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Segundo Muley, Varpe e Ralwani (2015) a resistência à tração do concreto é aproximadamente um décimo da resistência à compressão. Entretanto, a resistência à tração

pode ser o limitante de ruptura para uma estrutura, como vigas solicitadas por cargas de flexão e pavimentos rodoviários. Devido a isso, é fundamental conhecer este parâmetro.

Para avaliação da resistência à tração por compressão diametral, os corpos de provas (CPs) em formato cilíndrico, são submetidos a cargas de compressão ao longo de suas linhas axiais diretamente opostas, num intervalo de 0,7 a 1,3 MPa até a ruptura (MEHTA e MONTEIRO, 2014). De acordo com Neville (1997), além de ser um ensaio mais simples de ser executado do que o ensaio de tração direta, gera resultados mais uniformes, cerca de 5 a 12% maiores que a tração direta.

2.2.1.2.3 *Módulo de Elasticidade*

No concreto estrutural as propriedades mais importantes são os índices de resistência obtidos por ensaios mecânicos e o módulo de elasticidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Isso porque o módulo de elasticidade é utilizado no cálculo estrutural, sendo, em aspecto de projeto, extremamente importante conhecer as deformações dos elementos estruturais.

Pelo fato do concreto ser um material que não obedece a lei de Hooke (não é verdadeiramente elástico), as deformações não ocorrem de forma uniforme ao longo de uma peça de concreto. Sendo assim, tanto sob esforços de tração como compressão, a determinação do módulo de elasticidade é mais complexa (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Segundo Bastos (2006), existem expressões que correlacionam a resistência à compressão de concretos com os seus módulos de elasticidade, pois sabe-se que são propriedades que caminham na mesma direção. Dessa forma, destaca-se novamente a importância da obtenção deste parâmetro como forma de avaliação de suas propriedades.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), existem os módulos de elasticidade estático, dinâmico e à flexão.

- **Módulo de elasticidade estático:** é dado pela declividade da curva tensão-deformação para o concreto sob carga uniaxial.
- **Módulo dinâmico de elasticidade:** corresponde a uma deformação instantânea muito pequena. É dado aproximadamente pelo módulo tangente inicial, ou seja, módulo tangente para uma linha traçada a partir da origem.
- **Módulo de elasticidade à flexão:** determinado a partir do ensaio de flexão em uma viga carregada. Este módulo é normalmente utilizado para projeto e análise de pavimentos.

Existem diversos fatores que influenciam o módulo de elasticidade (METHA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997):

- Matriz da pasta de cimento:
 - Relação água/cimento: quanto menor, maior o módulo;
 - Adições minerais: a depender da composição química;
 - Teor de vazios: quanto menor, maior o módulo;
 - Grau de hidratação do cimento: se muito elevado, pode acarretar fissuras térmicas, diminuindo o módulo.

- Agregados:
 - Porosidade: quanto menor, maior o módulo;
 - Densidade: quanto maior, maior o módulo;
 - Dimensão máxima: quanto menor, menor a tendência da presença de vazios, logo, maior o módulo;
 - Quantidade: quanto menor, maior o teor da pasta de cimento, logo, maior o módulo;
 - Granulometria: quanto mais bem graduado, menor o teor de vazios, logo, maior o módulo;
 - Forma: quanto menos lamelar, maior o módulo;
 - Textura da superfície: quanto mais irregular, maior a aderência com a pasta de cimento, logo, maior o módulo;
 - Composição mineralógica.

- Zona de transição.

2.2.1.2.4 Carbonatação

Entre as patologias que atacam estruturas de concretos está a corrosão da armadura. Este processo é consequência do fenômeno conhecido como carbonatação.

A carbonatação é um processo físico-químico que ocorre lentamente entre os produtos alcalinos do concreto com gases ácidos. Esses produtos alcalinos são formados pelos íons de sódio (Na^+), potássio (K^+) e principalmente cálcio (Ca^{2+}) que são provenientes da reação de hidratação do cimento. Já os gases ácidos que podem ser encontrados no

ar atmosférico, principalmente em ambientes urbanos, são o gás sulfídrico (H_2S), o dióxido de enxofre (SO_2) e o gás carbônico (CO_2), este último com maior preponderância (FERREIRA, 2013, pg. 28).

Segundo Silva (2007), a carbonatação está diretamente relacionada com a penetração do gás dióxido de carbono, através dos poros, para o interior do concreto. Na presença da água, o dióxido de carbono transforma-se em ácido carbônico, que é reativo. De acordo com Verbeck (1958) e Roy et al. (1999), a taxa de umidade que favorece a carbonatação está entre 50 e 75%.

A relação água/cimento está diretamente ligada a atuação da carbonatação em estruturas de concreto. Isso porque, quanto maior essa relação, maior é o índice de vazios do concreto, ou seja, maior a quantidade de poros e, conseqüentemente, sua interconexão, sendo estes favoráveis a penetração do dióxido de carbono ao interior do concreto. Por outro lado, ao reduzir-se essa relação, há uma mitigação na profundidade da carbonatação, uma vez que é minorada a continuidade capilar dos poros devido à alteração da microestrutura da pasta de cimento, podendo os poros serem desconectados (SILVA, 2007).

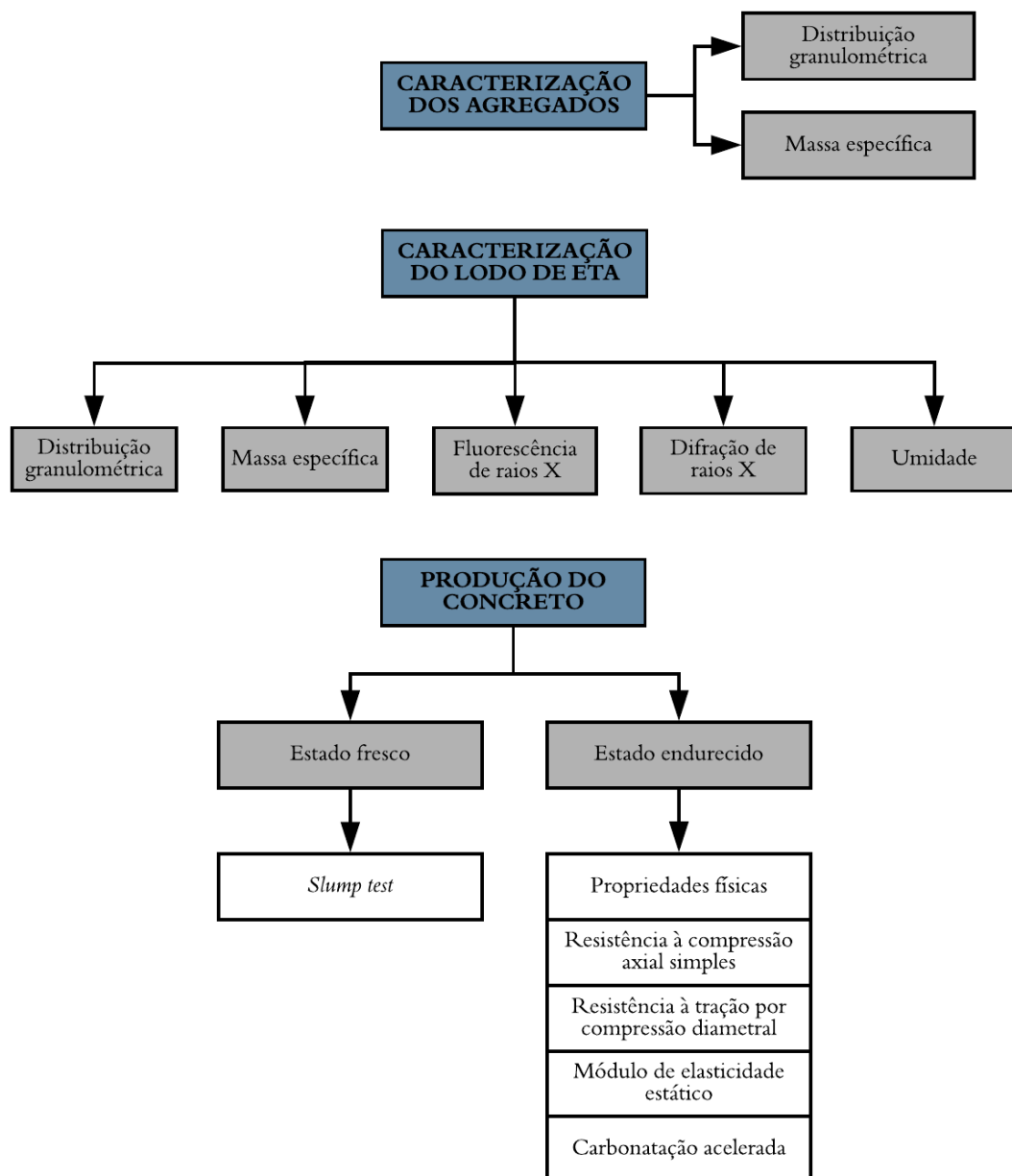
A carbonatação se caracteriza pela formação de uma região homogênea de avanço, promovendo a formação de zonas diferentes de pH. Segundo Papadakis, Vayenas e Fardis (1991), em condições normais de exposição, o fenômeno da carbonatação promove a diminuição do pH do concreto para valores inferior a 10. Ferreira (2013) explica essa redução a partir do consumo de Hidróxidos de sódio ($NaOH$), potássio (KOH) e cálcio ($Ca(OH)_2$).

Por se tratar de uma reação natural e lenta, diversos estudos sobre a carbonatação utilizam-se do processo acelerado, também conhecido como Câmara de Carbonatação Acelerada. Este processo consiste em submeter amostras a elevadas concentrações de dióxido de carbono em uma câmara apropriada. A grande dificuldade desse ensaio é conseguir uma representatividade adequada em relação ao fenômeno natural, tanto pela escolha e realização do pré-condicionamento das amostras, quanto pelas condições de execução do ensaio e definição dos fatores influentes (FERREIRA, 2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o local de fornecimento do lodo de ETA utilizado na pesquisa, assim como os materiais e as metodologias utilizadas no desenvolvimento experimental do trabalho. A Figura 3 apresenta o fluxograma de atividades realizadas.

Figura 3 – Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: A autora, 2019.

3.1 LOCAL DE FORNECIMENTO DO LODO DE ETA

O lodo de ETA usado neste trabalho de pesquisa foi coletado na ETA Cubatão, cuja localização se dá na rodovia SC 418, km 3,5 na cidade de Joinville/SC.

A ETA tem capacidade de tratamento de 1200 L/s para Joinville e 10 L/s para o município de Araquari (KOBİYAMA; MOTA; MENEGHINI, 2009). O manancial de captação da água bruta, Rio Cubatão, pertence à bacia hidrográfica Rio Cubatão Norte. Possui uma área de 492 km², um perímetro de 159,16 km e uma extensão do canal de aproximadamente de 88 km (MAIA et al., 2014).

O tratamento de água realizado na ETA Cubatão segue o processo convencional, sendo as seguintes etapas realizadas: captação da água bruta, mistura rápida (adição do coagulante), floculação, decantação, filtração, câmaras de contato (cloração), fluoretação e correção do pH.

Na etapa inicial de tratamento, após a captação da água bruta, faz-se a introdução do coagulante sulfato de alumínio na calha Parshall (-a) para mistura rápida. Em seguida ocorre o processo de floculação, com agitação lenta, onde o floculador é composto de 4 canais de floculação com fluxo vertical e volume de 1.918 m³ (-b). A água floculada segue para os decantadores, compostos de 2 unidades, do tipo vertical de alta taxa, equipados com placas paralelas de PVC e volume unitário de 2.200 m³ (-c). Nesta etapa as partículas sólidas sedimentam e a água clarificada passa para o processo de filtração.

A filtração da água na ETA Cubatão é realizada através de 16 unidades filtrantes, do tipo “filtro russo” (-d). O processo é de fluxo ascendente, sendo que cada unidade possui 40 m² de área filtrante. A água filtrada passa pela adição de cloro na forma gasosa, processo de desinfecção, introdução de flúor para prevenção à cárie dentária, e por fim, introdução de cal hidratada para correção de pH. Após estes processos, a água é encaminhada à rede de distribuição para enfim chegar aos consumidores.

A água de lavagem dos filtros e o resíduo das descargas dos decantadores são encaminhados à Estação de Tratamento de Lodo (ETL). Na ETL, estes efluentes são armazenados em um tanque de equalização. Este efluente é recalado para um clarificador, semelhante a um floccodcantador de alta taxa. A água clarificada é destinada ao rio Cubatão e o lodo adensado é armazenado em um tanque de lodo. O resíduo é então direcionado aos equipamentos de desague que consistem em prensas parafusos (-e). São dois equipamentos compostos por uma rosca sem fim, que realiza a dispersão líquido-sólido. O teor de sólidos obtido no processo de desague gira em torno de 22 a 25%.

Na ETL, nas etapas de adensamento e desaguamento, utiliza-se o polímero aniônico o qual possui alto peso molecular e baixa densidade de carga. Sua dosagem é feita a partir de testes visuais na floculação e conforme a qualidade da água clarificada.

Após estes processos, é gerado um resíduo conhecido como lodo de ETA. Segundo dados da própria CAJ, a produção média diária de lodo na ETA Cubatão em 2017 foi de 9,17 toneladas, o que corresponde algo em torno de 3.300 toneladas de lodo por ano. Atualmente, todo esse lodo é disposto em aterros sanitários na região de Joinville. Segundo a CAJ, no ano de 2017, foram dispendidos custos mensais médios (disposição e transporte) de R\$ 38.690,42 à companhia, chegando a aproximadamente em R\$ 465.000,00/ano.

Figura 4 – a) Calha Parshall com unidade de mistura rápida; b) Floculador hidráulico; c) Decantadores de alta taxa com placas de PVC; d) “Filtro russo”; e) Prensa parafuso.



Figura 5 – a) Calha Parshall com unidade de mistura rápida; b) Floculador hidráulico; c) Decantadores de alta taxa com placas de PVC; d) “Filtro russo”; e) Prensa parafuso.

(Continua)

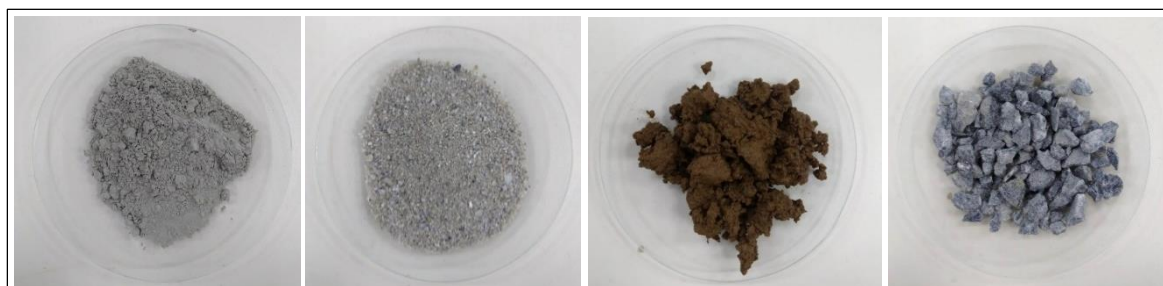


Fonte: Rosseto, 2017.

3.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados na produção das misturas foram água, cimento, brita, areia e lodo de ETA *in natura* (Figura 6).

Figura 6 - a) Cimento CPV ARI; b) Agregado miúdo; c) Lodo de ETA úmido e d) Brita.



(a)

(b)

(c)

(d)

Fonte: Da autora, 2019.

3.2.1 Água

A água utilizada foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Joinville/SC.

3.2.2 Cimento

Como aglomerante utilizou-se o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI). Suas características físicas atendem às especificações da ABNT NBR 5733/91, conforme

apresentado na Tabela 5. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), este cimento tem a peculiaridade de atingir alta resistência inicial devido a sua composição, onde há uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer. Além disso, há uma moagem mais fina do cimento, fazendo com que este, ao reagir com a água, adquira resistências elevadas com maior velocidade.

Tabela 5 – Caracterização física do cimento CPV ARI.

ENSAIO		RESULTADO
Resíduo #200		0,0 %
Resíduo #325		0,9 %
Expansibilidade à quente		0,4
Peso específico		3,1 g/cm ³
Superfície específica		5038 cm ² /g
Resistência mecânica (MPa)	1 dia	24,4
	3 dias	34,8
	7 dias	40,4
	28 dias	48,5

Fonte: Boletim de ensaios da Votorantim, 2018.

O Quadro 7 apresenta a composição típica desse tipo de cimento.

Quadro 7 – Composição do cimento Portland de alta resistência inicial.

Tipo de cimento	Sigla	Composição (% em massa)		Norma brasileira
		Clínquer + gesso	Material carbonático	
Alta resistência inicial	CPV ARI	100 – 95	0 – 5	NBR 5733

Fonte: ABCP, 2002.

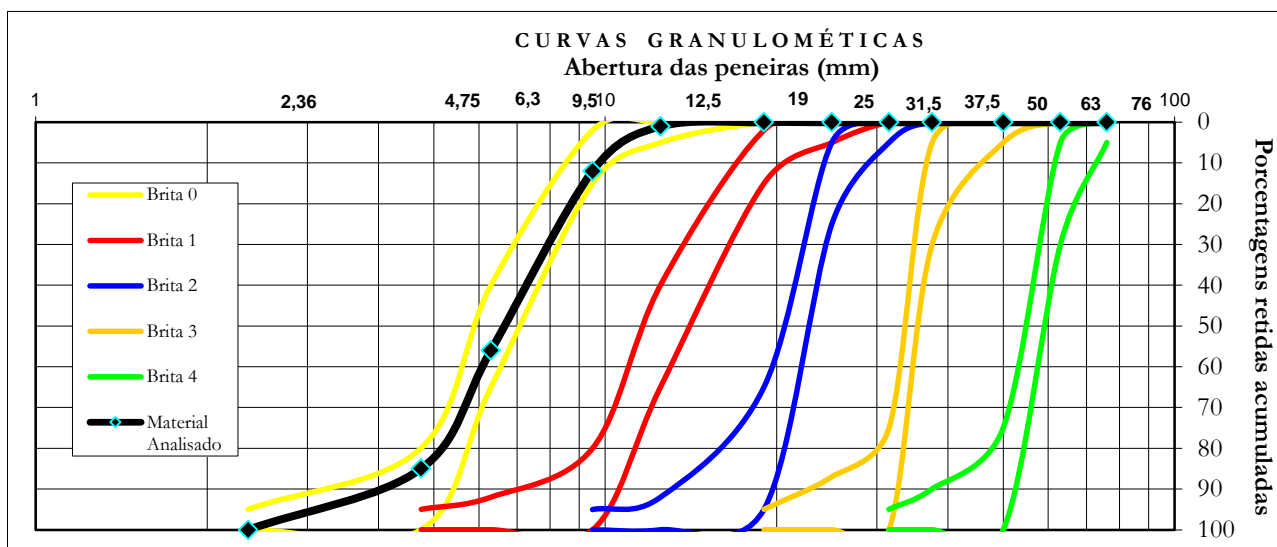
3.2.3 Agregado graúdo

Como agregado graúdo utilizou-se uma brita granítica obtida na região de Joinville/SC. A caracterização do material foi feita através do ensaio de granulometria e massa específica.

O ensaio de granulometria foi realizado conforme descrito na NBR 7217/87, utilizando-se um peneirador vibratório e peneiras de abertura 25,4 a 2,36 mm. Com as informações obtidas gerou-se a curva granulométrica do material estudado e, em relação às curvas granulométricas de classificação de agregados graúdos apresentadas na Figura 7, indica que o agregado graúdo em análise pode ser classificado como brita 0. Além disso, é possível

perceber que se trata de um agregado bem graduado, propriedade esta que auxilia no empacotamento das partículas, proporcionando um melhor resultado mecânico, tendo em vista que a absorção da carga se dá através da transferência da mesma por entre os grãos.

Figura 7 – Curva granulométrica da brita.



Fonte: A autora, 2019.

Na Tabela 6 apresentam-se as características físicas da brita 0 oriundas dos ensaios de granulometria e massa específica, obtida a partir do picnômetro (DNER ME 084/95 adaptado).

Tabela 6 – Características físicas da brita 0.

Material	Massa específica da brita seca	Diâmetro máximo	Módulo de finura
Brita 0	2,83 g/cm ³	12,5 mm	6,53

Fonte: A autora, 2019.

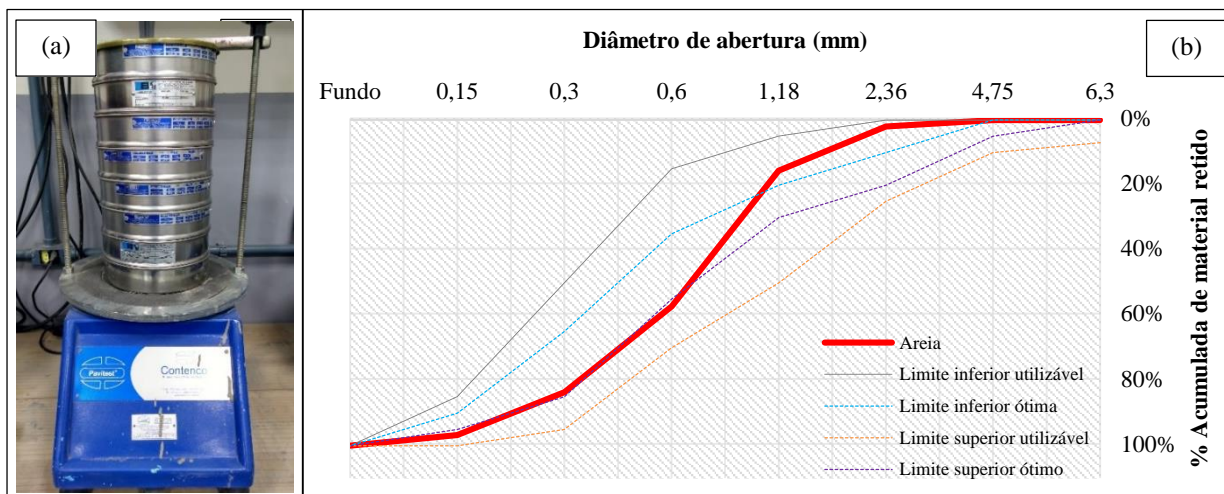
3.2.4 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi uma areia média de origem natural (leito de rio) da região de Joinville/SC. Esta foi caracterizada quanto a sua granulometria e massa específica.

Para o ensaio de granulometria utilizaram-se peneiras de tamanho que variam de 0,15 a 6,3 mm, além do peneirador vibratório (Figura 8-a). A partir da curva granulométrica obtida é possível perceber que aproximadamente 22% do material está na zona utilizável e 45% encontra-se na zona ótima para a produção de concretos, conforme exposto na Figura 8-b.

Figura 8 - a) Peneirador vibratório e peneiras e b) Curva granulométrica do agregado miúdo.

Fonte: Da Autora, 2019.



Fonte: A autora, 2019.

Ainda a partir do ensaio granulométrico, foi obtido o módulo de finura e diâmetro máximo das partículas. Além disso, com o uso de uma picnômetro (Erlenmeyer adaptado), foi obtida a massa específica do agregado miúdo, seguindo as especificações e recomendações da norma rodoviária DNER ME 084/95 (Tabela 7).

Tabela 7 - Características físicas do agregado miúdo.

Material	Massa específica da areia seca	Diâmetro máximo	Módulo de finura
Areia média	2,66 g/cm ³	4,75 mm	2,55

Fonte: A autora, 2019.

3.2.5 Lodo de ETA

O lodo de ETA utilizado foi fornecido pela Companhia de Águas de Joinville. Este foi coletado na Estação de Tratamento de Lodo da empresa, logo após o processo de adensamento, em seu estado úmido. A partir da amostra coletada para este estudo, obteve-se a umidade média do lodo, sendo esta equivalente a 67%.

O lodo de ETA foi caracterizado também quanto a sua massa específica (picnômetro), granulometria, composição química e identificação de fases cristalinas. Para estes ensaios em específico, o lodo de ETA foi seco em uma estufa a temperatura de 105 °C por 24 horas, e moído com o auxílio de um moinho de bolas em um jarro de 300 ml. Para a moagem foram usadas 39 bolas de 14 mm e 17 bolas de 20 mm, que permaneceram moendo o grão por meio

da fricção durante 7 minutos a uma rotação de 380 rpm. A quantidade de bolas utilizadas e o tempo de moagem foram definidos de forma experimental por Rossetto (2017). Os equipamentos utilizados estão apresentados na Figura 9.

Figura 9 – a) Moinho de bolas; b) Jarro 300 ml; c) Esferas e d) Estufa.



Fonte: A autora, 2019.

A composição química foi obtida a partir do ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX), realizada pelo Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais - LDCM/SENAI na cidade de Criciúma/SC. Esta análise permitiu averiguar os principais elementos da composição química do lodo de ETA, Alumina (Al_2O_3) e Sílica (SiO_2), bem como um elevado percentual de perda ao fogo. Vale destacar que este percentual revela a elevada presença de compostos orgânicos no resíduo. Além disso, essas concentrações elevadas de Si, e Al ocorrem devido a utilização de sulfato de alumínio como coagulante, e devido a presença de materiais argilosos encontrados na água bruta. Segue o resultado obtido na Tabela 8.

Tabela 8 – Composição química lodo da ETA pelo FRX.

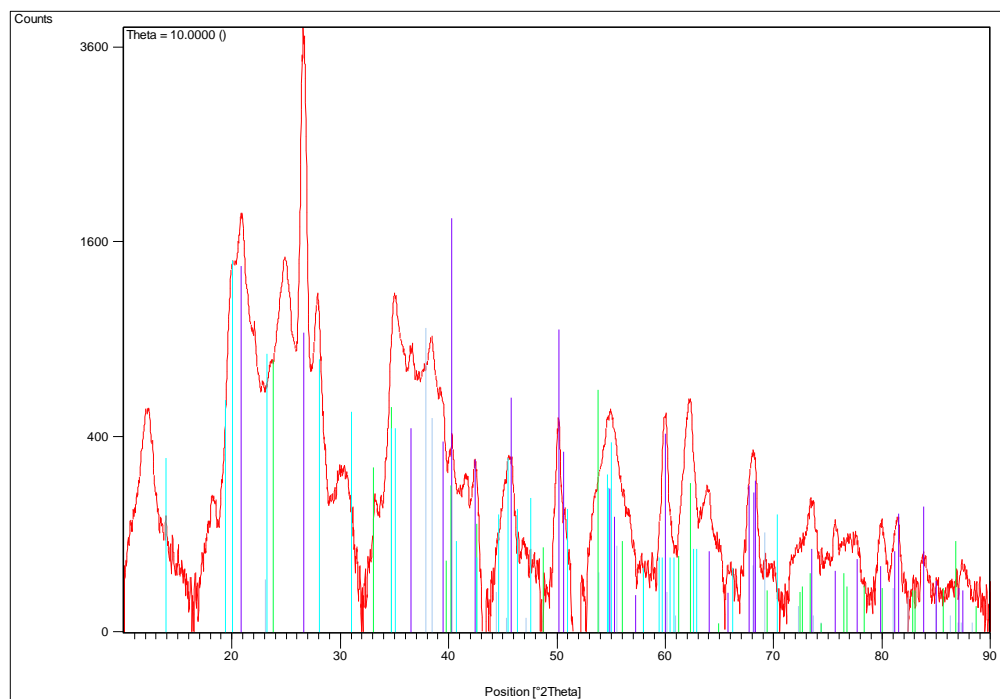
Óxidos	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	MnO	Na_2O	P_2O_5	SiO_2	SO_3	Outros	P.F
Teor (%)	25,44	0,50	7,15	0,62	0,70	0,11	0,28	0,31	25,61	0,52	0,91	37,85

Fonte: A autora, 2019.

Para identificação das fases cristalinas presente no lodo de ETA, a composição mineralógica foi determinada através do ensaio de Difração de raios-X (DRX). Este foi realizado no Laboratório de Biomateriais e Engenharia de Superfícies, na Pontifícia

Universidade Católica em Curitiba/PR (PUCPR). A varredura foi executada de 10° a 90° com taxa de 2°/min, nas amostras secas de lodo (105°C) (Figura 10).

Figura 10 - Difração de raios-X do lodo de ETA.

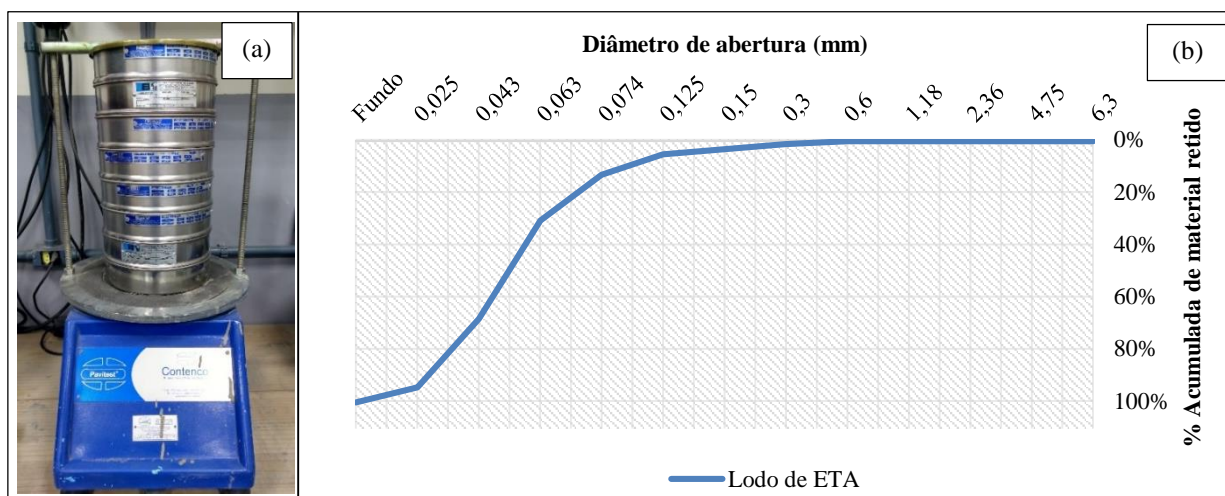


Fonte: A autora, 2019.

Foram identificadas fases cristalinas de quartzo, hematita, leucita, óxido de titânio e sulfato de zircônia, justificando a aplicabilidade do lodo de ETA como agregado em materiais cimentícios.

O lodo de ETA foi caracterizado também quanto a sua granulometria a partir de peneiras de aberturas que variam de 25 μm a 6,3 mm (Figura 11).

Figura 11 – a) Peneirador vibratório e peneiras e b) Curva granulométrica do Lodo.



Fonte: A autora, 2019.

Segue na Tabela 9 o módulo de finura e diâmetro máximo das partículas do lodo de ETA obtidos no ensaio granulométrico, assim como a massa específica obtida a partir do uso do picnômetro (DNER ME 084/95 adaptado).

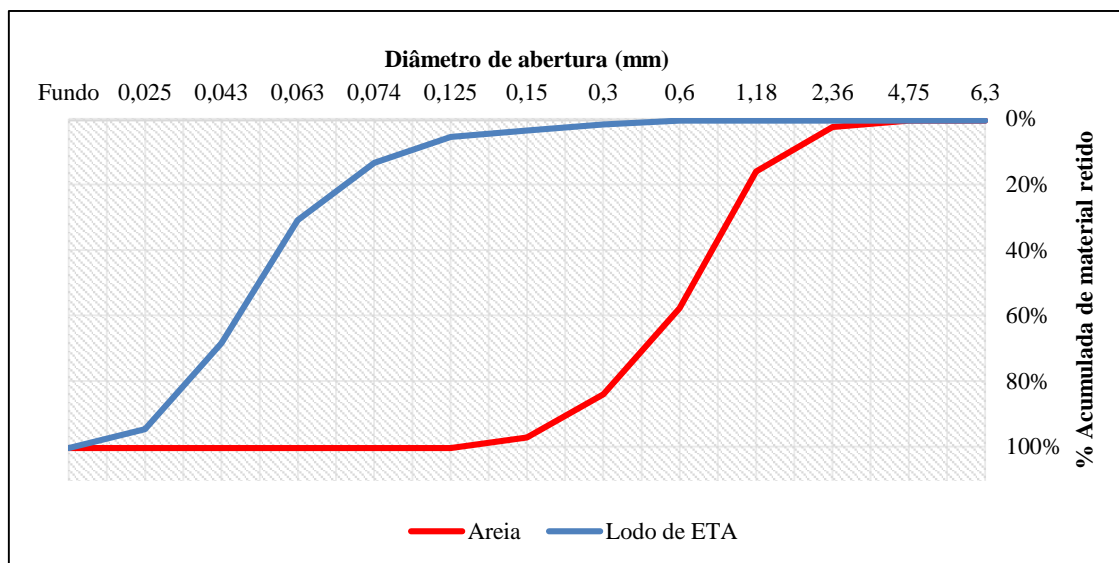
Tabela 9 - Características físicas do lodo de ETA.

Material	Massa específica do lodo seco	Diâmetro máximo	Módulo de finura
Lodo de ETA	2,08 g/cm ³	63 µm	2,15

Fonte: A autora, 2019.

Tendo em vista que a proposta deste trabalho é realizar a substituição parcial do agregado miúdo pelo lodo de ETA, e com o intuito de comparar a distribuição granulométrica de ambos, foi elaborado o gráfico da Figura 12. É possível perceber uma diferença considerável do diâmetro das partículas para os dois materiais. Isso justificaria um ganho de teor de finos na mistura de concreto, ao passo que se adicione o lodo de ETA, aumentando o teor de argamassa. Como consequência deste aumento, é esperado um impacto na fluidez do concreto, no caso, sua redução.

Figura 12 – Granulometria da areia e lodo de ETA.



Fonte: A autora, 2019.

3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste tópico será apresentado o trabalho experimental realizado, desde a dosagem de concreto, quanto a confecção dos CPs e execução dos ensaios.

3.3.1 Dosagem do concreto

3.3.1.1 Traço de referência

Inicialmente trabalhou-se com um concreto de controle, ou referência, nomeado de “REF”, e na sequência, foram realizadas outras três amostras de concreto onde houve a substituição parcial do agregado miúdo em massa, pelo lodo *in natura* em diferentes percentuais. Vale destacar que a umidade do lodo, 67%, foi descontada da proporção de água adotada para cada formulação.

Para a dosagem de concreto foi adotado o método CIENTEC, apresentado por Recena (2011). Trata-se de um método empírico com desvio padrão fixado em 7,0 MPa, onde a trabalhabilidade do concreto não é parâmetro definido, sendo seu resultado dependente das características dos materiais empregados. O método CIENTEC tem os valores determinados com a média de ensaios realizados em laboratórios para os materiais da região do estado do Rio Grande do Sul.

Para obtenção do traço de referência “REF”, foram considerados parâmetros e materiais específicos como dados de entrada para desdobramento do traço. Estes parâmetros estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros de entrada para desdobramento do traço.

Resistência característica do concreto à compressão (fck)	40 MPa
Relação água/materiais secos (H)	10,20 %
Teor de argamassa (α)	60 %

Fonte: A Autora, 2019.

A resistência característica do concreto à compressão (fck) aos 28 dias de 40 MPa foi definida pela autora. A relação água/materiais secos e o teor de argamassa foram definidos em concordância com Recena (2011), conforme apresentado na Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 11 - Obtenção de H.

Tipo de cimento	Classificação da brita	H (%)
CPIV	0	10,2
	1	9,8
	2	9,6
	3	9,4
CPI, CPII e CPV	0	10,2
	1	9,6
	2	9,4
	3	9,2

Fonte: Racena, 2011.

Tabela 12 – Obtenção do teor de argamassa.

Natureza da rocha	Classificação da brita	α (%)
Granítica	0	60
	1	53
	2	51
	3	49
Basáltica	0	60
	1	55
	2	53
	3	51

Fonte: Racena, 2011.

Sendo assim, foi possível obter a proporção água/cimento (a/c) a partir da equação (1).

$$a/c = \frac{2,15 - \log(f_{ck})}{1,27} = \frac{2,15 - \log(40)}{1,27} = 0,43 \quad (1)$$

A proporção de materiais secos foi obtida em função da relação água/cimento e a quantidade de água a ser empregada. Segue na equação (2).

$$1 + m = \frac{100 \times a/c}{H} = \frac{100 \times 0,43}{10,2} = 4,23 \quad (2)$$

Onde:

(1 + m) – Materiais secos

H – relação água/materiais secos (obtido pela Tabela 11)

A equação (3) determina a porcentagem de cimento, em relação a proporção de materiais secos.

$$\% \text{ Cimento} = \frac{100}{1 + m} = \frac{100}{4,23} = 23,64 \% \quad (3)$$

O teor de areia é calculado em função do teor de argamassa conforme segue na equação (4).

$$\% \text{ Areia} = \alpha - \% \text{ Cimento} = 60 - 23,64 = 36,36 \% \quad (4)$$

Onde:

α – Teor de argamassa (%)

% Cimento – Teor de cimento (%)

O teor de brita é obtido pela equação (5).

$$\% \text{ Brita} = 100 - \alpha = 100 - 60 = 40\% \quad (5)$$

Onde:

α – Teor de argamassa (%)

Por fim, obtêm-se o traço unitário da areia e brita conforme equações (6) e (7) respectivamente.

$$a = \frac{\% \text{ Areia}}{\% \text{ Cimento}} = \frac{36,36}{23,64} = 1,54 \quad (6)$$

$$p = \frac{\% \text{ Brita}}{\% \text{ Cimento}} = \frac{40}{23,64} = 1,69 \quad (7)$$

Onde:

a = quantidade de areia (kg)

p = quantidade de brita (kg)

Logo, sabendo que a quantidade de cimento considerada foi unitária, 1 kg, e que a relação água/cimento é equivalente a 0,43, é possível concluir que o traço unitário em massa é 1 : 1,54 : 1,69 : 0,43 (cimento : areia : brita : água/cimento).

3.3.1.2 Traços com adição de lodo de ETA

Depois de estabelecido o traço unitário para a formulação “REF”, foram introduzidos parcialmente diferentes teores de lodo de ETA nas demais dosagens de concreto como substituição parcial do agregado miúdo, conforme apresentado na Tabela 13.

Vale retificar que, ao passo que foi introduzido o lodo de ETA úmido, a água nele presente foi descontada da proporção água/cimento, de forma a manter esse fator constante. Para isso foi considerado para todas as dosagens, umidade do lodo de 67%.

Tabela 13 – Dosagens adotadas.

Nome	Lodo ETA (%)	H (%)	Areia (kg)	Brita (kg)	C. Cimento (kg/m ³)
REF	0	10,17	1,54	1,69	518,51
F05	5	10,19	1,46	1,69	518,51
F10	10	10,22	1,38	1,69	518,51
F20	20	10,51	1,23	1,69	518,51

Fonte: A autora, 2019.

3.3.2 Confeção dos Corpos de Prova

Para confecção das amostras, foi utilizada uma betoneira de capacidade de 120 litros (Figura 13-a), sendo confeccionados ao todo 66 corpos de prova (Figura 13-b). Todas as quatro

formulações (REF, F05, F10 e F20) foram executadas em um mesmo dia e em uma só mistura por traço.

Figura 13 – a) Betoneira 120 litros; b) Corpos de prova confeccionados.



Fonte: A autora, 2019.

3.3.3 Ensaios realizados

Os ensaios realizados nas amostras de concreto confeccionadas foram executados tomando como base normas técnicas, conforme segue na Tabela 14.

Tabela 14 – Normas dos ensaios realizados.

Ensaio	Norma Técnica	Nº CPS	Idades
<i>Slump test</i>	NBR NM 67	-	Estado fresco
Absorção d'água por imersão	NBR 9778	3	28 dias
Massa específica	NBR 9778	3	28 dias
Porosidade	NBR 9779	3	28 dias
Resistência à compressão axial simples	NBR 5739	3	7, 28 e 91 dias
Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222	3	28 dias
Módulo de elasticidade estático	NBR 8522	1	28 dias
Ensaio acelerado de carbonatação	Cyr et al (2005)	1	28 dias

Fonte: A autora, 2019.

3.3.4 Ensaios no Estado Fresco – *Slump Test*

Consiste em um procedimento para determinar a consistência do concreto fresco através de medidas de assentamento obtidos em laboratório com o auxílio de um tronco cone, uma barra

de aço redonda e uma trena (Figura 14). Esta medida foi determinada a fim de quantificar a influência do lodo de ETA na trabalhabilidade de concretos. A metodologia foi executada conforme recomendações da NBR NM 67/98.

Figura 14 – Equipamentos *slump test*.

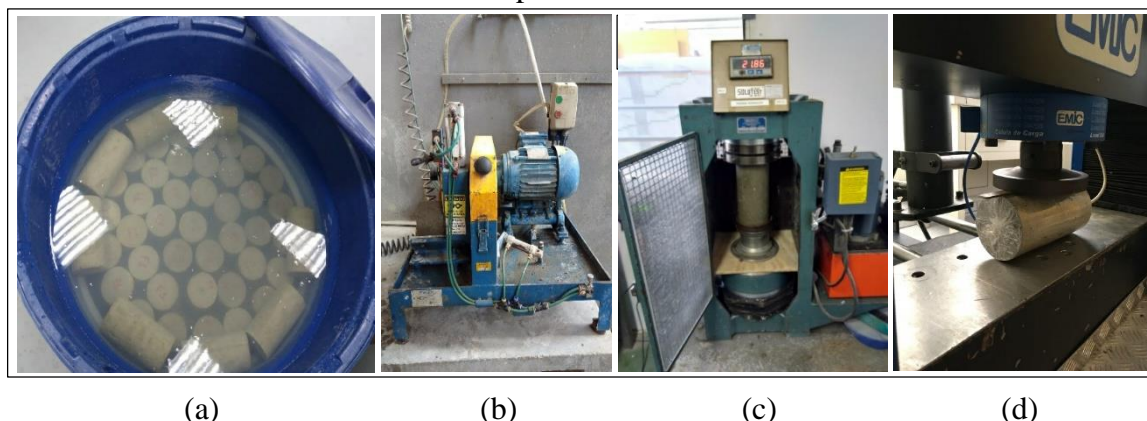


Fonte: A autora, 2019.

3.3.5 Ensaios no Estado Endurecido

Para avaliar as propriedades físicas e resistência mecânica à compressão simples e à tração por compressão diametral, foram confeccionados três corpos de prova cilíndricos de diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm por formulação. Para avaliar o ensaio de módulo de elasticidade estático, foi confeccionado 1 CP cilíndrico por formulação (100x200 mm). Já para análise do ensaio acelerado de carbonatação, foi confeccionado 1 CP prismático (40x40x160 mm) por formulação. A cura se deu a temperatura ambiente nas primeiras 24 horas, e de forma saturada no restante dos dias (Figura 15-a).

Figura 15 – a) Cura saturada; b) Retífica; c) Prensa compressão simples e d) Prensa tração por compressão diametral.



(a) (b) (c) (d)
Fonte: Da autora, 2019.

3.3.5.1 Propriedades Físicas

Para obtenção das propriedades físicas do concreto, como absorção de água, densidade e porosidade, foi realizado o ensaio de Arquimedes, segundo especificações da NBR 9778/87. As equações utilizadas para o cálculo das propriedades físicas estão expostas na Tabela 15.

Tabela 15 - Equações utilizadas para os cálculos das propriedades físicas.

Propriedades Físicas	Equações	Comentários
Absorção de água (%)	$\frac{M_{sss} - M_s}{M_s} \times 100$	M _s : massa seca em estufa.
Porosidade aberta (%)	$\frac{M_{sss} - M_s}{M_{sss} - M_i} \times 100$	M _i : massa imersa em água.
Densidade aparente (%)	$\frac{M_s}{M_{sss} - M_i} \times 100$	M _{sss} : massa saturada em superfície seca.

Fonte: Da autora, 2019.

3.3.5.2 Resistência à Compressão Axial Simples

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados na empresa Perville Engenharia e Empreendimentos S.A, na cidade de Joinville. O equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica (Figura 15-b). Antes de submeter os corpos de prova ao ensaio, estes tiveram suas superfícies transversais superiores e inferiores corrigidas com o uso de uma retífica (Figura 15-c), pertencente também a empresa Perville. Para este ensaio foram confeccionados corpos de prova submetidos a tempo de cura de 7, 28 e 91 dias.

3.3.5.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado na UNISOCIESC em Joinville, com uma máquina universal para ensaios mecânicos, eletromecânica, com capacidade de 100 kN (Figura 15-d). Neste caso, foram ensaiados corpos de prova com tempo de cura apenas de 28 dias.

3.3.5.4 Módulo de Elasticidade Estático

Este ensaio foi realizado na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC RS). Foram confeccionados CPs cilíndricos (100x200 mm) sendo estes submetidos a uma aplicação de força a fim de verificar a elasticidade da amostra pelo módulo secante. Este módulo consiste na inclinação da reta secante da curva tensão x deformação, que tem pontos correspondentes a carga de 0,5 MPa e 30% da tensão de ruptura.

Em cada CP foi aplicado uma força crescente a uma velocidade constante de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s. O ensaio é finalizado quando se atinge uma carga aproximadamente igual a 40% da carga de ruptura do concreto. Por este motivo é essencial ter previamente determinada a resistência à compressão de 3 corpos de prova com a mesma dosagem e dimensões.

A deformação foi medida por um extensômetro mecânico fixado externamente ao CP, o qual forneceu a sua deformação longitudinal. Esta determinação foi executada em duas linhas diametralmente opostas e centradas no eixo longitudinal da amostra, conforme recomendado pela NBR 8522/17. Segue na Figura 16 a representação da realização deste ensaio.

Figura 16 – Execução do ensaio de módulo de elasticidade.



Fonte: A autora, 2019.

O módulo de elasticidade foi obtido pelo módulo secante diretamente pela equação 8, conforme especificado na NBR 8522/17.

$$E_{ci,i} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (8)$$

Onde:

$E_{ci,i}$ = Módulo de elasticidade (GPa)

σ_b = tensão maior, equivalente a 30% da resistência à compressão (MPa)

0,5 = tensão básica do concreto (MPa)

ε_b = deformação específica do concreto sob a tensão maior

ε_a = deformação específica do concreto sob a tensão básica

Para este ensaio foram confeccionados corpos de prova submetidos a tempo de cura de 28 dias.

3.3.5.5 Carbonatação Acelerada

Este ensaio foi realizado também na PUCRS, em uma câmara de carbonatação com inserção contínua de gás carbônico (concentração de 3%), temperatura ambiente, pressão interna equivalente a atmosférica e umidade entre 65 e 75%. Este método foi desenvolvido por estudos de Cyr et al. (2005).

Para este ensaio foi confeccionado 1 CP para cada formulação, submetidos a um tempo de cura de 28 dias. Para esse caso em específico, foram executadas amostras prismáticas, com dimensões de 40x40x160 mm.

A mensuração da frente de carbonatação foi realizada a partir de um indicador químico de pH. Para isso fez-se uso de uma solução de fenolftaleína. Este indicador foi borrifado em uma região recém fraturada da amostra de concreto, realizada antes que a face exposta pela fratura viesse a se carbonatar ao reagir com o CO₂ presente no ar. O contato da solução com a amostra de concreto evidencia a região não carbonatada, onde o pH é muito alcalino, sendo esta região aparente por tons rosados.

Para possibilitar a medição das diferentes colorações detectadas, fez-se uso de um software de análise de imagem. Este programa computacional determina o tamanho de cada pixel de uma determinada foto, a partir de uma distância real informada. Com base nisso, é possível precisar dimensões, áreas ou um elemento contido na imagem. Para determinar a

penetração da carbonatação, foram retiradas três medidas de cada lado da amostra prismática de concreto, totalizando-se 12 medições por CP. Vale ressaltar que, se obtido uma frente de carbonatação de 20 mm, significa que esta atingiu o centro da amostra, metade da espessura, logo, é possível concluir que este CP foi 100% carbonatado.

3.3.6 Análise de Variância (ANOVA)

Como forma de tornar os resultados mais significativos, algumas verificações foram realizadas por análise de variância (ANOVA), com significância de 5%, utilizando-se o software Statistic. A partir dessa análise segundo Mucelin (2006), é possível saber se existe diferença significativa entre as médias dos tratamentos e se estes fatores exercem influência em alguma variável dependente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão expostos os resultados obtidos para os ensaios propostos, bem como, as discussões referentes aos ensaios realizados.

4.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

4.1.1 Slump Test

Os resultados obtidos no ensaio de *Slump test* estão apresentados na Tabela 16. A partir destes, é possível perceber que o lodo de ETA influenciou significativamente a trabalhabilidade do concreto. Comparando REF com F05 observa-se que houve uma redução no assentamento do concreto de 50%. Agora, comparando F05 com F10 e F20, houve pequenos aumentos no abatimento, mostrando um limite entre ganho e perda de trabalhabilidade. Além disso, percebe-se que com o seguimento da introdução de lodo de ETA na mistura, o teor de argamassa aumenta, logo a quantidade de finos é intensificada, melhorando a distribuição granulométrica. Isso explicaria os pequenos aumentos do assentamento do concreto de F10 e F20 quando comparados a F05.

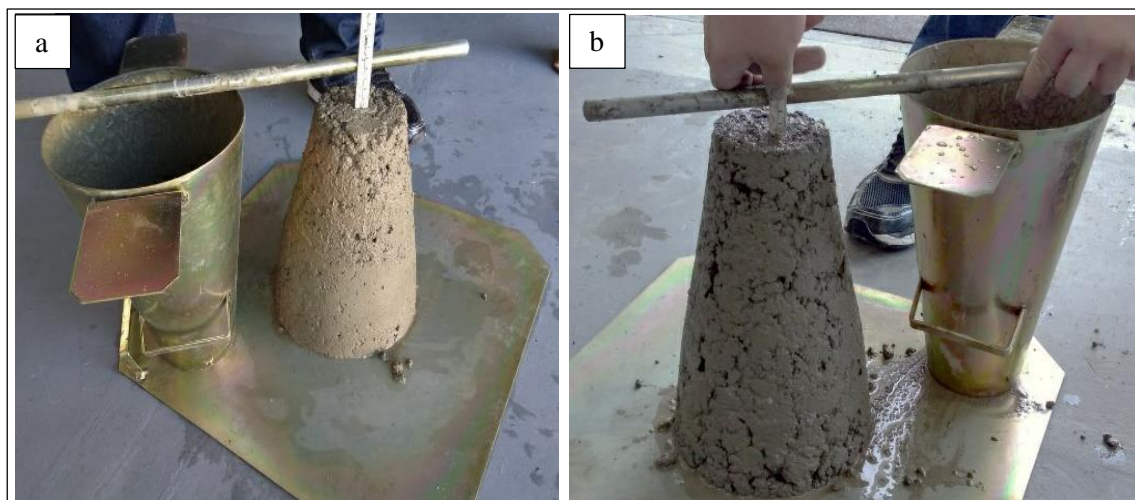
Tabela 16 - Resultados Slump Test.

Nome	Slump (mm)
REF	40,00
F05	20,00
F10	21,00
F20	25,00

Fonte: A autora, 2019.

Na Figura 17 é possível perceber a diferença do concreto sem o lodo de ETA (formulação REF) e com a presença deste (10% - F10).

Figura 17 – a) Abatimento de REF e b) Abatimento de F10.



Fonte: A autora, 2019.

4.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

4.2.1 Propriedades Físicas

Os resultados obtidos no ensaio de Arquimedes estão apresentados na Tabela 17. É possível observar que com o acréscimo de lodo de ETA, houve também um acréscimo na porosidade do concreto, logo, uma redução na sua densidade e por consequente, um aumento na absorção de água. A Figura 18 apresenta essas relações lineares, deixando evidente a influência do teor de lodo nas propriedades físicas.

Tabela 17 - Ensaio de Arquimedes (Propriedades físicas).

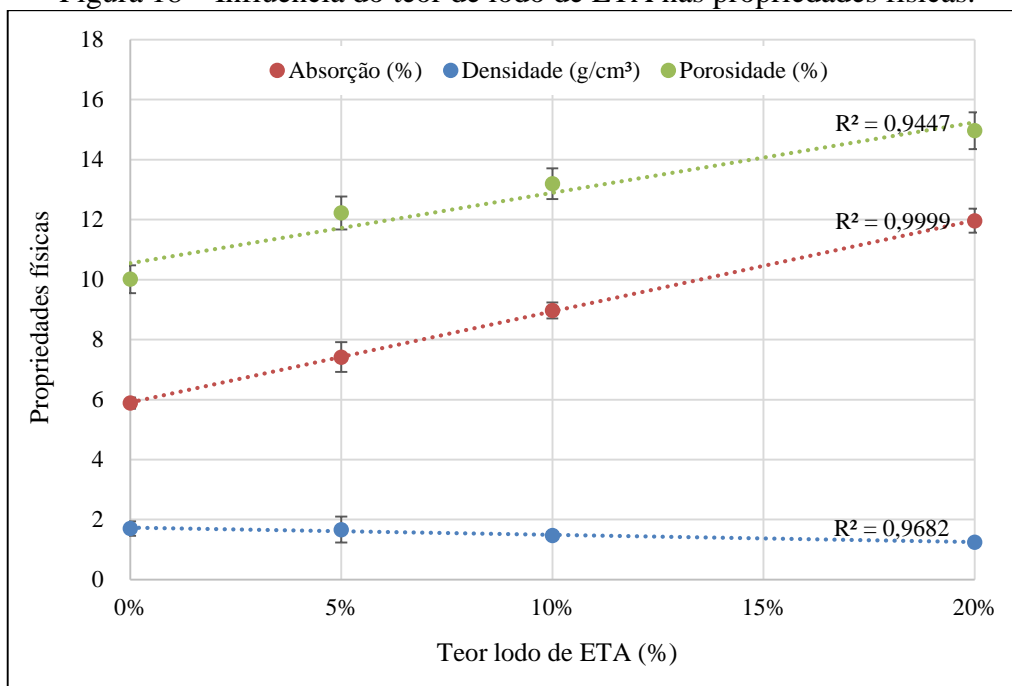
Teor de lodo de ETA (% massa areia)	0	5	10	20
Porosidade aberta (%)	10,01	12,22	13,20	14,96
Absorção de água (%)	5,89	7,42	8,97	11,96
Densidade aparente (g/cm ³)	1,70	1,67	1,47	1,25
Desvio Padrão	0,463	0,551	0,515	0,616

Fonte: A autora, 2019.

A interferência do teor de lodo de ETA na porosidade das amostras de concreto pode ser explicada pela possível presença de matéria orgânica no resíduo (devido à alta perda ao fogo observado no ensaio de FRX). Com a ação da temperatura e umidade ao decorrer do tempo, pode haver a formação de zonas frágeis, podendo ocasionar vazios, tornando o concreto poroso, logo, menos denso e mais propício a absorção de água e outras intempéries. Vale destacar que

nesse caso, há uma tendência de menor durabilidade das amostras com maiores teores do resíduo.

Figura 18 – Influência do teor de lodo de ETA nas propriedades físicas.



Fonte: A autora, 2019.

Quanto a redução da densidade aparente das amostras, essa pode ser justificada pelo aumento de vazios com o incremento do resíduo. Além disso, este decréscimo na densidade por ser também em decorrência da menor densidade do lodo em comparação à areia.

Por fim, o aumento da absorção de água das amostras é explicado pelo aumento da porosidade, onde há o surgimento de novos condutos capilares nos quais servem como meio de transporte da água.

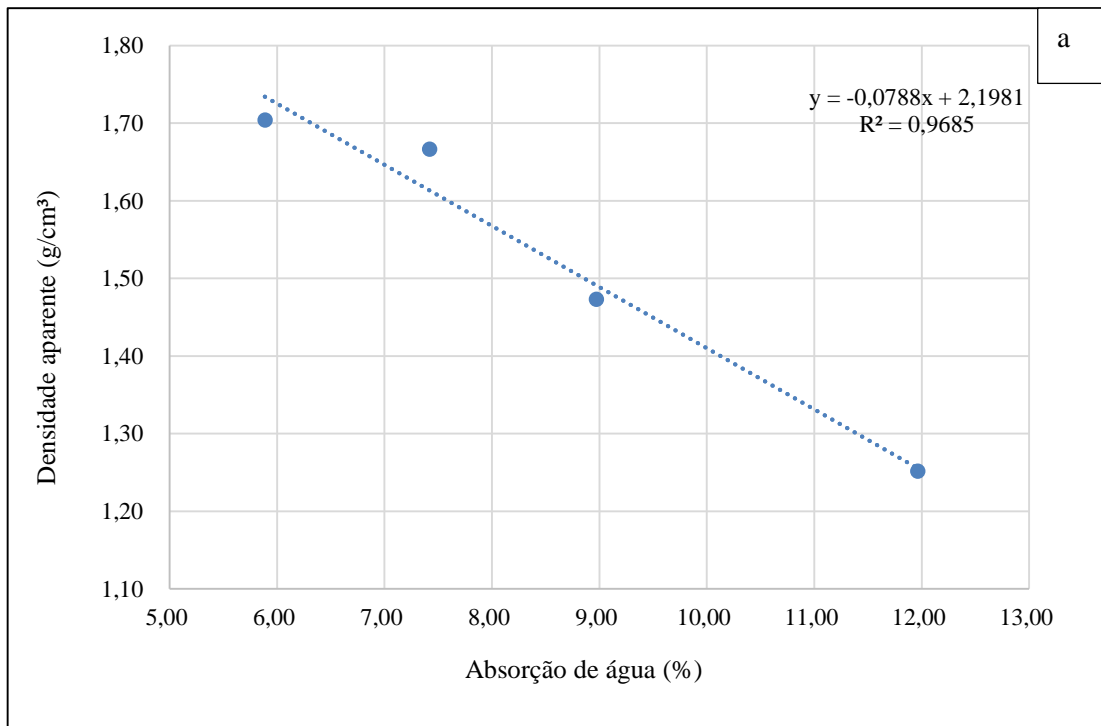
Observa-se que, comparando F05 com REF há um aumento de 19,08% da porosidade, uma redução de 2,19% da densidade e um aumento da absorção de água de 26,02%. Da mesma forma com F10, tem-se um aumento de 11,12% da porosidade, uma redução de 13,54% da densidade e um aumento de 52,40% da absorção de água. Por fim, constata-se um aumento de 33,14% da porosidade de F20 em relação a REF, uma redução de 26,54% da densidade e um aumento de 103,22% da absorção de água.

4.2.1.1 Relações entre as propriedades físicas

Os dados obtidos das propriedades físicas podem ser correlacionados de forma a tornar suas interferências mais compreensíveis e evidentes. Na Figura 19 são apresentados os gráficos com essas correlações. Os valores obtidos são a média dos resultados para cada uma das formulações ensaiados.

Nota-se pela Figura 19-a que há uma relação inversamente proporcional entre a densidade aparente e absorção de água. Ou seja, quanto mais denso o concreto, com menores teores de lodo conforme explicado anteriormente, menor será sua capacidade de absorver água. O mesmo comportamento é identificado comparando-se a porosidade aberta com a densidade aparente das amostras (Figura 19-b). Logo, quanto maior a porosidade do concreto, menor sua densidade. Por fim, através da Figura 19-c, é notável uma relação proporcional entre a porosidade e absorção de água, ou seja, quanto maior a porosidade maior a absorção de água, resultado este já esperado, tendo em vista que quanto mais vazios apresenta o concreto, mais facilitada é a entrada e percolação da água. Este resultado também foi evidenciado por Rossetto (2017).

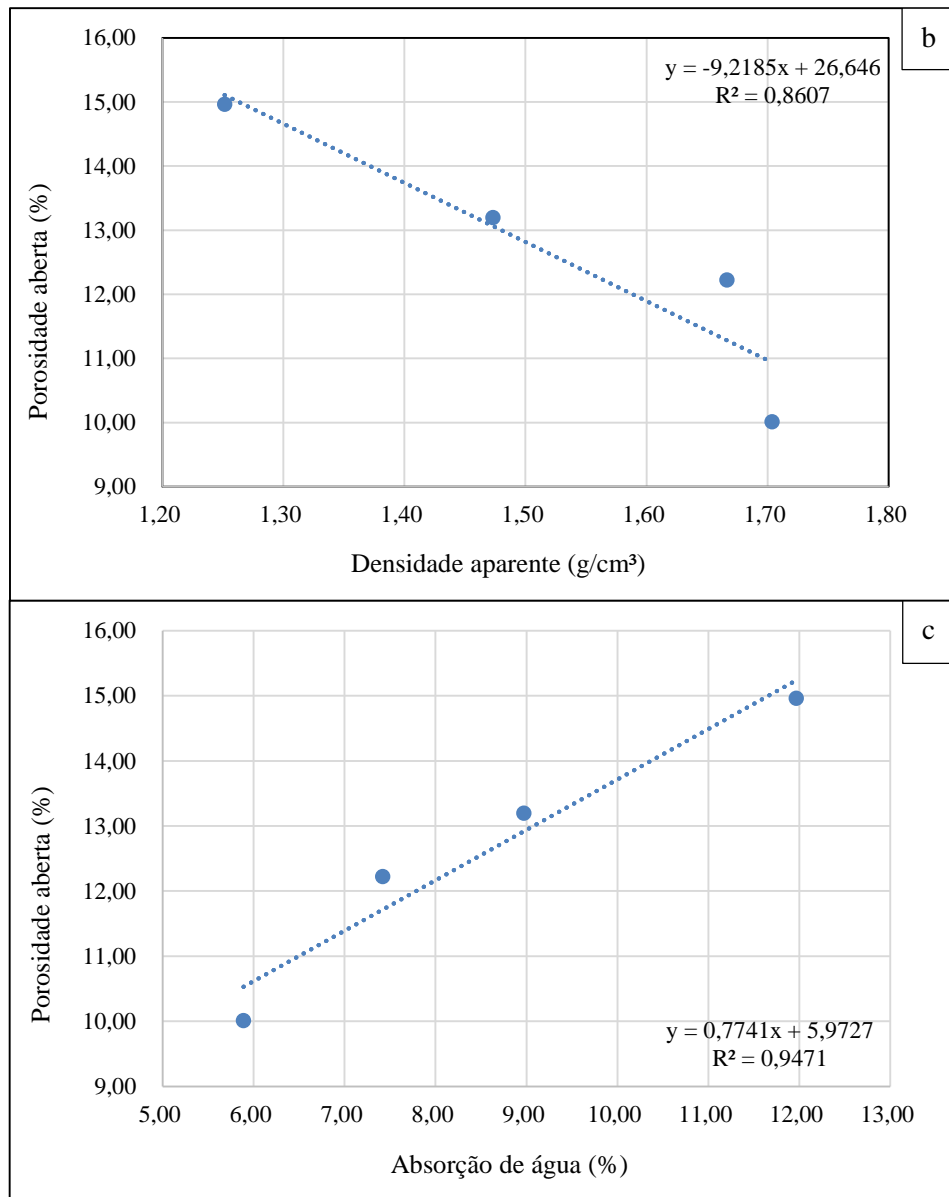
Figura 19 – Relações propriedades físicas. a) Densidade x Absorção; b) Porosidade x Densidade e c) Porosidade x Absorção.



Fonte: A autora, 2019.

Figura 18 – Relações propriedades físicas. a) Densidade x Absorção; b) Porosidade x Densidade e c) Porosidade x Absorção.

(Continua)

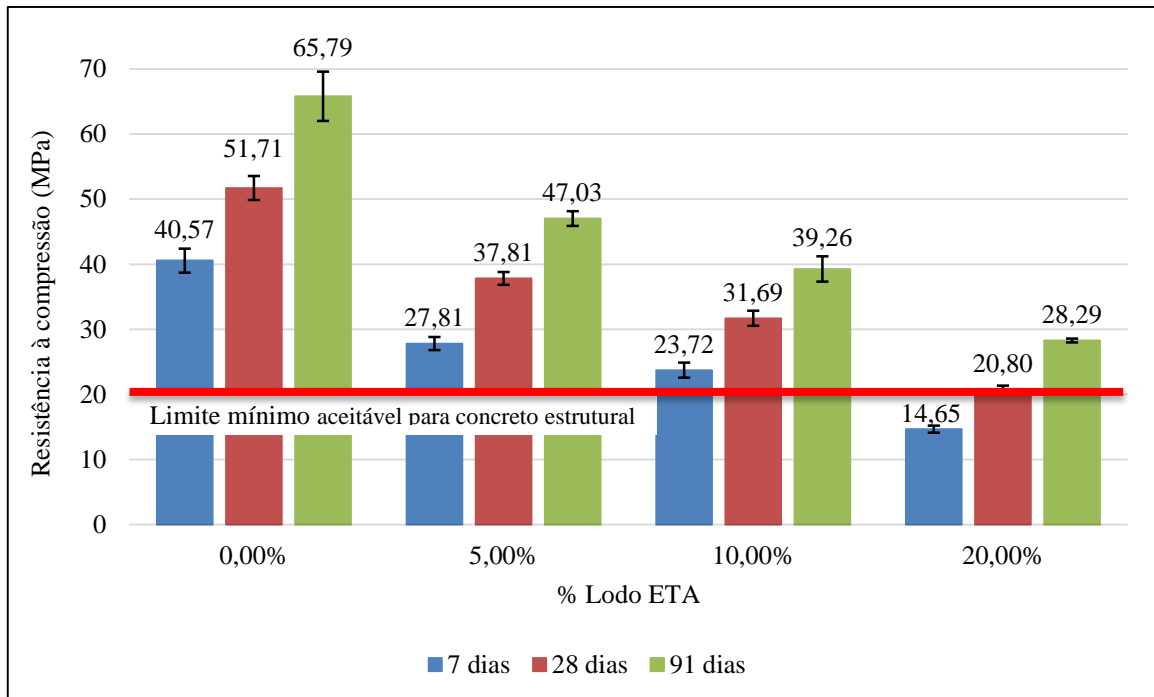


Fonte: A autora, 2019.

4.2.2 Resistência à Compressão Axial Simples

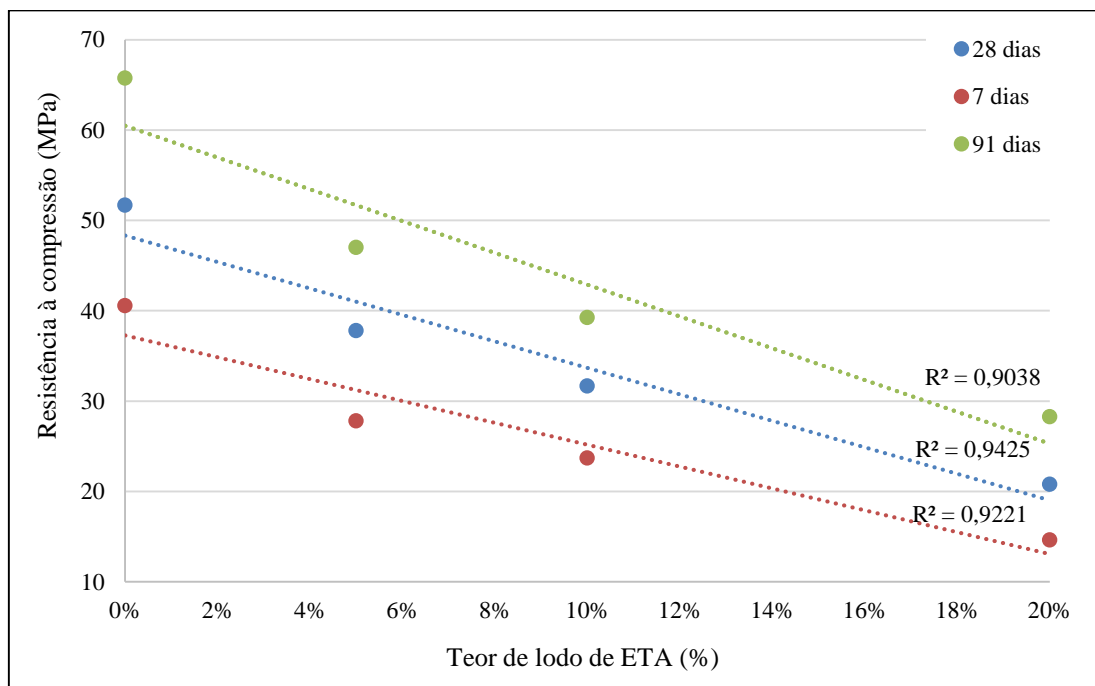
Os resultados da resistência à compressão das formulações estão expostos na Figura 19. Estes valores são a média dos três corpos de prova ensaiados para cada formulação, aos 7, 28 e 91 dias de cura.

Figura 19 - Resistência à Compressão (7, 28 e 91 dias de cura).



Fonte: A autora, 2019.

Figura 20 – Relação linear da resistência à compressão x teor de lodo de ETA.



Fonte: A autora, 2019.

Verifica-se uma tendência linear de decréscimo da resistência à compressão das formulações com introdução do lodo de ETA (Figura 20). Ou seja, quanto mais evidente for a presença do lodo nas misturas, menor é sua resistência à compressão. É possível notar uma

redução de 26,88% da resistência à compressão quando comparado F05 a REF, e uma redução de 59,78% quando comparado F20 a REF, ambos os casos para 28 dias de cura.

É possível averiguar, também, um acréscimo da resistência à compressão quando relacionada com o aumento do tempo de cura. Comparando REF aos 7 dias de cura com 91 dias, é possível notar um aumento de 62,19%. Relacionando ainda F20 aos 7 dias de cura e aos 91 dias, tem-se um aumento da resistência de 93,08%.

Segundo a NBR 8953/15 concretos com resistência características à compressão inferiores a 20 MPa não são considerados estruturais. Além disso, Helene e Terzian (1992) confirmam que a resistência para garantir a viabilidade do concreto deve ser superior a 20 MPa. Tendo em vista que a média da formulação F20 atingiu um valor minimamente superior a 20 MPa aos 28 dias de cura, levando em conta o desvio padrão, esse valor pode ser minimamente inferior ao limite ideal de 20 MPa. Sabendo disso, priorizando a segurança e levando em conta apenas critérios mecânicos, conclui-se que teores iguais ou superiores que 20% de lodo de ETA em relação a massa do agregado miúdo, não são recomendados à aplicação estrutural.

Apesar deste limitante, nas formulações de REF, F05 e F10, em todos os tempos de cura a resistência superou os 20 MPa, alcançando valores superiores a 30 MPa aos 28 dias de cura. Se considerar apenas a resistência à compressão, pode-se direcionar aplicações destes concretos à contrapisos, blocos de pavimento intertravado, peças decorativas, blocos e placas de vedação e etc. Porém, para confirmar essas aplicações é necessário verificar outras propriedades importantes do concreto, como resistência à tração na flexão, tração por compressão diametral, deformações estáticas e questões de durabilidade.

Hoppen (2004) investigou o efeito da substituição de teores de lodo de ETA *in natura* (3, 5, 7 e 10%) em concretos com resistência aos 28 dias entre aproximadamente 12 MPa a 34 MPa. Segunda a autora, apenas com os valores de resistência mecânica obtidos, pode-se direcionar o uso das misturas incorporando até 5% do lodo, cujas resistências superaram os 30 MPa aos 28 dias, em aplicação de concreto convencional.

Com o intuito de constatar a significância das variáveis controladas (teor de lodo e idade) na resistência à compressão, executou-se a análise de variância (ANOVA) da resistência à compressão simples em relação as idades e teores de lodo.

A partir do trabalho experimental realizado para o ensaio de resistência à compressão, foram obtidos os resultados da ANOVA apresentados na Tabela 18 e Figura 21. As análises foram conduzidas para nível de significância de 95%. Isso significa que o “p-value” deve ser menor que 0,05 para que as variáveis sejam estatisticamente significativas a um nível de

confiança de 95%. Dessa forma, é possível observar que a idade e o teor de lodo são considerados significantes, o que não acontece com a interação entre ambos.

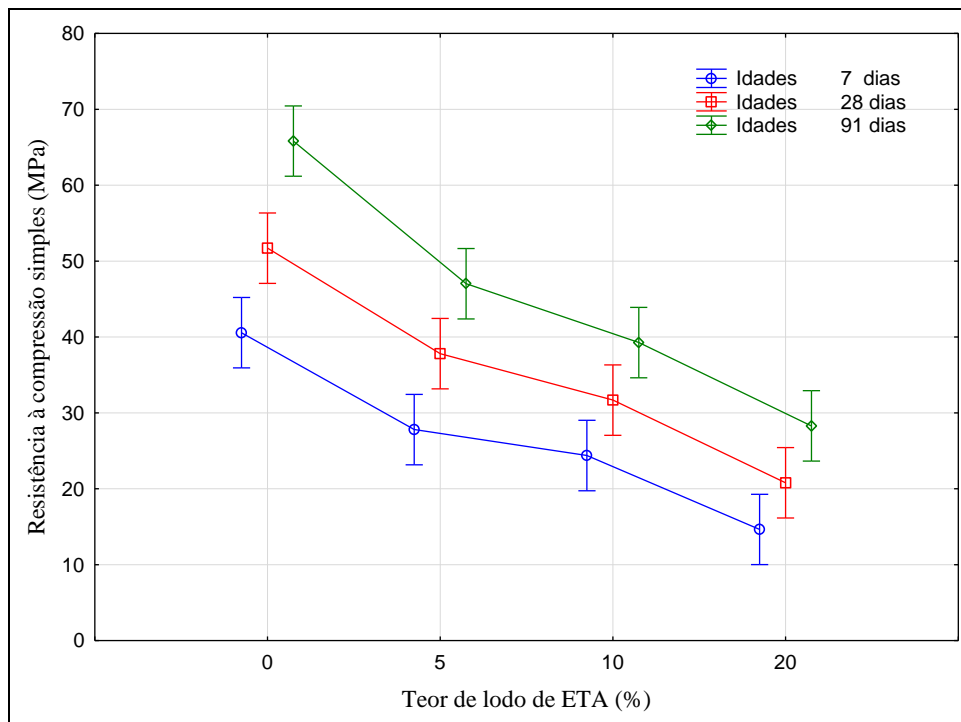
Tabela 18 – ANOVA do concreto produzido.

Variáveis	SQ	GDL	MQ	F _{calc}	Significância "p-value"
Idade (dias)	1999,82	2	999,91	66,018	0
Teor de lodo (%)	4649,52	3	1549,84	102,327	0
Idade x Teor de lodo	127,74	6	21,29	1,406	0,253168
Erro	363,5	24	15,15		

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

Fonte: A autora, 2019.

Figura 21 – Influência do teor de lodo e da idade dos CPs.



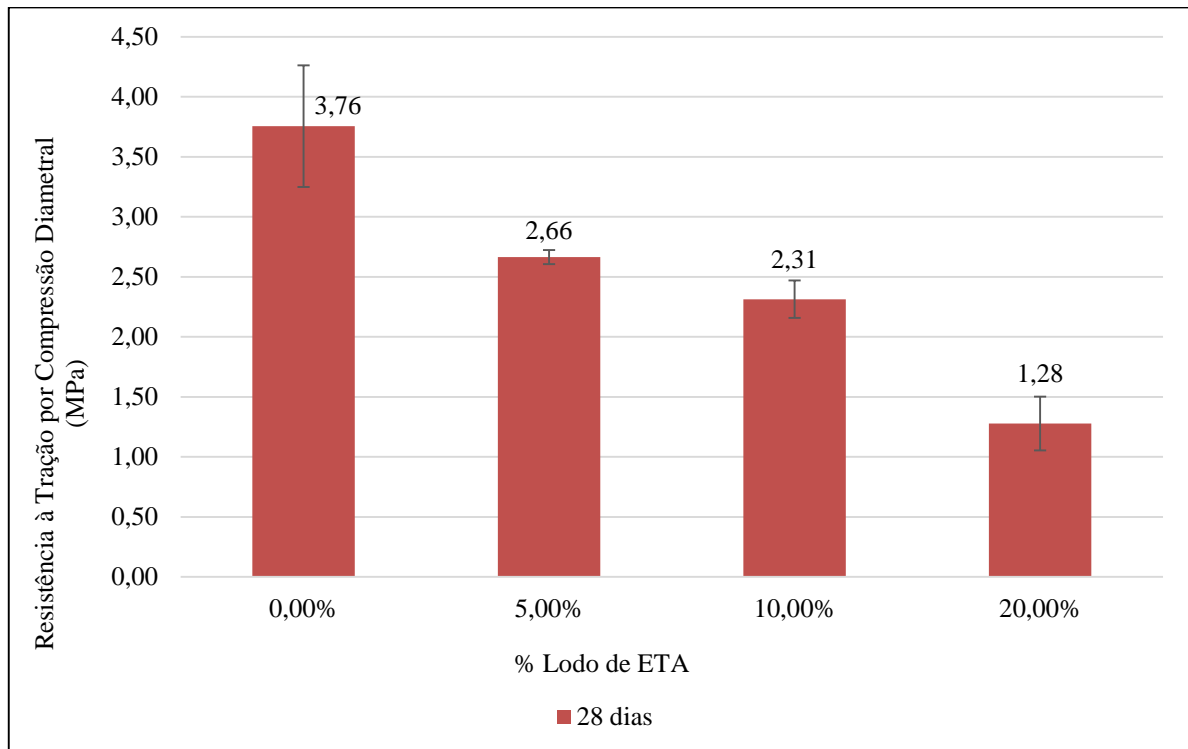
Fonte: A autora, 2019.

4.2.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Assim como na resistência à compressão, a resistência à tração por compressão diametral diminui com o acréscimo do lodo de ETA na mistura, conforme mostrado na Figura 22. Neste caso, as amostras foram ensaiadas apenas aos 28 dias de cura. Observa-se um

decréscimo na resistência à tração de 29,06% quando comparado F05 a REF e um decréscimo de 65,98% quando comparado F20 a REF.

Figura 22 - Resistência à tração por compressão diametral.



Fonte: A autora, 2019.

Segundo Scanduzzi e Andriolo (1986) a razão típica da resistência à tração por compressão diametral pela resistência à compressão axial é em torno de 7 a 8%. Verificando esta razão para os CPs confeccionados observa-se que para REF esta razão foi de 7,26%, para F05 de 7,05%, F10 de 7,30 e F20 de 6,14%. Dessa forma é possível observar mais uma vez um teor limite de aplicação do lodo de ETA de 20%.

4.2.4 Módulo de Elasticidade Estático

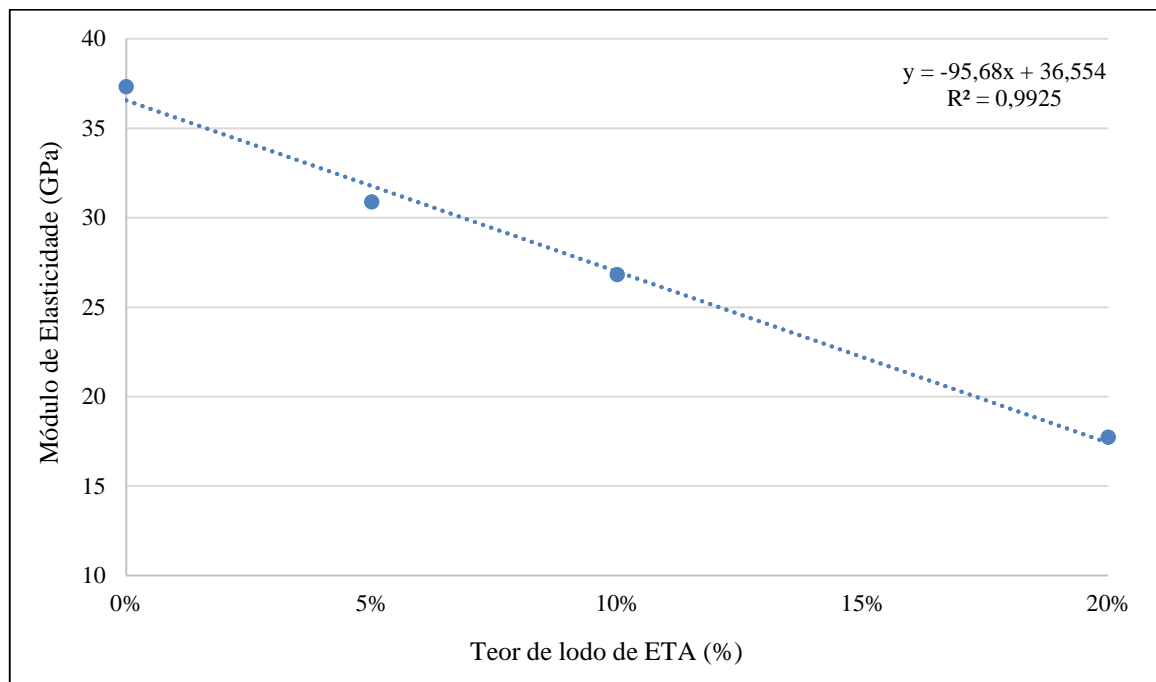
A variação do módulo de elasticidade seguiu a mesma tendência que os ensaio de resistência à compressão e à tração por compressão diametral. Percebeu-se uma redução do módulo com a introdução do lodo de ETA (Figura 23).

Comparando REF com as demais formulações, é possível notar uma redução de 17,25% referente a F05, 28,15% referente a F10 e 52,48% referente a F20.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), os valores do módulo de elasticidade estático para concretos com peso normal podem variar de 20 a 40GPa. Neville (1997) complementa dizendo

que, concretos que atingem resistência à compressão próximas de 25 MPa, devem alcançar módulos de elasticidade médios de 26 GPa. Já para concretos com resistência à compressão de 30MPa, o módulo deve alcançar valores próximos a 28 GPa. Sendo assim, verifica-se que F20 deve ser descartado de imediato, pois atingiu um módulo inferior a 20 GPa. As demais formulações se encaixam nas afirmações dos autores supracitados. Sendo assim, novamente é possível concluir um limite de utilização do lodo de ETA em substituição à areia inferior a 20%.

Figura 23 – Relação linear do módulo de elasticidade x teor de lodo de ETA.

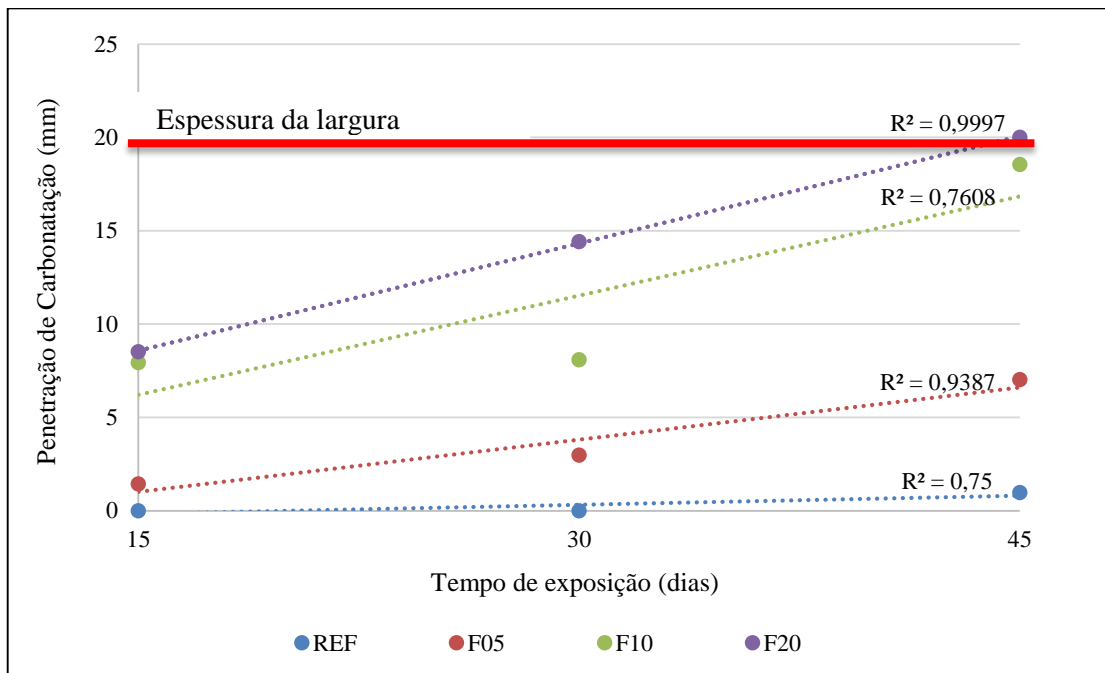


Fonte: A autora, 2019.

4.2.5 Carbonatação Acelerada

Na Figura 24 são apresentadas as profundidades médias da frente de carbonatação em função do tempo de exposição das amostras ao gás carbônico. Observa-se que a frente de carbonatação ultrapassou a espessura da largura do CP em F20 aos seus 45 dias de exposição. Isso indica que esta formulação foi 100% carbonatada neste período de tempo. Além disso, é possível notar que F10 apresenta um avanço médio da espessura de carbonatação muito superior a F05 e REF durante todo o período de exposição. Porém, ao contrário de F20, a frente de carbonatação de F10 não ultrapassa completamente a espessura do comprimento. Já F05 e REF apresentaram uma frente de carbonatação média muito abaixo da espessura do comprimento, indicando uma maior tendência de durabilidade frente a situação adversas.

Figura 24 – Relação linear da penetração de carbonatação x tempo de exposição.



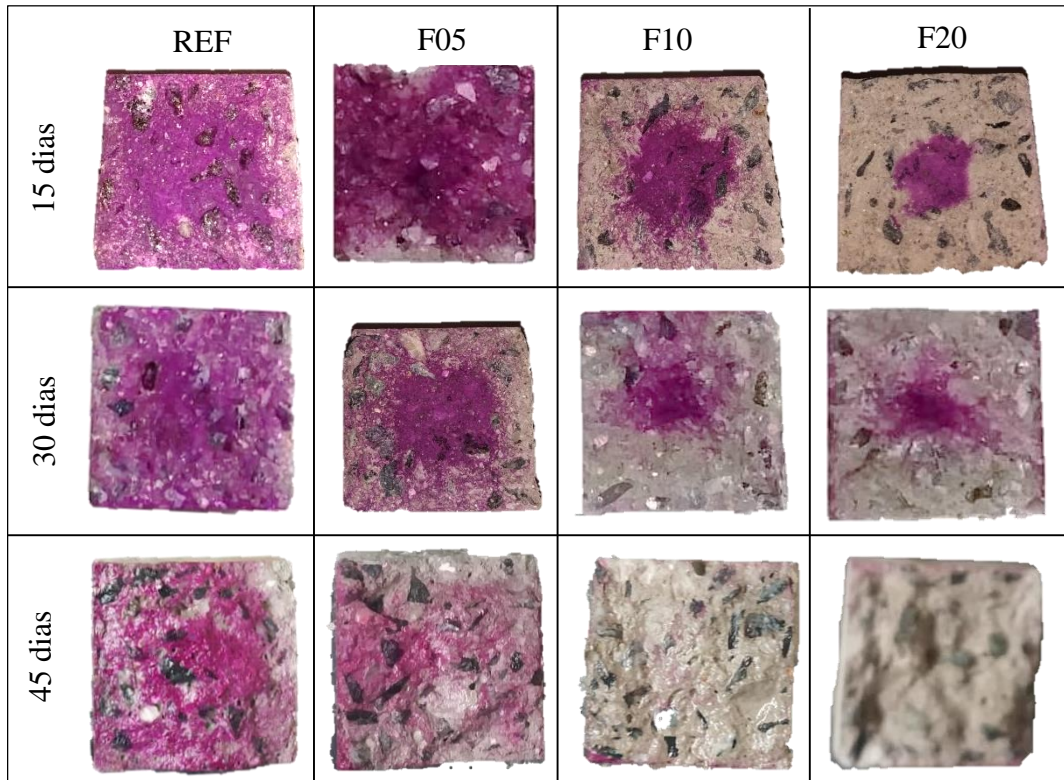
Fonte: A autora, 2019.

Para maior compreensão e a fim de facilitar a observação destes avanços da frente de carbonatação, é apresentado na Figura 25 as regiões afetadas por este processo. Vale destacar que as áreas pigmentadas com o tom rosado representam as regiões que não sofreram ataques, ao passo que as regiões acinzentadas, representam as regiões carbonatadas.

Apesar da amostra com teor de 10% não ter carbonatado completamente, esta sofreu ataques severos aos 45 dias de exposição, alcançado quase que completamente 100% de carbonatação. Dessa forma, entende-se que teores de lodo de ETA superiores a 10% não são indicados para o concreto estudado.

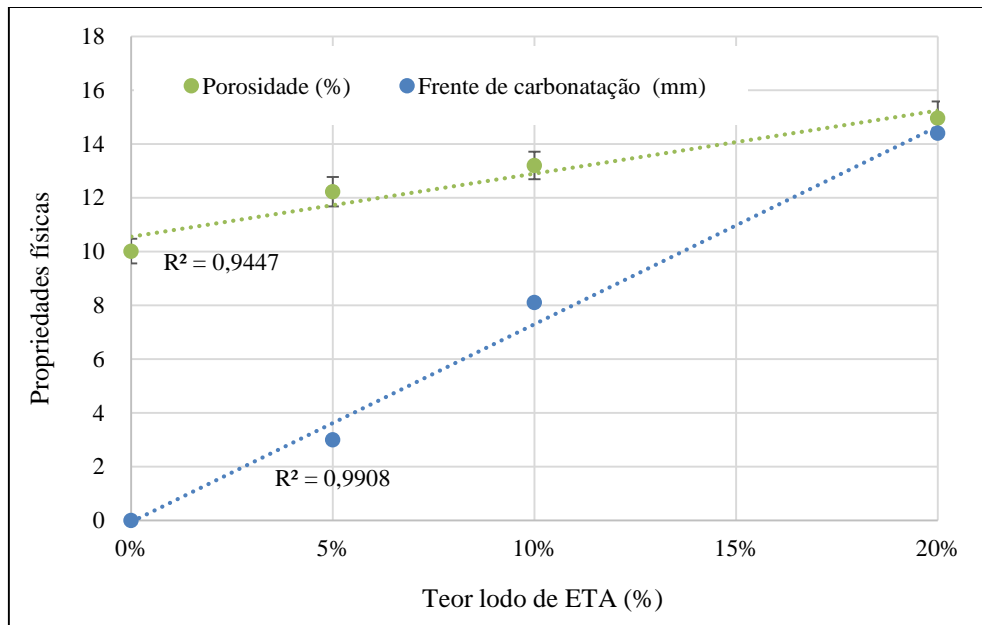
Vale ressaltar ainda que há uma relação diretamente proporcional entre a porosidade aberta e a frente de carbonatação, como já era esperado. É apresentado na Figura 26 o comparativo da frente de carbonatação aos 30 dias de ataque, com a porosidade aberta obtida com CPs de idade de 28 dias.

Figura 25 – Regiões carbonatadas (em cinza).



Fonte: A autora, 2019.

Figura 26 – Comparativo da porosidade a frente de carbonatação.



Fonte: A autora, 2019.

A partir do trabalho experimental realizado para o ensaio de carbonatação, foram obtidos os resultados da ANOVA apresentados na Tabela 18 e Figura 27. É possível observar

que o tempo de exposição, o teor de lodo e a interação entre esses dois fatores, têm p menor que 0,05, logo são considerados significantes.

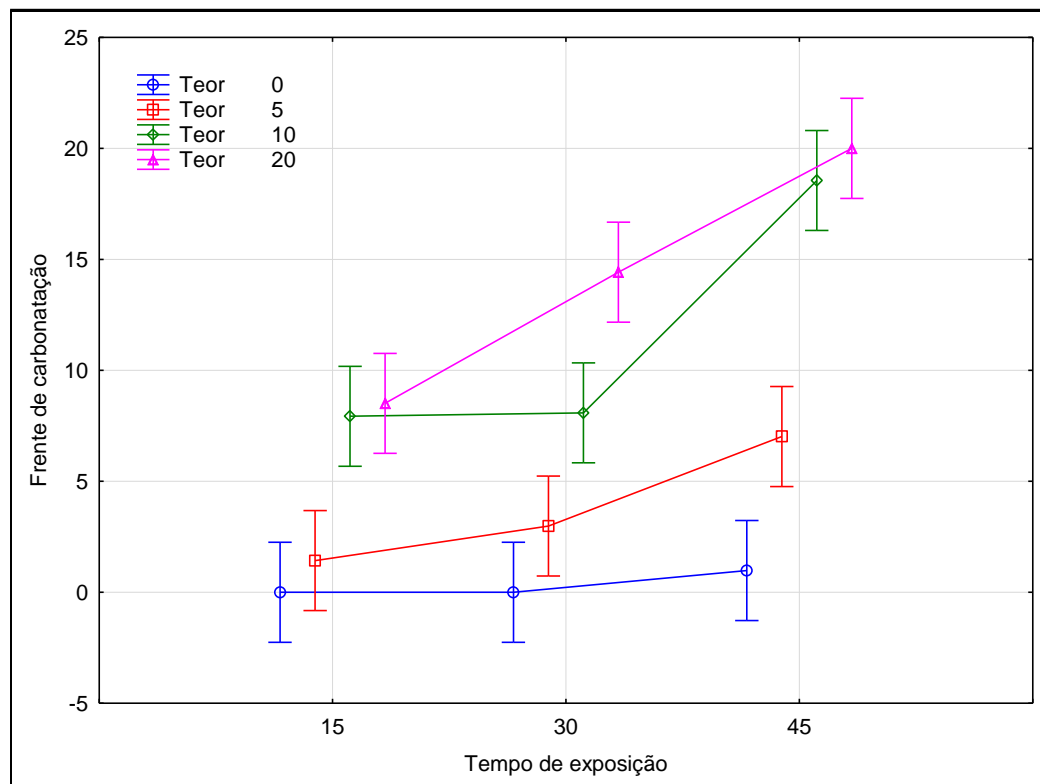
Tabela 19 – ANOVA do concreto produzido.

Variáveis	SQ	GDL	MQ	F _{calc}	Significância "p-value"
Teor de lodo (%)	1531,74	3	510,58	103,51	0
Tempo de exposição (dias)	441,38	2	220,70	44,74	0
Teor x Tempo de exposição	188,4	6	31,40	6,37	0,000123
Erro	177,57	36	4,93		

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

Fonte: A autora, 2019.

Figura 27 – Influência do teor de lodo e da idade dos CPs.



Fonte: A autora, 2019.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sabendo da necessidade de uma visão mais sustentável à indústria da construção civil em função do elevado consumo de diversos recursos naturais, este estudo vem ao encontro da busca de potencializar a utilização do lodo de ETA ao setor da construção. Com base nos resultados obtidos as seguintes considerações podem ser destacadas:

- Quanto a geração do resíduo:
 - A ETA estudada gerou em 2017 cerca 3.300 toneladas de lodo, onde todo esse montante é disposto em aterro sanitário, custando aproximadamente R\$ 465.000,00/ano.
- Quanto à caracterização físico-química do lodo de ETA:
 - Obteve-se uma densidade do lodo de 2,08 g/cm³;
 - Segundo resultados do FRX, os elementos de maior abundância no lodo são: alumina (25,44%), sílica (26,61%) e elevada perda ao fogo (37,85%) revelando uma elevada presença de matérias orgânicas;
 - A partir do ensaio de DRX, foram identificadas fases cristalinas de quartzo, hematita, leucita, óxido de titânio e sulfato de zircônia no lodo, justificando a aplicabilidade do resíduo como agregado;
 - De forma geral, observou-se que as principais propriedades analisadas apresentam valores similares aos encontrados na literatura, mostrando que o resíduo empregado tem potencial para uso na Construção Civil.
- Em relação a incorporação do lodo de ETA *in natura* como substituição ao agregado miúdo:
 - Observou-se que, com teores de lodo de ETA úmido acima de 10% em relação ao peso da areia seca, o concreto não apresenta propriedades mecânicas para utilização estrutural, sendo a resistência à compressão simples inferior a 20MPa;
 - Tanto os valores de resistência à tração por compressão diametral, como o módulo de elasticidade estático sofreram decréscimos com a introdução do lodo de ETA. Ainda assim, apresentaram valores similares ao recomendado pela literatura;
 - A partir do ensaio das propriedades físicas, percebeu-se um aumento da porosidade das amostras com maior teor de lodo, e por consequência, um aumento na absorção de água e uma redução na densidade aparente. Este efeito

pode ser explicado pelo elevado teor de matéria orgânica presente no lodo de ETA, ocasionando zonas frágeis, que com o passar do tempo, com a ação da umidade e temperatura, geram vazios;

- Por meio do ensaio de carbonatação foi possível observar que teores maiores de 10% do lodo de ETA provocam total carbonatação nas amostras de concreto a 45 dias de exposição.

Com base neste estudo, verificou-se que a substituição de areia por 10% de lodo de ETA em concretos pode de ser realizada. Porém vale enaltecer que deve se ter muito cuidado quanto a caracterização do resíduo, sabendo que este pode variar dependendo do processo de tratamento utilizado. Sendo assim, a dosagem deve ser verificada e atualizada para resíduos de diferentes regiões.

Conclui-se enfim que, os concretos com lodo de ETA com baixos teores de substituição em relação areia seca (teores iguais ou inferiores a 10%), se dosados de forma adequada, podem ser empregados em elementos estruturais, à contrapisos, blocos de pavimento intertravado, peças decorativas, blocos e placas de vedação e etc. Isso, levando em consideração a primordial avaliação de questões de durabilidade, como ensaio de carbonatação, penetração de cloretos, ataques químicos, lixiviação, entre outros.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da realização deste trabalho, citam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar a influência da substituição do lodo de ETA úmido proveniente de outras bacias hidrográficas;
- Realizar estudos de microestrutura do concreto, como Microscopia Eletrônica de Varredura, a fim de comprovar o efeito da adição do lodo na microestrutura do concreto, especialmente na questão da porosidade;
- Realizar ensaios de resistência à flexão;
- Realizar ensaios de lixiviação de forma a avaliar o encapsulamento de metais pesados quando o concreto é exposto a meios agressivos.

6 REFERÊNCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do Cimento Portland. **Boletim técnico**, São Paulo, n.106, 2002.

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

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: Determinação da Composição Granulométrica dos Agregados. Rio de Janeiro: 1987.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2 ed. Rio de Janeiro: 2015a. 9 p.

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

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

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. 2 ed. Rio de Janeiro: 2009a. 9 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estático de elasticidade e de deformação à compressão. 3 ed. Rio de Janeiro: 2017.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. 3 ed. Rio de Janeiro: 2015.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: 1987.

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

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

ALQAM, M.; JAMRAH, A.; DAGHLAS, H. Utilization of Cement Incorporated with Water Treatment Sludge. **Jordan Journal Of Civil Engineering**, Jordânia, v. 5, n. 2, p.268-277, 2011.

ANDREOLI, C. V; CARNEIRO, C. **A problemática da geração e disposição final de lodo de ETA**. In: CARNEIRO, C. ANDREOLI, C. V. (Coord.). Lodo de Estação de Tratamento de Água: gestão e perspectivas tecnológicas. Curitiba, Sanepar, 2013. p. 179-222.

BARROSO M.; CORDEIRO, J.S. (2001). Problemática dos metais nos resíduos gerados em estações de tratamento de água. In: 21º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Anais...** ABES, 2001.

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

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção: Novos Materiais para Construção Civil**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CARNEIRO, C. ANDREOLI, C. V. **Caracterização do lodo de ETA gerado no estado do paraná**. In: CARNEIRO, C. ANDREOLI, C. V. (Coord.). Lodo de Estação de Tratamento de Água – gestão e perspectivas tecnológicas. Curitiba, Sanepar, 2013. p. 131-178.

CHAVEZ, P. A. **Uso de lodo de estação de tratamento de água e agregado reciclado miúdo na fabricação de elementos de alvenaria**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil - UNICAMP, 2007. 213p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2007.

CHEN, H; MA, X; DAI, H. **Cement and Concrete Composites**. v. 32, i. 6, p. 436–439, jul. 2010.

CYR, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration. **Cement And Concrete Research**, França, v. 35, n. 4, p.719-730, abr. 2005.

DI BERNARDO, L; DANTAS, A. B; VOLTAN, P. E. N. **Trabalhabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: Ldibe, 2011. 453 p.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento e disposição dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. Luiz Di Bernardo, Angela Di Bernardo Dantas, Paulo Eduardo Nogueira Voltan. São Carlos, LDiBe, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 084**: Agregado miúdo – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me084-95.pdf>>. Acesso em: 03 fev 2019.

FADANELLI, L.; WIECHETECK, G. K. Estudo da utilização do lodo de estação de tratamento de água em solo cimento para pavimentação rodoviária. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 2, n. 2, 2010.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. 2013. 197 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

FILHO, C. F. M. **Abastecimento de  gua**. 2009. Disponível em: <<http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/Abastece.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2018.

GASTALDINI, A.L.G et al. The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. **Construction and Building Materials**, Santa Maria, n. 94, p.513-520, 2015.

GODOY, L. G. G.; SALAMONI, N.; ROHDEN, A. B. Lodo de estação de tratamento de água (ETA). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 59., 2017, Bento Gonçalves. **Anais...** [s.l.]: Ibracon, 2017. p. 1 - 10.

GRANDIN, S. R.; ALEM, S, P.; GARCIA JR., A. D. Desidratação de lodos produzidos em estações de tratamento de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17., 1993, Natal. **Anais...** Natal: ABES, 1993. v.2, p. 324-341.

HAGEMANN, S. E. **Materiais de construção básicos**. Rio Grande do Sul: Instituto Federal Sul-Rio-Grandense; Universidade Aberta do Brasil, 2011. Disponível em: <http://tics.ifsul.edu.br/matriz/conteudo/disciplinas/_pdf/apostila_mcb.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2017.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: Editora Pini Ltda, 1992.

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

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

HOPPEN, C. et al. Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. **Scientific Electronic Library Online**, Curitiba, v. 51, p.85-95, 2005.

IBRACON. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo, 2010. 1 v.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. 1 v.

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

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

KOBIYAMA, M.; MOTA, A. A.; MENEGHINI, P. Influência do deslizamento em turbidez e sólidos totais na água do rio: estudo de caso da bacia do rio Cubatão do Norte, Santa Catarina. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2009, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: ABRH, 2009.

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

- LIMEIRA, R. D. **Concreto: Qualidade, Classificação e Propriedades**. Campinas, 2000.
- LIN, C; WU, C. H; HO, H. M. **Recovery of municipal waste incineration bottom ash and water treatment sludge to water permeable pavement materials**. In Waste Management. Volume 26, Issue 9, Pages 970–978, 2006.
- MAIA, B. G. O. et al. **Bacias Hidrográficas da Região de Joinville**. Joinville: Indesign, 2014.
- MARTÍNEZ-GARCIA, C. ELICHE-QUESADA, D. PÉREZ-VILLAREJO, L. IGLESIAS-GODINO, F. J. CORPAS-IGLESIAS, F. A. **Sludge valorization from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry**. In Journal of Environmental Management. Volume 95, Supplement, Pages S343–S348, March 2012.
- MEGDA, C. R. SOARES, L. V. ACHON, C. L. **Propostas de aproveitamento de lodos gerados em ETAs**. 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2005.
- MEHTA P.K.; MONTEIRO, P.J.M., **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.
- MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª edição. São Paulo. IBRACON. 2014.
- MUCELIN, C. A. **Estatística elementar e experimental aplicada às tecnologias**. Medianeira, 2006. 245 p.
- MULEY, P; VARPE, S.; RALWANI, R. **Chopped Carbon Fibers Innovative Material for Enhancement of Concrete Performances**. **International Journal Of Scientific Engineering And Applied Science**, Mumbai, v. 1, n. 4, p.164-169, jul. 2015.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 466 p.
- NÓBREGA, C. C; PEREIRA, S. L. M; BARBOSA, G. **Caracterização do lodo residual das lagoas de lodo da estação de tratamento de água – estudo de caso: ETA – Gramame**. Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima. 4º Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos (SIIR), 2011.
- OLIVEIRA, E. M. HOLANDA, J. N. F. **Influência da adição de resíduo (lodo) de estação de tratamento de águas nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha**. Revista Cerâmica, Vol. 54, 167-173, 2008.
- PAIXÃO, L. C. et al. **Efeito da incorporação de lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa**. Revista Cerâmica, Vol. 54, 63-76, 2008.
- PAPADAKIS, V. G., VAYENAS, C. G., FARDIS, M. N. **Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete**. ACI Materials Journal/ March-April 1991.
- PORRAS, A. C. **Uso de lodo de Estação de Tratamento de Água e agregado reciclado miúdo na fabricação de elementos de alvenaria**. 2007. 188 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Unicamp, Campinas, 2007.

PORTELLA, K.F. et al. Caracterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna – Curitiba – Pr. 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL. Joinville, 2003.

POZZOBON, J. C. et al. Aplicação de lodo de estação de tratamento de água para a produção de cerâmica artística. 54º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA. Foz do Iguaçu. 2010.

RECENA, F. A. P. **Método de Dosagem de Concreto pelo Volume de Pasta com Emprego de Cinza Volante.** 2011. 262 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RAMIREZ, K. G. **Viabilidade do aproveitamento de resíduo de estação de tratamento de água (ETA) na confecção de concretos.** 2015. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2015.

REALI et al. (1999). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água.** Projeto PROSAB (1999), Rio de Janeiro: ABES, 250p.

ROSSETTO, M. **Desenvolvimento de geopolímeros com a adição do lodo de Estações de Tratamento de Água.** 2017. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

ROY, S.K.; NORTHWOODT, D.O.; POH, K.B. (1999). Durability of concrete - accelerated carbonation and weathering studies. **Building and Environment**, v. 34, p. 597-606.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodo de estação de tratamento de água.** Editora Edgard Blücher Ltda., S. Paulo (2001).

SCALIZE, P. S. DI BERNARDO, L. Caracterização da água de lavagem dos filtros rápidos de Estações de Tratamento de Água e dos sobrenadantes e sedimentos obtidos após ensaios de clarificação utilizando polímero aniônico. 20º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1999.

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

SILVA, A. P.; BIDONE, F. R. A.; MARQUES, D. M. L da M. Avaliação da Lixiviação de Alumínio e da Produção de Ácidos Graxos Voláteis em Reatores Anaeróbios Utilizados para Estudar a Disposição Final de Lodos de ETAs em Aterros Sanitários. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, XXVII., 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: AIDIS, 2000.

SILVA JR, A. P; ISAAC, R L. Adensamento por gravidade de lodo de eta gerado em decantador convencional e decantador laminar. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, XXVIII., 2002, Cancún. **Anais...** Campinas: AIDIS, 2002. p. 1 - 7.

SILVA, V. M. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida.** 2007. 306 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

TARTARI, R. et al. **Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: incorporação do lodo em mistura de argilas para produção de cerâmica vermelha.** Revista Cerâmica, Vol. 57, n. 344, 2011.

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

VERBECK G.J. (1958). **Carbonation of hydrated portland cement.** American Society for Testing and Materials - Special Technical Publication, pp. 17-36.

VIEIRA, C. M. F.; MARGEM, J. L.; Monteiro, S.N. Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com lodo de ETA. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p.275-281, 23 mar. 2008.

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

YAGUE, A. et al. Durability of concrete with addition of dry sludge from waste water treatment plants. **Elsevier**, Barcelona, n. 35, p.1064-1073, 2004.

ZHANG, Z. et al. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. **Construction & Building Materials**. v.56, p.114, jan. 2014.