

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LUCAS PLATTNER FERNANDEZ  
PAULA CRISTINA BUSS MIKOWSKI

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE LODO DE  
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM PEÇAS DE CONCRETO  
PARA PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA  
2016

LUCAS PLATTNER FERNANDEZ  
PAULA CRISTINA BUSS MIKOWSKI

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE LODO DE  
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM PEÇAS DE CONCRETO  
PARA PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Flavio Bentes Freire

Coorientador: Eng. Esp. Gustavo Macioski

CURITIBA

2016

---

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE LODO PROVENIENTE DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO

Por

**LUCAS PLATTNER FERNANDEZ  
PAULA CRISTINA BUSS MIKOWSKI**

Trabalho de Conclusão de Curso 2 apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 09 de novembro de 2016, pela seguinte banca de avaliação:

---

Prof. Orientador – Flavio Bentes Freire, Dr.  
UTFPR

---

Coorientador - Gustavo Macioski, Eng. Especialista.  
UTFPR

---

Prof. André Nagalli, Dr.  
UTFPR

Dedicamos este trabalho às nossas famílias que nos possibilitaram viver este momento e sempre nos incentivaram a buscar nos estudos respostas às nossas inquietações. Somos infinitamente gratos pela força, pelo apoio e pela inspiração com seus exemplos e valores. Devemos a vocês essa conquista.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos em primeiro lugar às nossas famílias, nossos pais, avós, tios e irmãos, por nos acompanharem neste percurso, nos dando o suporte necessário para que concluíssemos mais esta etapa. Obrigado pelo amor, pelo carinho, pela compreensão, pela paciência e, principalmente, pela sabedoria transmitida através de seus ensinamentos que se refletem em nossa essência e em nossas escolhas.

Ao nosso orientador Prof. Flávio, pela disponibilidade, pelo conhecimento compartilhado e pela presença em nossa jornada, nos acompanhando em cada decisão, atendendo nossas dúvidas e sempre nos incentivando a dar passos maiores e a trabalhar com dedicação. Obrigado pela parceria, pelos conselhos, pela amizade e pelas conversas, tanto nos momentos de dúvidas, quanto nas horas de descontração para que mantivéssemos o ânimo de seguir em frente.

Ao nosso coorientador Eng. Especialista Gustavo Macioski pela energia e disposição em nos ajudar com os inúmeros procedimentos em laboratório. Obrigado por ter aceitado nosso convite e nos permitido expandir as possibilidades de pesquisa, definindo rumos para que pudéssemos alcançar os resultados esperados.

A todos os grandes profissionais do *campus* Curitiba da UTFPR. Ao Prof. Wellington por nos acompanhar durante alguns ensaios. Ao estagiário do laboratório, Guilherme, a quem recorremos tantas vezes para liberar o acesso aos laboratórios e para nos ajudar a carregar materiais. E ao funcionário Paulo Sabino pelo auxílio na confecção das nossas fôrmas com enorme presteza e destreza.

Aos funcionários da SANEPAR, especialmente à Rita, ao Alcely, ao Luis Paulo, ao Valdir e demais funcionários da ETA Passaúna que nos possibilitaram realizar essa pesquisa, disponibilizando materiais de consulta, relatórios e principalmente à matéria-prima mais importante para este trabalho.

Agradecemos em especial aos nossos amigos, importantíssimos nessa fase. Obrigado pela força, pelo suporte, pelos risos, pelas experiências compartilhadas e, principalmente, pela compreensão pelos períodos de ausência nessa reta final. Obrigado por todas palavras de apoio. Obrigado por tantas vezes acreditarem mais na gente do que a gente a mesmo. A vida não teria o menor sentido sem vocês.

E finalmente agradecemos um ao outro pela parceria estabelecida, pela coragem em aceitar esse desafio juntos, pelo comprometimento, pelo apoio mútuo e pelo equilíbrio para definirmos nossos planos de ação. Foi uma honra!

*“O saber se aprende com os mestres. A sabedoria, só com o corriqueiro da vida.”*

*Cora Coralina*

## RESUMO

FERNANDEZ, Lucas Plattner; MIKOWSKI, Paula Cristina Buss. Viabilidade da Utilização de Lodo Proveniente de Estações de Tratamento de Água em Pavimento Intertravado de Concreto. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

O lodo gerado nas ETAs é resultado de várias operações que visam adequação da água aos padrões legais de potabilidade e tem composição química variável, de acordo com fatores diversos, como qualidade da água bruta e tipo de produtos químicos empregados nos procedimentos. Apesar de haver variadas alternativas para o tratamento do lodo, as soluções de disposição final que são usualmente utilizadas (cursos d'água, aterros sanitários ou estações de tratamento de esgoto), ainda representam grandes impactos e sobrecarregam os sistemas envolvidos. A busca por soluções técnica e economicamente viáveis e ambientalmente coerentes representa uma oportunidade de reduzir o passivo ambiental associado a este resíduo. Dentre as possibilidades, existe a de reutilização do lodo para aplicação em materiais de construção, considerando que os sólidos resultantes da secagem do lodo podem ser incorporados ao concreto e a materiais cerâmicos por exemplo. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica da adição de lodo de estações de tratamento de água (ETA) na produção de peças de concreto para pavimentação intertravada. Para atingir o objetivo estabelecido, foram moldadas amostras de peças de concreto para pavimentação intertravada com diferentes teores de adição de lodo em estado úmido e, posteriormente, amostras com um teor de lodo seco, baseado nos resultados obtidos com o lodo úmido. Foram feitos traços de concreto sem adição de lodo e com adição, em relação a massa de cimento, de 2,5%, 5,0% e 7,5% de lodo úmido e 5,0% de lodo seco em estufa. Além disso, foram feitos estudos acerca da composição química do lodo de ETA coletado, bem como a elaboração de estudos para o preparo do lodo, avaliando a viabilidade da realização de oxidação química, com o objetivo de reduzir a quantidade de matéria orgânica e permitir uma melhor durabilidade ao material, utilizando para isso peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) em amostras de lodo úmido e de lodo seco. As peças de concreto para pavimentação intertravada foram avaliadas quanto à resistência à compressão e à tração na flexão e quanto a índices físicos como índice de vazios, à absorção de água e à massa específica. Notou-se que até um teor de 5,0% de adição, as propriedades analisadas, de uma forma geral, sofrem uma redução da resistência, mas não de forma a impedir o emprego deste lodo na produção do concreto, enquanto que o teor de 7,5% de lodo acarretou queda significativa em diversas propriedades analisadas. Não foi observada, além da melhora na trabalhabilidade do concreto no estado fresco, diferenças nas propriedades decorrentes da utilização do lodo seco em vez de úmido. Ficou claro, dessa forma, que a quantidade de lodo adicionada ao concreto é um fator limitante. Conclui-se que a adição do lodo de ETA em peças de concreto para pavimentação intertravada é viável, desde que limitada a pequenos teores, de forma que não afetem drasticamente as propriedades necessárias a este material.

**Palavras-chave:** Lodo de ETA. Peças de Concreto para Pavimentação Intertravada. Oxidação de Lodo. Reúso de resíduos.

## ABSTRACT

FERNANDEZ, Lucas Plattner. MIKOWSKI, Paula Cristina Buss. Viability of utilization of sludge waste from water treatment in interlocking concrete pavers. 2016. Final bachelor paper (Bachelor in Civil Engineering), Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2016.

The waste sludge from water treatment results of various operations that aim to suit the water into the legal standards of potability. This sludge has a variable chemical composition, depending on many factors, such as quality of the raw water and the characteristics of the chemical products used during the procedures. Although there are many alternatives for treating this waste sludge, the usually used final dispositions (water courses, landfills and sewage treatment stations) still represents huge environmental impacts and overload the public systems. Searching for technical, environmental and economical solutions is one important way of reducing the environmental liabilities associated with this waste sludge. Among the various possibilities of reutilization, the application of this waste sludge from water treatment in building materials, such as concrete and ceramics, is one of the most attractive. The main aim of the present study was to evaluate the technical viability of adding waste sludge from water treatment in the production of interlocking concrete paver units. In order of achieving the objective, various interlocking concrete paver samples were produced with different levels of waste sludge from water treatment, in its natural moisture, added into the concrete. Later, others samples were produced with dried waste sludge, based on the previous analysis of different levels of addition. 5 types of concrete were produced: without any addition of waste sludge, to be used as reference; with 2,5%, 5,0% and 7,5% of addition of waste sludge in its natural moisture; with 5,0% of addition of dried waste sludge. Many analysis of the chemical composition of the waste sludge from water treatment were done and, beyond that, attempts of analyzing the possibility of oxidizing the waste sludge through the utilization of hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ). The interlocking concrete paver samples were evaluated for its fresh characteristics, for its compression and flexural resistance strengths and for its physical indexes, void content, water absorption and specific mass. It was noticed that up to 5,0% of waste sludge addition, both in its natural moisture and dried, the analyzed properties get slightly worse, but not in a way of avoiding its addition into the interlocking concrete paver. The addition of 7,5% of waste sludge ended up significantly harming various analyzed properties. Besides the better workability of the fresh concrete, no improvements were noticed by drying the waste sludge. It became clear that the amount of waste sludge added into the concrete is a limiting factor. It was concluded that the addition of waste sludge from water treatment into interlocking concrete paver is viable, as long as in small quantities.

**Key words:** Waste sludge from water treatment. Interlocking concrete pavers. Waste sludge oxidation. Resistance strength. Physical indexes.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Lodo com concentração de sólidos de 3%; 13% e 28% .....	20
Figura 2 - Fluxograma do tratamento do lodo de ETA. ....	24
Figura 3 - Formas de peças de concreto para pavimentação intertravada segundo a NBR 9781.....	37
Figura 4 - Fluxograma da metodologia.....	42
Figura 5 – ETA do Passaúna – Curitiba/PR .....	43
Figura 6 – Decantador.....	44
Figura 7 – Filtro vazio .....	44
Figura 8 – Tanque de lodo .....	44
Figura 9 – Adensador de lodo .....	44
Figura 10 – Tanque de recirculação .....	44
Figura 11 - Lodo centrifugado .....	45
Figura 12 – Centrífuga .....	45
Figura 13 – Caçamba .....	45
Figura 14 – Coleta de lodo .....	45
Figura 15 – Armazenagem .....	45
Figura 16 – Moinho de panelas AMP1 .....	47
Figura 17 – Panelas de moagem .....	47
Figura 18 – Espectrofotômetro de raio-X .....	47
Figura 19 – Amostras durante o processo de oxidação .....	49
Figura 20 – Lodo seco e destorroado.....	50
Figura 21 – Fôrmas em madeira e compensado.....	55
Figura 22 – Dimensões das amostras.....	55
Figura 23 - Peças moldadas.....	56
Figura 24 - Peças desmoldadas.....	56
Figura 25 - Peças em cura submersa .....	56
Figura 26 - Resistência à compressão .....	57
Figura 27 – Resistência à tração na flexão .....	57
Figura 28 – Lodo úmido com oxidante .....	65
Figura 29 – Lodo úmido com oxidante após 24h.....	65
Figura 30 – Lodo seco durante o procedimento .....	66
Figura 31 – Lodo seco com oxidante .....	66
Figura 32 – Lodo seco com oxidante após 24 horas.....	66
Figura 33 – Concreto, no estado fresco, com teor de 5,0% de lodo úmido .....	68

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo .....	52
Gráfico 2 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo .....	53
Gráfico 3 - Comparação entre resistência à compressão e massa específica .....	73
Gráfico 4 - Comparação entre índice de vazios e absorção.....	74

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Métodos de remoção e taxa de concentração do lodo.....	19
Quadro 2 - Métodos de adensamento.....	25
Quadro 3 - Métodos de desidratação natural.....	26
Quadro 4 - Métodos de desaguamento mecânicos.....	27

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do lodo das ETAs Iraí - PR (a), Passaúna - PR (b), São Carlos - SP (c), Araraquara - SP (d) e Rio Claro - SP (e) .....	21
Tabela 2 – Análise química por raio-X e espectrofotometria do lodo da ETA Passaúna .....	22
Tabela 3 - Composição química da argila e do lodo de ETA (%) .....	31
Tabela 4 - Principais resultados obtidos por Monteiro <i>et al.</i> (2008) para materiais cerâmicos.....	32
Tabela 5 - Principais resultados obtidos por Kizinievič <i>et al.</i> (2013) para materiais cerâmicos.....	33
Tabela 6 - Principais resultados obtidos por Benlalla <i>et al.</i> (2015) para materiais cerâmicos.....	33
Tabela 7- Principais resultados obtidos por Hoppen <i>et al.</i> (2006) em concretos.....	35
Tabela 8- Principais resultados obtidos por Tafarel (2015) em concreto (1:1,69:2,89:0,5).....	35
Tabela 9 – Principais resultados obtidos por Sales, de Souza e Almeida (2011).....	36
Tabela 10 - Parâmetros das peças de concreto para pavimentação intertravada ....	38
Tabela 11 – Parâmetros, equipamentos e metodologias para caracterização do lodo .....	46
Tabela 12 – Características físicas .....	51
Tabela 13 - Características químicas do Cimento Itambé CP V-ARI .....	51
Tabela 14 - Características físicas do Cimento Itambém CP V-ARI.....	51
Tabela 15 - Parâmetros do agregado miúdo .....	52
Tabela 16 - Parâmetros do agregado graúdo .....	53
Tabela 17 - Parâmetros do superplastificante MC POWERFLOW 1102.....	54
Tabela 18 - Dados de dosagem .....	54
Tabela 19 – Resultado pH e massa específica. ....	60
Tabela 20 – Resultados dos teores de umidade e teores de sólido. ....	60
Tabela 21 – Análise química por EDX do lodo da ETA Passaúna .....	62
Tabela 22 – Parâmetros obtidos para a massa bruta.....	64
Tabela 23 – Teor de sólidos voláteis após teste de oxidação .....	66
Tabela 24 – Perda ao fogo após teste de oxidação .....	67
Tabela 25 - Valores ensaiados de resistência à compressão .....	69
Tabela 26 - Valores ensaiados de resistência à tração à flexão .....	70
Tabela 27 - Valores ensaiados de índice de vazios .....	71
Tabela 28 - Valores ensaiados de absorção .....	71
Tabela 29 - Valores ensaiados de massa específica .....	71
Tabela 30 - Relação entre resistência à compressão e tração na flexão .....	73
Tabela 31 - Parâmetros inorgânicos para o extrato lixiviado.....	87
Tabela 32 - Parâmetros orgânicos pesticidas para o extrato lixiviado.....	87
Tabela 33 - Parâmetros orgânicos voláteis para o extrato lixiviado .....	88
Tabela 34 - Parâmetros inorgânicos para o extrato solubilizado.....	89
Tabela 35 - Parâmetros orgânicos pesticidas e voláteis para o extrato lixiviado .....	89

## LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento <i>Portland</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EDX	Espectroscopia de raios X por dispersão de energia
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SEMA	Secretaria Municipal do Meio Ambiente
SF	Sólidos Fixos
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.3 JUSTIFICATIVA.....	16
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>18</b>
2.1 GERAÇÃO DE LODO NAS ETAS .....	18
2.2 CARACTERIZAÇÃO DO LODO .....	19
2.3 TRATAMENTO DO LODO .....	23
2.3.1 Adensamento.....	25
2.3.2 Processos de desidratação naturais.....	26
2.3.3 Processos de desidratação mecânicos.....	27
2.3.4 Disposição final do lodo .....	28
2.4 POSSIBILIDADES DE APROVEITAMENTO DO LODO DE ETA.....	29
2.4.1 Preparo do lodo para aproveitamento .....	29
2.4.2 Aplicabilidade em materiais cerâmicos .....	31
2.4.3 Aplicabilidade em materiais cimentícios .....	34
2.5 PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO .....	36
2.5.1 Parâmetros de qualidade.....	37
2.5.2 Materiais utilizados .....	38
2.5.3 Aspectos da produção .....	39
2.5.4 Metodologias de dosagem para concretos secos.....	40
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>42</b>
3.1 COLETA, CARACTERIZAÇÃO E PREPARAÇÃO DO LODO.....	43
3.1.1 Coleta do lodo.....	43
3.1.2 Caracterização do lodo .....	46
3.1.3 Processos de oxidação do lodo .....	48
3.1.4 Secagem e beneficiamento do lodo.....	50
3.2 PREPARAÇÃO, DOSAGEM E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	50
3.2.1 Materiais utilizados .....	51
3.2.2 Dosagem do concreto.....	54
3.2.3 Moldagem das amostras.....	55
3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PEÇAS DE CONCRETO .....	57
3.3.1 Resistência à compressão e tração na flexão .....	57
3.3.2 Absorção, índice de vazios e massa específica .....	58
3.4 ANÁLISE DE DADOS ESPÚRIOS.....	59
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>60</b>
4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E ANÁLISE QUÍMICA DO LODO .....	60
4.2 ESTUDOS DE OXIDAÇÃO.....	64
4.3 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	67
4.4 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	69
4.4.1 Resistência à compressão e à tração na flexão .....	69
4.4.2 Índice de vazios, absorção de água e massa específica .....	71
4.4.3 Correlações entre os parâmetros obtidos .....	72
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>79</b>
<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>87</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O problema da geração e do gerenciamento de resíduos vem sendo discutido como forma de minimizar os impactos decorrentes do aumento da demanda por bens de consumo, energia e água. O crescimento populacional resultou no aumento da produção de água potável, e a grande urbanização dos últimos anos e as ocupações em áreas de mananciais contribuíram para a degradação da qualidade da água bruta. Por consequência, tem-se uma quantidade elevada de rejeitos, resultantes do tratamento, gerados nas Estações de Tratamento de Água (ETAs).

Uma ETA tem por princípio básico a transformação da água bruta em água potável, a partir da remoção dos materiais em suspensão, que alteram os parâmetros de cor e turbidez, e de organismos patogênicos. As ETAs de ciclo completo utilizam os processos de: coagulação, floculação, decantação/flotação, filtração e desinfecção (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991). Segundo dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE (2008), em 2008 o Brasil possuía 6040 ETAs convencionais em operação. Segundo Carneiro *et al.* (2013) pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) são operadas 176 ETAs.

Os processos de coagulação e floculação utilizados no tratamento permitem a aglomeração e a sedimentação das partículas sólidas, gerando nos decantadores, ou nos flotadores, uma grande quantidade de resíduo sólido caracterizado como lodo (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012). O lodo de ETA é considerado um fluido tixotrópico, com características que variam de acordo com a natureza da água bruta, dos processos utilizados para separação das partículas (sedimentação ou flotação) e dos produtos químicos aplicados no tratamento (RICHTER, 2001).

A composição do lodo de ETA caracteriza-se pela presença de água, de resíduos orgânicos e inorgânicos presentes na fonte de abastecimento, de partículas do solo e de subprodutos resultantes da adição de produtos químicos. A quantidade gerada de lodo depende da qualidade da água bruta e dos produtos utilizados para a sua potabilização (CORDEIRO, 2001).

No Brasil, a lei nº 6.938 de 3 de agosto de 1981 institui o descarte de lodo em cursos d'água como crime ambiental, estando sujeito à penalidades legais (BRASIL, 1981). A NBR 10004 (ABNT, 2004a) classifica o lodo como resíduo sólido que deve ser tratado, reutilizado e/ou reciclado, proibindo o seu lançamento *in*

*natura* nos corpos d'água. Ela exige, portanto, uma política adequada de gerenciamento desses resíduos pelos sistemas de tratamento de água.

Embora existam alternativas de tratamento para o lodo, grande número de estações de tratamento de água ainda faz o descarte inadequado desses resíduos. Barroso (2007) expõe que no Brasil menos de 0,5% das ETAs possuíam, até o ano de 2007, sistemas de secagem do lodo. Quando lançado diretamente em córregos e rios, o lodo afeta o corpo receptor, comprometendo ainda mais a qualidade da água.

Em muitas ETAs a destinação deste resíduo não é prevista em projeto, sendo gerenciada de maneira emergencial, com altos custos financeiros e ambientais. Quando não lançado diretamente nos cursos d'água, o lodo é disposto em aterros sanitários ou é encaminhado para tratamento em conjunto com o esgoto sanitário em estações de tratamento de esgotos (ETEs), podendo causar problemas operacionais e transferindo o problema de disposição (KATAYAMA, 2012).

De acordo com Hoppen *et al.* (2006), no Paraná eram produzidos em 2006 aproximadamente 4000 t/mês em matéria seca de lodo de ETA, sendo mais de 50% da região de Curitiba. Carneiro *et al.* (2013), afirmam ainda que a produção de lodo no Paraná em 2011 era de cerca de 118 mil litros por dia; sendo que apenas 18,2% das ETAs possuíam alguma metodologia para o desaguamento.

A busca por soluções tecnicamente e economicamente viáveis, bem como ambientalmente coerentes, representa uma oportunidade de reduzir impactos associados a este resíduo. Dentre as possibilidades de reutilização ou destinação final dos rejeitos de ETA, há a de aplicação em materiais de construção civil. Os sólidos resultantes do tratamento realizado nas ETAs podem ser incorporados em concreto, aplicados em cerâmicas ou utilizados para outras finalidades, se conhecidas as suas propriedades e seus potenciais usos (BARROSO, 2007).

Teixeira *et al.* (2006), Toya *et al.* (2007), Monteiro *et al.* (2008), Kizinievič *et al.* (2013), Wolff, Schwabe e Conceição (2015) e Benlalla *et al.* (2015), realizaram estudos para verificar a viabilidade de emprego deste lodo na fabricação de materiais cerâmicos. Já Lin, Wu e Ho (2006), Sales, de Souza e Almeida (2011) e Huang e Wang (2013) executaram, respectivamente, pesquisas voltadas para a aplicabilidade em materiais de pavimentação, concretos e agregados. Com base nisso, este trabalho visa estudar a viabilidade da fabricação de peças de concreto para pavimentação intertravada com a adição de lodo gerado nas ETAs.

## 1.1 OBJETIVOS

Levando em consideração o contexto previamente citado, o objetivo geral deste trabalho é analisar a viabilidade técnica da adição de lodo resultante do tratamento de água em ETAs no processo de fabricação de peças de concreto para pavimentação intertravada.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral e como forma de norteamento dos trabalhos a serem desenvolvidos, foram estabelecidos como objetivos específicos:

- i. Caracterizar o lodo de ETA, seus parâmetros físicos e químicos;
- ii. Verificar a influência da adição de diferentes teores de lodo úmido nas propriedades das peças de concreto para pavimentação intertravado;
- iii. Estabelecer o teor máximo de lodo de ETA a ser incorporado no concreto, sem prejuízo da trabalhabilidade e das características técnicas;
- iv. Estudar alternativas de oxidação e de secagem do lodo como preparação para adição ao concreto;
- v. Verificar a influência do método de preparação selecionado nas propriedades das peças de concreto em comparação aos resultados obtidos com a incorporação de lodo úmido.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012) ressaltam que a problemática dos resíduos de ETAs é de abrangência mundial, e que, apesar de a legislação brasileira exigir o tratamento antes do descarte em cursos de água ou no solo, muitas empresas de saneamento ainda adotam medidas inadequadas de disposição final do lodo proveniente do processo de tratamento de água.

A falta de uma metodologia reconhecida e de uma normatização estabelecida para o aproveitamento do lodo de ETA auxilia na perpetuação deste

ciclo de simples descarte em fontes hídricas ou em aterros, e na adoção de medidas operacionais que podem sobrecarregar outros sistemas, como a destinação à estações de tratamento de esgoto. Desta forma, faz-se importante a realização de estudos efetivos em relação à busca por outra finalidade para este lodo, como a sua incorporação em materiais de construção.

Além disso, a indústria da construção civil é uma das principais responsáveis pela extração e utilização dos recursos naturais para a fabricação de materiais. De uma maneira geral, os processos de fabricação dos materiais tradicionais se caracterizam por ações agressivas sobre o meio ambiente. A busca por soluções ambientalmente responsáveis faz, portanto, ainda mais importante o desenvolvimento de materiais com a incorporação de resíduos e baseados em matérias-primas alternativas, que reduzam o consumo de materiais associados a grandes impactos ambientais.

Sendo assim, a incorporação do lodo de ETA no concreto, alia a necessidade de uma nova forma de destinação a esse resíduo à necessidade da indústria da construção civil por novas matérias primas.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados os principais aspectos que envolvem o gerenciamento do lodo de ETAs, a partir do levantamento de informações sobre a geração do lodo, suas características, seus tratamentos e sua destinação final. Também serão abordados estudos visando a reutilização do lodo na construção civil. Por fim, serão apresentados os parâmetros e características básicas para fabricação de peças de concreto para pavimentação intertravada.

### 2.1 GERAÇÃO DE LODO NAS ETAS

As ETAs de ciclo completo, ou seja, de tratamento convencional, utilizam os processos de coagulação, floculação, clarificação por decantação ou flotação, filtração e desinfecção (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991). Juntamente com os produtos químicos empregados para remoção da cor e turbidez da água bruta, geram nos tanques de sedimentação ou flotação e nos filtros, resíduos que representam entre 0,2 e 5,0% do volume total de água (ANDREOLI *et al.*, 2006).

Para a coagulação e a floculação são aplicados coagulantes que desestabilizam suspensões coloidais e promovem a agregação das partículas em flocos capazes de sedimentar, que se acumulam nas unidades de decantação ou de flotação e nos filtros em forma de lodo. O coagulante mais utilizado é o sulfato de alumínio –  $Al_2(SO_4)_3$ , sendo também comuns coagulantes férricos como o sulfato férrico -  $Fe_2(SO_4)_3$  - e o cloreto férrico -  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ . A partir da coagulação são desencadeadas reações de hidrólise com a formação de hidróxidos que envolvem as partículas em suspensão e aumentam a capacidade de adsorção de metais e fosfatos da solução (RICHTER, 2009).

A quantidade de lodo gerada depende das características físico-químicas, principalmente relacionadas aos parâmetros de cor e turbidez da água bruta, da eficiência das unidades de processo, do tipo e da dosagem dos coagulantes e das demais substâncias químicas aplicadas no tratamento (RICHTER, 2009). A taxa de geração de lodo sofre variações sazonais, decorrentes de diferenças na qualidade de água dos mananciais dependendo do período do ano (REALI, 1999).

Segundo Cordeiro (2001), o tempo de permanência nos tanques, as técnicas de tratamento os métodos de limpeza empregados alteram a concentração de sólidos do lodo. A quantidade de água empregada na limpeza e as formas de descarga interferem no volume resultante. Em termos de massa, o lodo acumulado nos decantadores ou flotores representa entre 60 e 95% do total formado, sendo o restante proveniente da lavagem dos filtros (RICHTER, 2001).

No Quadro 1, elaborado conforme informações de Reali (1999), Di Bernardo e Dantas (2005), Richter (2009) e Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012), estão apresentadas informações que relacionam os métodos de limpeza nas unidades de processamento com as características e o teor de sólidos no lodo resultante.

<b>Unidade</b>	<b>Método de Remoção</b>	<b>Características do Lodo</b>	<b>% Sólidos</b>
Decantadores de limpeza manual	Realizada de 3 a 12 vezes por ano; retirada manual com pá, limpeza com mangueiras	Lodo estratificado e com sólidos mais densos e compactados ao fundo.	1 e 4%
Decantadores de remoção mecânica	Descartes regulares ou diários através de tubos coletores ou com descargas hidráulicas	Grande formação de lodo; Massa de lodo menos espessa, com mais água.	0,3 a 2%
Tanques de flotação	Geralmente através de raspadores até uma canaleta de coleta.	Camadas na superfície mantidas entre 15 a 20cm para adensamento adequado.	Pode atingir 5%
Filtros	Utilização de volumes entre 4 e 12 m <sup>3</sup> de água por m <sup>2</sup> de área de filtro	Baixa concentração de sólidos; grandes volumes.	0,004 a 0,1%

**Quadro 1 - Métodos de remoção e taxa de concentração do lodo.**

**Fonte:** Adaptado de Reali (1999), Di Bernardo e Dantas (2005), Richter (2009) e Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012)

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DO LODO

O lodo de ETA é constituído de hidróxidos, partículas inorgânicas, coloides, resíduos orgânicos e organismos patogênicos removidos nos processos de tratamento. É basicamente o resultado dos resíduos formados durante a coagulação e a floculação, adquirindo uma composição aproximada a da água bruta e do solo de entorno do manancial (RICHTER, 2001).

O lodo é considerado um fluido não-newtoniano, ou seja, sua tensão cisalhante tem relação direta com o gradiente de velocidade, o que lhe confere uma viscosidade variável dependendo da concentração de sólidos (BARROSO, 2007). Possui aspecto terroso, com coloração marrom, podendo assumir tons avermelhados, com viscosidade que lembra chocolate líquido (REALI, 1999).

Este resíduo constitui-se de grande quantidade de água, apresentando-se de forma tixotrópica, com aspecto de gel quando em repouso e fluido quando submetido à agitação (PORTELLA *et al.*, 2003). Possui aspecto terroso, com coloração marrom, podendo assumir tons avermelhados, com viscosidade que lembra chocolate líquido (REALI, 1999). Segundo Richter (2001), a aparência do lodo varia conforme a concentração de sólidos, conforme a Figura 1, sendo líquidos para concentrações entre 0 e 5%; esponjosos para concentrações entre 8 e 12%; e com consistência de barro em teores acima de 18%.



**Figura 1 - Lodo com concentração de sólidos de 3%; 13% e 28%.  
Fonte: Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012).**

O valor da massa específica do lodo varia de  $1002 \text{ kg/m}^3$  em lodos com teor de sólido de 1% à  $1500 \text{ kg/m}^3$  para lodos após o desaguamento, podendo-se adotar o médio de  $1800 \text{ kg/m}^3$  para a densidade de sólidos secos para a estimativa do volume produzido. A porcentagem de sólidos totais, constituídos principalmente de colóides e partículas de solo, varia entre 0,1 a 4%, para lodos de alumínio, e de 0,25 a 3,5%, para lodos de ferro. Destes, 75 a 90% correspondem a sólidos suspensos e 20 a 35% correspondem a sólidos voláteis, apresentando ainda uma pequena porção de biodegradáveis (RICHTER, 2001).

Em geral o teor de matéria orgânica, gerado pela presença de microrganismos e plânctons, varia entre 5 e 25%. Com base em dados experimentais relacionados às características sanitárias para avaliação de agentes

patogênicos, apresentam baixos índices de contaminação. Os componentes químicos encontrados em maiores proporções são os hidróxidos de alumínio e de ferro, resultantes da coagulação. A concentração de alumínio e de ferro é tipicamente de 5% a 10% da matéria seca de lodo (ANDREOLI *et al.*, 2006).

Os valores de pH ficam geralmente próximos ao neutro, variando entre 6 a 8 para os lodos de alumínio e de 7,4 a 9,5 para lodos de ferro. Sedimentam com relativa facilidade, mas apresentam baixa capacidade de compactação, que lhes conferem grandes volumes (RICHTER, 2001).

De acordo com Barroso e Cordeiro (2001), os resíduos de ETAs são potencialmente tóxicos dependendo do teor de metais e das características físico-químicas resultantes das reações ocorridas no processo de tratamento. Cobre, zinco, níquel, chumbo, cádmio, cromo e manganês, além do próprio alumínio, exercem papel de destaque para suas potenciais ações tóxicas, e podem interferir nas técnicas de tratamento, disposição e reutilização desses resíduos.

Conforme expõem Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012), pelo fato de as características do lodo variarem em função da qualidade da água bruta e dos tipos de tecnologia empregadas nos processos de tratamento, é preciso coletar amostras deste material e caracterizá-las para realização de projetos, escolha de tratamentos adequados e otimização dos processos.

Considerando-se as variações que podem ocorrer na composição do lodo, a Tabela 1 contém alguns valores referentes a composição química do lodo de ETAs de diferentes localidades com base em caracterizações apresentadas por Cordeiro (2001), Portella *et al.* (2003), Hoppen (2004) e Andreoli *et al.* (2013a).

**Tabela 1 - Composição química do lodo das ETAs Iraí - PR (a), Passaúna - PR (b), São Carlos - SP (c), Araraquara - SP (d) e Rio Claro - SP (e)**

Parâmetro	ETA 1 (a)	ETA 2 (b)	ETA 3 (c)	ETA 4 (d)	ETA 5 (e)
pH	5,35	6,4 - 7,02	7,2	8,93	7,35
Sólidos %	--	12,0	4,68	0,14	5,49
DQO			4800	140	5450
Al %	6,4	6,9	18,9	0,2	0,05
Fe %	5,6	2,9	8,52	13,2	7,32
P total %	0,3	0,11	--	--	--
Cd ppm	< 3,0	--	0,34	--	4,7
Cu ppm	31,1	--	35,5	--	1,6
Ni ppm	17,2	--	31,03	--	20,3
Pb ppm	113,4	--	--	--	--
Zn ppm	55,6	--	--	--	--
Cr ppm	31,15	--	26,9	117,3	14,98

Fonte: Adaptado de Cordeiro (2001), Portella *et al.* (2003), Hoppen (2004) e Andreoli *et al.* (2013a)

Cordeiro (2001) ressalta que esses valores representam dados pontuais que expressam as condições no momento da coleta. A variabilidade observada reflete principalmente a diferença entre os métodos operacionais de remoção do lodo e de limpeza dos decantadores. O teor de sólidos está relacionado com a quantidade de impurezas da água bruta e dos produtos químicos utilizados. Evidencia, também, a quantidade de água incorporada nos processos operacionais realizados antes da coleta de amostras.

Em relação as ETAs de São Carlos, Araraquara e Rio Claro, o autor afirma que as diferenças no teor de sólidos e do valor de DQO se dão porque na ETA de Araraquara, o lodo é removido três vezes ao dia, não sofrendo acúmulo nos tanques e apresentando uma concentração de sólidos bastante inferior às demais. As ETAs de São Carlos e de Rio Claro efetuam a limpeza dos decantadores de maneira manual e periódica, acarretando o aumento na concentração de sólidos.

No que diz respeito às concentrações de metais, Cordeiro (2001) afirma que podem ser observadas em teores mais elevados em sistemas que efetuam limpezas em grandes intervalos de tempo. Para Andreoli *et al.* (2013a), as concentrações de metais indicam principalmente as características dos solos, se apresentando com grande variabilidade de valores entre as ETAs analisadas. A quantidade de alumínio e de ferro está relacionada ao coagulante aplicado.

Portella *et al.* (2003) analisaram os elementos químicos presentes no lodo da ETA Passaúna, conforme apresentado na Tabela 2, em amostras coletadas em julho (Amostra 1) e agosto (Amostra 2) de 2002, a partir de análise por fluorescência de Raio X (EDX) e espectrofotometria de absorção atômica.

**Tabela 2 – Análise química por raio-X e espectrofotometria do lodo da ETA Passaúna**

Elementos (%)	Amostra 1	Amostra 2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,62	20,80
SiO <sub>2</sub>	14,10	12,75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,39	7,58
TiO <sub>2</sub>	0,35	0,68
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,34	0,69
CaO	0,33	0,36
MgO	0,15	0,42
K <sub>2</sub> O	0,11	0,27
Na <sub>2</sub> O	<0,02	0,10
Outros Elementos	3,60	5,23

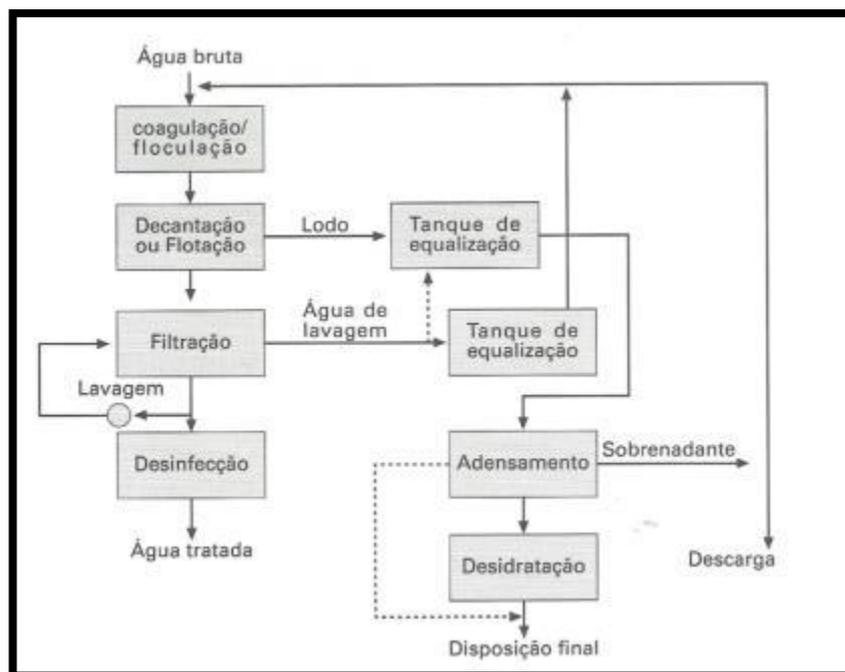
Fonte: Adaptado de Portella *et al.* (2003)

Por estas análises químicas foi detectado que os elementos com maior predominância são o alumínio, a sílica e o ferro, sendo o alumínio em maior quantidade com uma média de 22,8% e os demais com média de 13,42% e 7,98%, respectivamente. Estas concentrações elevadas confirmam a relação da constituição química do lodo ser relacionada principalmente ao tipo de coagulante utilizado, no caso o sulfato de alumínio, e as características do manancial, com a presença materiais argilosos e a sílica da areia (PORTELLA *et al.*, 2003). Observou-se também, que o fato das coletas terem sido realizadas em meses diferentes, representou variações na porcentagem de concentração dos elementos analisados.

### 2.3 TRATAMENTO DO LODO

O lançamento indiscriminado dos resíduos de ETAs nos corpos d'água de maneira direta ou indireta causa o aumento da concentração de metais tóxicos e de sólidos suspensos, limitando a luminosidade do meio líquido, diminuindo a produtividade do fitoplâncton e afetando as condições de vida e de reprodutibilidade da biota. Compromete a qualidade da água e do sedimento dos corpos receptores, podendo prejudicar o potencial do manancial como fonte de abastecimento (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012). O lodo, sendo considerado um resíduo sólido não inerte pela NBR 10004 (ABNT, 2004a), tem proibido o seu lançamento *in natura* nos cursos d'água, tornando essencial o tratamento de maneira adequada.

O tratamento dos lodos nas ETAs tem por objetivo proporcionar condições para a sua disposição final, a partir da sua redução a um estado sólido ou semi-sólido pela remoção de água, com a diminuição de volumes para facilitar o manuseio e o transporte (RICHTER, 2001). Os resíduos de ETAs apresentam teores de umidade em torno de 95%, fazendo com que os principais processos envolvidos no seu tratamento sejam o adensamento e a desidratação (OLIVEIRA; AISSE, 2013). Na Figura 2, proposta por Richter (2001), está apresentado o fluxograma do processo de tratamento em uma estação convencional.



**Figura 2 - Fluxograma do tratamento do lodo de ETA.**  
**Fonte: Richter (2001)**

O lodo gerado nos decantadores, flotores e filtros é encaminhado a tanques de equalização, nos quais as partículas floculentas são mantidas homogêneas através de agitação. Nesta etapa pode ser realizado o condicionamento do lodo, com a utilização de polímeros sintéticos para gerar condições necessárias para a liberação de água (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Devido à baixa concentração de sólidos, e por representar uma parcela considerável em termos volumétricos, propõe-se a recirculação da água de lavagem dos filtros e do sobrenadante removido dos lodos para o início da ETA (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012).

Após o condicionamento, o lodo passa para etapa de adensamento. A desidratação pode ser realizada através de processos naturais ou mecânicos, dependendo da área e dos custos de implantação (instalações, equipamentos) e de mão-de-obra disponíveis, bem como da distância até o local de disposição, das condições climáticas da região, das condições para operação e das tecnologias disponíveis nas ETAs (KURODA *et al.*, 2013).

A água presente no lodo divide-se em quatro frações: água livre, água intersticial, água vicinal e água de hidratação. Estas últimas só podem ser removidas por mudanças no estado de agregação das moléculas pelo aumento de energia

térmica (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). A água livre, desassociada da porção sólida, pode ser removida por ação da gravidade ou por filtração. A água intersticial, aderida por forças de superfície, pode ser removida pela ação de gradientes de pressão (RICHTER, 2001).

### 2.3.1 Adensamento

O adensamento é a primeira operação para a redução do volume de lodo, com o objetivo de remover o máximo de água possível e produzir um lodo mais concentrado para uma desidratação eficiente. Pode ser realizado por gravidade, por flotação ou por equipamentos mecânicos (RICHTER, 2001). No Quadro 2 estão apresentados os métodos de adensamento mais utilizados e a concentração de sólidos obtidas no lodo adensado, conforme informações de Richter (2001) e Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012).

<b>Processo</b>	<b>Método de Adensamento</b>	<b>% de Sólidos</b>
Gravidade	O lodo decanta formando um manto no fundo do tanque. O sobrenadante é removido por canalizações periféricas.	Em torno de 3% ou até 8% com adição de cal
Flotação	As partículas sólidas se aglomeram na superfície devido a redução de sua densidade com incorporação de bolhas de ar.	2 a 4% ou 4 a 8% com o uso de polímeros
Adensador Mecânico de Esteira	O lodo passa por uma esteira com tela filtrante com diversos raspadores que forçam a filtração durante o percurso.	2 a 4,5%
Adensador Mecânico de Tambor Rotativo	O lodo é introduzido num tambor que gira lentamente removendo a porção de líquido através de uma tela filtrante.	6 a 8% com o uso de polímeros

**Quadro 2 - Métodos de adensamento.**

**Fonte: Adaptado de Richter (2001) e Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012).**

### 2.3.2 Processos de desidratção naturais

Os processos naturais são utilizados por ETAs de pequeno e médio porte, devido ao baixo custo e a facilidade operacional. A desidratção se dá por drenagem por gravidade ou induzida, seguida por evaporação, exigindo grandes áreas e condições climáticas favoráveis. Também pode ocorrer por sedimentação dos sólidos. Os sistemas mais utilizados são os leitos de secagem e de drenagem, as lagoas de lodo e os *bags* ou *geotubes* (OLIVEIRA; AISSE, 2013).

Segundo Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012), para lodos adensados até atingir 1,5 a 3% de sólidos, é possível atingir concentrações de sólidos entre 15 e 20% nos sistemas de leitos de secagem e drenagem e nas lagoas de lodo. Já o lodo retido nos sacos de *geotube* atinge concentrações de sólidos superiores a 30%. Os métodos de desaguamento naturais e suas principais características estão apresentadas no Quadro 3, de acordo com informações de Richter (2001), Cordeiro (2001), Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012) e Oliveira e Aisse (2013).

<b>Método</b>	<b>Processo de Desaguamento</b>	<b>Características</b>
Leito de Secagem	O lodo é disposto em camadas de 20 a 30 cm sobre uma ou duas camadas de meio filtrante de areia com diferentes granulometrias e uma camada suporte de brita. O sistema de drenagem possui tubos perfurados de 150 a 200 mm.	Processo lento com duração de 3 a 4 meses.
Leito de Drenagem	Adaptação dos leitos de secagem, com uma manta geotêxtil sobre a camada de material filtrante ou sobre a camada de brita. Lodo disposto em camadas de até 50 cm.	Processo mais rápido, porém com resultado semelhante.
Lagoas de Lodo	Grandes lagoas com profundidade entre 1,20 e 1,80 m, impermeabilizadas para evitar infiltração e contaminação do subsolo. O lodo é deixado em repouso proporcionando a sedimentação das partículas. O sobrenadante é removido através de tubulações.	Formação de camada de água intermediária quando há infiltração de água pluvial.
<i>Bags</i> ou <i>Geotubes</i>	O lodo é acondicionado em bolsas de material geotêxtil sintético com pequenos poros que permitem a drenagem de água e a retenção de sólidos progressivamente.	Duração de 30 a 60 dias e exigem a utilização de polímeros

**Quadro 3 - Métodos de desidratção natural.**

**Fonte:** Adaptado de Richter (2001), Cordeiro (2001), Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012) e Oliveira e Aisse (2013).

### 2.3.3 Processos de desidratação mecânicos

Ao contrário dos sistemas naturais, os sistemas mecanizados de desaguamento necessitam de menor área e não dependem de condições climáticas, porém exigem mão-de-obra qualificada e equipamentos com maior custo de implantação (OLIVEIRA; AISSE, 2013). Em ETAs de médio e grande porte, devido ao grande volume de lodo a ser tratado, os meios mecânicos são os mais indicados (KURODA *et al.*, 2013).

Em ordem crescente de custo, os equipamentos mecânicos de desidratação mais utilizados são: prensa desaguadora centrífuga, filtro prensa e filtro a vácuo, e seguem o princípio de separação por sedimentação em um campo de forças (gravitacional ou centrífugo) e/ou filtração forçada (RICHTER, 2001). No Quadro 4 são apresentados os métodos para o desaguamento, as limitações de cada processo e a concentração de sólidos obtida no lodo desaguado, conforme informações levantadas dos trabalhos de Cordeiro (1999), de Richter (2001) e de Oliveira (2010).

<b>Equipamento</b>	<b>Processo de Desaguamento</b>	<b>Limitações</b>	<b>% de Sólidos</b>
Prensa desaguadora	O lodo passa por duas correias porosas e tensionadas e é comprimido por uma prensa.	Sensível às características de suspensão	15 a 20%
Centrífuga	O lodo é colocado em um tambor cilíndrico que promove a retenção dos sólidos em suas paredes quando rotacionado.	Eficiência depende da velocidade de rotação; tambor sujeito à abrasão	15 a 35%
Filtro Prensa	O lodo é introduzido entre duas placas com telas filtrantes que o comprimem a diferentes pressões	Aplicação de cinza e cal; processo lento; alto custo operacional e de energia	40 a 50% (com uso de cal)
Filtro à Vácuo	Um tambor revestido por uma tela filtrante gira em um recipiente de lodo, aplicando pressões negativas e positivas alternadamente	Usual para lodo de sedimentos finos; alto custo operacional e de energia. Pode ocorrer colmatção do filtro.	35 a 40%

**Quadro 4 - Métodos de desaguamento mecânicos.**

Fonte: Adaptado de Cordeiro (1999), Richter (2001) e Oliveira (2010).

#### 2.3.4 Disposição final do lodo

Após dar-se o tratamento adequado, é necessário que seja definido o destino final do lodo. De acordo com Andreoli *et al.* (2013b), a disposição final do lodo apresenta custos elevados, principalmente na questão de transporte, e requer alternativas condizentes a regulamentações ambientais. A legislação brasileira tem como instrumentos legais que dispõe sobre parâmetros, padrões e diretrizes para o lançamento de efluentes em corpos receptores, as resoluções CONAMA nº 357 (2005) e de nº 430 (2011).

Especificamente para o Estado do Paraná a disposição do lodo de ETA deve obedecer às condições e padrões ambientais da Resolução 001 de 2007 da Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA). Esta resolução determina que lodos de ETAs e ETEs poderão ser dispostos em aterros sanitários adjacentes às estações de tratamento, sob controle do Instituto Ambiental do Paraná (IAP). Além disso, estabelece padrões de lançamento em cursos d'água a partir do monitoramento de parâmetros como DBO e DQO (ANDREOLI *et al.*, 2013b).

Segundo Richter (2001), a definição do destino final para o lodo é uma das tarefas mais difíceis para os administradores dos serviços de saneamento, sugerindo o teor de sólidos no resíduo tratado como critério de escolha dentre as alternativas mais tradicionais empregadas: lançamento em cursos d'água (de 1 a 8% de sólidos); lançamento na rede de esgotos sanitários (de 1 a 8% de sólidos); aplicação em solos (de 1 a 15%); e aterros sanitários (de 15 a 25%).

Estas alternativas, no entanto, mesmo após o tratamento do lodo, ainda geram impactos ambientais não condizentes com os princípios de minimização, que regem o gerenciamento de resíduos sólidos. Além disso, transferem o problema dos resíduos em ETAS para outros sistemas operacionais, podendo sobrecarregá-los (KATAYAMA, 2012).

Sendo assim, de acordo com Katayama (2012), alternativas de usos benéficos dos resíduos de ETA têm aumentado a realização de pesquisas na área nos últimos anos. Hoppen (2004) expõe que a busca por soluções economicamente e ambientalmente vantajosas para o uso do lodo é um grande desafio, citando a incorporação dos sólidos provenientes do tratamento do lodo em matriz de concreto, como uma alternativa em potencial para a destinação destes resíduos.

## 2.4 POSSIBILIDADES DE APROVEITAMENTO DO LODO DE ETA

Enquanto no Brasil, a destinação usual para o lodo gerado nas ETAs é o descarte em rios (WOLFF; SCHWABE; CONCEIÇÃO, 2015), em Tóquio, no Japão, cerca de 2/3 deste lodo são aplicados em melhoramento do solo ou utilizados como parte do processo de produção de tijolos ou cimento (TOYA *et al.*, 2007).

Segundo Kyncl (2008), a utilização deste lodo na agricultura é possível, sendo, contudo, necessário considerar a quantidade de metais pesados existentes. Sales, de Souza e Almeida (2011) alertam a importância de levar em conta que a concentração de alumínio no lodo residual pode acarretar a fixação do fósforo e, desta forma, dificultar o crescimento dos vegetais. Já para o emprego em materiais da construção civil, as maiores dificuldades estão relacionadas à consistência gelatinosa e ao alto teor de água do lodo, o que torna difícil a obtenção de uma mistura homogênea (RIBEIRO *et al.*, 2001).

### 2.4.1 Preparo do lodo para aproveitamento

Para a incorporação do lodo em materiais de construção, muitos pesquisadores abordam a necessidade de realização de algum preparo ou beneficiamento do lodo, após os processos de tratamento geralmente realizados nas ETAs. Cita-se principalmente a necessidade de secagem do lodo, devido ao alto teor de água ainda remanescente após o desaguamento, com o objetivo de facilitar o controle de suas propriedades físicas para a mistura com outros materiais.

De acordo com Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012), a secagem do lodo desaguado visa a sua redução volume e acondicionamento para sua incorporação em artefatos de argila ou concreto, na preparação de cimentos ou utilização em solo-cimento, potencializando a sua utilização e estocagem. O processo consiste basicamente no aquecimento do lodo com a conseqüente evaporação da umidade ainda existente no resíduo tratado, permitindo a obtenção de um resíduo com teor de sólidos acima de 90% (SANTOS, 2003).

Wolff, Schwabe e Conceição (2015) defendem a exposição ao sol por no mínimo 72 horas, seguida da posterior secagem em estufa a 110°C por 24 horas. Já

Benlalla *et al.* (2015), em seus estudos, secaram o lodo ao sol por 72 horas e, depois, com o auxílio de um aquecedor elétrico, a 105°C por 48 horas. Lin, Wu e Ho (2006), Huang e Wang (2013) e Toya *et al.* (2007) não citam a necessidade da secagem prévia ao sol, mas sim a necessidade de secagem deste lodo de ETA em temperaturas entre 105 e 110°C por períodos entre 24 e 48 horas.

A incineração de lodo de ETA, que geralmente ocorre via oxidação térmica à temperaturas superiores a 900°C, pode ser utilizada para destruir a matéria orgânica presente no lodo desaguado com o objetivo de obter um material mais estabilizado para a utilização associada a outros materiais. Os componentes passíveis de oxidação térmica são transformados em água-vapor, dióxido de carbono e nitrogênio. No entanto, este processo pode gerar gases tóxicos e envolve gastos elevados de energia e custos de operação e manutenção (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012).

Embora a oxidação seja sistematicamente reportada na literatura como um processo de estabilização empregado comumente em lodos de ETEs e efluentes industriais e águas residuais, este assunto será brevemente abordado neste trabalho como base para a realização de estudos de preparação do lodo. Além dos processos de secagem e incineração, segundo Santos (2003), para a estabilização de lodos provenientes de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), também pode ser realizada a oxidação úmida.

A oxidação úmida, realizada em lodos com elevado teor de umidade, é um processo de transformação da matéria orgânica com a injeção de oxigênio à altas pressões, em dióxido de carbono, água, ácidos orgânicos fracos e matéria mineral. O resultado deste processo é um produto inerte e estéril, com destruição cerca de 95% do total dos sólidos voláteis, podendo ser incorporado a materiais de construção ou dispostos em aterros (FERNANDES e SOUZA, 2001).

Segundo Bautista *et al.* (2008), para efluentes industriais e águas residuais urbanas, são empregados processos oxidativos avançados, dos quais se destaca o processo *Fenton*. Este processo é baseado na geração de radicais hidroxilas ( $\text{OH}^\cdot$ ), a partir do uso de peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), usualmente aplicado em uma concentração de 35%, dissolvido em meio ácido na presença de ions de ferro. Mattos *et al.* (2003), afirmam que o  $\text{H}_2\text{O}_2$  é um dos oxidantes mais versáteis e com alto poder de reação, atuando como metabólico natural em uma ampla variedade de componentes, se decompondo em oxigênio molecular e água.

Em lodos de ETA, estudos com a utilização de  $H_2O_2$  foram realizados visando avaliar os efeitos da oxidação química em substituição ao uso de polímeros no condicionamento para a desidratação do lodo (FERREIRA FILHO e KAWAMOTO, 2000a) e verificar o comportamento cinético desta reação (FERREIRA FILHO; KAWAMOTO, 2000b). Não foram verificadas melhorias significativas na desidratação, nem obtidos resultados relacionados a oxidação como uma alternativa de preparação do lodo de ETA. No entanto, observou-se que a cinética da reação é influenciada diretamente pelas características do resíduo, podendo-se relacionar a concentração de agente oxidante a concentração de sólidos totais do lodo.

#### 2.4.2 Aplicabilidade em materiais cerâmicos

A semelhança de composição química entre a argila e o lodo gerado nas ETAs tem impulsionado pesquisas voltadas à incorporação deste lodo, como parte da matéria-prima, no processo de fabricação de materiais cerâmicos (TEIXEIRA *et al.*, 2006).

A semelhança entre argila e lodo gerado nas ETAs pode ser verificada a partir dos dados apresentados na Tabela 3, de acordo com Monteiro *et al.* (2008), cujo lodo foi obtido de ETAs da região de Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Kizinievič *et al.* (2013), cujo lodo foi obtido do processo de extração de ferro da água, e Benlalla *et al.* (2015), cujo lodo é decorrente do tratamento com sulfatos de alumínio.

**Tabela 3 - Composição química da argila e do lodo de ETA (%)**

<b>Autores</b>	<b>Composto</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>MgO</b>	<b>CaO</b>
<b>Monteiro <i>et al.</i> (2008)</b>	Lodo	24.68	30.39	11.59	0.35	0.17	0.16
	Argila	48.84	25.94	9.14	1.91	0.83	0.30
<b>Kizinievič <i>et al.</i> (2013)</b>	Lodo	10.90	1.34	68.65	-	0.61	8.23
	Argila	67.52	17.09	6.56	4.23	1.88	2.14
<b>Benlalla <i>et al.</i> (2015)</b>	Lodo	27.12	62.66	1.16	0.83	0.37	1.25
	Argila	54.17	15.27	6.81	2.85	7.74	2.85

Fonte: Adaptado de Monteiro *et al.*, (2008), Kizinievič *et al.* (2013) e Benlalla *et al.* (2015)

A argila, por ser um composto orgânico, é formada principalmente por compostos de Dióxido de Silício ( $\text{SiO}_2$ ), o Óxido de Alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e Óxido de Cálcio ( $\text{CaO}$ ) (TOYA *et al.*, 2007). Além disso, a composição química dos compostos da Tabela 3 se deve também ao fato de os principais coagulantes usados nas ETAs serem o Sulfato de Alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), Sulfeto Férrico ( $\text{FeS}$ ) e Cloreto Férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) (TEIXEIRA *et al.*, 2006).

Apesar de haver diferenças na composição química, graças a essa proximidade de composição entre lodo e argila são reduzidos eventuais problemas de incompatibilidade entre os materiais durante a queima do produto cerâmico (MONTEIRO *et al.*, 2008). De acordo com Benlalla *et al.* (2015) os principais fatores que influenciam na qualidade dos materiais cerâmicos com lodo incorporado são a proporção de lodo adicionada e a temperatura de queima do material. Estes dois fatores podem ser relacionados às propriedades físicas do material, como perda de massa, absorção de água, retração volumétrica, massa específica e resistência à compressão.

Os resultados de absorção de água, retração e resistência à compressão dos materiais cerâmicos, obtidos por Monteiro *et al.* (2008), são apresentados na Tabela 4. Os dados obtidos por Kizinievič *et al.* (2013) são apresentados na Tabela 5. Já os obtidos Benlalla *et al.* (2015) são apresentados na Tabela 6.

**Tabela 4 - Principais resultados obtidos por Monteiro *et al.* (2008) para materiais cerâmicos**

Parâmetro	Temperatura (°C)	Lodo adicionado (%)			
		0	3	5	10
Absorção de Água (%)	700	22,7	23,3	24,9	25,1
	900	22,7	23,9	24,0	25,1
	1100	11,0	11,8	12,2	14,0
Retração linear (%)	700	1,5	1,5	1,5	1,6
	900	2,9	2,8	2,8	3,0
	1100	9,5	9,6	9,7	8,6
Resistência à compressão (MPa)	700	6,4	5,0	4,1	4,2
	900	10,9	7,7	7,8	6,8
	1100	23,9	19,4	18,0	16,3

**Fonte: Adaptado de Monteiro *et al.* (2008)**

**Tabela 5 - Principais resultados obtidos por Kizinievič *et al.* (2013) para materiais cerâmicos**

Parâmetro	Temperatura (°C)	Lodo adicionado (%)					
		0	5	10	20	30	40
Absorção de água (%)	1000	14,2	11,0	12,8	18,0	24,7	28,8
	1050	11,6	4,6	6,5	11,7	16,2	19,8
Retração linear (%)	1000	13,0	11,5	11,7	12,2	12,7	14,8
	1050	15,1	15,2	15,8	16,0	16,5	17,5
Resistência à compressão (MPa)	1000	24,6	48,5	35,6	19,7	16,1	14,0
	1050	39,4	53,8	52,5	40,9	32,0	25,9

**Fonte: Adaptado de Kizinievič *et al.* (2013)**

**Tabela 6 - Principais resultados obtidos por Benlalla *et al.* (2015) para materiais cerâmicos**

Parâmetro	Temperatura (°C)	Lodo adicionado (%)					
		5	10	15	20	25	30
Absorção de Água (%)	800	16,2	18,7	19,6	20,0	23,0	25,1
	900	17,8	19,3	20,2	22,4	25,2	27,8
	1000	15,1	15,9	17,0	18,6	20,1	23,5
Retração (%)	800	1,2	1,3	1,5	1,8	1,9	1,9
	900	1,6	1,8	1,9	2,1	2,3	2,4
	1000	2,3	2,6	2,7	2,8	2,9	2,9
Resistência à compressão (MPa)	800	14,9	13,6	13,4	10,8	9,0	7,3
	900	16,1	14,8	14,0	10,9	9,5	8,7
	1000	17,2	16,2	14,4	11,9	11,0	8,3

**Fonte: Adaptado de Benlalla *et al.* (2015)**

O teor de água absorvida decresce com o aumento da temperatura de queima e cresce com a adição de lodo, devido ao aumento da porosidade por consequência da perda de massa (MONTEIRO *et al.*, 2008). A perda de massa, segundo Benlalla *et al.* (2015), aumenta proporcionalmente ao acréscimo de lodo e à elevação de temperatura do tratamento térmico.

Assim como a perda de massa, a retração volumétrica cresce à medida que se adiciona lodo à mistura e que se aumenta a temperatura de queima. Isso ocorre pelo fato de as altas temperaturas as quais o material é submetido causarem a evaporação da água e a queima da matéria orgânica (KIZINIEVIČ *et al.*, 2013).

A massa específica aumenta com o aumento da temperatura e diminui com a adição de lodo (BENLALLA *et al.*, 2015). Por ter relação direta a esse fator, a

resistência à compressão segue a mesma tendência de crescimento com temperatura e diminuição com lodo (KIZINIEVIČ *et al.*, 2013).

Segundo Benlalla *et al.* (2015), é viável a utilização do lodo de ETA em materiais cerâmicos, principalmente como fonte de alumínio. A temperatura ideal de queima varia entre 900°C e 930°C. Já Monteiro *et al.*, 2008, limita o uso de lodo de ETA na produção de materiais cerâmicos em proporções na casa de 3% e 5%, devido ao fato de maiores proporções reduzirem consideravelmente a resistência à compressão e aumentarem o valor de absorção de água. Kizinievič *et al.* (2013) concluíram que a incorporação do lodo de ETA é financeira, técnica e também ecologicamente viável em materiais cerâmicos aplicados para diversas finalidades.

Huang e Wang (2013) desenvolveram pesquisas voltadas para a produção de agregados leves a partir de lodo de ETA. Para a viabilização desta produção, os pesquisadores listaram três passos fundamentais: tratamento do lodo úmido, que deve ser secado inicialmente, até atingir umidade de 25%; preparo do composto compactado, que deve ser moído, amassado, homogeneizado, misturado com água e, finalmente, extrudado; e a sinterização (exposição do material a temperatura ligeiramente inferior à temperatura de fusão, resultando na alteração estrutural microscópica), que deve ocorrer a temperaturas na faixa de 1100°C até 1250°C. A partir destes três passos básicos, é possível a geração de agregados leves a base de lodo resultante do processo de tratamento de água. Vale notar que as temperaturas dos estudos de Huang e Wang (2013) são semelhantes às temperaturas dos estudos abordados no item 2.4.2.

### 2.4.3 Aplicabilidade em materiais cimentícios

Kyncl (2008), associando a necessidade do cimento ter um determinado teor de ferro e a alta porcentagem de compostos ferrosos na composição química do lodo, levantou a possibilidade de uso do lodo gerado nas ETAs na fabricação de Cimento *Portland*, que comumente utiliza, além das matérias-primas, cinzas de piritas ou hematitas sintéticas como fonte de ferro.

Nos testes do autor, o lodo, previamente seco, para permitir a utilização na indústria cimentícia, foi disposto livremente como um aditivo ao cimento. Os resultados obtidos foram aceitáveis, mas, devido às especificidades do lodo gerado

em diferentes ETAs e a falta de embasamento no assunto, Kyncl (2008) recomenda a necessidade de execução de outros testes para utilização em larga escala.

Além do emprego em materiais cerâmicos e na produção de Cimento *Portland*, o lodo de ETA pode ser utilizado na fabricação de concretos e argamassas. Hoppen *et al.* (2006) utilizaram lodo em uma matriz de concreto. Os principais resultados obtidos por Hoppen *et al.* (2006) estão apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7- Principais resultados obtidos por Hoppen *et al.* (2006) em concretos**

Parâmetro	Lodo Adicionado (%)		
	0	4	8
Absorção de Água (%)	7,44	7,41	7,46
Peso Específico (kg/m <sup>3</sup> )	2700	2510	2510
Resistência à Compressão (MPa)	38,90	28,25	27,05

**Fonte: Adaptado de Hoppen *et al.* (2006)**

A partir dos dados da Tabela 7 e demais estudos desenvolvidos por Hoppen *et al.* (2006), concluiu-se que a incorporação de lodo é possível, apresentando resultados positivos em concentrações de 4% e 8% de lodo úmido em relação à massa de areia e a um limite máximo de 10%. Além disso, devido à incorporação do lodo no concreto, reduziu-se o consumo de materiais, como areia, brita e cimento. Devido a falta de estudos a respeito das consequências do emprego do lodo de ETA, os autores aconselham a utilização apenas em concretos de características não-estruturais.

Seguindo esta linha, Tafarel (2015) avaliou as propriedades do concreto no estado endurecido com a incorporação do lodo de ETA em substituição ao agregado miúdo, nos teores de 5% e 10%. Até o teor de 5% o concreto pode ser utilizado para finalidades não estruturais, considerando os parâmetros apresentados na Tabela 8

**Tabela 8- Principais resultados obtidos por Tafarel (2015) em concreto (1:1,69:2,89:0,5)**

Parâmetro	Lodo Adicionado (%)		
	0	5	10
Absorção de Água (%)	6	7	7
Resistência à Compressão aos 7 dias (MPa)	16,45	15,76	10,35
Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)	17,50	15,51	12,38
Resistência à Tração aos 28 dias (MPa)	64,41	71,38	56,20

**Fonte: Adaptado de Tafarel (2015)**

Sales, de Souza e Almeida (2011) avaliaram a viabilidade de utilização do lodo, com um tratamento específico, em substituição ao agregado graúdo em concreto. Os principais resultados por esse estudo são apresentados na Tabela 9.

**Tabela 9 – Principais resultados obtidos por Sales, de Souza e Almeida (2011)**

Parâmetro	Concreto Produzido	Referência
<i>Slump</i> (cm)	7± 1	5± 1
Absorção de água (%)	8,8	5,1
Resistência à compressão (MPa)	11,1	20,9
Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	2200	2699

**Fonte: Adaptado de Sales, de Souza e Almeida (2011)**

Sales, de Souza e Almeida (2011) atestaram a viabilidade de emprego deste lodo, devendo ele ser corretamente tratado, na produção de concretos não estruturais. O concreto com lodo incorporado atingiu resistências baixas, na faixa de 10 até 15 MPa, enquanto o concreto de referência (traço 1:4,8:5,8:0,8) atingiu resistências médias, variando de 18 até 25 MPa. Essa redução na resistência do concreto se deve, segundo os autores, a maior porosidade e a menor resistência à compressão do lodo, em comparação aos materiais do concreto de referência.

## 2.5 PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO

As peças de concreto para pavimentação intertravada são materiais de vasta aplicabilidade, podendo ser utilizados em locais com trânsito de pedestres, em estacionamentos para carros ou até mesmo em ruas de tráfego de veículos automotores, sejam eles leves ou pesados (ABCP, 2011).

Sua principal vantagem é permitir que a água se infiltre no solo quando comparado com outras formas de pavimentação, visto que nas áreas urbanas, cujas vias são praticamente impermeáveis, em média apenas 5% da água da chuva se infiltra no solo. Além disso, este tipo de material reduz o escoamento de água pela superfície e retarda o fluxo de água até o subleito, reduzindo, dessa forma, o processo de erosão do solo causado pela água (ABCP, 2011).

Segundo o *US Department of Transportation* (2015), são vários os benefícios da utilização destas peças de concreto, como: imediata liberação do local após a conclusão dos trabalhos; redução do escoamento superficial; preservação da vegetação e do espaço onde seria feita a pavimentação; custos de vida útil inferiores a outros materiais de pavimentação; redução das ilhas de calor, devido ao alto índice de refletância da luz solar; e fácil e rápida manutenção, tanto dos blocos, quanto das camadas inferiores.

Já a ABCP (2010) lista, entre outras, como vantagens: a superfície antiderrapante, eficaz mesmo em situações nas quais o material está molhado; a resistência e a durabilidade, devido à alta resistência do concreto; e a possibilidade de reciclagem do material e reutilização em outras finalidades.

### 2.5.1 Parâmetros de qualidade

A NBR 9781 (ABNT, 2013) classifica as peças de concreto para pavimentação intertravada como peças pré-moldadas de concreto, de formas diversas, como representado pela Figura 3, compostas por Cimento *Portland*, agregados (naturais, industriais ou reciclados) e água, podendo conter pigmentos e aditivos, e com a função de revestimento de pavimentos intertravados. Além disso, devem ter uma relação entre comprimento e espessura igual ou inferior a 4.

#### D.2.1 Peças do tipo I

Conforme Figura D.1.

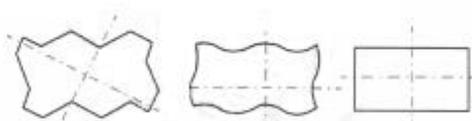


Figura D.1 — Exemplos de peças de concreto do tipo I

#### D.2.2 Peças do tipo II

Conforme Figura D.2.

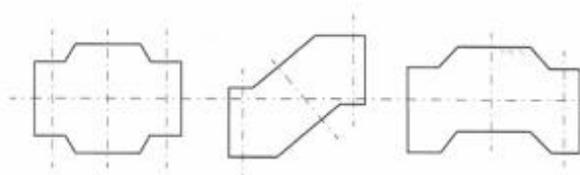


Figura D.2 — Exemplos de peças de concreto do tipo II

#### D.2.3 Peças do tipo III

Conforme Figura D.3.

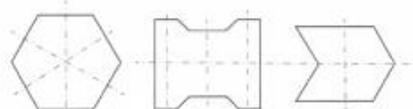


Figura D.3 — Exemplos de peças de concreto do tipo III

#### D.2.4 Peças do tipo IV

Conforme Figura D.4.

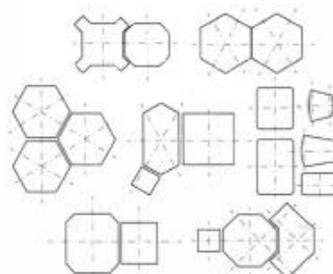


Figura D.4 — Exemplos de peças de concreto do tipo IV

**Figura 3 - Formas de peças de concreto para pavimentação intertravada segundo a NBR 9781. Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013)**

Além de apresentar aspecto homogêneo, arestas regulares e ângulos retos e não apresentar rebarbas ou defeitos similares, as peças de concreto para pavimentação intertravada devem respeitar os demais parâmetros estabelecidos pela NBR 9781 (ABNT, 2013) e que são apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10 - Parâmetros das peças de concreto para pavimentação intertravada**

Parâmetro	Valor	
Resistência à compressão (28 dias)	Fluxo leve	35 MPa
	Fluxo pesado	50 MPa
Absorção de água	Valor Médio	≤ 6%
	Valor Máximo	≤ 7%
Dimensões	Comprimento	≤ 250 mm
	Espessura	≥ 60 mm Múltiplo de 20 mm
	Largura	≥ 97 mm
Cavidade máxima devido à abrasão	Pedestres e Tráfego Leve	23 mm
	Abrasões Acentuadas	20 mm
Ângulo de inclinação	90°	

Fonte: Adaptado de NBR 9781 (ABNT, 2013)

Já a ASTM C936 (ASTM, 1996) estabelece valores mais rigorosos. A média de resistência à compressão não deve ser inferior a 55 MPa, sendo proibido haver unidades cuja resistência seja inferior a 50 MPa. A média dos valores de absorção de água deve ser de no máximo 5%, não sendo permitido que haja valores superiores a 7%.

## 2.5.2 Materiais utilizados

As peças de concreto para pavimentação intertravada são compostas por Cimento *Portland*, agregados e água, podendo ou não conter pigmentos e aditivos. A NBR 9781 (ABNT, 2013) determina que o Cimento *Portland* deve obedecer aos padrões de qualidade e requisitos impostos pelas normativas brasileiras.

Cruz (2003) pontua que, para peças pré-fabricadas, devido a necessidade de obtenção de altas resistências iniciais e rápido período de desforma, os cimentos de alta resistência inicial, como o CP V-ARI, são bastante propícios.

De acordo com Marchioni (2012), as características dos agregados escolhidos influenciam em muitos aspectos do concreto, como teor de água total da mistura, propriedades no estado fresco, condições de hidratação, durabilidade ou resistências mecânicas. Assim, deve-se analisar, dentre outras propriedades, a granulometria, a forma, a porosidade e o módulo de elasticidade dos agregados. Como as unidades de pavimento intertravado são voltadas para a pavimentação, Marchioni (2012 *apud* FERNANDES, 2008) recomenda a utilização de agregados com diâmetro inferiores a 6,3mm, para garantir uma superfície bem acabada e que propicie um bom rolamento.

Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), a água de amassamento deve atender a ABNT NBR 15900-1. Para a NBR 15900-1 (ABNT, 2009a), a água de amassamento do concreto utilizada deve atender aos valores limites para alguns compostos químicos, como cloretos e sulfatos. A água proveniente do abastecimento público, pode ser utilizada diretamente na fabricação das peças de concreto para pavimentação intertravada, enquanto águas de outras origens, exceto água de esgoto, podem ser utilizadas, em alguns casos com aplicações limitadas, desde que os valores dos parâmetros químicos obtidos após os ensaios requeridos estejam dentro dos limites mínimos e máximos.

Os aditivos são produtos adicionados em pequenas quantidades ao concreto, com o intuito de alterar, de acordo com as necessidades individuais, as propriedades do concreto. Os aditivos podem ser plastificantes, retardadores, aceleradores ou incorporadores de ar (ABNT NBR 7211, 2005).

Já os pigmentos, que devem ser obrigatoriamente de base orgânica (ABNT, 2013), são geralmente adicionados em proporções na faixa de 3 a 5% da massa do aglomerante e podem resultar em variadas cores (CRUZ, 2003).

### 2.5.3 Aspectos da produção

As peças de concreto para pavimentação intertravada são produzidas com o auxílio de vibro-prensas para garantir a melhor qualidade do produto, impedindo a formação de vazios na forma. Além disso, este equipamento garante que as resistências à compressão sejam homogêneas, assim como a textura do produto, e

que as dimensões finais do material tenham valores constantes e padronizados (FIORITI; INO; AKASAKI, 2007).

Segundo a ABCP (2010), a fabricação, quando executada com estas vibroprensas, garante um alto grau de compactação às peças, melhorando, portanto, a resistência do material à compressão e também a sua durabilidade.

De acordo com as características do material a ser produzido, o principal aspecto a se considerar é a correta calibragem da energia de vibração e das propriedades de prensagem do equipamento. Além de se levar em consideração as dimensões geométricas da peça, deve-se considerar também as especificações da vibroprensa, como potência e vibração, na metodologia de dosagem do concreto que será utilizado para fabricação das (CRUZ, 2003).

Após a execução das peças nas vibroprensas, aconselha-se que elas sejam curadas, por um período de 24 horas, em câmaras especiais, no interior das quais a umidade ambiente é controlada e igual a 95%, de forma que seja garantido o processo de hidratação do cimento e que o valor de absorção de água esteja de acordo com os parâmetros estabelecidos pela NBR 9781 (ABNT, 2013). Por fim, estas peças devem ser curadas no pátio da fábrica por períodos que, de acordo com as condições locais, variam de 7 até 28 dias (ABCP, 2010).

#### 2.5.4 Metodologias de dosagem para concretos secos

Segundo Marchioni (2012) o resultado final da produção das peças de concreto para pavimentação intertravada depende do teor de cimento incorporado, das propriedades dos agregados empregados e da qualidade do equipamento utilizado. Assim, a sequência comumente adotada na fabricação é a formulação inicial, seguido de testes de verificação das características obtidas e, por fim, a execução de ajustes, até que o material atinga as propriedades desejadas.

Devido a variabilidade na forma de produção, não há referências bem estabelecidas de dosagem deste material. Assim, é comum que a dosagem adotada para produção, seja decorrente de testes e experiências executados diretamente nas instalações de fabricação (CRUZ, 2003).

Os concretos secos são propícios de utilização para peças de concreto para pavimentação intertravada, além de blocos estruturais, tubos e outros. Oliveira

(2004) argumenta que, para mesma energia de vibração e mesmo traço, a adição de água, por melhorar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, diminuir o atrito entre os grãos e facilitar a compactação, resulta na diminuição do volume total de poros. Assim, devido a menor porosidade, os concretos secos conseguem atingir melhores resistências à compressão.

O Método Columbia, proposto pela fabricante de vibro-prensas, Columbia, consiste em utilizar agregados dentro de uma faixa de granulometria indicada, o que resulta em três fatores importantes para as peças de concreto para pavimentação intertravada: boa trabalhabilidade, aparência e resistência mecânica. Após essa determinação de granulometria, varia-se o teor de cimento adicionado em 15% e a umidade na casa dos 5% (JUNIOR, 2000).

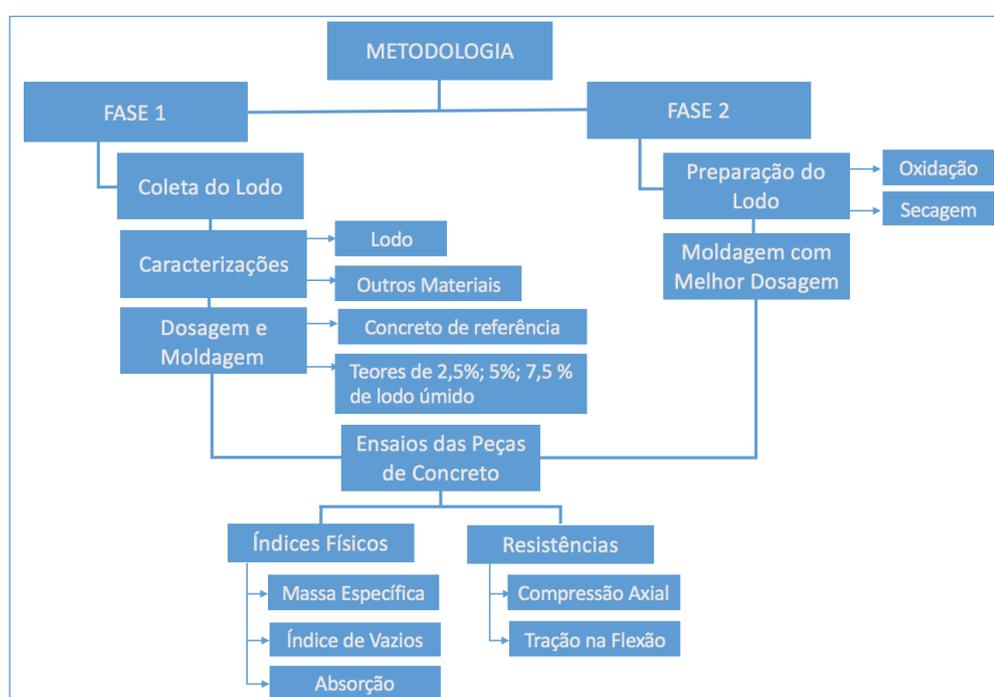
O Método Dowson é um método empírico, mas voltado para materiais de pavimentação. Consiste no ajuste dos agregados a uma curva de granulometria estabelecida por Dowson, que busca propiciar o menor volume de vazios ao concreto e, conseqüentemente, gerar materiais mais compactos. Os teores de cimento e de água utilizadas devem ser ajustados na fábrica (MARCHIONI, 2012).

Já o Método Besser Company, também empírico e criado pela Besser Company, consiste na utilização de agregados que se adequem devidamente a uma disposição granulométrica pré-definida. Após o estabelecimento das proporções de agregados, são executados traços pilotos, considerando as resistências que se desejam atingir, com variadas composições de cimento e umidades entre 6 e 7,5% (JUNIOR, 2000).

O método da ABCP é originalmente destinado a concretos plásticos, aqueles usualmente empregados na construção civil. Consiste na combinação dos materiais de forma econômica, buscando ainda boa trabalhabilidade. Este método se baseia na determinação em uma consistência desejada (de acordo com ensaio de abatimento de cone), na determinação de uma dimensão máxima característica do agregado graúdo e, a partir disto, na determinação gráfica da relação entre água e cimento e do consumo de cimento (BOGGIO, 2000).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão tratados dos materiais e métodos utilizados para avaliação da viabilidade técnica do emprego do lodo gerado nas ETAs em peças de concreto para pavimentação intertravada. Serão abordadas as metodologias de coleta, caracterização e preparação do lodo, de caracterização dos materiais, de dosagem do concreto, de moldagem dos corpos de prova e, por fim, da avaliação das propriedades das peças no estado endurecido, conforme fluxograma apresentado na Figura 4.



**Figura 4 - Fluxograma da metodologia**  
 Fonte: Os autores, 2016

Basicamente a pesquisa se dividiu em duas fases. Na primeira fase foram realizados os procedimentos necessários para a dosagem e a análise das propriedades do concreto com a incorporação de diferentes teores de lodo úmido. Com os resultados obtidos nos ensaios realizados na primeira fase, deu-se seguimento a segunda fase, cujo objetivo foi analisar a influência do preparado do lodo nas características do concreto, envolvendo a moldagem de peças após o preparo selecionado com base em estudos de oxidação e secagem, no teor que apresentou os melhores resultados na primeira fase.

### 3.1 COLETA, CARACTERIZAÇÃO E PREPARAÇÃO DO LODO

#### 3.1.1 Coleta do lodo

O lodo utilizado nesta pesquisa é proveniente da ETA Passaúna, operada pela SANEPAR e localizada na região metropolitana de Curitiba. Anteriormente a realização da coleta, no início do mês de maio de 2016 foi realizada uma visita à ETA para conhecimento dos processos utilizados no tratamento e no gerenciamento do lodo. Na Figura 5 pode ser observado o *layout* da ETA com a indicação das unidades de processo envolvidas na geração de lodo.



Figura 5 – ETA do Passaúna – Curitiba/PR  
Fonte: *Google Maps*

A ETA Passaúna utiliza como coagulante o sulfato de alumínio e trata uma vazão aproximada de 1800 L/s. Está dividida em 4 módulos, cada um com 4 decantadores (Figura 6) e 6 filtros de areia e carvão (Figura 7), onde são acumulados os resíduos do tratamento de água. O lodo gerado no decantador é removido através de descarga hidráulica duas vezes por mês e enviado para um tanque de estabilização de lodo (Figura 8) com capacidade de 500 m<sup>3</sup>, onde permanecem por aproximadamente 12 horas.



**Figura 6 – Decantador**  
Fonte: Os autores, 2016



**Figura 7 – Filtro vazio**  
Fonte: Os autores, 2016



**Figura 8 – Tanque de lodo**  
Fonte: Os autores, 2016

Após ficar estocado no tanque, o lodo passa pelo adensador (Figura 9), de onde é bombeado para a desidratação na centrífuga. O sobrenadante é enviado para um tanque de recirculação (Figura 10) com capacidade 300 m<sup>3</sup>, que também recebe a água de lavagem dos filtros, realizada a cada 24 horas, a água de lavagem dos decantadores e a água retirada do lodo centrifugado.



**Figura 9 – Adensador de lodo**  
Fonte: Os autores, 2016



**Figura 10 – Tanque de recirculação**  
Fonte: Os autores, 2016

Para a pesquisa foi utilizado o lodo centrifugado (Figura 11), armazenado em caçambas com capacidade de 5 m<sup>3</sup> e coletado por uma empresa terceirizada que utiliza o resíduo para correção de solos. A centrifugação é feita por uma centrífuga do Grupo Peralisi (2016) (Figura 12), permitindo uma vazão de 12000 L/h, conforme dados do manual do fabricante, gerando entre 45 e 55 caçambas de lodo<sup>1</sup>.



**Figura 11 - Lodo centrifugado**  
Fonte: Os autores, 2016



**Figura 12 - Centrífuga**  
Fonte: Os autores, 2016

O lodo foi coletado da caçamba (Figura 13), em 30/05/16, com o uso de uma pá e armazenado em bombonas com tampa removível de polietileno de alta densidade (PEAD) (Figura 14). Foram coletadas duas bombonas com capacidade de 50 litros, que, durante a realização da pesquisa, ficaram armazenadas no laboratório de saneamento da UTFPR (Figura 15).



**Figura 13 - Caçamba**  
Fonte: Os autores, 2016



**Figura 14 - Coleta de lodo**  
Fonte: Os autores, 2016



**Figura 15 - Armazenagem**  
Fonte: Os autores, 2016

<sup>1</sup> Informação obtida com funcionário da empresa durante visita à ETA.

### 3.1.2 Caracterização do lodo

Com o objetivo de avaliar a influência do lodo na dosagem e trabalhabilidade do concreto, realizou-se a caracterização do lodo com base em metodologias para análises de solos (ABNT, 1986) e de agregados (ABNT, 2009b), bem como em metodologias descritas no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (EATON; CLESCERI; GREENBERG, 1999). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Química do Concreto da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Curitiba. Os parâmetros analisados, as metodologias e os equipamentos utilizados estão apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11 – Parâmetros, equipamentos e metodologias para caracterização do lodo**

Parâmetro	Equipamento	Metodologia	Referência
pH	pHmetro	4500 H <sup>+</sup>	EATON; CLESCERI; GREENBERG, 1999
Teor de Umidade (%)	balança de precisão	NBR 6457	ABNT, 1986
Massa Específica Seca (g/cm <sup>3</sup> )	balança de precisão	NBR NM 52	ABNT, 2009b
Sólidos Totais (%)	balança de precisão	2450 G	EATON; CLESCERI; GREENBERG, 1999
Sólidos Voláteis (%)	balança de precisão	2450 G	EATON; CLESCERI; GREENBERG, 1999
Sólidos Fixos (%)	balança de precisão	2450 G	EATON; CLESCERI; GREENBERG, 1999
Perda ao Fogo (%)	balança de precisão	NBR NM 18	ABNT, 2004b

**Fonte: Os autores, 2016**

Com exceção da verificação da massa específica e do pH, os ensaios foram realizados em duplicata. Para o ensaio do pH foi utilizado o sobrenadante formado sobre o lodo mantido na bombona. Para os demais ensaios, o lodo foi homogeneizado mexendo-se até ficar uniforme. Para cada ensaio foi separado um mesmo volume de lodo, correspondente a 50 ml, medido em proveta.

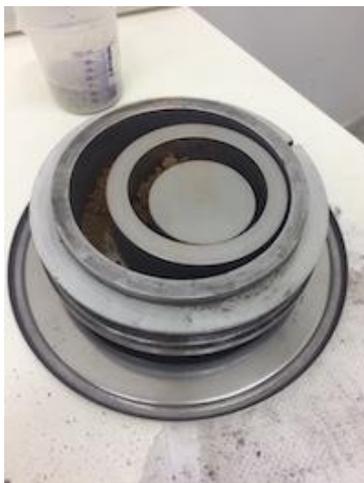
Para o teor de umidade, massa específica seca e sólidos totais, o lodo foi seco em estufa por 24 horas à 105°C. Para os sólidos voláteis e sólidos fixos, as amostras secas foram calcinadas em mufla à uma temperatura de 550°C por 1 hora, e para o ensaio de perda ao fogo, calcinadas à 1000°C por uma hora. Os equipamentos utilizados nestas análises foram a estufa (S150SA, BIOPAR) e a mufla (F3– DM/T, FORNITEC).

Além da caracterização do lodo por esses parâmetros, foi feita a análise química por fluorescência de raio-X por energia dispersiva (EDX), com o objetivo de identificar os elementos químicos presentes na composição do lodo e suas quantidades, bem como a concentração de CO<sub>2</sub>, após a perda d'água da amostra, também caracterizada como perda ao fogo. Conforme recomendações do fabricante do equipamento EDX-720/800 HS (SHIMADZU, 2013), para a análise, as amostras de lodo seco em estufa foram calcinadas em mufla à temperatura de 1000°C por uma hora, para correção dos teores de sólidos identificados.

Após a calcinação, o lodo foi pulverizado no moinho AMEF AMP1 (Figura 16), com a utilização de panelas de moagem (Figura 17). A análise no equipamento Shimadzu EDX 720/8000 HS (Figura 18), é realizada por meio de um espectrômetro de fluorescência de raios-X por energia dispersiva. Este método permite a obtenção de uma curva de sensibilidade que relaciona a intensidade fluorescente para cada elemento de interesse (WASTOWSKI *et al.*, 2010).



**Figura 16 – Moinho de panelas AMP1**  
Fonte: Os autores, 2016



**Figura 17 – Panelas de moagem**  
Fonte: Os autores, 2016



**Figura 18 – Espectrofotômetro de raio-X**  
Fonte: Os autores, 2016

Para verificação de demais características químicas relevantes foram consultados relatórios de caracterização fornecidos pela SANEPAR, correspondentes ao período do segundo semestre de 2014 até o primeiro semestre de 2016. São elaborados por laboratórios terceirizados, a cada 6 meses, especificando os compostos químicos inorgânicos e os compostos orgânicos para o extrato lixiviado conforme a NBR 10005 (ABNT, 2004b) e para o extrato solubilizado, de acordo com a NBR 10006 (ABNT, 2004c).

Os compostos presentes no extrato lixiviado e solubilizado foram verificados em termos qualitativos para identificar possíveis interferências no processo de oxidação ou em eventuais reações com o concreto. Também foram verificados parâmetros relacionados à massa bruta de lodo, tais como densidade, pH e teor de sólidos, para comparação com os resultados obtidos na caracterização nesta pesquisa, e de concentração de sulfetos, que podem influenciar em questões de durabilidade do concreto (HASPARYK *et al.*, 2002).

### 3.1.3 Processos de oxidação do lodo

Como alternativa de preparo do lodo, foram elaborados estudos de oxidação, adotando-se a concentração de sólidos totais e de sólidos voláteis como parâmetros para o estabelecimento de uma metodologia de dosagem do oxidante e de análise dos resultados. O objetivo foi verificar a possibilidade de melhorar as características do lodo em relação a concentração de matéria orgânica, estabilizando a fração degradável que pode exercer influência na durabilidade do material com a sua incorporação no concreto.

Como oxidante foi utilizado o peróxido de hidrogênio a 35%, com concentração de 395 g H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/L, fornecido pelo laboratório Labsynth. Pela falta de metodologias pré-estabelecidas, a quantidade de peróxido foi baseada nos estudos elaborados por Ferreira Filho e Kawamoto (2000a, 2000b). Determinou-se a concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, relacionando massa de agente oxidante pela massa de sólidos totais (g AO/g ST), em 5 fatores diferentes (0,2; 0,4; 0,6; 0,8 e 1,0).

Para isso, os resultados da determinação dos sólidos totais do lodo, em porcentagem, foram adaptados para mg/L, com base na metodologia 2540 B do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (EATON; CLESCERI; GREENBERG, 1999), destinada a sólidos totais em efluentes. Conhecendo-se a concentração em g/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, foram medidos os volumes a serem acionados em cada amostra com o auxílio de uma pipeta. Primeiramente foi testada a oxidação no lodo úmido. Foram preparadas 6 amostras de lodo em beckers de vidro, um de referência, sem a adição de peróxido, e 5 com os teores estabelecidos (Figura 19).



**Figura 19 – Amostras durante o processo de oxidação**  
**Fonte: Os autores, 2016**

Na capela do Laboratório de Saneamento da UTFPR, o oxidante foi adicionado aos poucos, misturando-se com uma espátula até a reação aparentemente estabilizar. As amostras foram mantidas em análise com o oxidante por 24 horas, e após esse período, seguiram-se os procedimentos de secagem em estufa e em mufla à 550°C para análise dos sólidos voláteis, parâmetro escolhido para a avaliação do processo de oxidação, seguindo a mesma metodologia e os mesmos procedimentos já citados anteriormente para caracterização do lodo.

A oxidação foi também realizada com lodo seco em estufa por 24 horas à temperatura de 105°C e posteriormente destorroado com um almofariz de porcelana. Foi utilizada a mesma quantidade inicial de lodo úmido e as mesmas concentrações de oxidante, repetindo a mesma sequência de procedimentos.

Conforme será apresentado no capítulo seguinte, os resultados obtidos para o teor de sólidos voláteis das amostras oxidadas, em ambos os procedimentos, não apresentaram diferenças entre si, nem em relação as amostras de referência. Dessa maneira, o procedimento de oxidação foi refeito no lodo úmido e no lodo seco com o teor de 0,6 g AO/ g ST, para a análise da perda ao fogo, com o objetivo de identificar a decomposição de materiais carbonáceos e de queima de material orgânico em um intervalo de temperatura superior ao utilizado para análise de sólidos voláteis.

Após 24 horas com o oxidante, foi realizada a secagem em estufa por 24 horas, seguida da calcinação das amostras em mufla a 1000°C por uma hora, conforme metodologia adaptada da NBR NM 18 (ABNT, 2004d). Novamente, não foram obtidos resultados significativos que justificassem a ocorrência da oxidação. Algumas hipóteses para a não alteração dos teores de sólidos voláteis e de perda ao fogo após a introdução do peróxido de hidrogênio foram consideradas, conforme

será discutido no próximo capítulo, mas em virtude de demandarem um considerável tempo hábil para que fossem confirmadas (ou descartadas), e também em função das outras atividades relacionadas a pesquisa, optou-se por suspender os estudos relacionados a oxidação.

#### 3.1.4 Secagem e beneficiamento do lodo

Como alternativa para preparação do lodo, com o objetivo de permitir um melhor controle para adição no concreto moldado na segunda fase da pesquisa, foi realizada a secagem do lodo em estufa a 105°C por 48 horas. A quantidade de lodo úmido separada para a secagem foi estabelecida conforme o teor de lodo adicionado no concreto dosado para a primeira fase da pesquisa. Após a secagem, o lodo foi destorroado com o uso de almofariz de porcelana (Figura 20).



**Figura 20 – Lodo seco e destorroado**  
Fonte: Os autores, 2016

### 3.2 PREPARAÇÃO, DOSAGEM E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Primeiramente foi realizada a dosagem e a moldagem para incorporação do lodo úmido em diferentes teores (2,5%, 5% e 7,5% em relação à massa de cimento) e, posteriormente, após a verificação dos resultados relativos às propriedades do concreto endurecido, foi realizada a moldagem com a adição de lodo seco no teor que apresentou os melhores resultados. Pela falta de vibroprensa para a moldagem de concreto seco, as amostras foram dosadas para uso do concreto convencional.

### 3.2.1 Materiais utilizados

Para produção das peças de concreto para pavimentação intertravada, fez-se uso de cimento *Portland*, agregado miúdo, agregado graúdo, água e lodo de ETA. Os cinco primeiros materiais estavam disponíveis nos laboratórios da UTFPR e o último foi coletado em visitada à ETA do Passaúna.

O cimento utilizado foi o Cimento *Portland* CP V-ARI produzido pela Cimento Itambé e cuja caracterização é feita e detalhada pela própria empresa. Os principais dados são apresentados na Tabela 12, as características químicas na Tabela 13 e as características físicas na Tabela 14.

**Tabela 12 – Características físicas**

Parâmetro	Unidade	Valor
Massa específica	kg/m <sup>3</sup>	3090
Resistência à compressão média a 28 dias	MPa	53,6
Início médio de pega	horas:minutos	03:39
Fim médio de pega	horas:minutos	04:18

Fonte: Cimento Itambé, 2016

**Tabela 13 - Características químicas do Cimento Itambé CP V-ARI**

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Perda ao Fogo (%)	CaO Livre (%)	Resíduo Insolúvel (%)	Equivalente Alcalino (%)
4,27	19,07	2,69	60,68	3,84	2,98	3,37	0,67	0,75	0,73

Fonte: Cimento Itambé, 2016

**Tabela 14 - Características físicas do Cimento Itambém CP V-ARI**

Expansibilidade a quente (mm)	Tempo de pega (h:min)		Consistência normal (%)	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	#200 (%)	#325 (%)	Resistência à Compressão (MPa)			
	Início	Fim					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
0,27	3:48	4:25	29,9	4,365	0,04	0,30	22,8	38,4	44,0	52,9

Fonte: Cimento Itambé, 2016

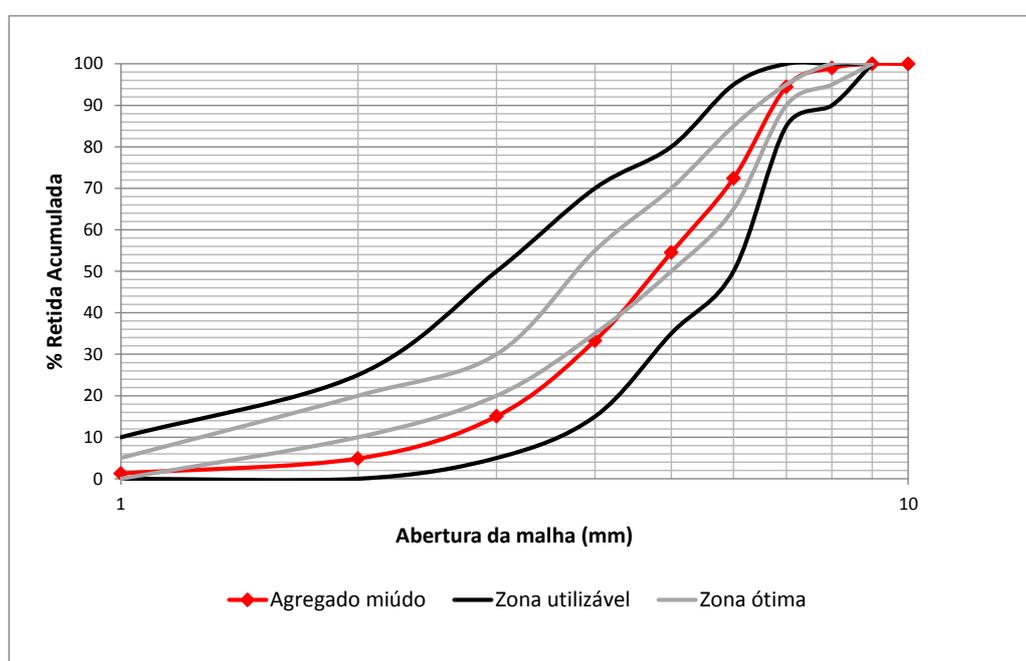
Seguindo as diretrizes da normatização, foram realizados ensaios para determinação da massa específica seca (ABNT, 2009b), da massa unitária (ABNT, 2006), do material pulverulento (ABNT, 2003a), da absorção (ABNT, 2003b), do módulo de finura (ABNT, 2003c) e da granulometria (ABNT, 2003c) do agregado

miúdo (areia). Os valores obtidos para os 5 primeiros parâmetros são apresentados na Tabela 15 e para o último deles no Gráfico 1.

**Tabela 15 - Parâmetros do agregado miúdo**

Parâmetro	Unidade	Média
Massa específica seca	kg/m <sup>3</sup>	2570
Massa unitária	kg/m <sup>3</sup>	1440
Absorção	%	1,05
Módulo de finura	-	2,21

Fonte: Os autores, 2015



**Gráfico 1 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo**

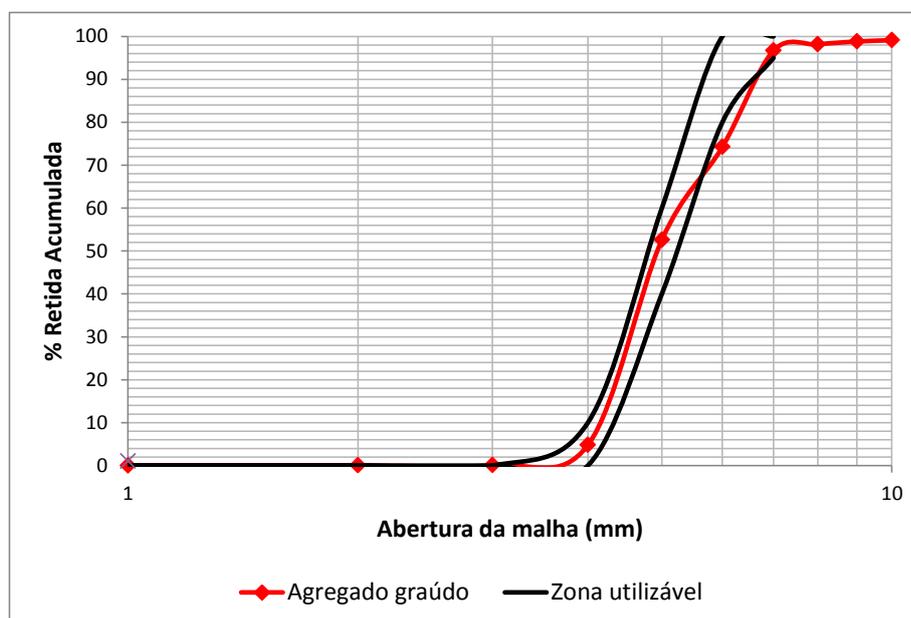
Fonte: Os autores, 2016

Seguindo as diretrizes da normatização, foram realizados ensaios para determinação da massa específica (ABNT, 2009c), da massa unitária (ABNT, 2006), da massa unitária compactada (ABNT, 2006), do material pulverulento (ABNT, 2003a), da absorção (ABNT, 2009c), do índice de vazios (ABNT, 2006) e da granulometria (ABNT, 2003c) do agregado graúdo (pedrisco). Os valores obtidos para os 6 primeiros parâmetros são apresentados na Tabela 16 e para o último deles no Gráfico 2.

**Tabela 16 - Parâmetros do agregado graúdo**

Parâmetro	Unidade	Média
Massa específica	kg/m <sup>3</sup>	2810
Massa unitária solta	kg/m <sup>3</sup>	1350
Massa unitária compactada	kg/m <sup>3</sup>	1520
Material pulverulento	%	3,14
Absorção	%	2,30
Índice de vazios	%	5,96

Fonte: Os autores, 2016



**Gráfico 2 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo**

Fonte: Os autores, 2016

O lodo de ETA utilizado para produção das peças de concreto foi caracterizado conforme o item 3.1.2. O lodo foi adicionado no concreto em seu estado adensado úmido e, posteriormente, após determinação do teor máximo de adição que não causasse perdas significativas nas características físicas do concreto, equivalente ao teor de 5,0% de adição, conforme apresentado no capítulo de resultados, foi utilizado em um novo traço, sendo o lodo seco a 105°C em estufa por 48 horas.

Fez-se necessária a correção do traço pela adição de mais água, juntamente com mais cimento, para evitar a alteração da relação água/cimento, e de um aditivo superplastificante MC POWERFLOW 1102. As principais características do aditivo são apresentadas na Tabela 17.

**Tabela 17 - Parâmetros do superplastificante MC POWERFLOW 1102**

Parâmetro	Unidade	Valor
Massa específica	kg/m <sup>3</sup>	1070
Dosagem sobre o peso recomendada	%	0,2 – 5,0

Superplastificante recomendado para concretos pré-moldados e aparentes

**Fonte: Os autores, 2016**

### 3.2.2 Dosagem do concreto

Para dosagem do concreto utilizado na moldagem, utilizou-se o Método da ABCP, a fim de facilitar o processo de moldagem das amostras. Apesar de industrialmente as peças de concreto para pavimentação intertravada serem moldadas com concretos secos, devido à ausência de vibroprensas ou mesas vibratórias nas instalações da UTFPR, o Método da ABCP atende aos requisitos necessários para desenvolvimento dos estudos deste trabalho. Os dados referentes à dosagem são apresentados na Tabela 18.

**Tabela 18 - Dados de dosagem**

Parâmetro	Unidade	Valor
fcj	MPa	33,53
água/cimento	-	0,59
Consumo de água	L/m <sup>3</sup>	225
Consumo de cimento	kg/m <sup>3</sup>	381,36
Consumo agregado graúdo	kg/m <sup>3</sup>	919,60
Consumo agregado miúdo	kg/m <sup>3</sup>	833,51

**Fonte: Os autores, 2016**

Para determinação do fcj de cálculo apresentado na Tabela 18, fez-se necessária a realização de uma correção, utilizando como base o valor de 35 MPa da NBR 9781 (ABNT, 2013), em função da diferença de geometria das amostras da normatização e do ensaio.

Inicialmente considerou-se a adição dos teores de 2,5%, 5% e 7,5%, em seu estado adensado, como os percentuais de lodo a serem adicionados em relação à massa de cimento. O teor de água no lodo neste estado foi considerado para correção do traço.

Em um segundo momento, a massa equivalente ao teor de 5% de lodo úmido em relação à massa de cimento foi seca e destorroada, sendo então utilizada para moldagem de novas amostras. Neste caso, não se fez necessária correção da quantidade de água de amassamento, buscando-se assim a verificação do processo de secagem nas propriedades do concreto.

### 3.2.3 Moldagem das amostras

Previamente à moldagem foram confeccionadas fôrmas (Figura 21) com compensado laminado e ripas de madeira pinus no canteiro de obras da UTFPR. Foram confeccionadas 6 fôrmas com capacidade de 5 peças cada uma, utilizando-se parafusos para a fixação das chapas, de maneira a possibilitar a desmontagem para a reutilização. As dimensões de um corpo de prova, assim como seu formato, são apresentados na Figura 22.



Figura 21 – Fôrmas em madeira e compensado  
Fonte: Os autores, 2016

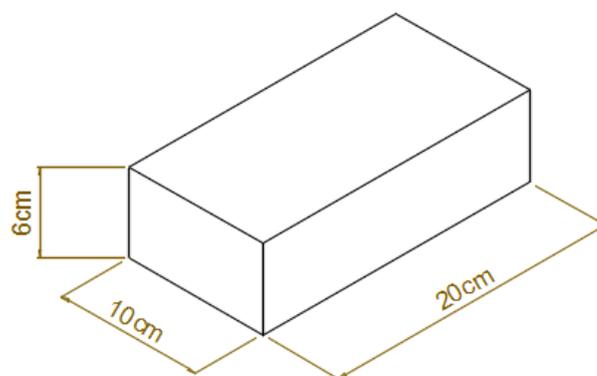


Figura 22 – Dimensões das amostras  
Fonte: Os autores, 2016

Com as dosagens de concreto pré-definidas, os corpos de prova foram confeccionados no laboratório de argamassas e concretos da UTFPR. Foram confeccionados 15 corpos de prova para cada um dos 5 traços estipulados (traço de referência, adições de 2,5%, 5,0% e 7,5% de lodo úmido adensado e adição de 5,0% de lodo seco em estufa).

O passo inicial para confecção das amostras foi a separação e pesagem dos materiais necessários para produção do concreto. Após isso, procedeu-se com a

aplicação de desmoldante nas fôrmas e, antes da mistura dos materiais, realizou-se imprimação da betoneira, a fim de evitar a perda de material dosado e a mistura com concretos anteriores produzidos na betoneira. Utilizou-se o mesmo traço do concreto a ser produzido, descartando-o após a realização da imprimação.

O lodo, anteriormente à utilização, passou por um processo de homogeneização misturando-se a amostra com o auxílio de uma pá dentro da bombona. Tendo sido adicionado na última etapa de confecção do concreto.

Cada corpo de prova foi moldado em duas camadas, sendo cada camada compactada com 30 golpes ao chão inclinando-se as laterais dos moldes cerca de 30°. Por fim, com o auxílio de colheres de pedreiro, pode-se fazer a regularização da superfície dos corpos de prova. Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram nos moldes por 24 horas, sendo desformados depois este período e, então, e alocados para cura submersa pelo período de 28 dias.

Na Figura 23 são mostrados os corpos de prova logo após a moldagem, na Figura 24 são mostrados os corpos de prova logo após a desforma e na Figura 25 é mostrada a alocação dos corpos de prova no processo de cura submersa.



**Figura 23 - Peças moldadas**  
Fonte: Os autores, 2016



**Figura 24 - Peças desmoldadas**  
Fonte: Os autores, 2016



**Figura 25 - Peças em cura submersa**  
Fonte: Os autores, 2016

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PEÇAS DE CONCRETO

Para análise da viabilidade técnica da utilização do lodo de ETA em peças de concreto para pavimentação intertravada foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, índice de vazios, absorção de água e massa específica no estado endurecido.

#### 3.3.1 Resistência à compressão e tração na flexão

Para execução dos ensaios de compressão e de tração na flexão, seguiu-se a NBR 9781 (ABNT, 2013) e a NBR 13279 (ABNT, 2005b) respectivamente.

Foi utilizada uma máquina de ensaios (EMIC, DL 30.000). Na Figura 26 é apresentado o ensaio de compressão e na Figura 27 o de tração na flexão.



**Figura 26 - Resistência à compressão**  
Fonte: Os autores, 2016



**Figura 27 - Resistência à tração na flexão**  
Fonte: Os autores, 2016

Para o ensaio de resistência à compressão, foram ensaiados 5 corpos de provas de cada traço, com idades de 28 dias. A partir dos valores máximos de força aplicados pela prensa e fazendo uso da Equação (1), foi possível determinar os valores de resistência à compressão de cada um dos corpos de prova ensaiados.

Para o ensaio de resistência à tração na flexão, assim como no de compressão, foram ensaiadas 5 amostras de cada traço, também com idades de 28

dias. A partir dos valores máximos de força aplicados pela prensa e fazendo uso da Equação (2), foi possível determinar os valores de resistência à tração na flexão de cada um dos corpos de prova ensaiados.

$$\sigma_C = \frac{P}{A_c} \quad (1)$$

$$\sigma_T = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot h^3} \quad (2)$$

Nas quais:

$\sigma_C$  : Resistência à compressão axial;

$\sigma_T$  : Resistência à tração na flexão;

P : Força máxima aplicada;

$A_C$  : Área comprimida;

L : Comprimento entre os apoios;

h : Altura do corpo de prova.

### 3.3.2 Absorção, índice de vazios e massa específica

Para determinação dos valores de absorção, índice de vazios e massa específica, foram seguidas as recomendações da NBR 9778 (ABNT, 1987). Para tanto, foram pesadas 5 amostras de cada traço, com idade de 28 dias, em 3 estados: umidade saturada, seca em estufa por 24 horas e submersa.

A partir dos valores obtidos das pesagens e fazendo uso da Equação (3), da Equação (4) e da Equação (5) foi possível, respectivamente, determinar os valores do índice de vazios, da absorção de água e da massa específica.

$$IV = \frac{m_{sat} - m_{seca}}{m_{sat} - m_{sub}} \times 100 \quad (3)$$

$$Abs = \frac{m_{sat} - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100 \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{m_{seca}}{m_{seca} - m_{sub}} \quad (5)$$

Nas quais:

IV : Índice de vazios;

Abs : Absorção de água;

$\gamma$  : Massa específica;

$m_{sat}$  : Massa saturada;

$m_{seca}$  : Massa seca;

$m_{sub}$  : Massa submersa.

### 3.4 ANÁLISE DE DADOS ESPÚRIOS

Para tratamento dos dados, foi feita a análise dos dados espúrios a partir dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração na flexão, índice de vazios e absorção. O intuito da análise foi analisar se os dados obtidos se apresentavam de acordo com uma curva de Gauss, utilizando o intervalo de 95% de certeza, como apresentado na Equação (6) (VUOLO, 1996).

$$\bar{x} - 2 \cdot \frac{\mu}{n} < x < \bar{x} + 2 \cdot \frac{\mu}{n} \quad (6)$$

Na qual:

$x$  : Valor individual analisado;

$\bar{x}$  : Valor médio;

$\mu$  : Desvio padrão;

$n$  : Número de dados.

Para este intervalo de certeza, 95% dos dados obtidos deveriam estar dentro do intervalo da Equação (6). Caso essa proporção fosse muito diferente do valor esperado, excluiu-se o valor individual mais distante do valor médio e foram refeitos os cálculos da Equação (6). Este procedimento de exclusão do dado espúrio foi executado em até duas oportunidades para cada critério analisado (VUOLO, 1996).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados das caracterizações e análises químicas do lodo realizadas em laboratório da UTFPR e a partir da verificação dos relatórios de análise fornecidos pela SANEPAR, assim como os resultados obtidos com os estudos de oxidação realizados no decorrer da pesquisa. São apresentados também os resultados obtidos através dos ensaios para verificação das propriedades do concreto no estado endurecido das peças de concreto para pavimentação intertravada, e observações realizadas quanto a questões de trabalhabilidade do concreto dosado com a adição de lodo.

### 4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS E ANÁLISE QUÍMICA DO LODO

As propriedades do lodo centrifugado, analisadas em laboratório da UTFPR, estão apresentadas na Tabela 19 e Tabela 20.

**Tabela 19 – Resultado pH e massa específica.**

Parâmetro	Unidade	Resultado
pH	-	6,97
Massa Específica Seca	kg/cm <sup>3</sup>	1736

Fonte: Os autores, 2016

**Tabela 20 – Resultados dos teores de umidade e teores de sólido.**

Parâmetro	Média obtida
Teor de Umidade (%)	87,4
Sólidos Totais (%)	12,8
Sólidos Voláteis (%)	35,7
Sólidos Fixos (%)	64,4
Perda ao Fogo (%)	42,4

Fonte: Os autores, 2016

O valor obtido para o pH encontra-se bastante próximo à neutralidade, estando dentro do intervalo de 6 a 8 proposto por Richter (2001), para lodos provenientes do tratamento de água com sulfato de alumínio. Este valor também

encontra-se bastante próximo a média de 6,73 obtida na caracterização do lodo da ETA Passaúna realizada por Portella *et al.* (2003). Este valor está dentro do valor de tolerância, especificado entre 5,5 e 9,0, estabelecido pela NBR NM 137 (ABNT, 1997) para a água de amassamento na produção de concreto.

O valor obtido da massa específica seca obtido foi de 1736 kg/m<sup>3</sup>, estando próximo ao valor médio de 1800 kg/m<sup>3</sup>, recomendado por Richter (2001) para cálculos estimativos de volume. Em comparação aos demais materiais utilizados no concreto – 3090 kg/m<sup>3</sup> para o cimento; 2574 kg/m<sup>3</sup> para o agregado miúdo e 2812 kg/m<sup>3</sup> para agregado graúdo, como pode ser observado no item 3.2.1 deste trabalho, o lodo apresenta massa específica inferior. Sendo assim, a sua adição no concreto pode representar uma leve redução na massa específica do concreto.

O teor de umidade médio de 87,4% é similar aos valores obtidos em outras caracterizações do lodo da ETA Passaúna: 86,9% (PORTELLA *et al.*, 2003); 88,1% (HOPPEN; PORTELLA; ANDREOLI, 2013) e 86,4% (TAFAREL, 2015). O conhecimento deste valor foi de extrema importância para a dosagem adequada dos materiais, principalmente em relação a correção da quantidade de água nos traços com adição de lodo úmido. Devido ao alto teor de umidade do lodo, verificou-se pela dosagem realizada, não ser possível a adição de teores superiores a 8%.

O teor de ST de 12,8% está abaixo dos valores de referência de 15 a 35% característicos após o desaguamento do lodo em centrifuga (OLIVEIRA, 2010), possivelmente decorrentes de variações pelo equipamento utilizado neste processo. No entanto está similar ao valor de ST de 11,9% determinado por Hoppen, Portella e Andreoli (2013) em caracterização anterior.

Relacionados à porção de matéria orgânica, Bidone, Silva e Marques (2001) atribuem uma concentração característica de 20 a 35% para o teor de SV em lodos de ETA, tendo sido obtido nesta pesquisa o valor médio de 35,7%, enquanto Oliveira (2010) obteve uma média de 37% de SV. Para o teor de SF foi obtida uma média de 64,4%, muito próximo ao valor de 63,2% obtido por Oliveira (2010).

Em relação à perda ao fogo, a média obtida de 42,4%, fazendo-se a calcinação a 1000°C em mufla, foi um pouco inferior a média de 49,8% obtida por Hoppen, Portella e Andreoli (2013), e de 50,1% obtida por e Portella *et al.* (2003). A perda ao fogo expressa a redução de massa que pode ocorrer devido à desidratação de materiais argilosos, decomposição de materiais carbonáceos e queima de material orgânico da amostra pela perda de hidroxilas estruturais,

podendo haver variação dependendo da composição química e das matérias orgânicas presentes no lodo (HOPPEN, 2004).

Os resultados obtidos na análise química através do ensaio EDX estão apresentados na Tabela 21. Podem ser observados os principais elementos químicos identificados no lodo e suas porcentagens.

**Tabela 21 – Análise química por EDX do lodo da ETA Passaúna**

<b>Elementos</b>	<b>(%)</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,95
SiO <sub>2</sub>	11,25
SO <sub>3</sub>	1,49
CaO	0,342
K <sub>2</sub> O	0,074
TiO <sub>2</sub>	0,062
MnO	0,029
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,028
PF (CO <sub>2</sub> )	63,78

**Fonte: Os autores, 2016.**

Estes compostos não são encontrados isoladamente e essa porcentagem não necessariamente expressa o valor direto do elemento analisado, podendo estar associados entre si e a diversos compostos inorgânicos e orgânicos presentes no resíduo. A presença desses elementos, geralmente é resultante das interações químicas decorrentes do processo de tratamento de água, podendo ser vinculada a determinados produtos químicos e ao meio de reação.

O valor mais expressivo observado é relacionado ao Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, em uma porcentagem de 22,95%, bem próximo a valores encontrados na literatura para lodos oriundos de processos com sulfato de alumínio como coagulante, como a média de 22,21% obtida por Portella *et al.* (2003). A quantidade de 11,25% determinada para SiO<sub>2</sub> pode estar relacionada a presença de materiais argilosos e sílica da areia na água bruta, havendo sido obtido uma média de 13,43% por Portella *et al.* (2003).

A porcentagem de 0,028% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> difere-se de valores obtidos na pesquisa realizada por Portella *et al.* (2003), na qual a concentração média de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> identificada foi de 7,99%. Verificando-se os relatórios de caracterização fornecidos pela SANEPAR puderam-se observar também divergências nas concentrações de Ferro (mg/L de Fe<sup>-</sup>) no extrato solubilizado de análises realizadas em diferentes períodos: 2,0 mg/L em no segundo semestre de 2014; 24,8 mg/L no segundo

semestre de 2015; 26,6 mg/L no segundo semestre de 2015 e 0,84 mg/L no primeiro semestre de 2016, mesmo período da retirada do lodo analisado nesta pesquisa. Essa divergência pode ser explicada por possíveis variações nos produtos utilizados no processo de tratamento de água, bem como pela maior concentração de hidróxidos de ferro em solos muito intemperizados (ANDREOLI et al., 2013a). Pelo fato de haverem variações no lodo em decorrências da sazonalidade e das características do manancial, o período de coleta influencia em sua composição.

Os compostos  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  e o  $Fe_2O_3$  presentes no lodo, são também encontrados na composição do cimento, assim como o  $CaO$  (RICHTER, 2001). A presença destes elementos no lodo pode, portanto, influenciar nas reações de hidratação do cimento, por se associarem a outros compostos para a formação do concreto. A presença de  $SO_3$ , por outro lado, pode gerar condições para o ataque de sulfatos ao concreto, com a formação de cristais expansivos que causam tensões no interior da argamassa, facilitando a ruptura e influenciando na durabilidade deste material (PINHEIRO-ALVES; GOMÀ; JALALI, 2007).

A perda ao fogo, neste caso determinada pela concentração de  $CO_2$  após a perda de água por calcinação da amostra, está relacionada a presença de matéria orgânica e de carbonatos que também podem influenciar nas reações do concreto. As reações de carbonatação, entre o  $CO_2$  e compostos do cimento, reduzem o pH do concreto, sendo condição para processos de corrosão no caso da associação a armaduras (ARAUJO; PANOSSIAN, 2010). Já a matéria orgânica influencia no consumo de água e facilita a entrada de agentes agressivos, além de comprometer a resistência mecânica do concreto (MACÊDO *et al.*, 2011).

Em relação aos relatórios de caracterização disponibilizados pela SANEPAR, foram verificados parâmetros considerados relevantes para a pesquisa, principalmente para análise da influência dos compostos orgânicos e inorgânicos, encontrados nos extratos lixiviados e solubilizados, nas reações ocorridas com a adição do peróxido de hidrogênio nos estudos de oxidação. No Apêndice A, consta a relação destes compostos, bem como suas concentrações e os limites de toxicidade determinados pela NBR 10004 (ABNT, 2004a).

A lixiviação e a solubilização, segundo Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012), representam a capacidade de transferência das substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido por meio de dissolução no meio extrator, tais como solos e águas subterrâneas, ou em meio aquoso, respectivamente. Essa caracterização

indica o potencial de liberação dos compostos presentes no resíduo, devendo, no caso da disposição em fontes hídricas e em solos, respeitar limites estipulados pela NBR 10004 (ABNT, 2004a) para que este não seja considerado tóxico.

Os parâmetros referentes para a massa bruta de lodo obtidos no relatório da SANEPAR estão relacionados na Tabela 22, juntamente com a média obtida nas caracterizações realizadas nesta pesquisa. Para os valores de pH, as amostras apresentaram variações, podendo estar relacionadas a variações da composição da água bruta. Para o teor de sólidos os resultados mantiveram-se bastante próximos, considerando que o processo para o desaguamento foi o mesmo.

**Tabela 22 – Parâmetros obtidos para a massa bruta**

Parâmetro	2014.2	2015.1	2015.2	2016.1	Média
<b>pH</b>	6,99	7,39	5,92	8,11	7,10
<b>Sólidos Totais (%)</b>	13,4	13,6	13,3	14,1	13,6
<b>Sulfetos (mg/kg)</b>	-	<3,0	<7,0	<1,0	-

Fonte: Os autores, 2016.

A presença de sulfetos na massa bruta evidencia a possibilidade de reações químicas no interior do concreto que podem influenciar na durabilidade. Segundo Hasparyk *et al.* (2002), a deterioração pela ação de sulfetos é uma particularidade do ataque por sulfatos, já citada anteriormente, como responsável pela formação de compostos com caráter expansivo na massa de concreto. Os sintomas típicos do concreto deteriorado pela ação de sulfetos são: manchas com aspecto de ferrugem, fissuras mapeadas e a desagregação do concreto.

## 4.2 ESTUDOS DE OXIDAÇÃO

Primeiramente para a dosagem do coagulante, foi realizada a verificação da concentração de sólidos totais em termos de mg/L. Obteve-se um valor médio de 147667 mg/L, valor este compatível com a média de 184746 mg/L, encontrada por Oliveira (2010) para o lodo centrifugado do Passaúna em 2010.

Os estudos de oxidação foram realizados em amostras de lodo úmido e de lodo seco. Em ambos os processos, com a adição do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> como oxidante, notou-se a ocorrência de efeitos físicos decorrentes de uma possível reação química entre os

elementos em análise, com a mudança do aspecto das amostras ao fim do procedimento.

Para o lodo úmido, notou-se a mudança da coloração e da consistência do lodo, assim que houve a adição do oxidante. Durante o procedimento, houve expansão de volume da amostra, com a liberação de vapores e leve aumento de temperatura, numa maior proporção quanto maior o volume de oxidante (Figura 28). As reações cessaram-se, aparentemente, em aproximadamente uma hora e as amostras foram mantidas em repouso por 24 horas, apresentando, ao fim desse período, uma textura pastosa e coloração mais clara que a inicial (Figura 29).



**Figura 28 – Lodo úmido com oxidante**  
Fonte: Os autores, 2016



**Figura 29 – Lodo úmido com oxidante após 24h**  
Fonte: Os autores, 2016

No caso do lodo seco, a reação ocorrida com a adição do agente oxidante aparentou ser mais intensa e mais rápida, com grande liberação de gases e maior aumento da temperatura da superfície do Becker (Figura 30). Notou-se que ao fim do processo, o lodo seco destorroado, se subdividiu em pedaços menores, apresentando-se em estado mais granulado e adquirindo também uma coloração mais escura (Figura 31). As amostras com maior quantidade de oxidante ficaram parcialmente diluídas no peróxido de hidrogênio (Figura 32).



**Figura 30 – Lodo seco durante o procedimento**  
 Fonte: Os autores, 2016



**Figura 31 – Lodo seco com oxidante**  
 Fonte: Os autores, 2016



**Figura 32 – Lodo seco com oxidante após 24 horas**  
 Fonte: Os autores, 2016

O parâmetro escolhido para verificação da ocorrência da oxidação foi o percentual de sólidos voláteis. A Tabela 23 apresenta os valores obtidos para a concentração de SV para cada um dos teores de oxidante utilizados em ambos os procedimentos.

**Tabela 23 – Teor de sólidos voláteis após teste de oxidação**

Concentração de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (g AO/g ST)	Lodo Umido SV (%)	Lodo Seco SV (%)
0,0	36,05	34,46
0,2	35,67	34,54
0,4	36,28	34,91
0,6	35,98	35,10
0,8	36,32	34,50
1,0	35,84	34,46
Média	36,02	34,52

Fonte: Os autores, 2016.

Observando-se os resultados nos dois grupos, verifica-se que não há uma diferença significativa entre os resultados obtidos com a adição de oxidante e os valores de referência. Tampouco há a redução no teor de sólidos voláteis para justificar a diminuição da concentração de matéria orgânica pela oxidação.

Supondo-se que a metodologia para a verificação da perda de matéria pudesse ter sido influenciada pelo intervalo de temperatura utilizado, de até 550°C

para os sólidos voláteis, os procedimentos foram repetidos para análise da perda ao fogo, que faz a verificação da perda de matéria orgânica em um intervalo de temperatura até 1000 °C Comparando-se os valores apresentados na Tabela 24, com o resultado obtido para a perda ao fogo de 42,4%, sem oxidante, pode-se observar que também não há redução significativa nos valores que justifique a redução da matéria orgânica.

**Tabela 24 – Perda ao fogo após teste de oxidação**

Parâmetro	Lodo Úmido	Lodo Seco
Perda ao Fogo (%)	41,6	48,9

**Fonte: Os autores, 2016**

Conforme os dados presentes nos relatórios de caracterização fornecidos pela SANEPAR, apresentados no Apêndice A, a presença de uma grande variedade de compostos inorgânicos e de compostos orgânicos voláteis e pesticidas, que se caracterizam por serem constituídos de grandes cadeias de carbono, inclusive com anéis aromáticos, pode interferir nas reações com o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. De acordo com Mattos *et al.* (2003), entre as aplicações do peróxido de hidrogênio na sua forma isolada, além da oxidação de matéria orgânica, tem-se a oxidação de componentes inorgânicos e a destruição de compostos reduzidos, de fenóis, pesticidas e solventes, podendo reagir na decomposição dessas substâncias, sem, no entanto, reduzir a concentração de substâncias voláteis.

Embora tenha sido considerada a hipótese de que o oxidante foi consumido previamente por substâncias inorgânicas ou tenha atuado na quebra dos compostos orgânicos, mantendo os percentuais de SV e de perda ao fogo, não houve tempo hábil suficiente para a realização de verificação de outros parâmetros, que englobassem também o monitoramento dos compostos inorgânicos e de mudanças na análise química do resíduo oxidado, de maneira a permitir uma nova moldagem em prazo suficiente para a análise das propriedades do concreto endurecido.

#### 4.3 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Durante a moldagem dos corpos de prova, houve dificuldade na obtenção de uma trabalhabilidade adequada à moldagem dos corpos de prova, visto que os

traços com maiores teores de lodo adicionado apresentaram uma consistência bastante seca, com propensão à segregação (Figura 33). Devido aos altos teores de água do lodo, os traços com maiores adições de lodo úmido foram produzidos com menores quantidades de água quando em comparação ao concreto de referência. Mais além, o concreto produzido com adição do lodo seco em estufa apresentou consistência e trabalhabilidade muito mais propícia e de fácil manejo.



**Figura 33 – Concreto, no estado fresco, com teor de 5,0% de lodo úmido**  
**Fonte: Os autores, 2016**

Esta consistência seca do concreto produzido com o lodo úmido se justifica pelo fato da viscosidade irregular do lodo impedir a suspensão de maneira uniforme e homogênea das partículas sólidas (BARROSO, 2007) durante o processo de hidratação do cimento. Dessa forma, a água incorporada ao lodo não estava disponível para envolvimento dos grãos dos agregados e do cimento, assim como a água livre. Devido à necessidade de manutenção da relação entre água e cimento, não foi utilizada água livre em quantidade suficiente para adquirir uma melhor trabalhabilidade.

Essa influência do lodo úmido na trabalhabilidade do material produzido corrobora com a importância da realização da secagem prévia do lodo para um melhor controle das propriedades no estado fresco, independentemente de sua aplicação, seguindo as recomendações de Lin, Wu e Ho (2006), Sales *et al.* (2011), Huang e Wang (2013), Kizinievič *et al.* (2013) e Benlalla *et al.* (2015).

#### 4.4 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

##### 4.4.1 Resistência à compressão e à tração na flexão

Os resultados de resistência à compressão obtidos através dos ensaios, assim como o valor médio, são apresentados na Tabela 25.

**Tabela 25 - Valores ensaiados de resistência à compressão**

Amostra	Resistência à Compressão (MPa)				
	0%	2,5%	5%	7,5%	5,0% lodo seco
1	43,02	34,49	33,89	24,18	32,41
2	43,63	34,51	34,68	23,65	33,87
3	42,59	35,25	34,76	23,98	32,22
<b>Média</b>	43,08	35,40	34,44	23,94	32,83

**Fonte: Os autores, 2016**

A partir dos valores apresentados na Tabela 25 fica claro que o traço com adição de 2,5% de lodo, tem um valor de resistência à compressão médio 17,83% inferior ao concreto de referência e os traços com adição de 5,0% e 7,5% de lodo têm redução de, respectivamente, 20,06% e 44,43%. Já para o traço com adição de 5,0% de lodo seco, esta redução é de 23,79%.

A partir dos dados da Tabela 25, infere-se que não há diferença estatística, considerando intervalo de 95% de confiança, entre os valores dos traços com adição de 2,5% e 5,0% de lodo. Além disso, os traços com adição de 5,0% de lodo úmido e 5,0% de lodo seco apresentaram valores bastante próximos. Nota-se ainda, uma redução drástica da resistência à compressão das amostras com 7,5% de lodo úmido adicionado.

O teor de 2,5% de adição de lodo está de acordo com o valor mínimo de resistência à compressão na Tabela 10, que é de 35 MPa para peças de concreto para usos comuns, enquanto os teores de 5,0% de lodo úmido e 5,0% de lodo seco apresentam valores ligeiramente inferiores ao mínimo requerido.

Estes dados estão alinhados com os obtidos nos estudos de Hoppen (2004), nos quais os valores de resistência à compressão mais próximos ao traço de referência foram os dos traços com adição de 3,0% e 5,0% de lodo. Ainda, segundo Kaosol (2010), os valores de resistência à compressão dos traços com adições de

lodo de ETA superiores a 10% apresentam valores significativamente inferiores ao traço padrão, apresentando reduções de resistência a partir de 38,33%.

Os resultados de resistência à compressão obtidos através dos ensaios, assim como o valor médio, são apresentados na Tabela 26.

**Tabela 26 - Valores ensaiados de resistência à tração à flexão**

Amostra	Tração na Flexão (MPa)				
	0%	2,5%	5%	7,5%	5,0% lodo seco
1	1,26	0,90	1,05	1,06	0,88
2	1,26	0,91	1,04	1,05	0,97
3	1,28	0,89	1,07	1,02	0,91
<b>Média</b>	1,26	0,90	1,05	1,04	0,92

**Fonte: Os autores, 2016**

A partir dos valores apresentados na Tabela 26 fica claro que o traço com adição de 2,5% de lodo, tem um valor de resistência à tração na flexão médio 28,57% inferior ao concreto de referência e os traços com adição de 5,0% e 7,5% de lodo têm redução de, respectivamente, 16,67% e 17,46%. Já para o traço com adição de 5,0% de lodo seco, esta redução é de 26,98%.

Todos os traços com adição de lodo, seja seco ou úmido, apresentaram reduções nos valores médios de resistência à tração na flexão. Os traços com adição de 5,0% e 7,5% de lodo úmido apresentaram valores muito próximos entre si, sem diferença estatística, e na mesma faixa dos valores obtidos nos estudos de Hoppen, Portella e Andreoli (2013), que verificaram uma redução média de 27,38% para teores de substituição de areia por lodo de 4,0% e 8,0%, e uma redução de 3,5% com o incremento em 4% da quantidade de lodo utilizada.

Uma das hipóteses para explicar o aumento da tração na flexão com o incremento de lodo adicionado ao concreto é o efeito fibra que o lodo pode exercer no conjunto após a cura. Dessa forma, por ter comportamento similar ao de fibras, que apresentam altas resistências à flexão, o lodo de ETA acaba melhorando essa propriedade do concreto no estado endurecido.

#### 4.4.2 Índice de vazios, absorção de água e massa específica

Os valores de índice de vazios, absorção de água e massa específica são apresentados respectivamente na Tabela 27, na Tabela 28 e na Tabela 29.

**Tabela 27 - Valores ensaiados de índice de vazios**

Amostra	Índice de Vazios (%)				
	0%	2,5%	5%	7,5%	5,0% lodo seco
1	6,02	8,16	7,42	8,32	7,65
2	6,42	7,83	7,30	8,32	7,70
3	6,93	7,62	7,76	8,55	7,96
<b>Média</b>	6,45	7,87	7,49	8,40	7,77

Fonte: Os autores, 2016

**Tabela 28 - Valores ensaiados de absorção**

Amostra	Absorção (%)				
	0%	2,5%	5%	7,5%	5,0% lodo seco
1	3,08	3,78	3,33	3,73	3,93
2	2,79	3,63	3,25	3,73	3,49
3	2,95	3,52	3,48	3,83	3,44
<b>Média</b>	2,94	3,64	3,35	3,77	3,62

Fonte: Os autores, 2016

**Tabela 29 - Valores ensaiados de massa específica**

Amostra	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )				
	0%	2,5%	5%	7,5%	5,0% lodo seco
1	2500	2350	2400	2430	2490
2	2480	2340	2410	2430	2380
3	2480	2360	2420	2430	2470
<b>Média</b>	2490	2350	2410	2430	2450

Fonte: Os autores, 2016

A partir dos dados da Tabela 27, conclui-se que em todos os traços, a adição de lodo, seja úmido ou seco, causou o aumento do índice de vazios. Estes aumentos foram na faixa de 22,01% para o traço com adição de 2,5% de lodo úmido, 16,12% para o traço com adição de 5,0% de lodo úmido e 30,23% para o traço com adição de 7,5% de lodo úmido. Já as amostras com adição de 5,0% de lodo tiveram um aumento de 20,47%.

Benlalla *et al.*(2015) e Kizinievič *et al.* (2013), apesar de tratarem de materiais cerâmicos, notaram a mesma tendência de aumento do índice de vazios a medida que se incorpora lodo. Já Hoppen (2004), com enfoque na produção de concreto com lodo incorporado, obteve incrementos de 1,67% para substituição de 3% da areia por lodo, 2,36% para substituição de 5% e 10,79% para substituição de 7%. Houve, portanto um grande aumento no índice de vazios a partir deste teor de 7%, o que, em proporções diferentes, também ocorreu segundo os valores da Tabela 27.

Os valores apresentados na Tabela 28 estão alinhados com os da Tabela 27, por se relacionarem de maneira proporcional. 23,81%, 13,95% e 28,23% são os respectivos aumentos de absorção de água para os traços com teores de 2,5%, 5,0% e 7,5% de lodo úmido incorporado, quando em comparação ao traço de referência. Para o teor de adição de 5,0% de lodo seco este aumento foi de 23,13%.

Os valores obtidos por Tafarel (2015) para absorção de água apresentaram a mesma tendência de crescimento com adição de lodo nos traços. Hoppen (2004) obteve aumentos de 8,68%, 9,24%, 20,73% e 25,21% para a substituição de, respectivamente, 3%, 5%, 7% e 10% da areia por lodo. Para materiais cerâmicos, a tendência é também o aumento da absorção de água, porém apenas a partir de elevados teores de adição de lodo (BENLALLA *et al.*, 2015; KIZINIEVIČ *et al.*, 2013)

Além disso, os valores de absorção de água apresentados na Tabela 28 cumprem as exigências da Tabela 10, que estabelece como 7,0% o limite máximo de absorção de água de uma peça de concreto para pavimentação intertravada e 6,0% como o limite médio da amostragem. Todas as amostras ensaiadas cumpriram com boa margem esta exigência.

Já os valores de massa específica foram reduzidos em 5,62%, 3,21% e 2,41% em comparação às amostras de referência. O teor de 5,0% de lodo seco adicionado teve redução relativa de 1,61%. Observando comportamento similar em seus estudos, Hoppen (2004) justificou este ocorrido pelo fato de massa específica do lodo ser inferior a dos demais materiais utilizados na produção do concreto.

#### 4.4.3 Correlações entre os parâmetros obtidos

As relações entre os valores ensaiados de resistência à compressão e resistência à tração na flexão são apresentados na Tabela 30.

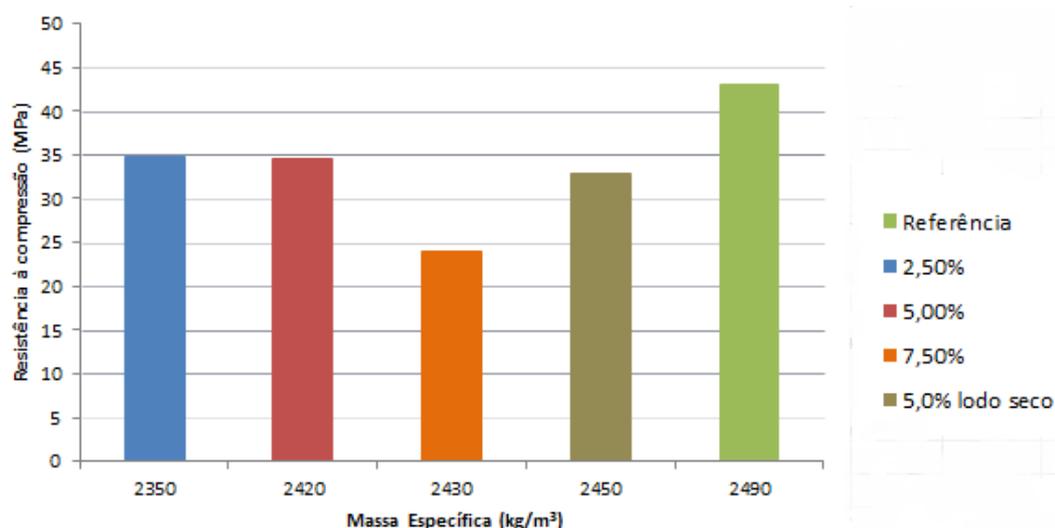
**Tabela 30 - Relação entre resistência à compressão e tração na flexão**

Amostra	Tração na Flexão (MPa)				
	0%	2,5%	5%	7,5%	5,0% lodo seco
Relação entre resistência à compressão e à tração na flexão	2,92%	2,54%	3,05%	4,34%	2,80%

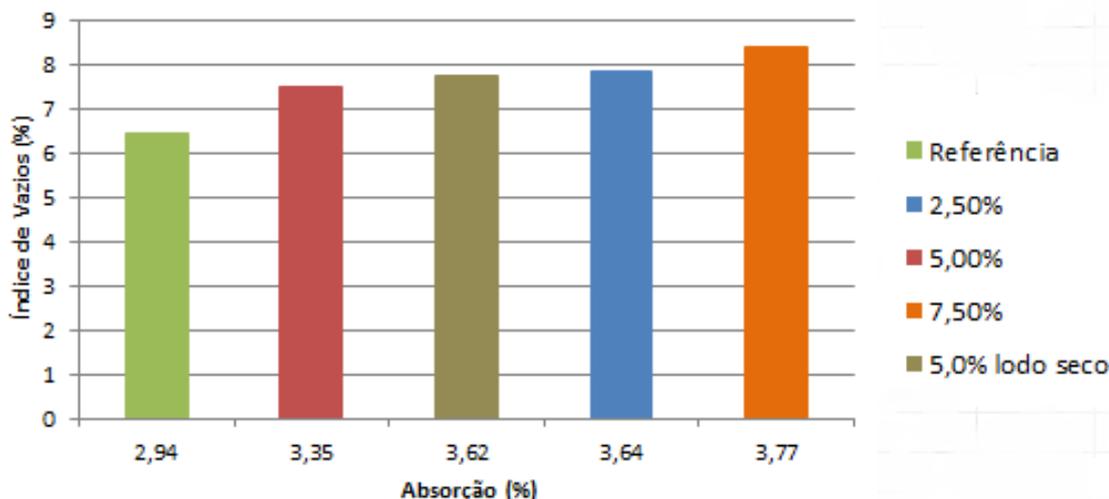
Fonte: Os autores, 2016

Segundo Mehta e Monteiro (1994) os valores de resistência à tração na flexão correspondem a aproximadamente 10% dos valores de resistência à compressão. Entretanto, nenhum dos valores obtidos, até mesmo o do traço de referência, apresentaram relação próxima a da literatura. Além disso, há uma variação nesta relação que, inicialmente, diminui com o acréscimo de lodo úmido e, a partir do traço de 5,0%, cresce. As relações entre 5,0% de lodo úmido e 5,0% de lodo seco apresentam valores próximos entre si.

A comparação entre resistência à compressão e massa específica é apresentada no Gráfico 3. A comparação entre os valores de índice de vazios e absorção de água é apresentada no Gráfico 4.

**Gráfico 3 - Comparação entre resistência à compressão e massa específica**

Fonte: Os autores, 2016



**Gráfico 4 - Comparação entre índice de vazios e absorção**  
**Fonte: Os autores, 2016**

A partir dos valores apresentados no Gráfico 3 infere-se que mesmo com uma maior massa específica, os corpos de prova com adição de 5,0% de lodo seco apresentaram menor resistência à compressão que os corpos de prova com adição de 2,5% e 5,0% de lodo úmido. Já a resistência à compressão do concreto com adição de 7,5% de lodo é inferior a todos os demais traços, deixando claro que, assim como sugerido por Kaosol (2010), o teor de lodo incorporado ao concreto é um fator limitante. Nos estudos de Hoppen (2004), entretanto, a queda na resistência à compressão, em decorrência da incorporação de maiores teores de lodo, não esteve aliada à redução da massa específica, que se manteve praticamente constante para diferentes teores.

Através dos valores do Gráfico 4 é possível perceber a relação de proporcionalidade entre índice de vazios e absorção de água. Em todos os casos com adição de lodo, seja ele úmido ou seco, houve um incremento na absorção de água das peças de concreto para pavimentação intertravada. Praticamente não há diferenças entre a incorporação de 5,0% de lodo úmido ou seco. Apesar disso, não há, como nos outros casos, uma linearidade no incremento, visto que os valores obtidos para adições de 5,0% de lodo são inferiores tanto aos valores obtidos para adições de 2,5% de lodo, quanto aos valores obtidos para adições de 7,5% de lodo.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos pelos ensaios das caracterizações do lodo permitiram concluir que o lodo centrifugado possui pH próximo da neutralidade, podendo ser incorporado ao concreto sem interferir na sua alcalinidade. A alta umidade, mesmo após a centrifugação, limita o teor de incorporação do lodo de ETA no concreto sem tratamentos prévios de secagem, a valores inferiores a 8% para não ultrapassar a quantidade de água de amassamento determinada na dosagem realizada.

As análises químicas e a verificação dos relatórios de caracterização identificaram uma série de compostos inorgânicos e orgânicos que podem influenciar as reações de hidratação do cimento, podendo interferir em parâmetros de durabilidade, bem como interferir nas reações relacionadas a oxidação do lodo.

De acordo com os relatórios de caracterização da SANEPAR, os teores estão em sua maioria dentro dos limites determinados pela NBR 10004 (ABNT, 2004a), sendo considerado um resíduo sólido não inerte. Para o extrato solubilizado identificaram-se teores de fenóis, ferro, manganês, cromo e surfactantes acima desses valores limites da norma, ressaltando a importância da realização de tratamentos, antes do descarte em corpos hídricos e no solo, e da busca de alternativas para a destinação desse resíduo.

Através dos estudos realizados foi possível avaliar a influência da adição do lodo no concreto para confecção de peças de pavimento intertravado. Pode-se analisar a influência nas propriedades do concreto fresco, nas resistências características e nos índices físicos.

Há redução na resistência à compressão conforme o aumento do teor de lodo adicionado. Observou-se que o índice de 2,5% de lodo adicionado atende os requisitos da NBR 9781 (ABNT, 2013) e os índices de 5,0% de lodo úmido e 5,0% de lodo seco apresentam valores muito próximos ao exigido pela normatização. Houve redução na resistência, em comparação ao concreto de referência de 17,83% para incorporação de 2,5% de lodo, 20,06% para 5% e 44,43% para 7,5%. Com o lodo seco, adicionado num teor de 5%, há uma redução relativa de 23,79%.

Também observou-se queda na resistência à tração à flexão com a incorporação de lodo. A resistência à tração na flexão apresentou perda de 28,57% na adição de 2,5%, e de, respectivamente, 16,67% e 17,46% para os teores de 5% e

de 7,5%. Já esta redução para a adição de 5,0% de lodo seco, quando em comparação ao traço de referência, foi de 26,98%.

Houve aumento no índice de vazios em todas as amostras ensaiadas. Para o teor de 2,5% de lodo adicionado este valor foi de 22,01%, para o de 5,0% foi de 16,12% e para o de 7,5% foi de 30,23%. Já para o caso do lodo seco, o teor de 5,0% acarretou num acréscimo de 20,47% no índice de vazios.

Para os traços de 2,5%, 5,0% e 7,5% de adição de lodo úmido, houve aumento de respectivamente 23,81%, 13,95% e 28,23 nos valores de absorção de água. Já para o teor de 5,0% de lodo seco, este incremento foi de 23,13%. Mesmo com esse aumento, todas as amostras ensaiadas seguiram as exigências da NBR 9781 (ABNT, 2013) quanto à absorção de água.

Já a massa específica reduziu com a adição de lodo. O traço com adição de 2,5% de lodo teve redução de 5,62%, o traço com adição de 5,0% teve redução de 3,21% e o traço com adição de 7,5% teve redução de 2,41%. Já o traço com adição de 5,0% de lodo seco teve redução de 1,61%.

Alternativas de preparação do lodo previamente à adição no concreto foram estudadas no intuito de dar melhores condições de trabalhabilidade e de controle da dosagem, no caso da secagem, e de permitir o tratamento prévio no intuito de reduzir a concentração dos compostos orgânicos que poderiam influenciar em questões de durabilidade do produto final. Não foi possível, entretanto, avaliar a ocorrência e a influência da oxidação química no lodo, pelos parâmetros de sólidos voláteis e perda ao fogo. Sendo assim, não foram moldadas amostras com este tipo de preparação.

No entanto, ressalta-se a importância da busca por uma metodologia adequada para a realização da oxidação, com a análise da utilização de outros reagentes, além do peróxido de hidrogênio, ou de outros procedimentos para a oxidação química, como por exemplo o processo Fenton. Pela possibilidade da obtenção de uma melhor durabilidade do material com a inertização da fração degradável decorrente da presença de matéria orgânica, verifica-se na oxidação uma alternativa de preparo do lodo que pode garantir as propriedades do concreto endurecido a longo prazo.

Quanto a secagem prévia do lodo para a adição no concreto, observou-se, em relação à moldagem das amostras uma melhor trabalhabilidade comparando-se ao lodo úmido adicionado. Comparando-se os resultados das resistências à

compressão e à tração na flexão, notou-se ligeira queda, quando comparado ao mesmo teor de lodo úmido. Já para os índices de vazios, absorção de água e massa específica, não foram notadas incrementos ou mudanças significativas.

Levando em consideração os resultados, bem como as condições de dosagem e moldagem, constata-se que a adição do lodo em teores de até 5% é viável na fabricação de peças de concreto para pavimento intertravado. Acima desse teor verifica-se o comprometimento das propriedades técnicas do concreto endurecido e da trabalhabilidade do concreto fresco. Além disso, para o traço de referência determinado, teores acima de 8% são inviáveis para a adição de lodo úmido, pelo fato de a quantidade de água presente no lodo ser superior a água de amassamento determinada na dosagem do traço.

A fabricação de peças de concreto, conforme às especificações da NBR 9781 (ABNT, 2013), em concreto seco e com o uso de vibroprensa, pode ser influenciada pela viscosidade irregular do lodo, o que dificulta a homogeneização da massa. Pelo fato do lodo úmido dificultar a suspensão de maneira uniforme das partículas sólidas na massa de concreto, a necessidade de otimização da utilização dos maquinários e de tempos maiores para homogeneização representa maiores gastos de energia e de custos com os equipamentos.

Pelo fato de a dosagem ser realizada com a menor relação de água/cimento, é necessária a verificação da quantidade de água no lodo adicionado. Desta forma, é adequado proceder com a secagem prévia do lodo. Caso a secagem em estufa por 24 horas seja técnica e economicamente inviável, por exigir equipamento específico e representar maiores gastos de energia, pode-se realizá-la via secagem ao sol, exigindo um espaço apropriado na empresa para este procedimento.

Além disso, a incorporação do lodo no processo produtivo de uma empresa especializada na fabricação de peças de concreto para pavimentação intertravada exigiria adaptações e representaria gastos de energia e equipamentos.

Por fim, a utilização do lodo como um material complementar em insumos para a construção civil, representa uma nova possibilidade de destinação para este resíduo, contribuindo para a redução dos impactos causados pela disposição em fontes hídricas e aterros.

Para trabalhos futuros sugere-se a considerar os seguintes aspectos:

- Dosagem e moldagem de concreto seco com adição de lodo de ETA e utilização de vibroprensa, para avaliar a viabilidade da fabricação de

pavimento intertravado de concreto conforme as condições de mercado;

- Realização de ensaios em maiores idades, buscando avaliar variações provocadas por questões de durabilidade devido à decomposição de matéria orgânica ou a possíveis ataques por sulfetos ou cloretos;
- Verificar outros métodos de secagem do lodo, como por exemplo a secagem ao sol, como alternativa para o preparo do lodo.
- Elaboração de metodologias e estudos para viabilizar a oxidação do lodo, buscando a diminuição da quantidade de matéria orgânica que pode influenciar na durabilidade das peças de concreto com lodo adicionado;
- Medir o tempo de reação de acordo com a quantidade de oxidante no lodo seco e no úmido, como forma de análise da influência dessa variável para o estabelecimento de uma metodologia de oxidação.
- Dosagem e moldagem de amostras com lodo oxidado para avaliação das propriedades do concreto endurecido após a preparação do lodo.

## REFERÊNCIAS

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO *PORTLAND*. **Manual do Pavimento Intertravado**. São Paulo, 2010.

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO *PORTLAND*. **Melhores Práticas Pavimento Intertravado Permeável**. São Paulo, 2011.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457 – **Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. NBR 9778 – **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação de absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. NBR 5733 - **Cimento *Portland* de Alta Resistência Inicial**. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. NBR NM 137. **Argamassa e concreto - Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento portland**. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. NBR NM 46. **Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003a.

\_\_\_\_\_. NBR NM 30. **Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2003b.

\_\_\_\_\_. NBR NM 248. **Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003c.

\_\_\_\_\_. NBR 10004 - **Resíduos Sólidos: Classificação**. Rio de Janeiro, 2004a.

\_\_\_\_\_. NBR 10005 - **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004b.

\_\_\_\_\_. NBR 10006 - **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004c.

\_\_\_\_\_. NBR NM 18 - **Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo**. Rio de Janeiro, 2004d.

\_\_\_\_\_. NBR 7211. **Agregados para concreto**. Rio de Janeiro, 2005a.

\_\_\_\_\_. NBR 13279. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro, 2005b.

\_\_\_\_\_. NBR NM 45 - **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. NBR 15900-1 - **Água de Amassamento para Concreto. Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2009a.

\_\_\_\_\_. NBR NM 52 - **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009b.

\_\_\_\_\_. NBR NM 53 - **Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009c.

\_\_\_\_\_. NBR 9781 - **Peças de Concreto para Pavimentação. Especificação e Métodos de Ensaio**, 2013.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; HOPPEN, C.; TAMANINI, C. R.; NEVES, P. S.; Produção, Composição e Constituição de Lodo de Estações de Tratamento de Água. In: **Usos Alternativos de Lodos de Estações de Tratamento de Água e Estações de Tratamento de Esgoto - Alternativas de uso de Resíduos de Saneamento**. Cap. 3. p. 29 - 48. Projeto PROSAB/ REDE COPORATIVA DE PESQUISAS. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

ANDREOLI, C. V.; MOTTA, A. C. V.; FERNANDES, C. V. S.; PEGORINI, E. S.; SOCOL, V. T. Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água. In: **Lodo de Estações de Tratamento de Água - Gestão e Perspectivas Tecnológicas**. Cap. 2. p. 68 -130. Curitiba: SANEPAR, 2013a.

ANDREOLI, C. V.; ZARPELON, A.; BERTOLDI, B.; CARNEIRO, C.. A Problemática da Geração e Disposição Final do Lodo de ETA. In: **Lodo de Estações de Tratamento de Água - Gestão e Perspectivas Tecnológicas**. Cap. 4. p. 180-222. Curitiba: SANEPAR, 2013b.

ARAUJO, A.; PANOSSIAN, Z. Durabilidade de estruturas de concreto em ambiente marinho: estudo de caso. In: **International Corrosion Meeting**. Fortaleza, ABRACO: 2010.

ASTM - *American Society for Testing and Materials*. C 936-01 - **Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paver Units**, 1996.

BARROSO, M. M. **Influência das Micro e Macropropriedades dos Lodos de Estações de Tratamento de Águas no Desaguamento por Leito de Drenagem.** Universidade de São Paulo, 2007.

BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. **Metais sólidos: Aspectos Legais dos Resíduos de Estação de Tratamento de Tratamento de Água.** 21º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL. João Pessoa: ABES, 2001.

BAUTISTA, P.; MOHEDANO, A. F.; CASAS, J. A.; RODRIGUEZ, J. J. *An overview of the application of Fenton oxidation to industrial wastewaters treatment.* In: **Journal Chemical Technology Biotechnology**, v. 83, p. 1323-1338, Society of Chemical Industry, 2008.

BENLALLA, A.; ELMOUSSAOUITI; DAHHOU, M.; ASSAAFI, M. **Utilization of Water Treatment Plant Sludge in Structural Ceramics Bricks.** *Applied Clay Science.* v. 188, p. 171 - 177, 2015.

BIDONE, F.; SILVA, A. P.; MARQUES, D. D. Lodos Produzidos nas Estações de Tratamento de Água (ETAs): Desidratação em Leitões de Secagem e Codisposição em Aterros Sanitários. In: **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final** . Cap. 9. p. 215 - 244.. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

BOGGIO, A.J.; **Estudo comparativo de Métodos de Dosagem de Concretos de Cimento Portland.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

BRASIL. Lei nº 6.938 de 3 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação. Brasília, DF, 1981.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento e estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF, 2005.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementares a Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. Brasília, DF, 2011.

CARNEIRO, C.; WEBER, P. S.; ROSS, B. Z. L.; GERVASONI, R.; SIMON, P. L.; MORO, B. G.; MOTTA, A. C. V.; Caracterização de Lodo de ETA gerado no Estado do Paraná In: **Lodo de Estações de Tratamento de Água - Gestão e Perspectivas Tecnológicas.** Cap. 3, p. 132 - 178. Curitiba: SANEPAR, 2013.

CIMENTO ITAMBÉ. **Relatório de ensaio de cimento CP V-ARI**. 2016

CORDEIRO, J. S. Remoção de Água de Lodos de ETAs Através de Filtração Forçada. In: **Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. Cap. 5, p. 107 – 124. Projeto PROSAB/REDE COOPERATIVA DE PESQUISAS. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

CORDEIRO, J. S. Processamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: **Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários, Inclusive com a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos - Resíduos Sólidos de Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final**. Cap. 5, p. 119-141. Projeto PROSAB/REDE COOPERATIVA DE PESQUISAS. Rio de Janeiro: RiMa/ABES, 2001.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento Intertravado de Concreto: Estudos dos Elementos e Métodos de Dimensionamento**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. Vol. 2, 2<sup>a</sup> ed. São Carlos: RiMa, 2005.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N.; **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição de Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. São Carlos: LDiBe, 2012.

EATON, A. D.; CLESCERI, L. S.; GREENBERG, A. E. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20th ed. Washington: American Public Health Association, 1999.

FERNADES, F.; SOUZA, S. G. Estabilização do Lodo de Esgoto. In: **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final**. Cap. 2. p. 29 - 55. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

FERREIRA FILHO, S. S.; KAWAMOTO, P. H. Efeito da oxidação química no processo de condicionamento e desidratação de lodos de estações de tratamento de água. In: **IX Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, Porto Seguro**. Anais do IX Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 2000a.

FERREIRA FILHO, S. S.; KAWAMOTO, P. H. Cinética de processos de oxidação química aplicados em engenharia sanitária e ambiental. In: **IX Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, Porto Seguro**. Anais do IX Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 2000b.

FIORITI, C. F.; INO, A.; AKASAKI, J. L. **Avaliação de Blocos de Concreto para Pavimentação Intertravado com Adição de Resíduos de Borracha Provenientes da Recauchutagem de Pneus.** *Ambiente Construído*, v. 7, n. 4, p. 43 - 54, Porto Alegre, 2007.

*Google Maps.* Disponível em <<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em 30/05/2016.

GRUPO PIERALISI. **Catálogo de centrífuga decantadora - Série 600.** Itália, 2016.

HASPARYK, N. P.; MUNIZ, F.C.; ARMELIN, J.L.; NASCIMENTO, J.F.; SANTOS, M.C.; BITTENCOURT, R.M.; ANDRADE, W.P.; CARASEK, H.; CASCUDO, O.; MINICUCCI, L. A.; **Contribuição ao estudo da influência de sulfetos presentes no agregados nas propriedades e durabilidade do concreto.** Goiânia, 2002.

HOPPEN, C. **Reciclagem de Lodo de ETA Centrifugado na Construção Civil, Método Alternativo para Preservação Ambiental.** Universidade Federal do Paraná, 2004.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K.F.; JOUKOSKI, A.; TRINDADE, E. M.; ANDREOLI, C. V. **Uso de Lodo de Estação de Tratamento de Água Centrifugado em Matriz de Concreto de Cimento Portland Para Reduzir o Impacto Ambiental.** *Química Nova*, v. 29, n. 1, p. 79-84, 2006.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K.F.; ANDREOLI, C. V. **Uso de Lodo de ETA na Produção de Matriz de Concreto.** In: **Lodo de Estações de Tratamento de Água - Gestão e Perspectivas Tecnológicas.** Cap. 15, p. 562 - 610. Curitiba: SANEPAR, 2013.

HUANG, C. H.; WANG, S. Y. **Application of Water Treatment Sludge in the Manufacturing of Lightweight Aggregate.** *Construction and Building Materials*, v. 43, p. 174 - 183, 2013.

JUNIOR, A. F. **Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural.** Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Plano Nacional de Pesquisa em Saneamento Básico.** Rio de Janeiro, 2008.

KAOSOL, T. **Reuse Water Treatment Sludge for Hollow Concrete Block Manufacture.** *Energy Research Journal*. v. 1, n. 2, p. 131-134, 2010.

KATAYAMA, V. T. **Quantificação da Produção de Lodo de Estações de Tratamento de Água de Ciclo Completo: Uma Análise Crítica.** Universidade de São Paulo, 2012.

KIZINIEVIČ, O.; ŽURAUSKIENÈ, R.; KIZINIEVIČ, V.; ŽURAUSKAS, R. **Utilisation of Sludge Waste from Watter Treatment for Ceramic Products.** *Construction and Building Materials*, v. 41, p. 464 - 473, 2013.

KURODA, E. K.; DA SILVA, S. M. C. P.; FERNANDES, F. OLIVEIRA, N. S.; AISSE, M. M. Desaguamento de Lodo de ETA em Leitões de Secagem Cobertos, Convencionais e Modificados. In: **Lodo de Estações de Tratamento de Água - Gestão e Perspectivas Tecnológicas.** Cap. 8, p. 341 - 388. Curitiba: SANEPAR, 2013.

KYNCL, M. **Opportunity for Water Treatment Sludge Re-use.** *GeoScience Engineering*, n.1, p. 11 - 22, 2008.

LIN, C. F.; WU, C. H.; HO, H. M. **Recovery of Municipal Waste Incineration Bottom Ash and Water Treatment Sludge to Water Permeable Pavement Materials.** *Waste Management*, v. 26, n. 9, p. 970 - 978, 2006.

MACÊDO, A.N.; LIMA, A.M. de.; FONSECA, F. O.; LAVÔR, B.V. A. Análise estatística do comportamento mecânico à compressão do compósito cimento – madeira. **Revista Matéria.** Rio de Janeiro, v.16, n.2, 2011.

MARCHIONI, M. L. **Desenvolvimento de Técnicas para Caracterização de Concreto Seco Utilizado na Fabricação de Peças de Concreto para Pavimentação.** Universidade de São Paulo, 2012.

MATTOS, I. L.; SHIRAISHI, K. A.; BRAZ, A. D.; FERNANDES, J. R. Peróxido de Hidrogênio: Importância e Determinação. **Química Nova**, v. 26, n. 3, p. 373–380, 2003.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estruturas, Propriedades e Materiais.** São Paulo: Pini, 1994.

MONTEIRO, S. N.; ALEXANDRE, J.; MARGEM, J. I.; SÁNCHEZ, R.; VIEIRA, C. M. F. **Incorporation of Sludge Waste for Water Treatment Plant Into Red Ceramic.** *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 6, p. 1281 - 1287, 2008.

OLIVEIRA, A. L. **Contribuição para a Dosagem e Produção de Peças de Concreto para Pavimentação.** Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

OLIVEIRA, N. S. **Estudo de Secagem do Lodo de Estação de Tratamento de Água.** Universidade Federal do Paraná, 2010.

OLIVEIRA, N. S.; AISSE, M. M. Secagem de Lodo de ETA: Uma Revisão. In: **Lodo de Estações de Tratamento de Água - Gestão e Perspectivas Tecnológicas**. Cap. 7, p. 301 - 340. Curitiba: SANEPAR, 2013.

PARANÁ. **Secretaria de Estadp de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SEMA. Resolução 001/07**. Dispõe sobre licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e da outras providencias para empreendimentos de saneamento. Paraná, 2007.

PINHEIRO-ALVES, M. T.; GOMÀ, F.; JALALI, S. Um Cimento mais Sustentável Frente a um Ataque Severo por Sulfatos. In: **3º Congresso Nacional da Construção**. Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal: 2007.

PORTELLA, K.F.; ANDREOLI, C.V.; HOPPEN, C.; SALES, A. BARON, O. **Caraterização Físico-Química do Lodo Centifugado da Estação de Tratamento de Água Passaúna – Curitiba – Pr. 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL**. Joinvile: ABES, 2003.

REALI, M. A. P. Principais Características Quantitativas e Qualitativas do Lodo de ETAs. In: **Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. Cap. 2, p. 21 – 39. Projeto PROSAB/REDE COOPERATIVA DE PESQUISAS. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

RIBEIRO, M. J.; TULYAGANOV, D. U.; FERREIRA, J. M.; LABRINCHA, J. A. **Recycling of Al-Rich Industrial Sludge in Refractory Ceramic Pressed Bodies**. *Ceramics International*, 2001.

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

RICHTER, C. A. **Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento**. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.

RICHTER, C. A. e AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de Água: Tecnologia Atualizada**. São Paulo: Edgard Blucher, 1991.

SALES, A.; DE SOUZA, F. R.; ALMEIDA, F. D. C. R. **Mechanical Properties of Concrete Produced with a Composite of Water Treatment Sludge and Sawdust**. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 6, p. 2793 - 2798, 2011.

SANTOS, A. D. **Estudo das Possibilidades de Reciclagem dos Resíduos de Tratamento de Esgoto da Região Metropolitana de São Paulo**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: São Paulo, 2003.

SHIMADZU. **Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer. EDX Series EDX - 720/800HS**. Japão, 2013.

TAFAREL, N. F. **Avaliação das Propriedades do Concreto devido à Incorporação de Lodo de Estação de Tratamento de Água.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Curitiba, 2015.

TEIXIERA, S. R.; DE SOUZA, S. A.; DE SOUZA, N. R.; ALÉSSIO, P.; SANTOS, G. T. A. **Efeito da Adição de Lodo de Estação de Tratamento de Água nas Propriedades de Material Cerâmico Estrutural.** *Cerâmica*, v. 52, p. 215 - 220, 2006.

TOYA, T.; NAKAMURA, A.; KAMESHIMA, Y. NAKAJIMA, A. OKADA, K. **Glass-Ceramics Prepared from Sludge Generated by a Water Purification Plant.** *Ceramics International*, v. 33, n. 4, p. 573 - 577, 2007.

US DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Permeable Interlocking Concrete Pavement.** *TechBrief*, p. 1 - 13, 2015.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria de erros.** 2<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Blucher, 1996.

WASTOWSKI, A. D.; DA ROSA, G. M.; CHERUBIN, M. R.; RIGON, J. P. G. Caracterização dos níveis de elementos químicos em solo, submetido a diferentes sistemas de uso e manejo, utilizando espectrometria de fluorescência de raios-x por energia dispersiva (EDXRF). **Química Nova**, v. 33, n. 7, p. 1449-1452, 2010.

WOLFF, E. SCHWABE, W. K. CONCEIÇÃO, S. V. **Utilisation of Water Treatment Plant Sludge in Structural Ceramics.** *Journal of Cleaner Production*, v. 96, p. 282 - 289, 2015.

**APÊNDICE A – PARÂMETROS OBTIDOS NOS RELATÓRIOS DE  
CARACTERIZAÇÃO DA SANEPAR PARA OS EXTRATOS LIXIVIADOS E  
SOLUBILIZAÇÃO**

Na Tabela 31, na Tabela 32 e na Tabela 33 são especificados os compostos inorgânicos e orgânicos identificados no extrato lixiviado do lodo analisado, assim como as concentrações correspondentes para o período entre segundo semestre de 2014 e o primeiro semestre de 2016.

**Tabela 31 - Parâmetros inorgânicos para o extrato lixiviado**

Parâmetro (mg/L)	2014.2	2015.1	2015.2	2016.1	Limite NBR 10004
Arsênio	<0,02	<0,1	<0,01	<0,01	1,0
Bário	1,9	<1,0	0,213	0,812	70,0
Cádmio	<0,02	<0,01	<0,001	<0,001	0,5
Chumbo	<0,02	<0,1	<0,01	<0,01	1,0
Cromo total	0,23	<0,1	0,0241	0,0375	5,0
Fluoreto	<0,02	<0,1	<0,1	<0,1	150
Mercúrio	<0,001	<0,01	<0,00008	<0,00008	0,1
Prata	<0,02	<0,01	<0,01	<0,01	5,0
Selênio	<0,02	<0,01	<0,008	<0,008	1,0

Fonte: Adaptado de dados fornecidos pela SANEPAR, 2016.

**Tabela 32 - Parâmetros orgânicos pesticidas para o extrato lixiviado**

Parâmetro (mg/L)	2014.2	2015.1	2015.2	2016.1	Limite NBR 10004
Aldrin + dieldrin	*	<0,001	<0,00003	<0,00003	0,003
Clordano	*	<0,001	<0,0001	<0,00003	0,02
DDT+DDD+DDE	*	<0,001	<0,0005	<0,00001	0,2
2,4 D	*	<0,001	<0,00005	<0,00001	3,0
Endrin	*	<0,001	<0,0001	<0,00003	0,06
Heptacloros	*	<0,001	<0,00002	<0,00002	0,003
Lindano	*	<0,001	<0,00005	<0,00003	0,2
Metoxicloro	*	<0,001	<0,00005	<0,00003	2,0
Pentaclorofenol	*	<0,001	<0,0005	<0,00005	0,9
Toxafeno	*	<0,001	<0,0001	<0,0001	0,5
2,4,5 - T	*	<0,001	<0,001	<0,00005	0,2
2,4,5 - TP	*	<0,001	<0,001	<0,00005	1,0

Fonte: Adaptado de dados fornecidos pela SANEPAR, 2016.

\*Não constam no relatório

Tabela 33 - Parâmetros orgânicos voláteis para o extrato lixiviado

Parâmetro (mg/L)	2014.2	2015.1	2015.2	2016.1	Limite NBR 10004
Benzeno	*	<0,001	<0,001	<0,001	0,5
Benzo(a)pireno	*	<0,001	<0,00005	<0,00005	0,07
Cloreto de Vinila	*	<0,01	<0,001	<0,001	0,5
Clorobenzeno	*	0,221	<0,001	<0,001	100
Clorofórmio	*	<0,01	<0,001	0,0446	6,0
Cresol total	*	<0,01	*	*	200
o-Cresol	*	*	<0,001	<0,00005	200
m+p-Cresol	*	*	<0,002	<0,0001	200
1,4 - Diclorobenzeno	*	<0,01	<0,001	<0,001	7,5
1,2 - Dicloroetano	*	0,312	<0,001	<0,001	1,0
1,1 -Dicloroetano	*	*	<0,001	<0,001	3,0
2,4 – Dinitrotolueno	*	*	<0,001	<0,00005	0,13
Hexaclorobenzeno	*	<0,01	<0,0005	<0,00005	0,1
Hexaclorobutadieno	*	*	<0,001	<0,00001	0,5
Hexacloroetano	*	*	<0,001	<0,00005	3,0
Metiletilcetona	*	<0,01	*	*	200
Nitrobenzeno	*	*	<0,00002	<0,00005	2,0
Piridina	*	*	<2,5	<2,5	5,0
Tetracloroeto de Carbono	*	0,039	<0,001	<0,001	0,2
Tetracloroetano	*	<0,01	<0,001	<0,001	4,0
Tricloroetano	*	<0,01	<0,001	<0,001	7,0
2,4,5 - Triclorofenol	*	<0,01	<0,001	<0,0001	400
2,4,6 - Triclorofenol	*	<0,01	<0,0005	<0,0001	20,0

Fonte: Adaptado de dados fornecidos pela SANEPAR, 2016.

\*Não constam no relatório

Na Tabela 34 e na Tabela 35 são especificados os compostos inorgânicos e orgânicos identificados no extrato solubilizado do lodo, assim como as concentrações correspondentes para o período entre segundo semestre de 2014 e o primeiro semestre de 2016.

Tabela 34 - Parâmetros inorgânicos para o extrato solubilizado

Parâmetro (mg/L)	2014.2	2015.1	2015.2	2016.1	Limite NBR 10004
Alumínio	<0,2	<0,2	0,0449	0,0250	0,2
Arsênio	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Bário	<0,07	<0,5	0,0717	0,141	0,7
Cádmio	<0,005	<0,001	<0,001	<0,001	0,005
Chumbo	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Cianeto	<0,02	<0,07	<0,05	<0,05	0,07
Cloreto	18,02	<5,0	6,83	10,1	250
Cobre	<0,02	<0,05	<0,005	<0,005	2,0
Cromo	0,26	<0,01	<0,01	0,0193	0,05
Ferro	2,0	24,75	26,6	0,839	0,3
Fluoreto	1,09	<0,1	<0,1	<0,1	1,5
Manganês	1,24	3,5	2,25	9,93	0,1
Mercúrio	<0,001	<0,0001	<0,00008	<0,00008	0,001
Nitrato (expresso em N)	1,7	25,0	<0,1	<0,1	10,0
Prata	<0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,05
Selênio	<0,01	<0,01	<0,008	<0,008	0,01
Sódio	5,0	3,0	1,27	4,98	200
Sulfato	12,0	<5,0	1,08	4,93	250
Zinco	0,12	<0,05	0,0144	0,0115	5,0

Fonte: Adaptado de dados fornecidos pela SANEPAR, 2016.

Tabela 35 - Parâmetros orgânicos pesticidas e voláteis para o extrato lixiviado

Parâmetro (mg/L)	2014.2	2015.1	2015.2	2016.1	Limite NBR 10004
Aldrin + dieldrin	*	*	<0,00003	<0,00003	0,00003
Clordano	*	*	<0,0001	<0,00003	0,0002
DDT	*	*	<0,0005	<0,00001	0,002
2,4 D	*	*	<0,0005	<0,00005	0,03
Endrin	*	*	<0,001	<0,00003	0,0006
Fenóis Totais	0,007	<0,001	0,081	0,073	0,01
Heptacloros	*	*	<0,00002	<0,00002	0,00003
Hexaclorobenzeno	*	*	<0,0005	<0,00005	0,001
Lindano	*	*	<0,00005	<0,00003	0,002
Metoxicloro	*	*	<0,0005	<0,00003	0,02
Toxafeno	*	*	<0,0001	<0,0001	0,005
2,4,5 - T	*	*	<0,001	<0,00005	0,002
2,4,5 - TP	*	*	<0,001	<0,00005	0,03

Fonte: Adaptado de dados fornecidos pela SANEPAR, 2016.

\*Não constam no relatório