



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GRACIELLE FERREIRA DE SOUZA

**UTILIZAÇÃO DE ESGOTO SANITÁRIO TRATADO EM LAGOA DE  
ESTABILIZAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE PASTA DE CIMENTO E CONCRETO**

JOÃO PESSOA

2018

GRACIELLE FERREIRA DE SOUZA

**UTILIZAÇÃO DE ESGOTO SANITÁRIO TRATADO EM LAGOA DE  
ESTABILIZAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE PASTA DE CIMENTO E CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso que apresenta à  
Coordenação do Curso de Engenharia Civil do  
Centro de Tecnologia da Universidade Federal da  
Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Engenheiro (a) Civil.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Vieira Soares

JOÃO PESSOA

2018

S729u Souza, Gracielle Ferreira de.

Utilização de esgoto sanitário tratado em Lagoa de Estabilização para produção de pasta de cimento e concreto / Gracielle Ferreira de Souza. - João Pessoa, 2018.

95 f. : il.

Orientação: Leonardo Vieira Soares Soares.  
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Reúso de água. 2. Lagoa de Estabilização. 3. Produção de Concreto. I. Soares, Leonardo Vieira Soares. II. Título.

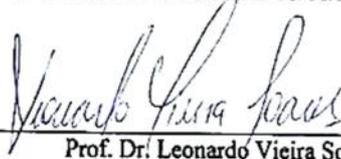
UFPB/BC

## FOLHA DE APROVAÇÃO

GRACIELLE FERREIRA DE SOUZA

### UTILIZAÇÃO DE ESGOTO SANITÁRIO TRATADO EM LAGOA DE ESTABILIZAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE PASTA DE CIMENTO E CONCRETO

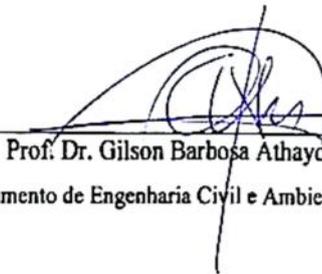
Trabalho de Conclusão de Curso em 01/11/2018 perante a seguinte Comissão Julgadora:



Prof. Dr. Leonardo Vieira Soares

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Prof. Dr. Gilson Barbosa Athayde Júnior

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

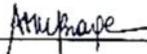
APROVADO



Prof. Dr. Aline Flávia Nunes Remígio Antunes

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Prof. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga

Matrícula Siapc: 1668619

Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

*Dedico este trabalho à Deus, a toda minha família em especial, minha mãe Edimilde e minha tia Nadja, por serem exemplos de amor e força.*

## AGRADECIMENTOS

Ir em busca de concretizar o sonho de se tornar Engenheira Civil, não foi uma fácil missão, porém Deus me abençoou colocando ao longo da minha caminhada, pessoas especiais que exerceram papéis fundamentais nessa conquista.

Agradeço primeiramente a Deus, pelo seu amor incondicional, por ser meu refúgio e meu guia, por sempre ter me dado uma luz em frente às dificuldades que apareceram ao longo desses cinco anos, pois sem Ele nada da minha vida teria sentido.

Agradeço a minha família, minha base, em especial a minha guerreira mãe Edimilde, por ser meu exemplo de força e superação, ao meu pai Gildo e as minhas tias, Nadja e Esoelma, que sempre estiveram comigo dando força, amor e incentivando os meus estudos.

As minhas amiguinhas Brenda, Mariana, Raionara, Tatiane e Kallyelândia, amigas de todos os momentos, que tornaram mais leves os momentos difíceis.

A irmã que Deus me presenteou, Gracielly, por ter dividido todas as angústias e momentos felizes comigo, por ter sido muitas vezes minha razão e apoio durante os ventos fortes ao longo dessa jornada.

A minha amiga Myellem, que se tornou membro da família, agradeço por sempre me contagiar com sua alegria e, por ter me mostrado o verdadeiro significado da amizade e do amor ao próximo.

Aos meus amigos e amigas, companheiros de turma, que no decorrer desses cinco anos estivemos firmes e fortes em todas as dificuldades, nos apoiando e encorajando perante as imposições do curso. Em especial, a Wylliane e Hennan, por todo suporte e palavra de incentivo, a eles meu carinho e amizade.

A minha parceira de trabalho Ana, que foi uma pessoa importante no desenvolvimento deste trabalho, agradeço-lhe por todo auxílio, apoio, dicas e por sua amizade.

A UFPB, professores, e funcionários, principalmente a meu orientador Leonardo Vieira Soares, por ser um espelho de educador, agradeço-lhe pela paciência e colaboração durante a concepção deste trabalho.

A professora Karine, por ter sido tão presente durante a minha vida acadêmica, agradeço-lhe por todo ensinamento e por ter despertado em mim o desejo de querer ter uma profissão tão honrada como a do professor.

Aos professores Gilson e Aline, que gentilmente se dispuseram a participar da banca examinadora, é uma honra poder compartilhar esse momento acadêmico com dois profissionais tão competentes e dedicados.

Ao professor Hidelbrando e o mestrando Lisarb, por toda assistência durante os ensaios de módulo de elasticidade.

As coordenadoras Ana Cláudia e Andrea, por serem profissionais exemplares, por toda preocupação e carinho com os alunos.

Aqueles que fizeram parte do meu crescimento profissional, a GIGOV-JP e PU, em especial aos meus espelhos de líderes, Jovanio, Marcos David e Ricardo.

Por fim, a toda equipe técnica e estagiários, do LABEME e LABSAN, que me auxiliaram durante todos os procedimentos laboratoriais, em especial a Sebastião, Delbe, Claudio e Elson, por todo suporte, sugestões e ensinamentos.

## RESUMO

Diante da crescente escassez da água potável, é de grande importância a busca de novas fontes alternativas, principalmente em setores com grande consumo de água, como a construção civil. Desse modo, esta pesquisa se dispõe a analisar a viabilidade técnica do uso de efluente de esgoto doméstico tratado por Lagoas de Estabilização na Estação de Tratamento de Esgoto de Mangabeira, operada pela CAGEPA (Companhia de Água e Esgotos da Paraíba), localizada no município de João Pessoa – PB, como água de amassamento e cura do concreto. Inicialmente, foi estabelecida uma resistência de 25 MPa para o concreto produzido, e assim, com a caracterização dos agregados foi feita a dosagem. Posteriormente, foram realizadas as coletas do efluente em períodos distintos, para melhor especificação do esgoto tratado, totalizando quatro amostras sobre as quais realizou-se análises químicas indicadas pela Norma Mercosul 137. Os resultados obtidos nos ensaios de determinação do pH a 25°C, ferro totais, sólidos totais, cloretos e sulfatos solúveis apresentaram-se coerentes aos limites exigidos e assim foi possível o início da produção do concreto. Com as amostras de efluente, foram produzidos 48 cilindros de concreto e para efeito de comparação, 16 cilindros de concreto com água abastecida pela CAGEPA, totalizando 64 elementos. Após as moldagens e as devidas curas, foram analisadas a resistência à compressão para idade de 7, 28 e 120 dias, bem como o módulo de elasticidade. Finalmente, os resultados da resistência para 7 dias, apresentaram valores divergentes a tolerância exposta pela norma em estudo. Em contrapartida, aos 28 dias, observou-se que a resistência teve um aumento de 54,29%, resultado que se esteve dentro dos limites exigidos pelas normas NM 137 e para idades de 120 dias, o concreto produzido com efluente apresentou-se 24,92% mais resistente ao da água potável. Enquanto, ao módulo de elasticidade, não houve variabilidade entre os valores médios do  $f_{ck}$  estabelecidos pelo método destrutivo e não-destrutivo, reiterando a consistência dos valores encontrados no ensaio de compressão, verificou-se também que o efluente não interferiu consideravelmente no  $f_{ck}$  do concreto produzido. Portanto, o esgoto tratado em estudo, atendeu à maioria dos requisitos discriminados pela Norma Mercosul 137, constatando apto para produção de pasta de cimento e do concreto.

**Palavras-chave:** Reúso de água, Lagoa de Estabilização, Produção de Concreto.

## ABSTRACT

In face of the growing scarcity of potable water it is of major importance the searching for new alternative sources of water, mainly for sectors of high consumption like civil construction. Thus, this research disposes to analyze the technical viability of the use of domestic sewage treated by stabilization ponds at the Sewage Treatment Station of Mangabeira, operated by CAGEPA (Companhia de Água e Esgotos da Paraíba), located in João Pessoa - PB as kneading and concrete cure water. Initially it was established a 25 MPa resistance for the produced concrete, and thus with the description of the aggregate the dosage was done. Subsequently, the effluent was collected in different periods, for a better specification of the treated sewage, totaling four samples on which chemical analyzes were carried out indicated by Mercosur Standard 137. The results obtained in the tests of determination of the pH at 25 ° C, total iron, total solids, chlorides and soluble sulfates were coherent to the required limits and thus the production of the concrete was possible. With the effluent samples, 48 concrete cylinders were produced and for comparison purposes, 16 concrete cylinders with water supplied by CAGEPA, totaling 64 elements. After the moldings and due cures, the compressive resistance for age of 7, 28 and 120 days, as well as the modulus of elasticity were analyzed. Finally, the results of the resistance for 7 days, presented values divergent to the tolerance exposed by the norm under study. On the other hand, at 28 days, it was observed that the resistance had an increase of 54,29%, a result that was within the limits required by norms NM 137 and for ages of 120 days, the concrete produced with effluent presented 24,92% more resistant to potable water. While the modulus of elasticity showed no variability between the mean values of  $f_{ck}$  established by the destructive and non-destructive method, confirming the consistency of the values found in the compression test, it was also verified that the effluent did not interfere considerably in the  $f_{ck}$  of the concrete produced. Therefore, the sewage treated in the study, met most of the requirements discriminated by the Mercosur Standard 137, proving suitable for the production of cement paste and concrete.

**Keywords:** Water reuse, Stabilization pond, Concrete production.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Relação entre trabalhabilidade e grandeza de abatimento.....	27
Tabela 2 - Principais compostos do cimento Portland. ....	33
Tabela 3 - Características conferidas a concretos e argamassas em função do tipo de cimento. .....	35
Tabela 4 - Exigências físicas da água para amassamento e cura. ....	37
Tabela 5 - Exigências químicas da água para amassamento e cura.....	37
Tabela 6 - Aberturas nominais do conjunto de peneiras das séries normal e intermediária.....	39
Tabela 7 - Caracterização dos módulos 1 e 2 da ETE. ....	43
Tabela 8 - Descrição das condições de controle. ....	52
Tabela 9 - Curva para determinação do consumo de água / m <sup>3</sup> .....	54
Tabela 10 - Curva para determinação do consumo de água / m <sup>3</sup> .....	54
Tabela 11 - Resultado das análises físico-químicas do efluente. ....	63
Tabela 12 - Resultado das análises de Sólidos Totais do efluente. ....	63
Tabela 13 - Composição granulométrica do agregado miúdo. ....	65
Tabela 14 - Composição granulométrica do agregado graúdo. ....	66
Tabela 15 - Massa específica e unitária dos agregados utilizados. ....	66
Tabela 16 - Parâmetros inicialmente considerados para o cálculo da dosagem do concreto. ..	67
Tabela 17 - Características dos agregados utilizados no traço. ....	67
Tabela 18 - Procedimento de dosagem do concreto. ....	68
Tabela 19 - Resultados do tempo de pega inicial utilizando efluente de esgoto tratado e água potável. ....	69
Tabela 20 - Análise Estatística para o tempo de pega inicial das amostras.....	70
Tabela 21 - Resultados do tempo de pega final utilizando efluente de esgoto tratado e água potável. ....	71
Tabela 22 - Análise Estatística para o tempo de pega final das amostras. ....	71
Tabela 23 - Resistência à compressão aos 07 dias. ....	72
Tabela 24 - Análise Estatística para o concreto com idade de 7 dias.....	73

Tabela 25 - Resistência à compressão aos 28 dias. ....	74
Tabela 26 - Análise Estatística para o concreto com idade de 28 dias.....	75
Tabela 27 - Resistência à compressão aos 120 dias. ....	76
Tabela 28 - Análise Estatística para o concreto com idade de 120 dias.....	77
Tabela 29 - Resultado do fck pelo método destrutivo e não-destrutivo. ....	78
Tabela 30 - Resultado do fck pelo método destrutivo e não-destrutivo para amostra com efluente tratado. ....	79
Tabela 31 - Análise Estatística para o fck estabelecido pelo método destrutivo e não-destrutivo, referente a amostra com efluente.....	80
Tabela 32 - Resultado do fck pelo método destrutivo e não-destrutivo para amostra com água potável. ....	80
Tabela 33 - Análise Estatística para o fck estabelecido pelo método destrutivo e não-destrutivo, referente a amostra com água potável. ....	81

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Lagoa facultativa.....	21
Figura 2 - Lagoa anaeróbia – lagoa facultativa. ....	22
Figura 3 - Lagoa aerada facultativa. ....	22
Figura 4 - Lagoa aerada de mistura completa – lagoa de decantação. ....	23
Figura 5 - Fases do concreto.....	26
Figura 6 - Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão. ....	29
Figura 7 - Determinação do módulo de elasticidade do concreto à compressão.....	31
Figura 8 - Fatores que interferem no módulo de elasticidade do concreto.....	32
Figura 9 - Vista em planta da ETE Mangabeira. ....	41
Figura 10 - Elementos do Sistema de Tratamento Preliminar da ETE.....	42
Figura 11 - Esquema do tratamento do Módulo I.....	42
Figura 12 - Ponto de zona de mistura. ....	43
Figura 13 - Vista da Lagoa Facultativa do primeiro módulo. ....	44
Figura 14 - Leitura do pH da amostra através do aparelho Phmetro de bancada. ....	46
Figura 15 - Banho-Maria e dessecador, respectivamente, para análise do teor de sólidos. ....	47
Figura 16 - Espectrofotômetro e material para análise do teor de Ferro. ....	48
Figura 17 - Aparelhos e reagentes utilizados no método, e material para análise.....	49
Figura 18 - Agitador magnético e material para análise do teor de sulfatos. ....	50
Figura 19 - Ensaio de tempo de início e fim de pega, respectivamente. ....	51
Figura 20 - Etapas do ensaio de consistência. ....	57
Figura 21 - Moldes cilíndricos dos corpos de prova. ....	58
Figura 22 - Processo de cura do concreto.....	59
Figura 23 - Prensa hidráulica utilizada no ensaio de compressão axial dos corpos de prova. .	60
Figura 24 - Instrumentação utilizada para ensaio dinâmico. ....	60
Figura 25 - Princípio de funcionamento do Sonelastic. ....	61
Figura 26 - Método do frasco Chapman.....	69

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2. OBJETIVO .....</b>	<b>18</b>
2.1 Objetivos Específicos .....	18
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>19</b>
3.1 Esgoto sanitário.....	19
3.2 Tratamento de esgotos .....	19
3.2.1 Lagoas de Estabilização.....	21
3.3 Reúso .....	23
3.3.1 Tipos de reúso.....	23
3.3.2 Reúso na construção civil.....	24
3.4 Concreto.....	25
3.4.1 Propriedades do concreto.....	27
3.4.1.1 Trabalhabilidade.....	27
3.4.1.2 Adensabilidade .....	27
3.4.1.3 Durabilidade .....	28
3.4.1.4 Resistência.....	28
3.4.1.5 Módulo de Elasticidade.....	30
3.4.2 Componentes .....	33
3.4.2.1 Aglomerante – Cimento Portland.....	33
3.4.2.2 Agregados.....	35
3.4.2.3 Água .....	36
3.5 Dosagem do concreto.....	38
3.5.1 Parâmetros e termos utilizados na dosagem .....	38
3.5.1.1 Massa específica e unitária.....	38
3.5.1.2 Dimensão Máxima Característica e Módulo de Finura.....	38
3.5.1.3 Tempo de início e fim de pega.....	39

3.5.1.4	Cura do concreto .....	39
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>41</b>
4.1	Área de estudo .....	41
4.2	Amostragem.....	44
4.3	Ensaio de caracterização do efluente.....	45
4.3.1	Potencial Hidrogênio (pH) .....	45
4.3.2	Teor de Sólidos Totais .....	46
4.3.3	Teor de Ferro total .....	47
4.3.4	Teor de Cloretos .....	48
4.3.5	Teor de Sulfatos Solúveis .....	50
4.4	Ensaio de caracterização dos agregados graúdo e miúdo.....	51
4.5	Ensaio de caracterização da pasta de cimento .....	51
4.6	Dosagem do concreto.....	52
4.6.1	Cálculo da resistência de dosagem .....	52
4.6.2	Determinação do fator água/cimento (a/c) .....	53
4.6.3	Estimativa do consumo de água/m <sup>3</sup> de concreto .....	53
4.6.4	Consumo de cimento/m <sup>3</sup> de concreto .....	54
4.6.5	Proporção dos agregados .....	54
4.6.6	Consumo de agregados/m <sup>3</sup> .....	55
4.6.7	Cálculo do traço em peso (TUP) .....	55
4.7	Ensaio de caracterização do concreto produzido .....	56
4.7.1	Ensaio de consistência .....	56
4.7.2	Processo de produção e cura do concreto.....	57
4.7.3	Ensaio de resistência à compressão axial .....	59
4.8	Ensaio do módulo de elasticidade.....	60
4.9	Análise estatísticas dos resultados obtidos .....	62
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>63</b>
5.1	Caracterização do efluente.....	63
5.1.1	Potencial de Hidrogênio à 25°C .....	64
5.1.2	Cloretos e Sulfatos solúveis.....	64
5.1.3	Ferro .....	65
5.1.4	Sólidos .....	65
5.2	Caracterização dos agregados graúdo e miúdo.....	65

5.3	Dosagem do concreto.....	67
5.3.1	Ajuste no traço obtido .....	68
5.4	Análise do tempo de pega da pasta de cimento produzida .....	69
5.5	Análise da resistência à compressão do concreto produzido .....	72
5.5.1	Resistência à compressão axial aos 07 dias.....	72
5.5.2	Resistência à compressão aos 28 dias.....	74
5.5.3	Resistência à compressão aos 120 dias.....	76
5.5.4	Módulo de elasticidade.....	77
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>82</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>84</b>
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>
	<b>APÊNDICE A - Ensaio Dinâmico para determinar o Módulo de Elasticidade - 1ª Amostra - 28 dias.....</b>	<b>90</b>
	<b>APÊNDICE B - Ensaio Dinâmico para determinar o Módulo de Elasticidade - 2ª Amostra - 28 dias.....</b>	<b>91</b>
	<b>APÊNDICE C - Ensaio Dinâmico para determinar o Módulo de Elasticidade - 3ª Amostra - 28 dias.....</b>	<b>92</b>
	<b>APÊNDICE D - Ensaio Dinâmico para determinar o Módulo de Elasticidade – Amostra de Água Potável - 28 dias .....</b>	<b>93</b>
	<b>ANEXO A - Ábaco experimental para determinação da proporção de agregados.....</b>	<b>94</b>
	<b>ANEXO B - Tabela de distribuição T Student .....</b>	<b>95</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A água está relacionada a todas as atividades humanas, direta ou indiretamente, tendo um papel influenciador na sobrevivência biológica, na qual é um recurso essencial para a produção econômica, abrangendo setores como a indústria, agricultura, transporte e entre outros vinculados ao fornecimento de produtos e serviços (JACOBI; GRANDISOLI, 2017).

A água doce representa 2,5% do total de água da Terra, em que parte dela não é acessível ao consumo humano, e ocorrendo uma distribuição irregular entre os países, em que 9 deles possuem 60% dela, enquanto outros passam por um quadro de estresse hídrico, como alguns países da África, Oriente Médio e Ásia. Segundo a Unesco (2012), existe uma previsão que no ano 2032, cerca de cinco bilhões de pessoas serão afetadas pela escassez de água (JACOBI; GRANDISOLI, 2017).

Cabe destacar que de acordo com Tundisi (2008), o atual cenário de crise hídrica é cada vez mais agravado devido a inúmeros fatores como a intensa urbanização, a poluição, as mudanças climáticas, a pobre infraestrutura que apresenta até 30% de perdas na rede após tratamento das águas, bem como a falta de ações consistentes quanto à governabilidade de recursos hídricos.

Com base nesse cenário de crise hídrica, torna-se imprescindível a busca por soluções que garantam sustentabilidade em sua perspectiva mais ampla, bem como o uso racional da água, o controle de perdas e desperdícios, e o reúso da água, incluindo a utilização de esgotos sanitários para diversos fins. Desse modo, a utilização de efluentes pode ser uma fonte alternativa eficaz em situações de acentuada escassez de recursos hídricos, sendo uma oportunidade de natureza econômica, ambiental e social (FLORÊNCIO et al, 2006).

Segundo a Agência Nacional de Águas - ANA (2012), a indústria de transformação representa o terceiro maior uso de recursos hídricos, ressaltando que o setor da construção civil, consome cerca de 16% de toda a água potável consumida no país. Salienta-se que a água potável é utilizada em inúmeras atividades nesse setor, como suprimento das necessidades dos colaboradores, como componente nas argamassas, na compactação de aterros, cura de concreto, entre outras. Porém vale destacar, que a produção de concreto é a atividade que apresenta maior índice de consumo de água.

Em meio a esse panorama, Pessarello (2008) correlata que é necessário a utilização de em média de 160 a 200 litros de água por m<sup>3</sup> de concreto. Sabendo que o consumo de concreto

por ano é de grandeza de 51 milhões de m<sup>3</sup> (ABCP, 2012), pode-se constatar que é consumido 10,2 trilhões de litros de água por ano.

Logo, visto o elevado consumo de água na construção civil, principalmente na produção de concreto, torna-se de grande importância o desenvolvimento de alternativas que busquem o equilíbrio entre o consumo e demanda desse insumo, como a substituição da água potável por águas com qualidade inferior. Nesse sentido, o presente trabalho tem como propósito o estudo da viabilidade técnica da utilização de esgoto doméstico tratado em Lagoas de Estabilização na produção de concreto e pasta de cimento, tendo como referência os limites expostos na Norma Mercosul 137/97.

## 2. OBJETIVO

Analisar a utilização de esgoto doméstico tratado em lagoas de estabilização, no emprego de atividades que necessitam de água de menor qualidade, como a produção de pasta de cimento e concreto, de forma a estimular o uso de fontes alternativas de água na construção civil.

### 2.1 Objetivos Específicos

- ) Com base na caracterização dos agregados, definir o traço para uma resistência de 25 MPa;
- ) Verificar as características físico-químicas do efluente das lagoas de estabilização (sólidos totais, sulfato, ferro total e cloretos), bem como analisar se atendem as exigências descritas na Norma Mercosul 137;
- ) Comparar a resistência à compressão do concreto com idades de 7, 28 e 120 dias, preparados com efluente provindo do tratamento por sistema de lagoas de estabilização (água de reúso) e água de abastecimento;
- ) Comparar o tempo de início e fim de pega das pastas de cimento preparadas com água de reúso e água de abastecimento;
- ) Verificar o módulo de elasticidade dos corpos de prova de água de reúso e água de abastecimento e relacionar com a resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ).

### **3. REVISÃO DA LITERATURA**

#### **3.1 Esgoto sanitário**

Segundo a NBR 9648/1986, o esgoto doméstico é definido como despejo líquido decorrente do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas. E o esgoto sanitário é constituído de esgoto doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária, sendo que sua composição é basicamente composta água de banho, urina, fezes, papel, restos de comida, produtos de limpeza e águas de lavagem.

A água residuária doméstica constitui 99,9% do esgoto bruto de sua massa, e 0,1% é composta por sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos (sais) e dissolvidos (gorduras e óleos), bem como microrganismos remanescentes, como vírus, bactérias, vermes e protozoários (VON SPERLING, 2005).

Contudo, o esgoto sanitário pode sofrer alterações em determinados intervalos de tempo, sendo em divergentes estações do ano, dias da semana e horas do dia, ou seja, pode ocorrer variações das características dos esgotos sanitários em termos de composição e concentração. Tendo como variáveis a temperatura, precipitação, as atividades industriais e humanas que influenciam as particularidades dos esgotos (VON SPERLING, 2002)

Dessa maneira, para caracterizar o esgoto sanitário bruto e tratado são analisados alguns principais parâmetros como Potencial Hidrogeniônico (pH), DBO, DQO, Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Fixos (STF), Sólidos Totais Voláteis (STV), Sólidos Sedimentáveis (S. Sed.), Fósforo Total (PT), temperatura, Oxigênio Dissolvido (OD), Nitrogênio Amoniacal (NA), Óleos, Graxas Residuais (OG), dentre outros (LOPES, T. R.,2015).

#### **3.2 Tratamento de esgotos**

Com a urbanização e o crescimento da indústria, cresce a preocupação com o lançamento indiscriminado de esgotos domésticos ou industriais nos corpos hídricos, caracterizado pela degradação da qualidade ambiental da água. Desse modo, o lançamento de efluente de esgoto no corpo receptor deve seguir as exigências da legislação ambiental em vigor em cada região. No Brasil, existe a resolução CONAMA N°430/2011 do Ministério do Meio Ambiente, que através de condições, parâmetros, padrões e diretrizes determinam o valor máximo de poluentes que o corpo hídrico pode receber, sem comprometer a qualidade da água.

Portanto, antes do efluente ser lançado no corpo receptor, o mesmo é levado para as estações de tratamento de esgotos, na qual passa por processo biológico, químico ou físico. O processo biológico se assemelha aos que ocorre num corpo d'água, chamado de autodepuração, em que a matéria orgânica é transformada em produtos mineralizados inertes (OLIVEIRA, 2014).

O tratamento de esgotos é composto por inúmeros tipos de processos, porém de forma geral tem como principais organismos as bactérias, os fungos, as algas e os vermes, onde a escolha do determinado organismo depende do poluente encontrado no esgoto, sendo os mais comuns os sólidos em suspensão, matéria orgânica biodegradável, poluentes patogênicos, nitrogênio, fósforo. Entretanto, no caso de lagoas de estabilização, procura-se o equilíbrio entre as algas e bactérias (OLIVEIRA, 2014).

Desse modo, o tratamento convencional do esgoto sanitário, tem o intuito da remoção de sólidos, matéria orgânica, macronutrientes e agentes patogênicos por meio de processos físicos, biológicos e químicos.

Segundo Von Sperling (2005), o tratamento convencional de águas residuárias é discriminado nos seguintes níveis:

) **Tratamento preliminar:** destina-se a remoção de sólidos grosseiros e areia. Na qual, seus mecanismos são de ordem física (peneiramento e sedimentação), composto por grade, desarenador e medidor de vazão.

) **Tratamento primário:** destina-se a remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis e sólidos flutuantes por meio de mecanismos físicos como decantadores. Uma parte desses sólidos em suspensão é contida pela matéria orgânica em suspensão, que é removida por sedimentação.

) **Tratamento secundário:** destina-se a remoção de matéria orgânica e alguns nutrientes (nitrogênio e fósforo) por meio de mecanismos biológicos. Em que, deve-se alcançar 90% de DBO.

) **Tratamento terciário:** destina-se a remoção de poluentes específicos como metais pesados, micronutrientes e patogênicos.

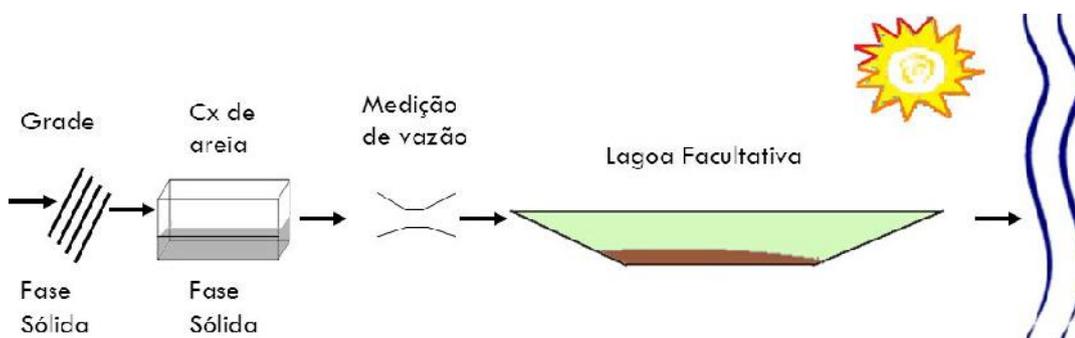
### 3.2.1 Lagoas de Estabilização

Segundo Jordão e Pessôa (1995), as lagoas de estabilização, quer naturais ou artificiais, são sistemas de tratamento biológico de esgoto em que a matéria orgânica é estabilizada pela ação das bactérias (oxidação aeróbia ou fermentação anaeróbia), tendo alguns fungos e protozoários incluídos no processo, e redução fotossintética das algas. Entretanto, elas são indicadas para regiões de clima quente (elevadas temperaturas e taxas de insolação) e com suficiente disponibilidade de área.

Conforme Von Sperling (1996), as lagoas de estabilização são compostas por diferentes níveis operacionais:

**Lagoa facultativa:** é caracterizada por possuir uma zona aeróbia superior, uma zona anaeróbia na camada de fundo e por uma zona dita facultativa, onde são predominantes os processos de oxigenação aeróbia e fotossintética. Desse modo, a DBO é estabilizada aerobiamente por bactérias dispersas no meio líquido, posteriormente a DBO tende a sedimentar, sendo estabilizada anaerobiamente. E através da fotossíntese, as algas fornecem oxigênio as bactérias aeróbias.

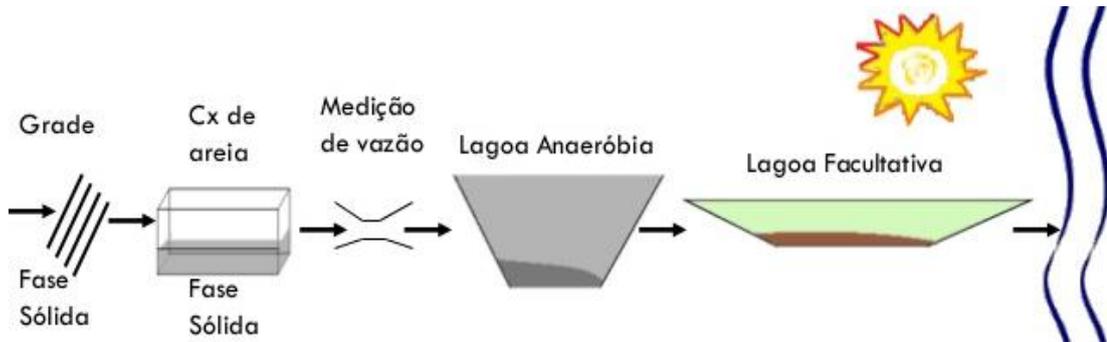
Figura 1 - Lagoa facultativa.



FONTE: ORTIZ (2013).

**Lagoa anaeróbia – lagoa facultativa:** a lagoa anaeróbia é mais profunda e com menor volume, em relação a facultativa, em média com profundidade que variam de 3 a 6 metros, com o intuito de minimizar ao máximo a entrada de oxigênio. É utilizada para o tratamento de esgotos sanitários com altos teores de DBO, a eficiência de remoção da DBO é em torno de 50%, enquanto a DBO remanescente é removida na lagoa facultativa.

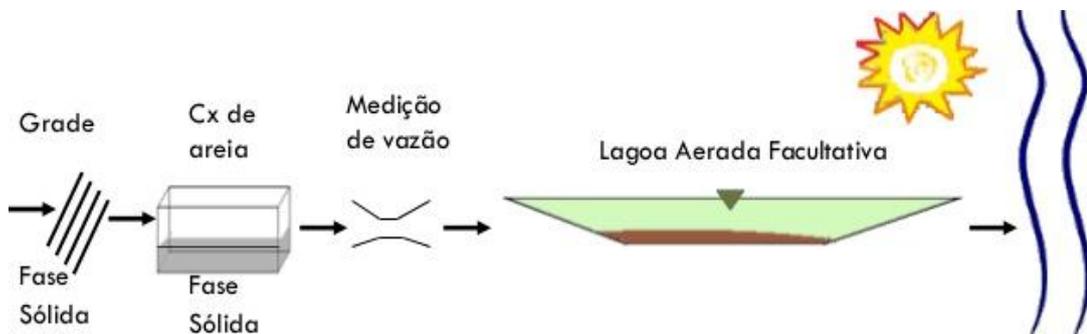
Figura 2 - Lagoa anaeróbia – lagoa facultativa.



FONTE: ORTIZ (2013).

)] **Lagoa aerada facultativa:** possui o mesmo mecanismo de remoção de DBO aos de uma lagoa facultativa, sendo que o oxigênio é fornecido por aeradores mecânicos, que permite que a decomposição da matéria orgânica se dê mais rapidamente, devido a uma maior introdução de oxigênio, comparada à lagoa facultativa convencional. E parte dos sólidos do esgoto e da biomassa sedimenta, sendo decomposta anaerobiamente no fundo.

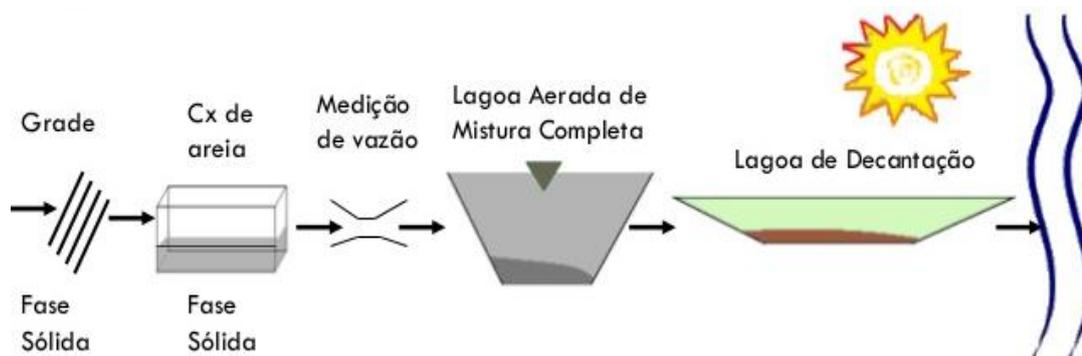
Figura 3 - Lagoa aerada facultativa.



FONTE: ORTIZ (2013).

)] **Lagoa aerada de mistura completa – lagoa de decantação:** os sólidos, principalmente a biomassa permanecem em mistura completa (mistura dos constituintes em toda lagoa) quando a energia introduzida por unidade de volume da lagoa é elevada. Em que, observa-se que a remoção da DBO é mais eficiente, posteriormente o efluente necessita passar pela lagoa de decantação para remoção de elevados teores de sólidos (bactérias), antes do seu lançamento no corpo receptor.

Figura 4 - Lagoa aerada de mistura completa – lagoa de decantação.



FONTE: ORTIZ (2013).

### 3.3 Reúso

Com o panorama de escassez de água potável em várias regiões do mundo, levou à uma crescente consciência da população a busca de fontes alternativas como o reúso da água. Desse modo, segundo Florêncio et al (2006), o reúso de águas é a substituição de água potável por fontes alternativas com águas de menor qualidade para uso em atividades menos restritivas. Essa ação contribui para redução do volume de água captado e o lançamento de efluentes em corpos receptores.

Segundo, Jordão e Pessoa (1995), o reúso de água em foco as aplicações ao meio urbano, existem uma variedade de aplicações como: irrigação de campos de esporte, usos ornamentais e paisagísticos, descarga de banheiros, combate a incêndios, lavagem de veículos, limpeza de ruas, desobstrução de redes de esgoto e de drenagem pluvial, entre outras. Sendo que algumas fontes como as águas pluviais, de drenagem e águas cinzas, podem ser utilizadas para o uso das atividades citadas acima.

Dessa maneira, as águas residuárias deveriam receber maior visibilidade como um novo recurso hídrico no uso de atividade que demandam água para fins não potáveis. Assim, o reúso se tornaria uma opção significativa para a redução da pressão sobre os mananciais. (FLORÊNCIO et al. 2006).

#### 3.3.1 Tipos de reúso

O reúso de águas é destinado a diversas modalidades de atividades que necessitam de água com menor qualidade, sendo que é de grande valia a análise dos sistemas de tratamento. Desse modo, influenciada pela forma de captação, existem diversas origens para a água de

reúso, que por sua vez, reflete em sua classificação. De acordo com Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (2018), o reúso de água classifica-se em:

**) Reúso indireto não-planejado da água:** Ocorre quando a água é descarregada no meio ambiente e reutilizada em sua forma diluída, de maneira não intencional e não controlada. A mesma está sujeita apenas às ações naturais do ciclo hidrológico (diluição, autodepuração).

**) Reúso indireto planejado da água:** Diz respeito a reutilização de efluentes, depois de tratados, são descarregados de forma planejada nos corpos de águas superficiais ou subterrâneas, de maneira controlada.

**) Reúso direto planejado das águas:** Ocorre quando os efluentes, depois de tratados, não são descarregados no meio ambiente, são encaminhados diretamente de seu ponto de descarga até o local do reúso.

**) Reciclagem de água:** Representa como uma fonte suplementar de abastecimento do uso original. Na qual, representa um caso particular do reuso direto planejado, sendo considerada um reúso interno da água, antes de sua descarga em um sistema geral de tratamento ou outro local de disposição.

### **3.3.2 Reúso na construção civil**

A água não é considerada como um material de construção e seus custos são raramente incluídos no processo de planejamento e execução de uma obra. No entanto, é válido o seu papel em todo o processo de engenharia, seja como componente ou ferramenta. Sendo utilizada em inúmeras atividades, como a produção de concreto e argamassas, na umidificação do solo durante a compactação de aterros, na limpeza, na cura do concreto, entre outras funções.

Devido ao expressivo consumo de água no processo construtivo e o crescimento da preocupação da escassez de água, surgem no setor da construção civil, medidas visando à racionalização no consumo de água, como a implantação de ações, tal como a utilização de água de reuso em atividades que necessitam de uma água com menor qualidade.

De acordo, com Sinduscon/SP (2005), as águas de reúso são utilizadas em edifícios, em atividades como a irrigação de jardins e lavagem de pisos, bem como na preparação de argamassas, concretos, controle de poeira e compactação do solo. Entretanto, para garantir a

boa qualidade e infraestrutura de qualquer construção, a água deve seguir padrões de qualidades exigidos em norma, como a Norma Técnica ABNT NBR 15900 que especifica os requisitos para a água ser considerada adequada ao preparo de concreto e NM 137/1997 que delimita parâmetros para que a água possa ser utilizada na produção de pasta de cimento e do concreto.

A produção de concreto é umas das atividades da construção civil que consome mais água, no Brasil o uso da água de reúso como fonte alternativa para elaboração do concreto ainda não é realidade, mas diversos estudos acerca do tema já vem sendo feitos. Exemplificando, o trabalho de Silva (2008) que estudou o efluente de lagoas de estabilização como água de amassamento e cura de concreto, como o de Nascimento (2018) que utilizou efluente oriundo do reator batelada sequencial, para mesma finalidade de análise. Ambos as pesquisas, constaram que os efluentes analisados, obedeciam às exigências discriminadas pela norma NM137/97 para produção de concreto e pasta de cimento.

### **3.4 Concreto**

O concreto é considerado o material mais consumido na construção civil, devido as suas propriedades e aplicabilidades. O seu surgimento foi no século II A.C, quando descobriram o primeiro aglomerante, Pozzolana, encontrada na região do sul da Itália. A Pozzolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso, que reage quimicamente com cal e água, formando uma pedra artificial, resistente mesma quando submersa. Assim, era considerada um tipo rudimentar de concreto, em que esse material era usado com pedras de diferentes tamanhos, mantendo-as unidas (METHA e MONTEIRO, 1994).

O processo de fabricação do concreto sofreu grandes avanços em relação a sua composição e proporção normatizada. No século de seu surgimento, os romanos utilizavam a cal como material cimentício, e aditivos como leite, gordura vegetal, ou sangue na mistura. Já na década de 70 e 80, ocasionou a introdução de fibras e superplastificantes nas misturas, respectivamente. Mas foi a partir do século XVIII que inovações significativas surgiram com a criação dos cimentos hidráulicos (KAEFER, 1998).

Após passar por diversos aperfeiçoamentos e estudos, atualmente o concreto é definido como um material resultante da mistura homogênea e proporcionada de um aglomerante (cimento Portland), agregados miúdos, agregados graúdos, água e, alguns casos, componentes minoritários (aditivos químicos e adições) (SILVA, 1991). Assim, é válido diferenciar os conceitos de pasta de cimento, argamassa e concreto. Em que, a pasta resulta das reações

químicas do cimento com a água, a argamassa é a pasta misturada com a agregado miúdo, e o concreto simples é a argamassa misturada com a brita, como mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Fases do concreto.



a) Pasta;

b) Argamassa;

c) Concreto simples.

FONTE: BASTOS (2004).

Desse modo, o concreto é um material com a estrutura heterogênea com propriedades físicas determinadas pelos materiais utilizados em sua produção, em que os agregados e aglomerantes possuem características e funções distintas em sua composição. Segundo Neville (2016), “o agregado confere vantagens técnicas consideráveis ao concreto, que passa a ter maior estabilidade dimensional e melhor durabilidade do que a pasta de cimento”.

Além da sua composição, existe inúmeros outros fatores que influenciam nas propriedades do concreto. Segundo Neville (2016), os fatores mais relevantes são: relação água-cimento, procedimento e duração do processo de mistura; condições de adensamento e de cura, forma e dimensões dos corpos de prova, idade do concreto, umidade, temperatura etc.

Entretanto, as principais propriedades do concreto são resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, consistência e trabalhabilidade, adensabilidade, permeabilidade, durabilidade, e entre outras, que permitem que esse material tenha um papel fundamental no setor da construção civil, tendo significância em obras de edifícios, galpões e pisos industriais, obras hidráulicas e de saneamento, rodovias e estruturas diversas.

O concreto é o material mais consumido no mundo, com exceção da água, devido a abundância de matéria prima, a resistência ao fogo, baixo custo dos materiais, processo de fabricação acessível, material impermeável com flexibilidade de formas e adaptabilidade com adequada capacidade de suporte estrutura.

### 3.4.1 Propriedades do concreto

As propriedades do concreto se diferenciam em relação ao seu estado fresco ou endurecido, influenciando na qualidade do material. Assim, para obter um controle tecnológico do concreto, usualmente é realizado o ensaio de resistência à compressão, no entanto mesmo que a resistência característica seja satisfatória para tal necessidade, não garante a qualidade final do concreto, pois pode não apresentar propriedades para desenvolver um bom desempenho e durabilidade (DURAN e FRACARO, 2011).

Desse modo, com a finalidade do concreto estabelecida, é válido o estudo de suas propriedades correspondentes. Assim, a seguir as propriedades desse material mais relevantes para a pesquisa em estudo:

#### 3.4.1.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é definida como a maior ou menor aptidão com que o concreto é colocado na forma, sem perda de sua homogeneidade. E é determinada através da medida de sua consistência, que por sua vez é definida pelo ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump Test), que indica a maior ou menor fluidez da mistura fresca. Entretanto, alguns fatores como o traço, teor água / materiais secos, granulometria e forma de grãos, aditivos, tempo e temperatura, influenciam a consistência do concreto (SILVA, 1991).

Segundo, Neville (2016) existe uma correlação entre a trabalhabilidade e o ensaio de abatimento, assinalada na Tabela 1.

Tabela 1- Relação entre trabalhabilidade e grandeza de abatimento.

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

FONTE: NEVILLE (2016)

#### 3.4.1.2 Adensabilidade

A adensabilidade é a capacidade de expulsão do ar, espaços vazios e excesso de água do interior da massa através da vibração do concreto, manual (socamento ou apiloamento) ou

mecânica (vibração e centrifugação). Que por sua vez, permite maior compactação, evitando que a mistura fique porosa e desuniforme, resultando em uma superfície lisa, plana e estática, evitando falhas e garantindo um bom acabamento e qualidade do material acomodado no interior do molde, conseqüentemente implica no ganho de durabilidade e resistência.

Vale ressaltar que deve-se ter o cuidado de excesso de vibração, pois pode causar a separação dos elementos do concreto.

#### 3.4.1.3 Durabilidade

A NBR 6118 (2003) define durabilidade como a capacidade da estrutura de resistir à ação do tempo, aos ataques químicos, abrasão ou qualquer outra deterioração. Em que, a mesma deve ser definida na fase de projeto e assim, pode-se dizer que um concreto durável é aquele que apresenta um bom desempenho em serviço, trabalhando sob as condições para as quais foi especificado, em um tempo determinado.

Assim, a durabilidade depende, do tipo das ações, físicas, químicas e mecânicas. Segundo Neville (2016), as causas físicas abrangem os efeitos de altas temperaturas ou de diferenças de coeficientes de dilatação térmica do agregado e da pasta de cimento endurecida. Enquanto, as causas químicas de deterioração podem incluir as reações álcali-sílica e álcali-carbonato, internamente, e a ação de íons agressivos, como cloretos, sulfatos ou dióxido de carbono (gás carbônico), bem como por vários líquidos e gases naturais e industriais, externamente. Já as causas de deteriorações mecânicas destacam-se impacto, abrasão, erosão ou cavitação.

No entanto, Helene (2001), aponta quatro fatores, que são correlacionados a durabilidade da estrutura do concreto, conhecida como a regra dos 4C, são eles composição, compactação, cura efetiva e cobrimento. Assim, vale salientar que a deterioração do concreto raramente é decorrente de uma única causa e que geralmente é ocasionada pelo transporte de fluidos através do concreto, com exceção quando se refere às causas mecânicas.

#### 3.4.1.4 Resistência

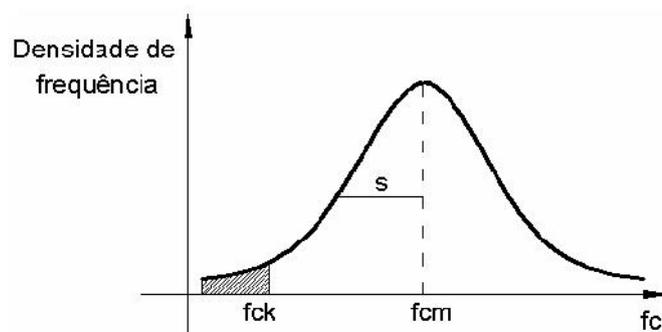
A resistência mecânica é a capacidade do concreto de resistir a esforços solicitados sem que entre em colapso, ou ainda, a última tensão aplicada ao elemento que provoca a desintegração do material que o constitui (ISAIA, 2001).

De um modo geral, essa resistência está relacionada a diversos fatores como: a resistência da pasta de cimento endurecida que depende da relação água/cimento (maior esta relação, conseqüentemente menor será a resistência final), resistência do agregado, resistência da ligação pasta-agregado que depende das características dos mesmos (partículas de formas mais cúbicas e rugosas, aumentam a resistência mecânica do concreto), bem como outros fatores, traço do concreto, grau de adensamento e condições de cura.

Para determinar a resistência característica à compressão é realizado ensaios padronizados, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007), em que através de uma prensa hidráulica são ensaiados os corpos de prova padrão em idades estabelecidas, normalmente, aos 28 dias, com ensaios adicionais, aos três e aos sete dias, podendo ocorrer o requerimento de outras idades. São utilizados dois tipos de corpos de prova: cúbicos e cilíndricos, sendo que no Brasil, geralmente é usado o cilíndrico. Entretanto, é válido destacar que aos 28 dias o concreto já adquiriu em torno de 75 a 90% de sua resistência total.

Após ensaio de uma amostragem de concreto, pode ser feito um gráfico denominado de Curva Estatística de Gauss ou Curva de Distribuição Normal para a resistência do concreto à compressão (Figura 6).

Figura 6 - Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão.



FONTE: BASTOS (2014).

Na qual, encontram-se na sua abscissa a resistência média do concreto à compressão,  $f_{cm}$  e a resistência característica do concreto à compressão,  $f_{ck}$ , que é determinada pela seguinte fórmula:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65S_d \quad (1)$$

Onde:

$f_{cm}$ , é o valor intermediário da amostragem,  $S_d$  é o desvio padrão, enquanto  $f_{ck}$ , é o valor inferior à média cuja probabilidade de não ser atingida é 5 %, ou ainda, 95% dos corpos

de prova possuem a resistência à compressão simples maior ou igual a resistência característica do concreto à compressão.

Enquanto, a resistência característica do concreto à tração ( $f_{ctk}$ ) é determinada de forma similar à resistência do concreto à compressão. Diferenciando apenas no estudo da tração os tipos de ensaios normalizados: tração direta, compressão diametral e tração na flexão. Todavia, é de grande importância o conhecimento da resistência do concreto “na determinação da fissuração (momento fletor de primeira fissura e verificação da abertura da fissura), no dimensionamento das vigas à força cortante e na resistência de aderência entre o concreto e a barra de aço” (BASTOS, 2010).

#### 3.4.1.5 Módulo de Elasticidade

O concreto quando submetido à ação de tensões, geralmente tensões de compressão, sofre deformações, sendo assim o módulo de elasticidade é um parâmetro relativo a essas deformações. Em que, observa-se que quando o concreto apresenta maior resistência à compressão normalmente deforma-se menos, conseqüentemente possui elevado módulo de elasticidade, em relação ao concreto com menor resistência (BASTOS, 2010).

Desse modo, o módulo de elasticidade ou módulo de deformação longitudinal é uma propriedade característica do material dado pela razão entre uma tensão aplicada sobre um corpo e a deformação específica imediata nele verificada, vista na Lei de Hooke (Eq. 2).

$$= E \times \quad (2)$$

Onde:

a tensão;

a deformação específica;

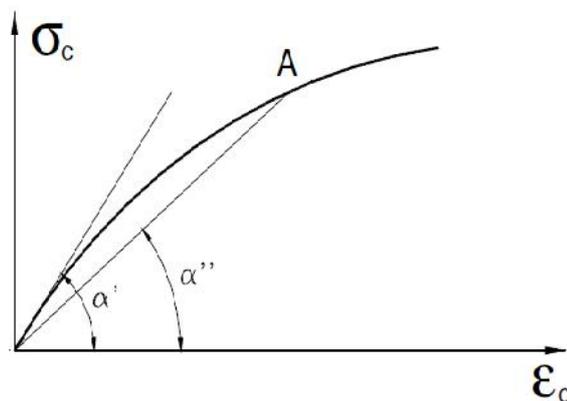
E o módulo de elasticidade.

No entanto, o concreto quando submetido a tensões de compressão ou de tração, exibe um comportamento não linear, apresentada na curva tensão versus deformação (Figura 7). Portanto, para obedecer a linearidade exposta pela Lei de Hooke, é feita uma reta tangente à curva do diagrama, em relação ao ângulo ( $\alpha'$ ), esse é o módulo de elasticidade tangente. Enquanto, faz-se uma tangente do ângulo ( $\alpha''$ ) formado pela reta secante que passa por um ponto A do diagrama, denomina-se módulo de elasticidade secante, que por sua vez, tem grande

importância na determinação de esforços solicitantes e na verificação de estados limites de serviço (BASTOS, 2010).

Segundo Neville (2016), “o módulo secante é um módulo estático, pois é determinado a partir de uma relação tensão-deformação experimental em corpos de prova cilíndricos, ao contrário do módulo dinâmico”, “que é determinado pela vibração de um corpo de prova de concreto com a aplicação de uma tensão insignificante”.

Figura 7 - Determinação do módulo de elasticidade do concreto à compressão.



FONTE: BASTOS (2010).

De acordo com a NBR 6118, pode-se determinar o valor do módulo de elasticidade inicial aos 28 dias segundo a expressão:

- a) para  $f_{ck}$  de 20 a 50 Mpa

$$E_{ci} = \alpha E_{5600} \sqrt{f_{ck}} \quad (3)$$

Onde:

$\alpha = 1,2$  para basalto e diabásio;

$\alpha = 1,0$  para granito e gnaisse;

$\alpha = 0,9$  para calcário;

$\alpha = 0,7$  para arenito.

- b) para  $f_{ck}$  de 55 a 90 Mpa

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \alpha E_{\left(\frac{f_c}{1} + 1,25\right)^{1/3}} \quad (4)$$

com  $E_{ci}$  e  $f_{ck}$  em MPa.

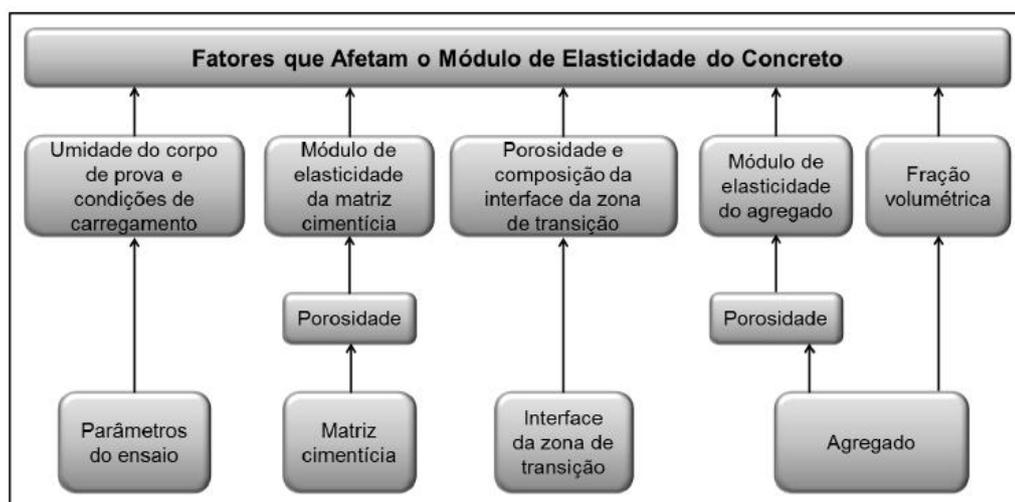
E para o módulo de elasticidade secante é dado pela equação a seguir:

$$E_{cs} = \alpha_i E_{ci} \quad (5)$$

$$\text{Onde: } \alpha_i = 0,8 + 0,2 \frac{f_c}{8} \leq 1,0$$

Conforme o exposto, a determinação do módulo de elasticidade é válida para determinação das deformações nas estruturas de concreto, como nos cálculos de flechas em lajes e vigas. Ressaltando que existem inúmeros fatores que influenciam o seu valor final, entre eles as características e dos materiais componentes dos concretos, como o tipo de agregado, da pasta de cimento e a zona de transição entre a argamassa e os agregados, entre outros expostos na Figura 8.

Figura 8 - Fatores que interferem no módulo de elasticidade do concreto.



FONTE: MEHTA e MONTEIRO (2014) apud PACHECO et al (2014).

Em relação aos fatores que interferem na determinação experimental do módulo de elasticidade do concreto, pode-se citar o método de ensaio, tensões limites de elasticidade, geometria dos corpos de prova, grau de saturação do concreto e outros. Assim dentre os fatores referidos, a relação  $a/c$  tem maior relevância ao módulo de elasticidade, pois tem grande influência na resistência à compressão do concreto (PACHECO et al, 2014).

### 3.4.2 Componentes

Como dito anteriormente, o desempenho do concreto devido as suas propriedades físicas, térmicas e químicas é influenciado pelas características dos seus materiais em sua composição. Assim, essa seção aborda algumas das principais características de cada elemento.

#### 3.4.2.1 Aglomerante – Cimento Portland

O cimento tem como origem há cerca de 4.500 anos, seu nome é originado do latim *caementu*, que designava na velha Roma uma espécie de pedra natural não esquadrejada nos rochedos. Mas foi em 1824, que o construtor inglês Joseph Aspdin patenteou uma mistura composta por pedras calcárias e argila pelo nome de cimento Portland, que por sua vez apresentava cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland (BATTAGIN, 2008).

O cimento Portland é um material seco e fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água, e que após a hidratação de seus materiais, endurecido, não se decompõe mesmo que seja novamente submetido à ação da água. Assim, classificado como um aglomerante hidráulico é composto, essencialmente, em calcário, sílica, alumina e óxido de ferro (Tabela 2).

Tabela 2 - Principais compostos do cimento Portland.

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato dicálcico	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C3S
Silicato tricálcico	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C2S
Aluminato tricálcico	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C3A
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C4AF

FONTE: NEVILLE (2016).

Existe uma grande variedade de cimentos fabricados que dependendo do tipo da construção, suas características e propriedades se tornam mais apropriadas para serem utilizados em concreto dentro das condições impostas na sua obra.

Segundo a ABCP (2012), os diferentes tipos de cimentos normalizados são designados pela sigla CP e pela classe de resistência. São nomeados a partir da sigla CP acrescido de algarismos romanos I a IV que se refere ao tipo de adições, e os algarismos arábicos 25, 32 e 40, que apontam as resistências à compressão aos 28 dias de cura expressas em Mpa (Tabela 3).

- CP I (Cimento Portland Comum): Cimento sem adições com uso para construções em geral;
- CP I-S (Cimento Portland Comum com Adições): Cimento com as mesmas características do anterior, mas com adição de 5% de material pozolânico em massa;
- CP II (Cimento Portland Composto): Cimento de uso geral com resistência moderada ao ataque dos sulfatos contidos no solo. Podem ser adicionados durante sua produção materiais pozolânicos (CP II-Z), escórias granuladas de alto-forno (CP II – E) ou filer (CP II – F), sendo o filer o pó resultante da moagem do calcário;
- CP III (Cimento Portland de Alto Forno): Cimento que resulta em um concreto de maior impermeabilidade, durabilidade, com baixo calor de hidratação, assim como alta resistência à expansão e resistência aos sulfatos;
- CP IV (Cimento Portland Pozolânico): Cimento com baixo calor de hidratação, apontado o seu uso para construção de estruturas de grande porte. Além que, apresenta propriedades de impermeabilidade, durabilidade e resistência mecânica à compressão superior aos do CP II;
- CP V ARI (Cimento Portland de Alta Resistência): Cimento com dosagem diferenciada de calcário e argila na produção do clínquer, com moagem mais fina do cimento que permite reagir com a água com maior velocidade, adquirindo elevada resistência inicial à compressão e desforma rápida. Sendo assim, recomendado na produção de pré-moldados;
- Cimento Portland Branco (CPB): Cimento com coloração branca classificado em dois subtipos: estrutural e não estrutural. É composto por baixos teores de óxidos de ferro e manganês e utilização do caulim no lugar da argila, para obter sua cor diferenciada aos demais cimento;
- Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (CP BC): Cimento que produz um concreto com baixa liberação de calor durante o processo de hidratação, que por sua vez tem como propriedade de retardar o desprendimento de calor em peças de grande massa de concreto, e assim, reduz fissuração de origem térmica na estrutura;

- Cimento Portland Resistente a Sulfatos (CP RS): Cimento que oferece elevada resistência à sulfatos. Voltado o seu uso para concretos utilizados em meios agressivos, como redes de esgotos de águas servidas ou industriais, água do mar ou alguns tipos de solos.

Tabela 3 - Características conferidas a concretos e argamassas em função do tipo de cimento.

Característica	Tipo de Cimento					
	Comum e Composto	Alto forno	Pozolânico	Alta resistência inicial	Resistentes a sulfatos	Branco estrutural
Resistência à compressão	Padrão	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Muito maior nos primeiros dias	Padrão	Padrão
Calor gerado na reação do cimento com a água	Padrão	Menor	Menor	Maior	Padrão	Maior
Impermeabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Padrão	Padrão
Resistência aos agentes agressivos (água do mar e esgotos)	Padrão	Maior	Maior	Menor	Maior	Menor
Durabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Maior	Padrão

FONTE: BASTOS (2014).

#### 3.4.2.2 Agregados

O concreto é composto de pelo menos  $\frac{3}{4}$  de seu volume pelos agregados, que por vez, suas propriedades físicas, térmicas e químicas influenciam o desempenho do concreto, em relação a durabilidade, hidratação e ao comportamento estrutural (NEVILLE 2016).

Segundo a NBR 9935 (ABNT, 2005) agregado é definido como material particulado ou granular, com forma ou volume definido, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para preparação de argamassa ou concreto. Eles podem ser classificados quanto à sua origem, dimensões dos grãos e pela massa específica.

Quanto à origem, podem ser naturais caracterizado por um material encontrado na natureza sem sofrer por nenhum processo industrial, artificiais obtidos pelo processo de fragmentação de rochas e os industrializados aquele material natural que sofre processos industriais (processo

químico-físico). E em relação a massa específica, o agregado pode ser classificado de leve quando sua massa específica for menor que  $2000 \text{ kg/m}^3$ , quando for entre  $2000 \text{ kg/m}^3$  a  $3000 \text{ kg/m}^3$  chamado de normais e com massa específica maior que  $3000 \text{ kg/m}^3$ , denominado de pesados. Já quanto aos tamanhos dos grãos, são classificados em miúdos e graúdos.

Os agregados miúdos, segundo a NBR NM 7211, são caracterizados por agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150  $\mu\text{m}$ . Em que, correspondem as areias naturais ou decorrente da britagem de rochas, ou de mistura de ambas, que por sua vez apresentam elevada área específica, exercendo influência preponderante sobre a plasticidade do concreto, identificada pela facilidade com que este tem de mudar de forma de modo irreversível quando submetido a tensão.

Todavia outros fatores têm papel de grande importância nas as propriedades do concreto, como a umidade e granulometria da areia. A umidade caracterizada pela quantidade de água presente no agregado é um parâmetro que condiciona a resistência, durabilidade da estrutura, bem como no consumo de cimento mais econômico. Enquanto, a composição granulométrica deve apresentar boa distribuição granulométrica, ou seja, ser composta por grãos de diversos tamanhos.

Ainda em conformidade com a NBR NM 7211, os agregados graúdos são aqueles cujo grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm. Suas propriedades dependem das características físicas do agregado como porosidade, forma e textura, onde os agregados leves resultam em baixa resistência à compressão, devido a sua composição com muitos vazios. No que diz a respeito à forma, pode influenciar a zona de transição na mistura de concreto, já que partículas grandes ou alongadas e achatadas tem aptidão de acumular quantidades de água junto a interface do agregado (exsudação interna) (METHA e MONTEIRO, 1994).

#### 3.4.2.3 Água

A água é um dos componentes mais relevantes na produção do concreto, na qual a sua presença e dos silicatos e dos aluminatos formam produtos hidratados, resultando em uma massa firme e resistente, ou seja, a pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 2016). Que por sua vez, ela pode ser utilizada no amassamento da mistura e no processo de cura do concreto em estado sólido.

A água de amassamento é definida como a água que promove a hidratação dos sais de cimento, provocando uma homogeneização da mistura, como influencia na trabalhabilidade do concreto. Enquanto, a água de cura, é a responsável de manter o concreto saturado, evitando que ocorra a evaporação prematura da água de amassamento, conseqüentemente, resguardará o concreto de sofrer retração plástica, aumento da permeabilidade e redução da resistência à abrasão.

Todavia, dada a importância desse componente, é válido ressaltar a relevância da quantidade da água, que é definida pela relação água/cimento (a/c) no processo de dosagem, pois o teor de água na mistura possui relação direta com as propriedades do concreto, tendo como influência na sua resistência e na durabilidade da pasta.

Desse modo, a relação a/c interfere na porosidade capilar da pasta de cimento, que por sua vez, permite a permeabilidade e a ação dos agentes agressivos. Logo, com o intuito de preservar a durabilidade e qualidade do concreto, ambas as águas devem-se atender aos padrões normatizados pela NM 137/97, como mostrado na Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 4 - Exigências físicas da água para amassamento e cura.

	<b>Requisito</b>	<b>Diferença máxima</b>	<b>Método de ensaio</b>
<b>Tempo de pega</b>	Inicial (min)	30	NM 65
<b>Tempo de pega</b>	Final (min)	30	
<b>Resistência à compressão aos 07 e 28 dias (%)</b>		10	05:01-0430

FONTE: Norma MN 137/97.

Tabela 5 - Exigências químicas da água para amassamento e cura.

<b>Requisito</b>	<b>Limites</b>		<b>Método de ensaio (item da norma NM137)</b>	
	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>		
Resíduos Sólidos	-	5000	5.2.1	
Potencial de hidrogênio (pH) <sup>1)</sup>	5,5	9	5.2.2	
Ferro (Fe)	-	1	5.2.5	
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	-	2.000	5.2.3	
Cloretos (Cl <sup>-</sup> )	Concreto simples	-	2.000	5.2.3
	Concreto armado	-	700	5.2.3

Tabela 5 (continuação) – Exigências químicas da água para amassamento e cura.

	Concreto protendido	-	500	5.2.3
<sup>1)</sup> Os valores de pH são adimensionais.				
Unidades dos demais parâmetros: 10 <sup>-6</sup> g/cm <sup>3</sup> .				

FONTE: Norma MN 137/97.

Portanto, a qualidade da água influencia diretamente nas propriedades do concreto, podendo trazer inúmeros impactos adversos provenientes da sua má qualidade, como a queda da resistência, alteração no tempo de pega, ocorrência de carbonatação e eflorescência, aparição de manchas e corrosão do aço da armadura.

### 3.5 Dosagem do concreto

A dosagem do concreto consiste no processo de escolha dos componentes (cimento, água, agregados, adições ou aditivos) e de determinação de suas quantidades para produção do mesmo, de forma proporcional, obtendo uma mistura mais econômica possível e que atenda as características de desempenho mínimo, especialmente resistência, durabilidade e consistência (NEVILLE, 2016). Dada a sua importância, essa seção aborda alguns parâmetros e termos empregados nesse processo.

#### 3.5.1 Parâmetros e termos utilizados na dosagem

##### 3.5.1.1 Massa específica e unitária

A Massa Específica do agregado é definida pela relação entre a massa seca da amostra e o seu volume correspondente, eliminando-se o volume de vazios. Segundo a NBR 6118, adota-se o valor da massa específica entre 2.000 kg/m<sup>3</sup> e 2.800 kg/m<sup>3</sup> para os concretos. Em contraste, sendo a massa específica não conhecida, pode ser adotado para concretos comuns o valor de 2.400 kg/m<sup>3</sup> e 2.550 kg/m<sup>3</sup> para Concreto Armado. Já a Massa Unitária é o quociente entre a massa do agregado e seu volume correspondente, considerando-se o volume de vazios. Ela depende das formas das partículas, da granulometria e do nível de compactação do agregado.

##### 3.5.1.2 Dimensão Máxima Característica e Módulo de Finura

De acordo com NBR 7211, a Dimensão Máxima Característica correlata à abertura nominal da malha da peneira de serie normal ou intermediária, em que o agregado apresenta porcentagem igual ou imediatamente inferior a 5% de massa retida acumulada. Enquanto, o

Módulo de Finura é definido pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras de série normal, dividido por 100. A distribuição das peneiras das séries normal e intermediária estão referidas na Tabela 6.

Tabela 6 - Aberturas nominais do conjunto de peneiras das séries normal e intermediária.

Série Normal	Série Intermediária
75 mm	-
-	63,0 mm
-	50,0 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm
-	25,0 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 $\mu\text{m}$	-
300 $\mu\text{m}$	-
150 $\mu\text{m}$	-

FONTE: NBR 7211 (2005).

### 3.5.1.3 Tempo de início e fim de pega

Tempo de início de pega dá-se o início do crescimento brusco da viscosidade da massa, caracterizado pelo intervalo de tempo decorrido desde a adição da água de amassamento ao cimento até o início da solidificação da mistura, ocorrendo a perda da plasticidade da pasta de cimento, em que nesse intervalo a agulha de Vicat (equipamento baseado nas normas (NBR NM 43 e NMR NM 65) penetra na pasta até uma distância de  $(4\pm 1)$  mm da placa base. Já o tempo de fim de pega corresponde ao tempo transcorrido entre o contato da água com o cimento até o fim do endurecimento do material, em que a agulha de Vicat penetra 0,5 mm na pasta.

### 3.5.1.4 Cura do concreto

A hidratação é o processo que ocorre a reação química entre o cimento e água, que por sua vez, tem um papel significativo na resistência e permeabilidade do concreto. Notando que, quanto maior for a hidratação, maior será a resistência e menor será a permeabilidade. Portanto, a cura é o conjunto de procedimentos adotados para promover a hidratação do cimento, bem

como no controle da temperatura e da entrada e saída de água no concreto, e assim, mantendo o concreto saturado (NEVILLE, 2016).

A cura tem como propósito geral de evitar a perda prematura da água de amassamento do concreto. O efeito dela inadequada provoca retrações plásticas e hidráulicas no concreto que resultam em possíveis fissurações, aumento da permeabilidade, redução da resistência à abrasão e menor desempenho quando solicitada a tensões de compressão.

A duração da cura é influenciada por alguns fatores relevantes como a severidade das condições de secagem, os requisitos de durabilidade esperados, das condições ambientais locais (temperatura, umidade, ventos etc) e da composição do concreto. Em que, o cimento Portland comum deve permanecer por no mínimo 7 dias em cura e 14 dias para cimento Portland pozolânico e alto-forno, ressaltando que deve se iniciar esse procedimento, 24 horas após a preparação da mistura.

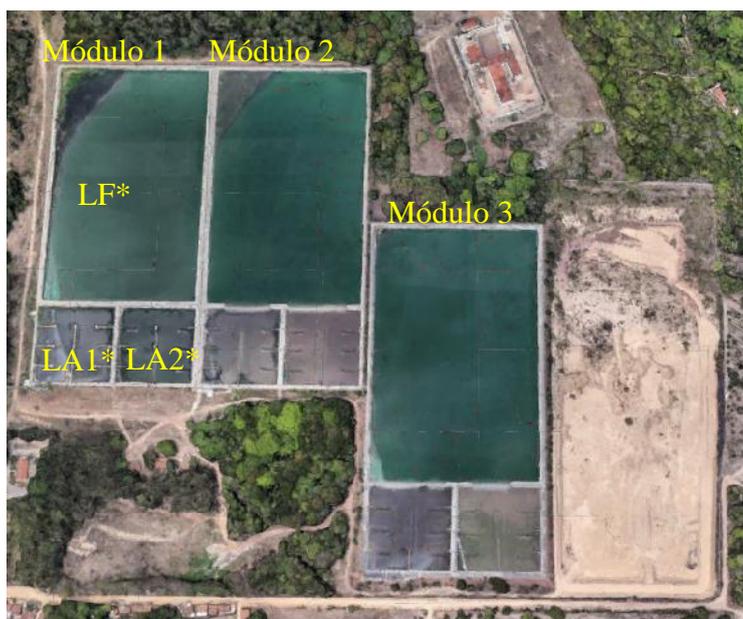
## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Área de estudo

Este trabalho utilizou como água de reuso o efluente de esgoto doméstico tratado na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), pertencente a Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), localizada no bairro de Mangabeira, no município de João Pessoa, Paraíba.

A ETE pertence ao sistema de esgotamento sanitário do município e recebe esgoto bruto majoritariamente doméstico da zona sul da região, representada pelos bairros Mangabeira, Valentina de Figueiredo e Ernesto Geisel, e tem capacidade de tratamento de uma população de 99.350 habitantes. A seguir na Figura 9, pode-se observar a vista geral da estação de tratamento.

Figura 9 - Vista em planta da ETE Mangabeira.



LA – Lagoa Anaeróbia\*; LF – Lagoa Facultativa\*

FONTE: Google Earth.

Os efluentes direcionados para estação de tratamento de Mangabeira passam inicialmente por um tratamento preliminar, composto por grade, desarenador e calha Parshall (sistema de medição de vazão). Que por sua vez, são inseridos por um sistema de alimentação formado por emissários de recalque, caixa de distribuição, seguido de três tubulações que despeja o efluente em três módulos de lagoas de estabilização.

Figura 10 - Elementos do Sistema de Tratamento Preliminar da ETE.



a) Desarenador;

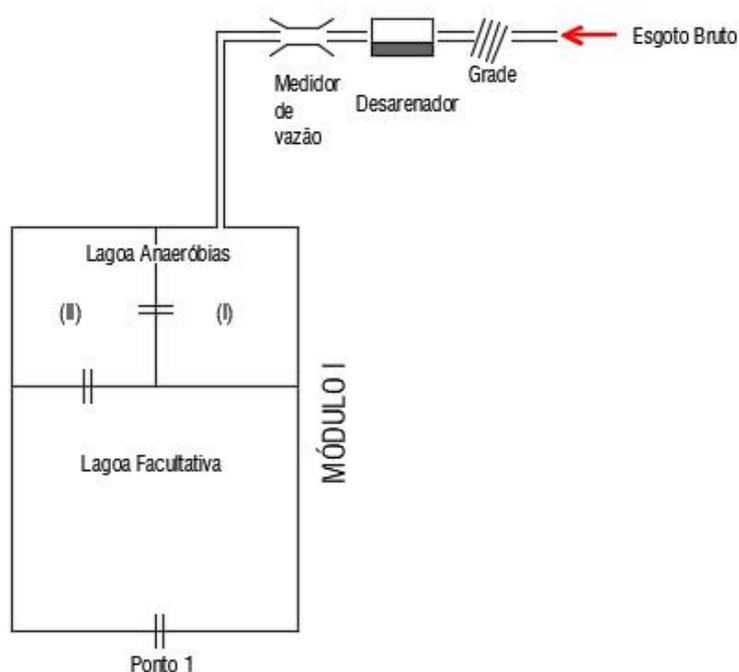


b) Calha Parshall

FONTE: Autor, 2018.

Cada módulo é constituído por duas lagoas anaeróbias e uma facultativa, em série, denominado por sistema australiano. Na qual, pode-se observar na Figura 11, o esquema do tratamento do Módulo I, onde no ponto 1, foi feita a coleta do efluente em estudo. Todavia, esse ponto é considerado a zona de mistura da lagoa facultativa (Figura 12), em que o efluente é reunido para posterior lançamento no rio Cuiá.

Figura 11 - Esquema do tratamento do Módulo I.



FONTE: Autor, 2018.

Figura 12 - Ponto de zona de mistura.



FONTE: Autor, 2018.

As características de cada lagoa referente aos módulos 1 e 2, são expostas na Tabela 7.

Tabela 7 - Caracterização dos módulos 1 e 2 da ETE.

Características	Lagoas		
	Anaeróbia 1 (LA 1)	Anaeróbia 2 (LA 2)	Facultativa (LF)
Comprimento (m)	63,1	63,1	228,5
Largura (m)	63,1	63,1	140
Área (há)	0,4	0,4	3,2
Profundidade (m)	3,7	3,7	1,8
Volume (m <sup>3</sup> )	14.800	14.800	57.600
Vazão (m <sup>3</sup> /dia)	8.275	8.275	8.275
TDH (dia)	1,8	1,8	7

FONTE: Adaptado de CAGEPA (1994) *apud* BARACUHY (2006).

Figura 13 - Vista da Lagoa Facultativa do primeiro módulo.



FONTE: Autor, 2018.

## 4.2 Amostragem

No período de dois meses, referente ao mês de maio e junho de 2018, foram coletadas em dias distintos, quatro amostras dos efluentes tratados na Lagoa Facultativa do primeiro módulo da ETE, e encaminhadas ao Laboratório de Saneamento Ambiental da UFPB para realização dos ensaios físico-químicos. As amostras foram coletadas em garrafas PET limpas, com capacidade de 5 litros para realização dos ensaios e cura do concreto.

E como amostra de referência para a análise comparativa, utilizou-se uma amostra de água do sistema de abastecimento da CAGEPA. Ressaltando que, a NM 137, base dessa pesquisa, recomenda a água destilada como água de referência.

No entanto, como o objetivo da pesquisa é fazer uma análise da viabilidade técnica do uso dos efluentes na produção de pasta de cimento e concreto, de forma que seja uma nova alternativa para construção civil, assim empregou-se água de distribuição pública como referência.

Os ensaios de caracterização do material e a produção do mesmo, foram realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LABEME) e Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (LAPAV). Todos laboratórios citados pertencem as instalações da Universidade Federal da Paraíba.

### 4.3 Ensaio de caracterização do efluente

A NM 137 especifica a caracterização da água destinada para a preparação da argamassa e concreto de cimento Portland. Desse modo, para que o esgoto tratado na Lagoa de Estabilização possa ser utilizado como água de amassamento, deve-se atender os requisitos físicos e químicos expostos pela norma citada. Com isso, segundo Silva e Oliveira (2001), foram realizadas as seguintes determinações químicas para as quatro amostras coletadas do efluente de esgoto tratado:

- ) pH a 25°C (valor adimensional);
- ) Teor de Sólidos Totais (mgST/L);
- ) Teor de Ferro total (mgFe/L);
- ) Teor de Cloretos (mgCl /L);
- ) Teor de Sulfatos Solúveis (mgSO<sub>4</sub><sup>2-</sup> /L).

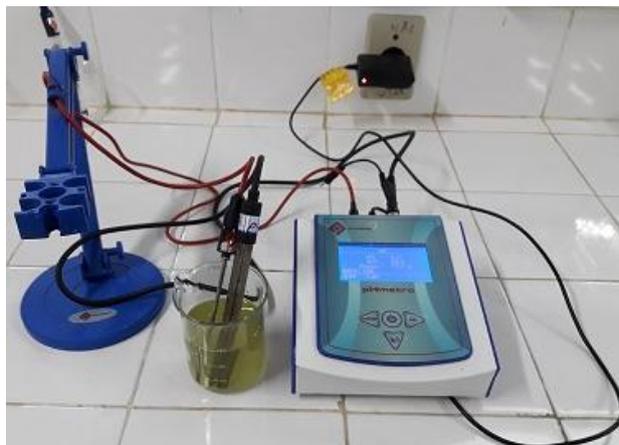
Assim, foi feito para cada amostra em estudo, triplicada em ambos os ensaios acima, exceto o ensaio de cloreto solúveis e sulfatos que foram feitas réplicas. E para efeito de cálculo foi realizada a média aritmética dos resultados obtidos.

#### 4.3.1 Potencial Hidrogênio (pH)

O potencial hidrogênio é caracterizado por determinar a intensidade da condição ácida ou básica de um determinado meio em estudo. Em lagoas de estabilização de águas residuárias domésticas, o seu aumento é recorrente da fotossíntese de algas, exerce papel na eliminação de organismos patogênicos (SILVA; OLIVEIRA 2001).

Desse modo, a determinação do pH foi feita através do aparelho Phmetro de bancada (Figura 14), que é constituído por um eletrodo e um circuito potenciômetro, em que foram inseridos em cada amostra de efluente tratado e posteriormente, feita a leitura do parâmetro.

Figura 14 - Leitura do pH da amostra através do aparelho Phmetro de bancada.



FONTE: Autor, 2018.

#### 4.3.2 Teor de Sólidos Totais

Os sólidos totais são definidos pela matéria que após o processo de evaporação e secagem a uma temperatura entre 103 e 105 °C, mantém-se como resíduo na amostra em estudo. Assim, o ensaio iniciou-se com a preparação da cápsula de evaporação, em que a cápsula limpa foi aquecida durante uma hora no forno mufla, em sequência foi esfriada à temperatura ambiente utilizando um dessecador e pesada. Após isso, medido um volume de 100 ml da amostra bruta (VA), foi posto na capsula de porcelana e posto em banho-maria (Figura 15). Depois da evaporação, com o intuito de eliminar a umidade residual, a cápsula com o resíduo foram levados à estufa com temperatura de 105° por 1 hora.

Após secagem, a cápsula foi resfriada em um dessecador (Figura 15) e pesada. Em sequência, finalmente a cápsula com os resíduos são postos em forno mufla pré-aquecido a 500° ± 50° por 20 minutos e novamente resfriada no dessecador (estágio de ignição). Contudo, foi calculado o valor de sólidos totais, fixos e voláteis da amostra, respectivamente pelas equações, 6, 7 e 8.

$$\text{Sólidos Totais (mg/L)} = \frac{1}{V} \frac{x(B-A)}{/1} \quad (6)$$

$$\text{Sólidos Totais Voláteis (mg/L)} = \frac{1}{V} \frac{x(B-C)}{/1} \quad (7)$$

$$\text{Sólidos Totais Fixos (mg/L)} = \frac{1}{V} \frac{x(C-A)}{/1} \quad (8)$$

Onde:

A - Peso da cápsula em g;

B - Peso da cápsula com resíduo após secagem em g;

C - Peso da cápsula com resíduo após ignição em g;

VA - Volume da amostra em ml.

Figura 15 - Banho-Maria e dessecador, respectivamente, para análise do teor de sólidos.



FONTE: Autor, 2018.

#### 4.3.3 Teor de Ferro total

Para determinação da concentração de ferro na amostra em estudo, foi utilizado o Método Colorimétrico da Fenantrolina. Caracterizado quando três moléculas de fenantrolina formam quelato com cada cátion de ferro II produzindo um complexo vermelho alaranjado, cuja medida da intensidade de cor a 510 nm, que obedece à Lei de Lambert-Beer.

O método iniciou-se com a diluição do efluente por 2 vezes com o volume de 50 ml de água destilada e um volume de 100ml da diluição foi separado em um erlenmeyer (125 ml). Posteriormente, foi adicionado 2 ml de ácido clorídrico concentrado e 1 ml de solução de hidroxilamina na amostra diluída e levada para uma chapa térmica, até que o volume remanescente estivesse entre 15 a 20 ml. Em sequência, a amostra foi resfriada a temperatura ambiente e transferida para um balão volumétrico com capacidade de 100 ml, assim foi adicionada 10 ml da solução tampão de acetato de amônio e 4 ml da solução de fenantrolina. Depois, foi completado o volume do balão volumétrico com água destilada e foi aguardado por 10 minutos para o desenvolvimento pleno da cor. E logo, foi feita a leitura da absorbância a 510 nm no aparelho espectrofotômetro (Figura 16).

O mesmo procedimento paralelamente foi feito com uma amostra de branco, composta por água destilada, que teve como objetivo de zeragem do espectrofotômetro, uma vez que os reagentes utilizados apresentam pequenas concentrações de ferro.

Contudo, com base na Lei de Beer, foi elaborada a curva de calibração, que por sua vez foi utilizada para converter o valor da absorbância em concentração (mg/l). E assim, o valor resultante foi multiplicado por 2, já que a amostra foi diluída 2 vezes no início do método, resultando na concentração real de ferro de cada amostra.

Figura 16 - Espectrofotômetro e material para análise do teor de Ferro.



FONTE: Autor, 2018.

#### 4.3.4 Teor de Cloretos

Para determinação da concentração de cloreto na amostra em estudo, foi utilizado o Método Argentométrico (Método de Mohr), que consiste na titulação da amostra com nitrato

de prata. Inicialmente, foi medido um volume de 100 ml (VA) da amostra de efluente, sendo que a mesma foi diluída 2 vezes com água destilada. Em seguida, foi adicionado 3 ml da suspensão de hidróxido de alumínio na solução, misturado, decantado e por fim filtrado com auxílio de papel de filtro comum. Posteriormente, adicionou-se 1 ml de peróxido de hidrogênio e agitou a mistura. Finalmente, foi acrescentado 1 ml de solução indicadora de cromato de potássio na solução, titulando em sequência, sob agitação, com solução padrão de nitrato de prata de normalidade N, até o estabelecimento da coloração marrom avermelhada na amostra. Ressaltando que foi realizado o mesmo procedimento paralelamente com uma prova em branco.

Desse modo, foi calculado a concentração de cloreto pela Equação 9, e o resultado obtido multiplicado por dois, uma vez que a amostra foi diluída 2 vezes no início do método, resultando na concentração real de cloretos na amostra.

$$\text{Cloretos (mg/l)} = \frac{(A-B) \times N \times 3}{V} \quad (9)$$

Onde:

A - Volume de nitrato de prata gasto na titulação da amostra em ml;

B - Volume de nitrato de prata gasto na prova em branco em ml;

C - Normalidade do nitrato de prata, adimensional;

VA - Volume da amostra em ml.

Figura 17 - Aparelhos e reagentes utilizados no método, e material para análise.



FONTE: Autor, 2018.

#### 4.3.5 Teor de Sulfatos Solúveis

Para determinação do teor de sulfatos solúveis na amostra em estudo, foi utilizado o Método Turbidimétrico, que consiste no processo de precipitação dos íons sulfatos ao reagir com cloreto de bário e a leitura da absorbância é a 420 nm.

O ensaio iniciou-se com a diluição do efluente por duas vezes com água destilada e medição do volume de 100 ml. Depois foi adicionado 5 ml do reagente condicionante e um bastão magnético dentro do Erlenmeyer, que por sua vez a solução foi misturada através de um agitador magnético (Figura 18). Em sequência, com a amostra em agitação por 1 minuto, acrescentou-se 5 gramas de cloreto de bário. Após, foi feita a leitura da absorbância a 420 nm no espectrofotômetro. Todavia, foi efetuado uma prova em branco para calibrar o aparelho, já que a água destilada possui zero teor de sulfatos.

Para efeito de análise, através da curva padrão de calibração, elaborada por meio da Lei de Beer, o valor da absorbância foi convertido em concentração (mg/l). E o resultado obtido foi multiplicado por dois resultando na concentração real de sulfatos na amostra.

Figura 18 - Agitador magnético e material para análise do teor de sulfatos.



FONTE: Autor, 2018.

#### 4.4 Ensaio de caracterização dos agregados graúdo e miúdo

A qualidade dos agregados tem papel influenciador na qualidade do concreto, portanto é primordial que se tenha o conhecimento das suas características através de testes e ensaios laboratoriais conforme as normas da ABNT. Desse modo, foram determinadas para os agregados graúdo e miúdo, a massa unitária NBR NM 45 (ABNT,2006), massa específica NBR NM 52 (ABNT,2003), e composição granulométrica NBR NM 248 (ABNT,2003). E com os resultados obtidos, determinou-se o Diâmetro Máximo Característico (DMC) e o Módulo de Finura (MF) de ambos agregados, conforme a NM 248.

#### 4.5 Ensaio de caracterização da pasta de cimento

Para caracterização da pasta de cimento, adotou-se como base os parâmetros da NM 137 e os procedimentos referidos na NM 65, que descreve o método de determinação do tempo de pega da pasta de cimento Portland utilizando o aparelho de Vicat (Figura 19). Em que, a preparação da mesma, bem como o enchimento dos moldes foram realizados segundo a NM 43.

Dessa maneira, foram realizadas um total de quatro determinações, sendo três utilizando a pasta de cimento elaborada com efluente da Lagoa Facultativa e de um com água de referência. Todavia, como explanado anteriormente, foi utilizada a água de distribuição pública como referência para manter a coerência do objetivo da pesquisa, embora a NM 137 e a NM 65 sugeressem como reagente a água destilada.

Figura 19 - Ensaio de tempo de início e fim de pega, respectivamente.





FONTE: Autor, 2018.

#### 4.6 Dosagem do concreto

Para obter uma dosagem eficiente e econômica do concreto, foi adotado o método experimental ABCP/ACI. E assim, nesta seção descreve-se a sequência desse procedimento.

##### 4.6.1 Cálculo da resistência de dosagem

A resistência média do concreto a compressão, também conhecida de resistência de dosagem, como exposto na terceira seção desse trabalho, é dada pela Equação 10.

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \times S_d \quad (10)$$

Assim, observa-se que a resistência de dosagem depende do  $f_{ck}$  e do desvio padrão. Dessa maneira, foi adotado o valor de  $f_{ck} = 25$  Mpa e definido o  $S_d$ , que é em função das condições de preparo do concreto em obra estabelecidas pela NBR-12655, descritas na Tabela 8.

Tabela 8 - Descrição das condições de controle.

Condição	Classe	Descrição da Condição	Desvio Padrão Mpa
A	C10 a C80	O cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados.	4
B	C10 a C25	O cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados medidos em massa combinada com volume.	5,5

Tabela 8 (continuação) - Descrição das condições de controle.

C	C10 a C15	O cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume, a água de amassamento é medida em volume e a sua quantidade é corrigida em função da estimativa da umidade dos agregados da determinação da consistência do concreto, conforme disposto na ABNT NBR NM 67 ou outro método normalizado.	7
---	-----------	---	---

FONTE: Adaptada de NEVILLE (2016).

#### 4.6.2 Determinação do fator água/cimento (a/c)

O fator água/cimento é um dos principais responsável pela resistência do concreto. Segundo Abrams, a resistência do concreto é inversamente proporcional a essa relação (a/c). Assim, para efeito de cálculo, foi utilizada a seguinte equação (Fórmula de Bolomey):

$$f_{28} = K \times \left( \frac{1}{a/c} - 0,5 \right) \quad (11)$$

Onde:

$f_{c28}$  - Resistência média de dosagem, aos 28 dias em MPa;

K - Coeficiente de atividade do cimento, aos 28 dias;

a/c - Fator água/cimento em L/Kg.

Para determinar o fator água/cimento, antes calculou-se o coeficiente de atividade teórico do cimento (K teórico) que considera apenas a resistência nominal do cimento, dado pela Equação 12.

$$K \text{ teórico} = \frac{\text{Classe do cimento}}{1,5833} \quad (12)$$

$$1,5833$$

#### 4.6.3 Estimativa do consumo de água/m<sup>3</sup> de concreto

Com o módulo de finura da areia utilizada, definiu-se a curva para determinação do consumo de água na Tabela 9. Assim, com a curva estabelecida e com a dimensão máxima do agregado graúdo, obteve-se o consumo de água por 1m<sup>3</sup> de concreto (Tabela 10). Ressaltando que este consumo é definido para concretos com abatimento de 60 mm. Então, para obter abatimentos diferentes, a cada 10 mm de diferença em relação ao abatimento desejado, deve-se acrescentar ou subtrair 2 litros de água.

Tabela 9 - Curva para determinação do consumo de água / m<sup>3</sup>.

Curva	Módulo de Finura da Areia
I	2,00 a 2,49
II	2,50 a 2,84
III	2,85 a 3,20

Tabela 10 - Curva para determinação do consumo de água / m<sup>3</sup>.

Dimensão Máxima (mm)	Consumo de Água / m <sup>3</sup>		
	Curva 1	Curva 2	Curva 3
4,8	253	246	241
6,3	243	236	231
9,5	232	225	220
12,5	222	216	211
19	213	207	202
25	204	198	193
32	195	189	184
38	186	181	176
50	178	173	169

#### 4.6.4 Consumo de cimento/m<sup>3</sup> de concreto

Com o resultado do fator água/cimento e o consumo de água, pode-se calcular o consumo de cimento pela Equação 13, a seguir:

$$\text{Consumo de cimento} = \frac{\text{Consumo de água}}{a/c} \quad (13)$$

Onde:

- ) Consumo de cimento em Kg;
- ) Consumo de água em L;
- ) a/c - Fator água/cimento em L/Kg.

#### 4.6.5 Proporção dos agregados

A determinação das proporções entre os agregados é um dos passos mais relevante ao concreto. Em que, através do Ábaco Experimental no Anexo A, que utiliza como dados de entrada o consumo de cimento e a dimensão do agregado graúdo, determinou-se o valor do

parâmetro teórico S. E partir desse S, foi possível determinar o potencial de areia (agregado miúdo) pela Equação X e o percentual de brita (agregado graúdo), por meio da Equação 14.

$$A\% = \frac{100}{1 + S}$$

$$B\% = 100 - A\% \quad (14)$$

#### 4.6.6 Consumo de agregados/m<sup>3</sup>

O dimensionamento do traço de concreto é feito para se obter o volume de 1 m<sup>3</sup>. Sendo que, deve-se resultar no valor de 1000 litros, o somatório dos volumes absolutos de os materiais constituintes do concreto (Equação 15)

$$\text{Vol}_{\text{cimento}} + \text{Vol}_{\text{ag. miúdo}} + \text{Vol}_{\text{ag. graúdo}} + \text{Vol}_{\text{água}} = 1000 \text{ litros} \quad (15)$$

Sabendo que, a Massa Especifica (M.E.) é a razão de massa seca (kg) por volume (L), ao substituí-la na Equação xx, obteve-se a Equação 16.

$$\frac{\text{Massa}_{\text{cimento}}}{\text{M.E.}_{\text{cimento}}} + \frac{\text{Massa}_{\text{ag. miúdo}}}{\text{M.E.}_{\text{ag. miúdo}}} + \frac{\text{Massa}_{\text{ag. graúdo}}}{\text{M.E.}_{\text{ag. graúdo}}} + \frac{\text{Massa}_{\text{água}}}{\text{M.E.}_{\text{água}}} = 1000 \text{ litros} \quad (16)$$

Em seguida, considerou-se a massa total de agregados do traço (M<sub>ag</sub>), através do somatório da massa do agregado miúdo mais a massa do agregado graúdo. Vale ressaltar que ambos os agregados possuem massas específicas distintas, logo, foi calculado a média ponderada dessas massas específicas, pela expressão a seguir:

$$\text{M.E.}_{\text{mp}} = \text{M.E.}_{\text{ag. miúdo}} \times \%_{\text{ag. miúdo}} + \text{M.E.}_{\text{ag. graúdo}} \times \%_{\text{ag. graúdo}} \quad (17)$$

Assim, pode-se definir o consumo de agregado em sua totalidade, para posteriormente através das proporções definidas no item anterior, determinar o consumo de cada agregado.

#### 4.6.7 Cálculo do traço em peso (TUP)

O traço como dito anteriormente, é a proporção entre os materiais que compõem o concreto, que é expresso pela seguinte ordem, Cimento (1): Areia: Brita : a/c. Desse modo, para obter o traço em peso, expresso em valor unitário, deve-se dividir o consumo de cada componente pelo consumo de cimento.

## **4.7 Ensaio de caracterização do concreto produzido**

A qualidade final do concreto está relacionada ao controle de suas propriedades no estado fresco como no seu estado sólido. Em que, entende-se como concreto fresco, quando o mesmo se encontra no estado plástico, antes do endurecimento. Assim, observa-se que a propriedades do concreto endurecido dependem fundamentalmente de suas características enquanto no estado fresco (NEVILLE, 2016).

Desse modo, foi analisado o concreto no seu estado fresco pelo ensaio de consistência (NBR NM 67) e no estado sólido pelo ensaio de resistência à compressão axial (NBR 5739), conforme as recomendações da NM 137.

### **4.7.1 Ensaio de consistência**

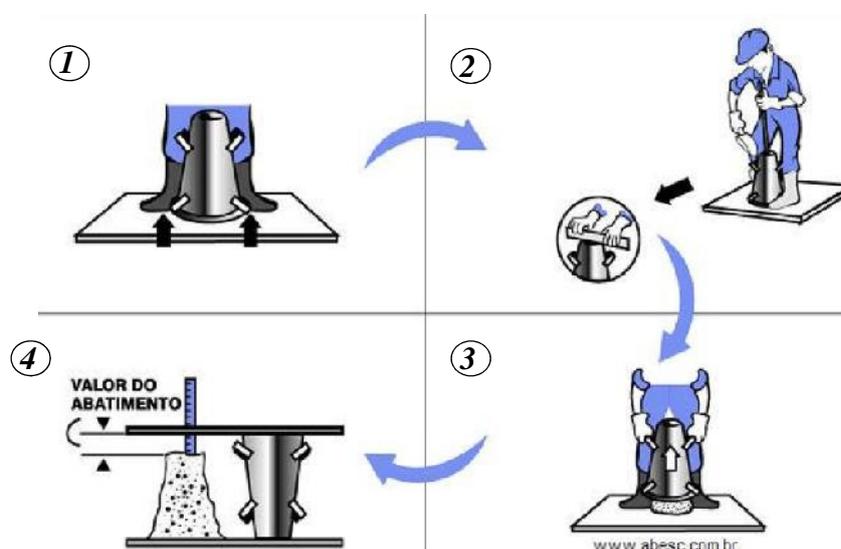
A consistência está relacionada com as características inerentes ao próprio concreto, bem como é definida pelo o maior ou menor grau de fluidez da mistura fresca, relacionando-se com a mobilidade da massa (NEVILLE, 2016).

Nesse contexto, com o traço determinado, pode-se iniciar a produção do concreto com o auxílio de uma betoneira no LABEME. Feito a mistura dos materiais, para prosseguir a moldagem dos corpos de prova, foi necessário verificar a consistência do concreto, através do ensaio de abatimento de tronco, chamando de Slump Test.

Para realização do ensaio, o equipamento utilizado foi uma haste de socamento e um tronco de cone de 300 mm de altura, 100 mm de diâmetro no topo e 200 mm de diâmetro na base. Assim, inicialmente o molde foi disposto sobre uma placa base e o operador posicionou-se os pés sobre as hastes laterais, e assim o molde de tronco de cone foi preenchido com concreto em 3 camadas individuais compactadas com 25 golpes distribuídos uniformemente sobre a seção, utilizando uma haste de ponta arredondada (NM 67).

Enquanto, no preenchimento e na compactação da camada superior, deixou-se um excesso de concreto, na qual foi nivelado com a base do tronco do cone (cone de Adams), através de uma desempenadeira, permitindo o nivelamento da superfície com as bordas do molde. Em seguida, o tronco do cone foi retirado lentamente e colocado em posição invertida ao lado do concreto. Por fim, verificou-se o abatimento do concreto com o auxílio de uma trena, como pode ser visto essa sequência na Figura 20.

Figura 20 - Etapas do ensaio de consistência.



FONTE: HELENE (2001).

Entretanto, foi realizado o ensaio de consistência para cada amostra de concreto produzida na pesquisa, totalizando 4 ensaios, sendo 3 para o concreto preparado com água de efluente da Lagoa Facultativa e 1 para água potável.

#### 4.7.2 Processo de produção e cura do concreto

Após ao ensaio de consistência, pode-se prosseguir a produção do concreto, em que foram moldados 16 corpos de prova cilíndricos de concreto para cada uma das 3 amostras de efluente tratado e para 1 amostra com água proveniente da CAGEPA. Os corpos de prova possuíam um volume de 1,57 litros, caracterizados pelas dimensões de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro.

No processo de moldagem, inicialmente os corpos de prova foram preparados, em que os moldes e suas bases foram revestidos internamente com uma fina camada de óleo mineral, como mostrado na letra *a* da Figura 21. Logo após a preparação, foi feita a introdução do concreto nos moldes em duas camadas de volume aproximadamente igual.

Assim, para o adensamento do concreto, foi utilizado uma haste, em que para cada camada foi aplicado 12 golpes distribuídos uniformemente em toda a seção transversal do molde. E durante esse processo, foi realizado um leve batimento na face externa do molde com um bastão de madeira, até o fechamento dos vazios na massa do concreto.

Já na última camada, foi introduzido uma quantidade em excesso de concreto, após o adensamento, realizou-se o rasamento da superfície com a borda do molde utilizando uma colher de pedreiro adequada, visto na letra *b* da Figura 21.

Figura 21 - Moldes cilíndricos dos corpos de prova.



b) Corpos de prova preparados para o processo de moldagem (lubrificados);



a) Corpos de prova após a moldagem.

FONTE: Autor, 2018.

Realizado a moldagem, os moldes foram alocados sobre uma superfície horizontal rígida, e após 24 horas foram desmoldados e identificados, e em seguida, submersos em água até o momento do ensaio de compressão axial. Sendo que, os corpos de prova foram imergidos no fluido coerente ao que foi utilizado como água de amassamento na sua produção, ou seja, foram usados um recipiente com efluente oriundo da Lagoa Facultativa e um tanque com água potável para o respectivo processo de cura (Figura 22).

Figura 22 - Processo de cura do concreto.



a) Recipiente preenchido com efluente da Lagoa Facultativa;

b) Tanque preenchido com água potável.

FONTE: Autor, 2018.

#### 4.7.3 Ensaio de resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão foi baseado aos procedimentos da NBR 5739, em que foi utilizado como instrumento a prensa hidráulica da Contenco Ind. e Com. Ltda (Figura 23).

Desse modo, de início foi feito a regularização da superfície dos corpos de prova cilíndricos, através da retificação em faceadora (capeamento), tornando a mesma plana, lisa e perpendicular ao eixo longitudinal da peça do instrumento. E durante os ensaios foi utilizado no topo superior do corpo de prova, o disco de Neoprene. Observando que esses dois passos tem o intuito de permitir a distribuição uniforme de tensão nas superfícies dos corpos de prova, possibilitando resultados de resistência à compressão mais confiáveis.

Em sequência, cada o cilindro de concreto na sua idade prevista foi centralizado sobre a bandeja da prensa, com o auxílio dos círculos concêntricos de referência do instrumento. E assim, a carga de ensaio foi então aplicada, continuamente e sem choques, com velocidade de carregamento de 0,20 MPa/s. A resistência à compressão foi obtida pelo quociente entre a carga de ruptura pela área da seção transversal dos corpos de prova, expressa em Mega Pascal (MPa).

Figura 23 - Prensa hidráulica utilizada no ensaio de compressão axial dos corpos de prova.

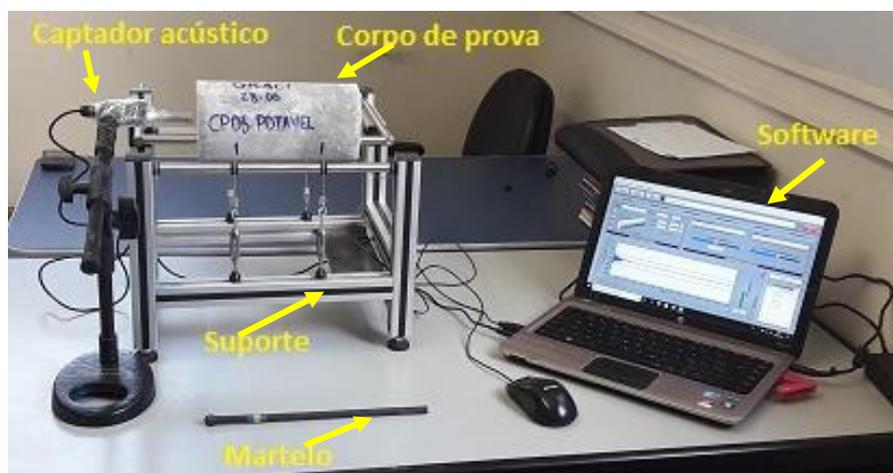


FONTE: Autor, 2018.

#### 4.8 Ensaio do módulo de elasticidade

Para caracterização do concreto produzido com efluente ou água potável, utilizou-se o Sonelastic PC Based, desenvolvido pela ATCP – Engenharia Física, que é um conjunto de soluções utilizadas para caracterização não-destrutiva dos modelos elásticos e para amortecimento de materiais baseado na técnica de excitação por impulso (ASTM-E 1876), com o uso de um software para PC como unidade de processamento. Esse instrumento é composto pelo suporte, martelo, microfone e captador acústico (Figura 24).

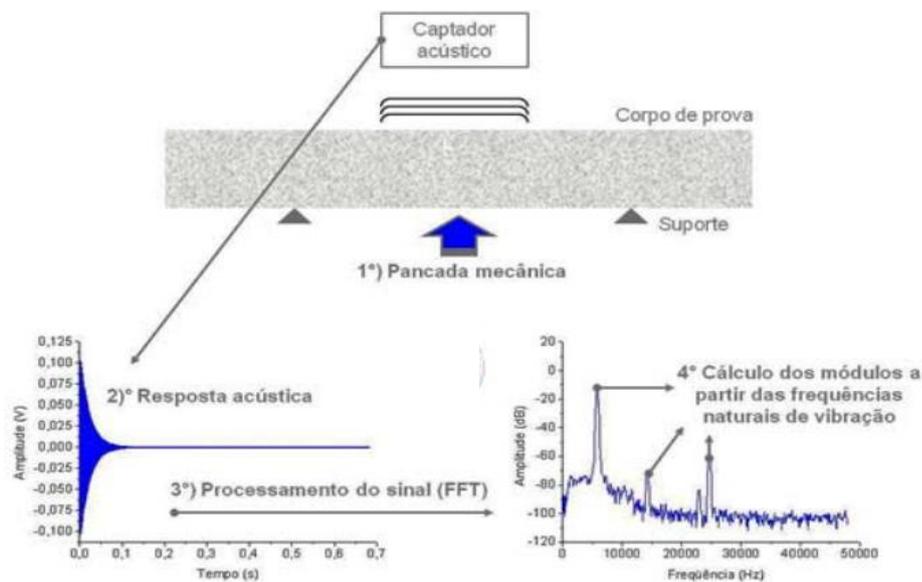
Figura 24 - Instrumentação utilizada para ensaio dinâmico.



FONTE: Autor, 2018.

Na realização do ensaio, utilizou-se corpo de prova com dimensões de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, que foi retirado da cura com as idades de 28 dias, posteriormente identificado, pesado, posicionado e apoiado no suporte do instrumento. Logo, o corpo de prova foi golpeado levemente por um “martelo” que, por sua vez, emitiu-se um som característico, composto pela frequência natural de vibração do corpo. Que por sua vez, essa resposta acústica foi captada por um captador acústico e processada pelo *software*, que com o conhecimento das dimensões, da massa e das frequências naturais de vibração, determinou-se o módulo de elasticidade para cada cilindro. Desse modo, pode-se verificar na Figura 25, o princípio de funcionamento do programa.

Figura 25 - Princípio de funcionamento do Sonelastic.



FONTE: DIÓGENES (2011).

Segundo Diógenes et al. (2011), o módulo de elasticidade dinâmico é maior em torno de 20, 30 e 40 por cento do que o módulo estático de deformação para concretos de alta, média e baixa resistências. Logo, foi adotado que o módulo de elasticidade estático seja 60% menor que o módulo de elasticidade dinâmico. Portanto, através do módulo de elasticidade dinâmico estabelecido pelo ensaio para as amostras de efluente e água potável, encontrou-se o módulo de elasticidade estático.

Por conseguinte, por meio da NBR 6118 (ABNT, 2007), pode-se determinar a resistência característica do concreto pelo método não-destrutivo para as amostras em estudo. Com isso, foi possível fazer a comparação do  $f_{ck}$  pelo método destrutivo e não-destrutivo para os dois efluentes, bem como analisar a resistência das amostras segundo a NM 137.

#### **4.9 Análise estatísticas dos resultados obtidos**

O Teste T *Student* é usado na comparação de duas médias e segue uma distribuição normal, na qual foi utilizado na condição para duas amostras de fluidos independentes. Assim, definiu-se uma taxa tolerável de imprecisão no valor de 5%, permitindo conhecer a probabilidade de erro de tomar a decisão, bem como foi empregada a tabela de Distribuição T disposta no presente trabalho no Anexo B.

Desse modo, foi analisado os resultados de tempo de pega, resistência à compressão aos 07, 28 e 120 dias e a resistência característica do concreto para 28 dias encontrada pelos método destrutivo e não-destrutivo, de acordo com os parâmetros exposto pela NM137, e em sequência, foi analisado estatisticamente pelo Teste T *Student*.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização do efluente

Como já delineado, foram coletadas quatro amostras de efluente oriundo da Lagoa Facultativa da ETE Mangabeira e produzidos três traços de concreto. Para cada amostra de efluente, foi retirada uma pequena quantidade para análises físico-químicas exigidas pela Norma Mercosul 137. Ressaltando que para os parâmetros de cloretos e sulfatos, as amostras foram analisadas em réplica e os demais parâmetros em tréplica. Logo, observa-se os resultados na Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 11 - Resultado das análises físico-químicas do efluente.

Data de coleta	Amostras	Parâmetro							
		pH a 25°C		Cloretos (mgCl /L)		Sulfatos (mgSO <sub>4</sub> <sup>2</sup> /L)		Ferro total (mgFe/L)	
		Valor obtido	Faixa limite	Valor obtido	Limite	Valor obtido	Limite	Valor obtido	Limite
10/mai	Amostra 1	7,7		37,49		38,81		0,68	
16/mai	Amostra 2	7,68		76,98		31,41		0,16	
23/mai	Amostra 3	7,4	5,5 a 9,0	59,48	Até 2.000	30,13	Até 2.000	0,46	Até 1,0
22/jun	Amostra 4	7,42		67,48		52,84		0,52	
	Média	7,55		60,36		38,30		0,46	

Tabela 12 - Resultado das análises de Sólidos Totais do efluente.

Data de coleta	Amostras	Sólidos Dissolvidos Totais			
		Totais Voláteis	Totais Fixos	Totais	Limite totais
10/mai	Amostra 1	128	263	391	
16/mai	Amostra 2	166	166	332	
23/mai	Amostra 3	160	185	345	Até 5.000
22/jun	Amostra 4	154	276	430	
	Média	152	222,5	374,5	

Unidade: mg/L

### 5.1.1 Potencial de Hidrogênio à 25°C

Na determinação do pH a 25°C para as quatro amostras de efluente analisadas, foi obtido uma média de valores igual a 7,55, assinalando condição básica do efluente. Prontamente, o resultado consta dentro da faixa de aceitabilidade determinada pela norma NM 137.

### 5.1.2 Cloretos e Sulfatos solúveis

Na determinação do teor de Cloretos e Sulfatos solúveis, a NM 137 recomenda que os limites para esses parâmetros devem ser analisados para o concreto já produzido. No entanto, como o efluente é um dos componentes do concreto, foi realizada uma análise prévia para apurar se o mesmo atendia os requisitos determinados pela norma.

Prontamente, na determinação dos Cloretos solúveis, obteve-se a média dos valores numa ordem de 60,36 mg Cl<sup>-</sup>/L, resultado que se encontra dentro do limite exigido pela norma NM 137 para os três tipos de concreto considerados: simples (até 200 mg Cl<sup>-</sup>/L), armado (até 700 mg Cl<sup>-</sup>/L) e protendido (até 500 mg Cl<sup>-</sup>/L).

Em relação aos Sulfatos solúveis, a média dos valores obtidos foi igual a 38,30 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L, resultado dentro do limite de 2.000 mgSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L requerido pela norma NM 137.

Vale ressaltar que segundo a NM137, os limites exigidos pela norma de Cloretos e Sulfatos solúveis no concreto produzido, abrangem os teores encontrados na água de amassamento e cura, como também nos aditivos químicos, agregados e cimento. Em que, as normas NBR NM 16 (ABNT, 2004) e NBR 9917(ABNT, 1987), padronizam a determinação desses parâmetros nos agregados e no cimento, respectivamente, porém estas não foram realizadas no estudo.

Portanto, não se realizou a determinação do teor desses parâmetros para o concreto produzido. No entanto, considerando o tipo de cimento (CP II – Z 32) e na origem dos agregados (areia e brita) utilizados, foi adotado um teor de 50% da média dos valores obtidos nas determinações realizadas para o efluente. Consideração coerente ao que é exigido pela norma em estudo.

### 5.1.3 Ferro

Na análise das amostras em relação ao parâmetro do Ferro, foi obtido uma média de valores igual a 0,46 mgFe/L. Resultado que se demonstrou abaixo do valor limite (1,0 mgFe/L) exigido pela norma NM 137.

### 5.1.4 Sólidos

Para determinação dos sólidos nas amostras de efluente, foram analisados os sólidos totais, os sólidos totais fixo e voláteis. As referidas amostras apresentaram uma média 222,5 mgSTF/L de sólidos totais fixos e 152 mgSTV/L de sólidos totais voláteis. Enquanto, para os sólidos totais, as amostras obtiveram uma média dos valores igual a 374,5 mgST/L. Valor inferior ao limite máximo (5.000 mgST/L) exigidos pela norma NM 137.

Por fim, com os resultados delineados, observou-se que o efluente analisado atende aos padrões impostos pela NM 137, conseqüentemente pode-se ser utilizado na produção do concreto.

## 5.2 Caracterização dos agregados graúdo e miúdo

A determinação da composição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos foram feitas conforme as especificações da NBR NM 248. E partir dela, foi possível determinar a Dimensão Máxima Característica e Módulo de Finura de cada material, como pode-se observar na Tabela 13 e Tabela 14.

Tabela 13 - Composição granulométrica do agregado miúdo.

Peneiras (mm)	Peso retido (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
4,75	1,9	0,19	0,19
2,36	45	4,5	4,69
1,18	97,3	9,73	14,42
0,6	167,3	16,73	31,15
0,3	400,2	40,02	71,17
0,15	168,5	16,85	88,02
Resíduo	119,8	11,98	100
Total	1000	100	-

Diâmetro máximo característico (mm)	2,36
Módulo de finura	2,09

Tabela 14 - Composição granulométrica do agregado graúdo.

Peneiras (mm)	Peso retido (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
75	0,00	0,00	0,00
63	0,00	0,00	0,00
50	0,00	0,00	0,00
37,5	0,00	0,00	0,00
31,5	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00
19	361,00	7,22	7,22
12,5	3620,40	72,41	79,63
9,5	720,00	14,40	94,03
6,3	250,80	5,02	99,05
4,75	47,80	0,96	100,00
2,36	0,00	0,00	100,00
1,18	0,00	0,00	100,00
0,6	0,00	0,00	100,00
0,3	0,00	0,00	100,00
0,15	0,00	0,00	100,00
Resíduo	0,00	0,00	100,00
Total	5000,00	100,0	-

Dímetro máximo característico (mm)	19
Módulo de finura	7,01

Dessa maneira, através de peneiramento, obteve-se os valores acima e assim foi possível conhecer a distribuição dos grãos dos agregados e suas respectivas porcentagens de ocorrência.

Além da caracterização da distribuição dos grãos, de acordo com normas brasileiras NBR NM 45, NBR NM 52 e NBR NM 53, determinou-se a massa unitária e específica dos agregados miúdos e graúdos, como exposto na Tabela 15.

Tabela 15 - Massa específica e unitária dos agregados utilizados.

Tipo	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )
Agregado miúdo	2,63	1,63
Agregado graúdo	2,70	1,50

### 5.3 Dosagem do concreto

Para a produção do concreto, deve-se observar alguns parâmetros relevantes como abatimento, D.M.C. dos agregados, o tipo e marca do cimento utilizado, a quantidade de cada material, entre outros, que de fato influenciam nas características da mistura. Desse modo, na determinação da dosagem do concreto, inicialmente foi adotada uma resistência à compressão na idade de 28 dias no valor de 25 MPa, considerada como uma resistência moderada e que possui o uso comum no município de João Pessoa.

E em relação a trabalhabilidade do concreto, que está diretamente ligada a resistência e o teor de água, foi adotada a consistência para o concreto de 80 mm, que é indicado para elementos estruturais como vigas e pilares, bem como considerada uma consistência plástica. Além disso, adotou-se o uso de cimento Portland CP II – Z 32 RS (fabricante: Nacional), considerado por cimento Portland Composto, com adição de materiais pozolânicos e resistentes ao sulfato, caracterizado no emprego em obras civis em geral e bom desempenho nas estruturas de concreto que entram em contato com ambientes agressivos.

Vale ressaltar que não foi utilizado nenhum aditivo ou adição no traço do concreto, com intuito de manter o foco da pesquisa, de analisar apenas a influência do efluente na produção da pasta de cimento e concreto.

Nesse contexto, de posse dos parâmetros adotados (Tabela 16) e os resultados da caracterização dos agregados (Tabela 17), foi possível calcular o traço experimental para produção do concreto conforme a metodologia da ABCP/ACI, exposto na Tabela 18.

Tabela 16 - Parâmetros inicialmente considerados para o cálculo da dosagem do concreto.

Parâmetros adotados	
Resistência à compressão desejada	$f_{ck} = 25 \text{ MPa}$
Consistência (abatimento)	80 mm
Cimento Portland CP II – Z 32 RS	M.E. = 3,1 g/cm <sup>3</sup>

Tabela 17 - Características dos agregados utilizados no traço.

Agregado	D.M.C. (mm)	Mód. Finura	M. E. g/cm <sup>3</sup>	M. U. Kg/dm <sup>3</sup>
Miúdo	2,36	<b>2,09</b>	<b>2,63</b>	1,63
Graúdo	<b>19</b>	7,01	<b>2,7</b>	1,5

Tabela 18 - Procedimento de dosagem do concreto.

<b>Dosagem Experimental do Concreto ABCP/ACI</b>		
<i>Passo</i> 1	<b>Resistência de dosagem (28dias)</b>	<b>31,6 Mpa</b>
	Condição	A
	Desvio padrão	4 Mpa
<i>Passo</i> 2	<b>Fator água/cimento</b>	<b>0,48 l/Kg</b>
	K teórico	20,2
<i>Passo</i> 3	<b>Consumo de água</b>	<b>217 l/m<sup>3</sup> concreto</b>
	Curva 1	213 l/m <sup>3</sup> concreto
	Adicionou 4 litros para obter abatimento de 80 mm.	
<i>Passo</i> 4	<b>Consumo de cimento</b>	<b>452 Kg/m<sup>3</sup> concreto</b>
<i>Passo</i> 5	<b>Proporção dos agregados</b>	
	S ( Ábaco experimental)	1,5
	Areia	<b>40%</b>
	Brita	<b>60%</b>
<i>Passo</i> 6	<b>Consumo de agregados</b>	
	Agregados totais	<b>1702,3 Kg/m<sup>3</sup> concreto</b>
	Agregado miúdo	<b>680,9 Kg/m<sup>3</sup> concreto</b>
	Agregado graúdo	<b>1021,4 Kg/m<sup>3</sup> concreto</b>
<b>Traço em peso</b>		
<b>1 : 1,51 : 1,8 - 0,48</b>		

### 5.3.1 Ajuste no traço obtido

Com o procedimento de dosagem do concreto, foi estimando no item anterior, o traço experimental de 1:1,50:2,26 – 0,48, em que observa-se em especial as proporções relativas de agregados miúdo e graúdo, que afetam o abatimento do concreto. Então, é visível que a relação entre os agregados graúdo e miúdo foi de 1,5 o que resulta em um concreto referido como áspero, com tendência a segregação e exsudação.

Desse modo, foi fixado o teor de água/mistura seca e alterado a relação agregado miúdo/agregado graúdo, que por sua vez a proporção dos agregados foi para o valor de 1,2. Assim, o traço final obtido foi de 1:1,50:1,80 – 0,48, em que se observa que a quantidade de brita diminui, resultando em um melhor adensamento da mistura, ou seja, melhor trabalhabilidade.

Todavia, a variação da trabalhabilidade depende da condição de umidade do agregado e da temperatura ambiente, dado que influenciam na quantidade de água necessária à mistura. Visto isso, para cada produção de concreto foi verificado a umidade da areia pelo método do

frasco Chapman NM 9776 (ABNT 1987), e a partir de seu valor, o consumo de água e agregado miúdo foi corrigido quando necessário (Figura 26).

Figura 26 - Método do frasco Chapman.



FONTE: Autor,2018.

#### 5.4 Análise do tempo de pega da pasta de cimento produzida

Para realização do ensaio do tempo de pega, foi utilizado o cimento CP II-Z 32 RS e água para hidratação da pasta, efluente da Lagoa Facultativa e água potável. Desse modo, foram feitas 5 pastas de cimento, 4 elaboradas com efluente e 1 com água potável. O resultado do tempo de pega inicial para as amostras, encontra-se na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados do tempo de pega inicial utilizando efluente de esgoto tratado e água potável.

Amostra	Tempo de pega inicial (min)	Tempo de pega da água potável (min)	Tolerância (definição da NM 137)
Amostra 1	187		
Amostra 2	132	106	30 min
Amostra 3	131		
Amostra 4	158		

Com finalidade de verificar a consistência dos valores expostos na Tabela 19, foi feita uma análise estatística e o teste T *Student*, mostrado na Tabela 20.

Tabela 20 - Análise Estatística para o tempo de pega inicial das amostras.

<b>Análise Estatística</b>				
	<b>Número da amostra (n)</b>	<b>Média ( )</b>	<b>Variância (S<sup>2</sup>)</b>	<b>Desvio padrão (S)</b>
Água Potável	1	106	-	-
Amostra de Efluentes	4	152	700,67	26,47
<b>Teste t student</b>				
			Variância (S <sup>2</sup> )	700,67
			Desvio padrão (S)	26,47
			Variância da distribuição (t)	-1,55
			Grau de liberdade	3
			Significância adotada	0,05
			T crítico	3,182

De acordo com a Tabela 20, pode-se verificar que a pasta de cimento produzida com efluente obteve-se o tempo de pega inicial no valor médio de  $152 \pm 26,47$  minutos e 106 minutos para amostra feita com água potável. Entretanto, a amostra analisada contém um número pequeno de dados, que por sua vez apresenta-se um valor considerado de variância e desvio padrão. Assim, observa-se a necessidade de ampliar o tamanho da amostra, para que tenha mais precisão dos resultados.

Todavia, conforme a norma NM137, a diferença de tempo de pega entre as amostras produzidas com efluente e com água potável, não devem ser superiores a 30 minutos, sendo uma das exigências que permite que a água em estudo seja aceita como água de amassamento e cura do concreto.

Desse modo, considerando o intervalo de confiança, constata-se que o valor mínimo do tempo de pega inicial da pasta de cimento produzida com efluente é no valor de 125,53 minutos, e assim, pode-se consumir que foi obedecida a exigência pela norma em estudo. Enquanto, a análise comparativa entre as médias dos dois grupos feita pelo teste T *Student*, em que adotou-se o nível de significância no valor de 0,05, pode-se verificar que as condições  $t - t_c$  e  $t + t_c$  foram obedecidas, portanto não existe diferença significativa entre os valores médios de tempo de pega inicial para a pasta de cimento produzida com o efluente tratado e a água potável.

Em contrapartida, os valores do tempo de pega final das amostras, estão expostos na Tabela 21 e a análise estatística na Tabela 22.

Tabela 21 - Resultados do tempo de pega final utilizando efluente de esgoto tratado e água potável.

Amostra	Tempo de pega final (min)	Tempo de pega da água potável (min)	Tolerância (definição da NM 137)
Amostra 1	208		
Amostra 2	182	161	30 min
Amostra 3	146		
Amostra 4	193		

Tabela 22 - Análise Estatística para o tempo de pega final das amostras.

<b>Análise Estatística</b>				
	Número da amostra (n)	Média ( )	Variância (S <sup>2</sup> )	Desvio padrão (S)
Água Potável	1	161,00	-	-
Amostra de Efluentes	4	182,25	697,58	26,41
<b>Teste t student</b>				
Variância (S <sup>2</sup> )			697,58	
Desvio padrão (S)			26,41	
Variância da distribuição (t)			-0,72	
Grau de liberdade			3	
Significância adotada			0,05	
T crítico			3,182	

Com base nos valores expostos na Tabela 22, é possível observar que o tempo de pega final obteve-se o valor médio de  $182,25 \pm 26,41$  minutos e 161 minutos para amostra feita com água potável. Em comparação, ao resultado do tempo de pega inicial, pode-se observar uma diminuição na variância, conseqüentemente no desvio padrão, indicando menor dispersão entre os valores em torno da média para amostra de efluentes.

Contudo, verificou-se que o valor mínimo do tempo de pega final da pasta de cimento produzida com efluente é no valor de 155,84 minutos, e assim, pode-se certificar que o valor mínimo do intervalo de confiança e o valor médio, obedecem a exigência da NM 137. E de acordo com o *T Student*, não houve diferença significativa entre os valores médios.

Portanto, pode-se afirmar que o efluente em estudo pode ser utilizado como água de amassamento e cura do concreto, levando em consideração instantaneamente o tempo de pega.

## 5.5 Análise da resistência à compressão do concreto produzido

Como exposto anteriormente foram moldados 16 corpos de prova para três amostras de efluente e uma de água potável, utilizando-se o mesmo tipo de cimento e agregados, totalizando uma produção de 64 cilindros de concreto. Precedentemente, à realização do ensaio de compressão, todos os corpos de prova passaram pelo processo de cura, ficando imersos nos fluidos semelhantes aos utilizados a sua água de amassamento.

Desse modo, foi feito o ensaio de resistência à compressão para as idades de 7, 28 e 120 dias. Em que se utilizou para cada amostra, uma série de 4 corpos de prova rompidos em 7 dias e uma série de 6 corpos de prova rompidos em 28 e 120 dias.

Conforme a NM 137, para efeito de análise, realizou-se as determinações de resistência à compressão de forma comparativa entre os corpos de provas moldados com efluente e água potável. Ressaltando que ambas as resistências à compressão aos 7 e 28 dias dos dois tipos de fluidos, as diferenças entre os valores não devem ser superior a 10%, conforme exposto na Tabela 4. Logo, calculou-se as médias dos valores de resistência à compressão para cada fluido e idade respectivamente do concreto produzido, bem como análise estatística com o Teste T *Student*.

### 5.5.1 Resistência à compressão axial aos 07 dias

Feito o ensaio de resistência à compressão axial, encontrou-se os resultados para idade de 7 dias para os cilindros de concreto produzidos com efluente da Lagoa Facultativa e água potável, como exposto na Tabela 23.

Tabela 23 - Resistência à compressão aos 07 dias.

RESISTÊNCIA AOS 7 DIAS					
Amostra	Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf)	Tensão (Mpa)	Tensão Média (Mpa)	Desvio Médio (%)
Amostra 1	1	12,743	16,23	16,40	12%
	2	11,75	14,97		
	3	10,942	13,94		
	4	16,05	20,45		
Amostra 2	1	11,781	15,01	18,11	23%
	2	11,794	15,02		
	3	19,084	24,31		
	4	10,569	<b>13,46</b>		

Tabela 23 (continuação) - Resistência à compressão aos 07 dias.

Amostra 3	1	11,055	14,08	16,55	13%
	2	15,963	20,34		
	3	11,666	14,86		
	4	13,284	16,92		
Água Potável	1	22,556	28,73	26,50	10%
	2	23,265	29,64		
	3	17,975	22,90		
	4	19,427	24,75		

Desse modo, observa-se que a série de cilindros com efluente, apresentou-se uma tensão média para a idade de 7 dias no valor de 17,02 MPa. No entanto, segundo a NM137, recomenda-se para os concretos produzidos com o efluente, tensões médias mínimas aceitável no valor de 23,85 MPa. Logo, observou-se que as 3 amostras não obedeceram a tolerância exposta pela norma.

Contudo, com o intuito de testar a existência de diferença entre as médias das duas amostras em estudo, sendo a série do efluente e de água potável. Foi feito uma análise estatística pelo teste T *Student*. Em que, os resultados dessa análise mostram-se na Tabela 24.

Tabela 24 - Análise Estatística para o concreto com idade de 7 dias.

<b>Análise Estatística</b>				
	<b>Número da amostra (n)</b>	<b>Média ( )</b>	<b>Variância (S<sup>2</sup>)</b>	<b>Desvio padrão (S)</b>
Água Potável	4	26,50	10,29	3,21
Amostra de Efluentes	11	17,02	11,14	3,34
<b>Teste t student</b>				
			Variância (S <sup>2</sup> )	10,95
			Desvio padrão (S)	3,31
			Variância da distribuição (t)	4,91
			Grau de liberdade	13
			Significância adotada	0,05
			T crítico	2,16

Por conseguinte, adotando uma significância de 5% e com o valor do grau de liberdade de 13, pode-se obter o t crítico, retirado da tabela T de distribuição, tendo o valor de 2,16. Além disso, calculou-se a variância da distribuição (t), e assim, a condição  $t < t_c$  não foi obedecida. Logo, pode-se afirmar que há diferença significativa entre os valores médios do concreto de água potável e efluente tratado.

### 5.5.2 Resistência à compressão aos 28 dias

Os resultados das resistências à compressão aos 28 dias para os cilindros de concreto produzidos com efluente da Lagoa Facultativa e água potável, são mostrados na Tabela 25.

Tabela 25 - Resistência à compressão aos 28 dias.

RESISTÊNCIA AOS 28 DIAS					
Amostra	Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf)	Tensão (Mpa)	Tensão Média (Mpa)	Desvio Médio (%)
Amostra 1	1	16,758	21,35	22,86	25%
	2	13,038	16,61		
	3	11,041	<b>14,06</b>		
	4	12,644	16,11		
	5	22,78	29,02		
	6	24,504	31,22		
Amostra 2	1	16,884	<b>21,51</b>	29,83	12%
	2	16,884	<b>21,51</b>		
	3	17,765	22,63		
	4	23,848	30,38		
	5	27,322	34,81		
	6	24,724	31,50		
Amostra 3	1	15,935	20,30	26,10	21%
	2	15,954	20,32		
	3	16,84	21,45		
	4	23,671	30,15		
	5	26,33	33,54		
	6	24,211	30,84		
Água Potável	1	25,408	32,37	32,21	3%
	2	27,724	35,32		
	3	24,695	31,46		
	4	24,35	31,02		
	5	25,374	32,32		
	6	24,16	30,78		

De acordo, com as Tabelas 23 e 25, os valores de 13,46, 14,06 e 21,51 foram descartados da análise, por apresentarem uma medição inconsistente aos demais valores de cada amostra, que por sua vez, é recorrente a falhas humanas no decorrer da produção do concreto ou durante o ensaio de compressão. Além disso, pode-se atentar a variabilidade dos valores de cada amostra, para ambas as idades de 7 e 28 dias, porém para o concreto com idade de 28 dias, é mais expressivo a variação média de cada valor em torno da média, quando comparado a

amostra potável. Logo, verificou-se que os dados da amostra potável se apresentaram mais homogêneos, conseqüentemente, resultado mais preciso e para amostra de efluente, obteve-se um desvio médio relevante, caracterizando uma variabilidade significativa.

Contudo, para obter dados mais coerentes, foi realizada análise estatística, resultado exposto na Tabela 26.

Tabela 26 - Análise Estatística para o concreto com idade de 28 dias.

<b>Análise Estatística</b>				
	<b>Número da amostra (n)</b>	<b>Média ( )</b>	<b>Variância (S<sup>2</sup>)</b>	<b>Desvio padrão (S)</b>
Água Potável	6	32,21	2,75	1,66
Amostra de Efluentes	15	26,26	40,38	6,53
<b>Teste t student</b>				
			Variância (S <sup>2</sup> )	30,47
			Desvio padrão (S)	5,52
			Variância da distribuição (t)	2,23
			Grau de liberdade	19
			Significância adotada	0,05
			T crítico	2,093

O valor médio de resistência para a idade de 28 dias, utilizando o efluente foi igual a 26,26 MPa com o intervalo de aceitação de  $\pm 6,53$ . Assim, o valor máximo de resistência é de 32,79 MPa e logo atende a tensão média mínima aceitável que tem o valor de 28,99 MPa, segundo a NM 137.

Em relação, ao teste T *Student*, adotando uma significância de 5% e com o valor do grau de liberdade de 19, pode-se obter o t crítico, retirado da tabela T de distribuição, tendo o valor de 2,093 e a variância da distribuição (t) com o valor de 2,23. Logo, a sentença  $t < c$  não foi obedecida, pode-se afirmar que há diferença estatística relevante entre os valores médios do concreto de água potável e efluente tratado.

Contudo, feito a comparação das resistências nas duas idades, observou-se que em 21 dias corridos, um aumento na resistência à compressão referente ao efluente no valor de 54,29%, enquanto para amostra de água potável, essa diferença é no valor de 21,55%.

### 5.5.3 Resistência à compressão aos 120 dias

Os resultados das análises de resistências à compressão aos 120 dias para o concreto produzido com efluente da Lagoa Facultativa e água potável, são mostrados na Tabela 27.

Tabela 27 - Resistência à compressão aos 120 dias.

RESISTÊNCIA AOS 120 DIAS					
Amostra	Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf)	Tensão (Mpa)	Tensão Média (Mpa)	Desvio Médio (%)
Amostra 1	1	26,602	33,89	31,36	7%
	2	26,872	34,23		
	3	22,332	28,45		
	4	24,285	30,94		
	5	23,016	29,32		
	6	23,016	<b>29,32</b>		
Amostra 2	1	26,965	34,35	35,52	3%
	2	26,905	34,27		
	3	27,25	34,71		
	4	27,762	35,37		
	5	28,731	36,60		
	6	29,708	37,84		
Amostra 3	1	29,708	<b>37,84</b>	34,49	8%
	2	29,725	37,87		
	3	25,19	32,09		
	4	27,812	35,43		
	5	28,853	36,76		
	6	23,79	30,31		
Água Potável	1	23,998	30,57	27,05	15%
	2	25,959	33,07		
	3	17,27	22,00		
	4	21,618	27,54		
	5	17,31	22,05		
	6	14,757	<b>18,80</b>		

Conforme o resultado exposto na Tabela 27, os valores de 29,32, 37,84 e 18,80 foram descartados da análise, seguindo a mesma lógica que foi aplicada nas análises de resistência para idade de 7 e 28 dias. É visto também que, em comparação aos resultados das outras idades do concreto, a variabilidade dos valores de cada amostra para idade de 120 dias, apresentaram índice menor, constatando-se que os dados obtidos foram mais homogêneos, conseqüentemente, mais coerentes.

Entretanto, foi realizada análise estatística, como mostrada na Tabela 28.

Tabela 28 - Análise Estatística para o concreto com idade de 120 dias.

<b>Análise Estatística</b>				
	<b>Número da amostra (n)</b>	<b>Média ( )</b>	<b>Variância (S<sup>2</sup>)</b>	<b>Desvio padrão (S)</b>
Água Potável	5	27,05	24,84	4,98
Amostra de Efluentes	16	33,79	8,53	2,92
<b>Teste t student</b>				
			Variância (S <sup>2</sup> )	11,97
			Desvio padrão (S)	3,46
			Variância da distribuição (t)	-3,81
			Grau de liberdade	19
			Significância adotada	0,05
			T crítico	2,093

A tensão média encontrada para o concreto produzido por efluente foi igual a 33,79 MPa com o intervalo de aceitação de  $\pm 2,92$  e para o concreto de água potável, obteve-se o valor de 27,05 MPa. Logo, observa-se que o concreto do efluente apresentou uma resistência superior a 21,92% em relação ao concreto da água potável.

Todavia, é válido frisar que ao longo do tempo transcorrido, a resistência do concreto do efluente apresentou um crescimento, algo que não foi observado na resistência entre as idades de 28 e 120 dias para o concreto da água potável, fator que pode ter sido influenciado pela variabilidade de valores obtidos na última idade. No entanto, segundo o teste T *Student*, pode-se afirmar que não houve diferença estatística relevante entre os valores médios do concreto de água potável e efluente tratado.

#### 5.5.4 Módulo de elasticidade

A partir do ensaio dinâmico com caráter não-destrutivo, pode-se estabelecer o módulo de elasticidade dinâmico das amostras de efluente e água potável para idade de 28 dias, como mostrado no Apêndice A, B, C e D. E através desses valores, foi calculado o módulo de elasticidade estável secante, considerando a premissa que o mesmo equivale a 60% do módulo de elasticidade dinâmico.

Para efeito de ensaio, foi trabalhado com um conjunto composto por 8 corpos de prova para ambas as amostras em estudo, somando 24 cilindros utilizando o efluente tratado e 8

cilindros com o uso da água potável. No entanto, para o ensaio de compressão (método destrutivo), foi estabelecida a resistência à compressão para 6 corpos de prova para cada amostra. Desse modo, com o objetivo de fazer uma análise mais coerente, foram descartados dois valores de cada amostra que apresentaram menores resistências, como mostrado na Tabela 29.

Tabela 29 - Resultado do fck pelo método destrutivo e não-destrutivo.

	Descrição	Método Destrutivo	Método Não-Destrutivo
		Fck (Mpa)	Fck (Mpa)
Amostra 1	CP1	18,87	21,33
	CP2	14,13	21,48
	CP3	11,59	21,25
	CP4	13,63	22,37
	CP5	26,54	<b>19,95</b>
	CP6	28,74	<b>20,23</b>
	CP7		20,57
	CP8		20,28
Amostra 2	CP1	19,03	23,93
	CP2	19,03	22,37
	CP3	20,16	24,46
	CP4	29,02	<b>22,11</b>
	CP5	27,90	<b>21,73</b>
	CP6	32,33	22,40
	CP7		22,15
	CP8		22,48
Amostra 3	CP1	17,82	23,96
	CP2	17,85	24,02
	CP3	18,98	<b>22,67</b>
	CP4	27,68	<b>22,90</b>
	CP5	31,07	24,22
	CP6	28,37	24,09
	CP7		25,23
	CP8		23,30
Água Potável	CP1	29,89	26,26
	CP2	32,84	27,40
	CP3	28,98	<b>25,23</b>
	CP4	28,54	26,26
	CP5	29,85	25,62
	CP6	28,30	27,88
	CP7		<b>25,00</b>
	CP8		26,74

Dessa maneira, na Tabela 30, encontra-se os valores da resistência característica encontrada pelos dois métodos destrutivo e não-destrutivo para amostra de efluente tratado. Em que, observa-se que o método não-destrutivo se apresentou um desvio médio menor que do método destrutivo, ostentando valores mais homogêneos, conseqüentemente mais precisos.

Tabela 30 - Resultado do fck pelo método destrutivo e não-destrutivo para amostra com efluente tratado.

	Descrição	Método Destrutivo	Método Não-Destrutivo
		Fck (Mpa)	Fck (Mpa)
Amostra 1	CP1	18,87	21,33
	CP2	14,13	21,48
	CP3	11,59	21,25
	CP4	13,63	22,37
	CP5	26,54	20,57
	CP6	28,74	20,28
Amostra 2	CP1	19,03	23,93
	CP2	19,03	22,37
	CP3	20,16	24,46
	CP4	29,02	22,40
	CP5	27,90	22,15
	CP6	32,33	22,48
Amostra 3	CP1	17,82	23,96
	CP2	17,85	24,02
	CP3	18,98	24,22
	CP4	27,68	24,09
	CP5	31,07	25,23
	CP6	28,37	23,30
Desvio Médio (%)		26%	5%

Por sua vez, feita a comparação dos valores da resistência característica do concreto produzido com efluente, encontrados por meios dos dois métodos explanados, observou-se uma diferença insignificativa, valores esses que convergem para  $f_{ck}$  igual a 25 MPa, como estabelecido na dosagem do concreto. Logo, pela análise feita com o teste T *Student*, pode-se afirmar que não há diferença estatística apreciável entre os valores médios da resistência para ambos os métodos.

Tabela 31 - Análise Estatística para o fck estabelecido pelo método destrutivo e não-destrutivo, referente a amostra com efluente.

<b>Análise Estatística</b>				
	<b>Número da amostra (n)</b>	<b>Média ( )</b>	<b>Variância (S<sup>2</sup>)</b>	<b>Desvio padrão (S)</b>
Método Destrutivo	18	22,38	42,60	6,53
Método Não-Destrutivo	18	22,77	2,08	1,44
<b>Teste t student</b>				
Variância (S <sup>2</sup> )			22,34	
Desvio padrão (S)			4,73	
Variância da distribuição (t)			-0,25	
Grau de liberdade			34	
Significância adotada			0,05	
T crítico			2,032	

Em relação ao concreto produzido com água potável, este apresentou valores homogêneos de resistência, com desvio médio pequeno (Tabela 31). No entanto, verifica-se que a resistência encontrada pelo método destrutivo se apresentou 10,25% superior a encontrada pelo método não-destrutivo, bem como no teste T *Student*, pode-se afirmar que existe diferença estatística entre os valores médios para os dois métodos.

Tabela 32 - Resultado do fck pelo método destrutivo e não-destrutivo para amostra com água potável.

	<b>Descrição</b>	<b>Método Destrutivo</b>	<b>Método Não-Destrutivo</b>
		<b>Fck (Mpa)</b>	<b>Fck (Mpa)</b>
Água Potável	CP1	29,89	26,26
	CP2	32,84	27,40
	CP3	28,98	26,26
	CP4	28,54	25,62
	CP5	29,85	27,88
	CP6	28,30	26,74
Desvio Médio (%)		4%	2%

Tabela 33 - Análise Estatística para o  $f_{ck}$  estabelecido pelo método destrutivo e não-destrutivo, referente a amostra com água potável.

<b>Análise Estatística</b>				
	<b>Número da amostra (n)</b>	<b>Média ( )</b>	<b>Variância (S<sup>2</sup>)</b>	<b>Desvio padrão (S)</b>
Método Destrutivo	6	29,74	2,75	1,66
Método Não-Destrutivo	6	26,69	0,68	0,83
<b>Teste t student</b>				
Variância (S <sup>2</sup> )			1,72	
Desvio padrão (S)			1,31	
Variância da distribuição (t)			4,02	
Grau de liberdade			10	
Significância adotada			0,05	
T crítico			2,228	

Contudo, para amostra do efluente tratado, foi observada a resistência em um intervalo de  $[22,38 \pm 6,53]$  e  $[22,77 \pm 1,44]$  estabelecidas no método destrutivo e não-destrutivo, respectivamente, e para água potável, os intervalos de  $[29,74 \pm 1,66]$  e  $[26,69 \pm 0,83]$ . Logo, pode-se constatar que ambas as resistências característica do concreto produzido com efluente ou água potável, apresentaram valores próximo ao  $f_{ck}$  adotado no cálculo da dosagem do traço do concreto.

Segundo a NM 137, recomenda que a diferença entre a resistência do concreto produzido com o efluente e com água potável, não pode ultrapassar 10%, assim a resistência mínima deve ter o valor mínimo de 26,766 MPa e 24,021MPa, pelo método destrutivo e não-destrutivo. Todavia, ambas as resistências estão no intervalo de confiança dos valores da amostra do efluente.

Portanto, pode-se afirmar que não houve significativa variabilidade entre as resistências, conseqüentemente o efluente não interferiu consideravelmente no  $f_{ck}$  do concreto produzido.

## 6. CONCLUSÕES

Mediante as análises químicas realizadas no efluente tratado, os resultados referentes aos parâmetros analisados (pH, cloretos, ferro, sulfatos solúveis e sólidos totais), apresentaram-se satisfatórios aos limites indicados pela NM 137. E, assim, foi possível dar a continuidade na produção do concreto, com o traço final estabelecido de 1:1,50:1,80 – 0,48.

Desse modo, com base na análise do tempo de pega inicial e final, os resultados obtidos utilizando o efluente na produção da pasta de cimento obedeceram ao limite exposto pela NM 137 e que através do teste T *Student*, foi possível averiguar que não houve diferença significativa entre os valores médios.

Enquanto a resistência à compressão axial para as idades de 7, 28 e 120 dias, apresentaram resultados levemente divergentes a faixa de aceitabilidade proposta pela NM 137. No entanto, por meio do estudo da variabilidade dos valores, tendo como base o desvio médio e a análise estatística com nível de significância de 5%, foi possível verificar que para idade de 7 dias, as 3 amostras não obedeceram a tolerância exposta pela norma em estudo.

Posteriormente, observou-se com 28 dias o concreto produzido com efluente, apresentou-se um aumento da resistência de 54,29%, e assim, para as idades de 28 e 120 dias, a exigência da norma NM 137 foi atendida, constatando que em comparação ao concreto produzido com água potável, o efluente não influenciou na resistência à compressão do concreto. Ressalta-se que, aos 120 dias o concreto produzido pelo efluente apresentou resistência superior ao da água potável.

Em relação ao módulo de elasticidade, foi possível instituir a comparação do  $f_{ck}$  do método destrutivo e não-destrutivo, com o intuito de verificar a consistência dos valores encontrados no ensaio de compressão. Assim, observou-se a melhor precisão nos resultados no método não-destrutivo, como, também, a variação entre os valores médios das resistências características do concreto entre os dois métodos, foi insignificante. Desse modo, foi visto que o efluente não interferiu consideravelmente no  $f_{ck}$  do concreto produzido. Todavia, é válido destacar o odor desagradável na água residuária estudada, devido ao processo de eutrofização, ou seja, crescimento excessivo de algas.

Por fim, constatou-se que o efluente de esgoto tratado pela Lagoa de Estabilização da ETE de Mangabeira (CAGEPA) em João Pessoa-PB pode ser utilizado como água de amassamento e cura do concreto, visto que o mesmo atendeu à maioria dos requisitos discriminados pela Norma Mercosul 137. Essa possibilidade pode trazer impactos positivos ao

meio ambiente, visto que na construção civil utiliza quantidade significativa de água na produção de concreto e em outras atividades, sendo uma opção viável em ambiente inóspitos, onde a busca de água com qualidade suficiente tem elevado grau de dificuldade.

## 7. RECOMENDAÇÕES

Durante a pesquisa, foram observadas algumas necessidades para ampliar a consistência dos dados e expandir novas preposições a respeito da temática estudada. Desse modo, é sugerido algumas recomendações para estudos futuros:

- ) Averiguar o desempenho do concreto para obter resistências superiores à 25MPa, através da determinação de nova dosagem;
- ) Averiguar o desempenho do concreto produzido com esgoto tratado e utilização de aditivos ou adições;
- ) Averiguar a durabilidade do concreto elaborado com águas residuárias;
- ) Investigar as possíveis interferências da utilização da água residuária em concreto com a proporção dos agregados fixada e variação do fator a/c;
- ) Analisar o desempenho do aço empregado no concreto armado produzido com efluentes tratados, com vista a ocorrência à corrosão que pode ser ocasionada pelos sais presentes no efluente (cloretos e sulfatos solúveis);
- ) Averiguar o desempenho do concreto elaborado com efluentes de outros tipos de sistema de tratamento como wetlands;
- ) Averiguar a interferência do processo de filtração na qualidade do efluente tratado pela Lagoa Facultativa para posteriormente analisar a intervenção na resistência do concreto;
- ) Analisar o evento de odores desagradáveis na produção do concreto produzido em grande escala utilizando o efluente tratado e estudo sobre possíveis soluções para minimizar esses odores;
- ) Analisar à presença de microrganismos patogênicos e não patogênicos no efluente que possa vir a comprometer a manipulação humana durante a produção do concreto;
- ) Analisar a viabilidade econômica do uso do efluente tratado na produção de concreto e cura de peças estruturais;
- ) Ampliar o número de amostras analisadas para obtenção de dados mais coerentes e consistentes.

## 8. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Disponibilidade de demanda de Recursos Hídricos no Brasil: estudo técnico. Caderno de Recursos Hídricos.** Brasília, DF: ANA, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Estudo da Agência Nacional de Águas aborda uso da água no setor industrial.** Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/noticias/estudo-da-agencia-nacional-de-aguas-aborda-uso-da-agua-no-setor-industrial>>. Acesso em: 20 set 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico de utilização de cimento Portland.** 7.ed. São Paulo, 2012. 28p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9648 - Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário.** Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS/ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NBR NM 45 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** CB-18/CSM-05, 2006, 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS/ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NBR NM 52 – Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente.** CB-18/CSM-05, 2003, 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS/ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NBR NM 53 – Agregado graúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente e absorção de água.** CB-18/CSM-05, 2003, 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS/ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NBR NM 65 – Cimento Portland – Determinação do tempo de pega.** CB-18/CSM-05, 2003, 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS/ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NBR NM 67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** CB-18/CSM-05, 1998, 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS/ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NBR NM 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. CB-18, 2007, 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS/ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica**. CB-18/CSM-05, 2003, 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS/ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NBR NM 6118 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS/ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NBR NM 9935 – Agregados**. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS/ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NBR NM 7211 – Agregados para concreto – Especificação**. 2005.

ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 137 – Argamassa e concreto – Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento Portland**. CSM-05, 1997, 15 p.

BARBETTA, P. A. **Estatística aplicada às Ciências Sociais**. 7ed. Florianópolis. Editora da UFSC. 2010.

BATTAGIN, A. F. Uma breve história do cimento Portland. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br>>. Acesso em: 23 set 2018.

BASTOS, P. **Fundamentos do concreto**. Notas de aula da disciplina “Estruturas de concreto armado I”. Universidade Estadual Paulista – UNESP, Bauru/SP. 2014.

BROOKS, J. J.; NEVILLE, A.M. **Tecnologia do concreto**. Editora Bookman. 2 ed. 2013

CARVALHO, M. V. **Aspectos técnicos e eficiência de um Reator em Batelada Sequencial (SBR) para tratamento de esgoto residencial**. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Civil. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo, SP. Disponível em <<http://cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 07 agosto 2018.

DURAN, A. P.; FRACARO, D. **Verificação das propriedades básicas do concreto industrializado fornecido em embalagens de 30 kg.** Trabalho de Conclusão de Curso. Curso Superior de Tecnologia em Concreto. Universidade Federal da Paraíba, Curitiba, 2011.

DIÓGENES, H. J. F.; CASSOLINO, L.C.; PEREIRA, A. H. A.; EL DEBS, M. K. EL DEBS, A. L. H. C. Determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resposta acústica. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. Volume 4, dez 2011.

FLORÊNCIO, L; BASTOS, R; AISSE, M. **Tratamento e reutilização de esgotos sanitários.** PROSAB–Edital IV. Recife: ABES, 2006. 427p.

GOELLNER, E.; SANTIN, J. **A Gestão dos Recursos Hídricos e a Cobrança pelo seu Uso.** Sequência (Florianópolis), n. 67, p. 199-221. 2013.

HELENE, P., (2001). **Introdução da vida útil no projeto das estruturas de concreto NB/2001.** WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. Novembro. São José dos Campos.

ISAIA, G. C., (2001). **Durabilidade do concreto ou das estruturas de concreto. Reflexões sobre o tema.** WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. Novembro. São José dos Campos.

JACOBI, P; GRANDISOLI, E. **Água e sustentabilidade: desafios, perspectivas e soluções.** São Paulo: IEE-USP e Reconnecta, 2017. 1ª Edição.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos.** 3ª ed. São Paulo: ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1995.

KAMIYAMA, H. **Lodo ativado por batelada (LAB): suas vantagens no tratamento de esgotos das comunidades de médio e pequeno porte (Parte1).** DAE. N° 157. São Paulo. 1989.

KAEFER, L. F. **A evolução do concreto armado.** Notas de aula da disciplina “ PEF 5707 – Concepção, Projto e Realização das estruturas: aspectos históricos”, Universidade de São Paulo, São Paulo, dezembro de 1998, 43 p.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573p.

NASCIMENTO, A. R. **Uso de esgoto sanitário tratado em reator batelada sequencial para produção de pasta de cimento e concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Civil. Universidade Federal da Paraíba. 2018.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª Edição. São Paulo: Bookman, 2016.

OLIVEIRA, P. **Influência da intensidade de aeração na formação do floco de lodo ativado e eficiência de remoção de matéria orgânica**. Natal. 2014. 70f: il

ORTIZ, G. **Tratamento de águas residuárias**. Apresentação de Slides, 2013. Disponível em: <[http:// pt.slideshare.net/GiovannaOrtiz/aula-7-lagoas-anaerbias-e-lagoas-aeradas](http://pt.slideshare.net/GiovannaOrtiz/aula-7-lagoas-anaerbias-e-lagoas-aeradas)>. Acesso em: 25 set 2018.

PACHECO, J.; BILESKY, P.; MORAIS, T. R; GRANDO, F.; HELENE, P. **Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto**. Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto, outubro 2014.

PESSARELLO, R. G. **Estudo exploratório quanto ao consumo de água na produção de obras de edifícios: avaliação e fatores influenciadores**. Monografia de MBA em Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios, Universidade de São Paulo, 2008.

REDE NACIONAL DE CAPACITAÇÃO E EXTENSÃO TECNOLÓGICA EM SANEAMENTO AMBIENTAL (ReCESA)/MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Processos de tratamento de esgotos: guia do profissional em treinamento: nível 1**. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). Brasília. 2008. 72 p.

REZENDE, A. **Reúso urbano de água para fins não potáveis no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Federal de Juiz de Fora. 2016.

SANTOS, A. **Pesquisa ressalta presente e futuro do concreto**. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/pesquisa-ressalta-presente-e-futuro-do-concreto/>>. Acesso em: 13 set 2018.

SILVA, J. **Utilização de Esgoto Tratado em Sistema de Lagoas de Estabilização como Água de Amassamento e Cura de Concreto**. Dissertação de Mestrado- UFC. Fortaleza-Ceará,2008.

SILVA, MOEMA RIBAS. **Materiais de construção**. 2ª edição, Editora: Pini, São Paulo, 1991.

SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. **Manual de análises físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias**. Campina Grande, PB, 2001. 266p.

SINDICATO DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO (SINDUSCON)/ AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS/ FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO /. **Manual sobre a conservação e reúso de água em edificações**, São Paulo, 2005, 152p.

TUNDISI, J. G. **Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções**. 2008.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento biológico de águas residuárias – Lagoas de estabilização**. Vol. 3, 2ª Edição ampliada. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002, 196 p.

VON SPERLING, MARCOS. **Princípios básicos do tratamento biológico de águas residuárias – Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Vol. 1, 3ª Edição. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005, 452 p.

**APÊNDICE A - Ensaio Dinâmico para determinar o Módulo de Elasticidade - 1ª  
Amostra - 28 dias**

Ensaio Dinâmico para determinar o Módulo de Elasticidade - 1ª Amostra - 28 dias					
Descrição	Nº	E long (GPa)	± (GPa)	Média (GPa)	Fck (Mpa)
CP1	1	36,67	0,21	21,99	21,33
	2	36,53	0,21		
	3	36,68	0,21		
	4	36,69	0,21		
CP2	1	36,77	0,21	22,06	21,48
	2	36,79	0,21		
	3	36,79	0,21		
	4	36,71	0,21		
CP3	1	36,59	0,21	21,94	21,25
	2	36,54	0,21		
	3	36,55	0,21		
	4	36,59	0,21		
CP4	1	37,52	0,22	22,52	22,37
	2	37,53	0,22		
	3	37,52	0,22		
	4	37,53	0,22		
CP5	1	35,43	0,2	21,26	19,95
	2	35,43	0,2		
	3	35,43	0,2		
	4	35,45	0,2		
CP6	1	35,71	0,21	21,41	20,23
	2	35,67	0,21		
	3	35,67	0,21		
	4	35,68	0,21		
CP7	1	35,99	0,21	21,59	20,57
	2	35,98	0,21		
	3	35,99	0,21		
	4	35,98	0,21		
CP8	1	35,77	0,21	21,44	20,28
	2	35,72	0,21		
	3	35,74	0,21		
	4	35,69	0,21		

**APÊNDICE B - Ensaio Dinâmico para determinar o Módulo de Elasticidade - 2ª  
Amostra - 28 dias**

Ensaio Dinâmico para determinar o Módulo de Elasticidade - 2ª Amostra - 28 dias					
Descrição	Nº	E long (GPa)	± (GPa)	Média (GPa)	Fck (Mpa)
CP1	1	38,85	0,22	23,28	23,93
	2	38,79	0,22		
	3	38,79	0,22		
	4	38,79	0,22		
CP2	1	37,49	0,22	22,51	22,37
	2	37,49	0,22		
	3	37,53	0,22		
	4	37,57	0,22		
CP3	1	39,2	0,23	23,54	24,46
	2	39,26	0,23		
	3	39,25	0,23		
	4	39,23	0,23		
CP4	1	37,3	0,22	22,38	22,11
	2	37,26	0,22		
	3	37,31	0,22		
	4	37,35	0,22		
CP5	1	36,96	0,21	22,19	21,73
	2	37,01	0,21		
	3	36,98	0,21		
	4	36,98	0,21		
CP6	1	37,58	0,22	22,53	22,40
	2	37,55	0,22		
	3	37,53	0,22		
	4	37,54	0,22		
CP7	1	37,34	0,22	22,40	22,15
	2	37,32	0,22		
	3	37,31	0,22		
	4	37,37	0,22		
CP8	1	37,6	0,22	22,57	22,48
	2	37,62	0,22		
	3	37,62	0,22		
	4	37,62	0,22		

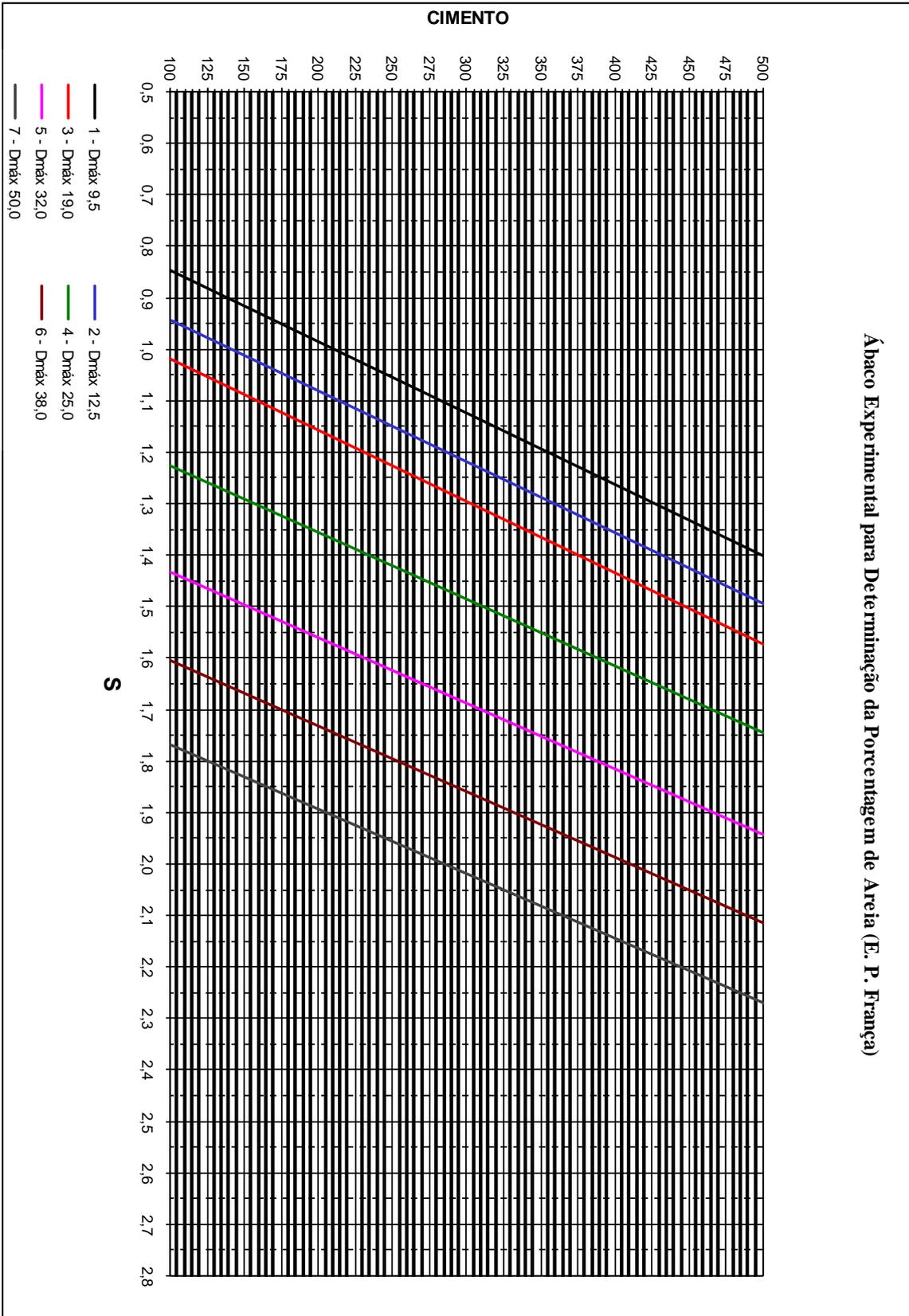
**APÊNDICE C - Ensaio Dinâmico para determinar o Módulo de Elasticidade - 3ª****Amostra - 28 dias**

<b>Ensaio Dinâmico para determinar o Módulo de Elasticidade - 3ª Amostra - 28 dias</b>					
<b>Descrição</b>	<b>Nº</b>	<b>E long (GPa)</b>	<b>± (GPa)</b>	<b>Média (GPa)</b>	<b>Fck (Mpa)</b>
CP1	1	38,84	0,22	23,30	23,96
	2	38,84	0,22		
	3	38,81	0,22		
	4	38,84	0,22		
CP2	1	38,85	0,22	23,33	24,02
	2	38,88	0,22		
	3	38,9	0,22		
	4	38,91	0,22		
CP3	1	37,78	0,22	22,67	22,67
	2	37,77	0,22		
	3	37,77	0,22		
	4	37,78	0,22		
CP4	1	37,99	0,22	22,78	22,90
	2	37,97	0,22		
	3	37,88	0,22		
	4	38,03	0,22		
CP5	1	39,04	0,23	23,43	24,22
	2	39,02	0,23		
	3	39,05	0,23		
	4	39,06	0,23		
CP6	1	38,92	0,22	23,36	24,09
	2	38,96	0,23		
	3	38,94	0,23		
	4	38,94	0,23		
CP7	1	39,81	0,23	23,91	25,23
	2	39,84	0,23		
	3	39,83	0,23		
	4	39,9	0,23		
CP8	1	38,25	0,22	22,98	23,30
	2	38,29	0,22		
	3	38,32	0,22		
	4	38,31	0,22		

**APÊNDICE D - Ensaio Dinâmico para determinar o Módulo de Elasticidade – Amostra de Água Potável - 28 dias**

<b>Ensaio Dinâmico para determinar o Módulo de Elasticidade - Amostra de Água Potável - 28 dias</b>					
<b>Descrição</b>	<b>Nº</b>	<b>E long (GPa)</b>	<b>± (GPa)</b>	<b>Média (GPa)</b>	<b>Fck (Mpa)</b>
CP1	1	40,64	0,23	24,39	26,26
	2	40,64	0,23		
	3	40,69	0,24		
	4	40,64	0,23		
CP2	1	41,5	0,24	24,92	27,40
	2	41,45	0,24		
	3	41,65	0,24		
	4	41,51	0,24		
CP3	1	39,84	0,23	23,91	25,23
	2	39,79	0,23		
	3	39,88	0,23		
	4	39,88	0,23		
CP4	1	40,64	0,23	24,39	26,26
	2	40,7	0,24		
	3	40,65	0,23		
	4	40,64	0,23		
CP5	1	40,17	0,23	24,09	25,62
	2	40,15	0,23		
	3	40,15	0,23		
	4	40,16	0,23		
CP6	1	41,9	0,24	25,13	27,88
	2	41,88	0,24		
	3	41,91	0,24		
	4	41,86	0,24		
CP7	1	39,73	0,23	23,80	25,00
	2	39,64	0,23		
	3	39,64	0,23		
	4	39,65	0,23		
CP8	1	40,99	0,24	24,61	26,74
	2	41,01	0,24		
	3	41,03	0,24		
	4	41,06	0,24		

ANEXO A - Ábaco experimental para determinação da proporção de agregados.



FONTE: ABCP/ACI apud NASCIMENTO (2018).

## ANEXO B - Tabela de distribuição T Student

gl	Área na cauda superior								
	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0005
1	1,000	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	127,3	318,3	636,6
2	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,09	22,33	31,60
3	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,21	12,92
4	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,894	6,869
6	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781
10	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587
11	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497	4,025	4,437
12	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428	3,930	4,318
13	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372	3,852	4,221
14	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326	3,787	4,140
15	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286	3,733	4,073
16	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,252	3,686	4,015
17	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222	3,646	3,965
18	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197	3,610	3,922
19	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174	3,579	3,883
20	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,153	3,552	3,850
21	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,135	3,527	3,819
22	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,119	3,505	3,792
23	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,104	3,485	3,768
24	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,091	3,467	3,745
25	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,078	3,450	3,725
26	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,067	3,435	3,707
27	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,057	3,421	3,689
28	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,047	3,408	3,674
29	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,038	3,396	3,660
30	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,030	3,385	3,646
35	0,682	1,306	1,690	2,030	2,438	2,724	2,996	3,340	3,591
40	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	2,971	3,307	3,551
45	0,680	1,301	1,679	2,014	2,412	2,690	2,952	3,281	3,520
50	0,679	1,299	1,676	2,009	2,403	2,678	2,937	3,261	3,496
<b>z</b>	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	2,807	3,090	3,291

**Nota:** A coluna em destaque é a mais usada.

FONTE: BARBETTA (2010) apud NASCIMENTO (2018).