



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

ANA RACHEL MELO NASCIMENTO

**USO DE ESGOTO SANITÁRIO TRATADO EM REATOR BATELADA
SEQUENCIAL PARA PRODUÇÃO DE PASTA DE CIMENTO E CONCRETO**

JOÃO PESSOA

2018

ANA RACHEL MELO NASCIMENTO

**USO DE ESGOTO SANITÁRIO TRATADO EM REATOR BATELADA
SEQUENCIAL 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^o. Dr. Leonardo Vieira Soares

JOÃO PESSOA

2018

N244u Nascimento, Ana Rachel Melo.

Uso de esgoto sanitário tratado em Reator de Batelada Sequencial na produção de pasta de cimento e concreto./ Ana Rachel Melo Nascimento. – João Pessoa, 2018.

63f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Vieira Soares.

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Reúso de águas 2. Reator de Batelada Sequencial (SRB) 3. Produção de concreto I. Título.

BS/CT/UFPB

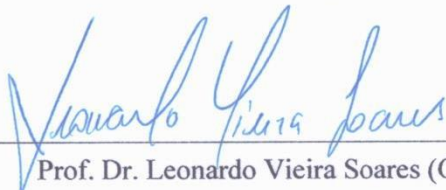
CDU: 2.ed. 624(043.2)

FOLHA DE JULGAMENTO

ANA RACHEL MELO NASCIMENTO

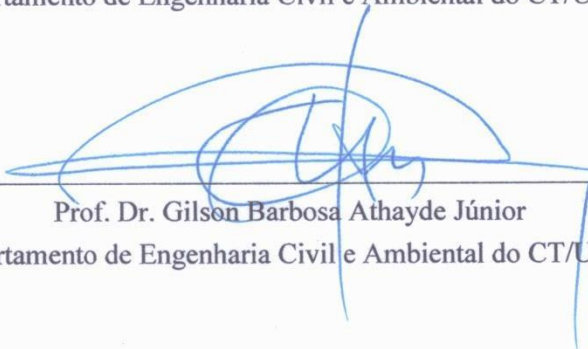
**USO DE ESGOTO SANITÁRIO TRATADO EM REATOR BATELADA
SEQUENCIAL PARA PRODUÇÃO DE PASTA DE CIMENTO E CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso defendido em 14 de junho de 2018.




Prof. Dr. Leonardo Vieira Soares (Orientador)
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



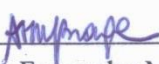
Prof. Dr. Gilson Barbosa Athayde Júnior
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Prof. Dr. Givanildo Azeredo
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO



Prof.^a Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga
Matrícula Siape: 1668619
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

*Dedico esse trabalho à
minha família, por sempre
acreditar e investir em mim.*

AGRADECIMENTOS

Ao longo do curso de Engenharia Civil, deparei-me com diversos desafios e percalços os quais só consegui superar devido à companhia e ao suporte de pessoas muito queridas. A entrega desse trabalho conclui uma etapa muito especial da minha vida, e por isso me sinto feliz, realizada e muito grata.

Gostaria de agradecer a contribuição dos meus pais, Ana Izabel e Gustavo, assim como do meu irmão, Eduardo, e avós, Antônio e Raquel, pelo apoio e incentivo a mim transmitidos. Agradeço à toda minha família que nunca mediu esforços para me proporcionar uma boa formação acadêmica e por sempre acreditar em mim.

Ao professor Leonardo Soares, agradeço-lhe pela orientação neste trabalho, assim como pelo apoio, compreensão e incentivo a fim de sempre obter o meu melhor desempenho, tornando-se uma pessoa fundamental em minha formação acadêmica.

Aos meus amigos da graduação, por sempre compartilharem os fardos ao longo desta jornada e por tornarem mais leves os momentos difíceis. Aos meus amigos de ensino médio pelo incentivo e disposição para me escutar sobre as dificuldades da vida. Às pessoas maravilhosas que adentraram em minha vida neste último ano, por todo carinho, paciência e apoio.

Aos meus professores, por se dedicarem a uma profissão tão nobre, possibilitando a mais adequada formação no ramo. Agradeço, ainda, aos professores que compõem a banca, Gilson e Givanildo, por terem aceitado o convite de avaliar o presente trabalho, me sinto honrada em poder contar com a opinião acadêmica de dois profissionais tão competentes.

Por fim, gostaria de agradecer também à equipe do projeto BRAMAR pelo uso de suas instalações experimentais, tornando possível a realização desta pesquisa. Não posso deixar de enaltecer a equipe de técnicos do LABEME e LABSAN que não só me auxiliaram com os procedimentos laboratoriais, mas também ajudaram no meu crescimento acadêmico com indicações e dicas sempre com um sorriso estampado no rosto.

RESUMO

A construção civil é um dos setores da indústria em que mais se consome água potável e, diante da crescente escassez da mesma, a utilização de efluentes de estações de tratamento de esgotos sanitário se encontra como uma fonte alternativa para técnicas da construção civil que não necessitam de água potável. Este trabalho se propõe, então, a analisar a viabilidade técnica do uso de efluente de esgoto doméstico tratado em Reator SBR (Reator em Batelada Sequencial) localizado nas instalações experimentais do Projeto BRAMAR 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, na produção de pasta de cimento e concreto. Inicialmente, os materiais componentes do concreto foram definidos e caracterizados para determinação do melhor traço. Em seguida, foram coletadas, em dias distintos, três amostras de efluente sobre as quais foram realizadas análises químicas indicadas pela Norma Mercosul 137 referente às águas utilizadas para amassamento e cura. Observou-se os níveis máximos dos parâmetros de pH, ferro totais, sólidos totais, cloretos e sulfatos solúveis das amostras. Posteriormente, para cada amostra de efluente tratado foram moldados oito corpos de prova. Com o intuito de comparação, foram produzidos outros oito corpos de prova com a água abastecida pela CAGEPA, totalizando 32 elementos. Após as moldagens e as devidas curas, foram analisadas o tempo de pega e resistência à compressão aos 7 (sete) e 28 dias de todos os corpos de prova. Por fim, os resultados oriundos da análise química do efluente, bem como os resultados dos ensaios de tempo de pega e resistência estiveram dentro dos limites e tolerâncias exigidas pelas normas NM 137, permitindo a utilização de água de reúso na produção de pasta de cimento e do concreto.

Palavras-chave: Reúso de água, Reator de Batelada Sequencial, Produção de Concreto.

ABSTRACT

The civil construction is one of the sectors of industry in which more potable water is consumed and, given water's increasing scarcity, the use of effluents from sewage treatment plants is an alternative source for construction techniques that do not require potable water. Therefore, this work is analyzing the technical feasibility of the use of domestic sewage treated effluent in SBR (Sequencing Batch Reactor), which is located at the experimental facilities of the BRAMAR Project at the Mangabeira Sewage Treatment Plant, managed by CAGEPA (Water resources and Sewers Company of Paraíba), located in the municipality of João Pessoa - PB, with the purpose of producing cement paste and concrete. Initially, the components of concrete were defined and characterized for the determination of the best material proportion. Later, three specimens of the SBR effluent were collected, in distinct days, and chemical analyzed according to the standard NM 137. The maximum levels of pH, total iron, total solids, chlorides and soluble sulfates were verified. Then, for each specimen of treated effluent, four pairs of cylindrical test samples were cast. To make a result comparison, others four pairs were cast with water supplied by CAGEPA, totalizing 32 elements. After the moldings, the setting time and compressive strength at 7 and 28 days for all the cylindrical samples were analyzed. Thus, the results from the chemical analysis of the effluents were suitable for its use, as well as the results of the setting time and resistance tests were within the limits and tolerances required by NM 137, allowing the use of reuse water/effluent in the production of cement paste and concrete.

Keywords: Water Reuse, Sequencing Batch Reactor, Concrete production.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos físicos da água para amassamento e cura.....	26
Tabela 2- Requisitos químicos da água para amassamento e cura.	27
Tabela 3 - Aberturas nominais das peneiras da série normal e intermediária.	29
Tabela 4 - Curva para determinação do consumo de água / m ³	40
Tabela 5 - Resultado das análises físico-químicas do efluente de esgoto.	45
Tabela 6 - Resultado das análises de Sólidos Totais do efluente de esgoto.	45
Tabela 7 - Composição granulométrica do agregado miúdo.	47
Tabela 8 - Composição granulométrica do agregado graúdo.	47
Tabela 9 - Massa específica e unitária dos agregados utilizados.	48
Tabela 10 - Dados para determinação de traço de concreto.	49
Tabela 11 - Determinações de tempo inicial de pega.	50
Tabela 12- Determinações de tempo final de pega.....	50
Tabela 13- Determinações de resistência à compressão aos 07 dias.	52
Tabela 14 - Análise estatística da resistência à compressão aos 7 dias.	53
Tabela 15 - Determinações de resistência à compressão aos 28 dias.....	53
Tabela 16 - Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias.	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema de tratamento convencional de esgoto.	17
Figura 2 - Esquema do ciclo operacional de um Reator SBR.	19
Figura 3- Componentes do concreto: Cimento, areia e brita respectivamente.	22
Figura 4 - Esquema de fabricação de cimento Portland.	24
Figura 5 - Curva de Distribuição Normal para definição da resistência característica do concreto.	30
Figura 6 - Instalação do Reator SBR na ETE Mangabeira.	31
Figura 7 - Reator de Bateladas Sequencial na Instalação Experimental do BRAMAR.	32
Figura 8 - Espectrofotômetro e material para análise do teor de Ferro.	35
Figura 9 - Agitador magnético e material para análise do teor de sulfatos.	36
Figura 10 - Desecador e Filtrador para análise do teor de Sólidos.	37
Figura 11 - Aparelho de Vicat utilizado para determinação de tempo de pega.	38
Figura 12 - Prensa hidráulica utilizada na compressão axial dos corpos de prova.	43
Figura 13 - Tanque de cura preenchido com efluente tratado.	51

LISTA DE FÓRMULAS

Fórmula 1 – Determinação da concentração de Cloretos	34
Fórmula 2 – Determinação do teor de Sólidos Totais	37
Fórmula 3 – Determinação do teor de Sólidos Voláteis	38
Fórmula 4– Determinação do teor de Sólidos Fixos	38
Fórmula 5 – Determinação da Resistência média aos j dias.....	39
Fórmula 6 – Relação entre resistência média e relação água/cimento	40
Fórmula 7 – Cálculo do K teórico	40
Fórmula 8 – Determinação do consumo de cimento	41
Fórmula 9 – Proporção de areia.....	41
Fórmula 10 – Proporção de brita	41
Fórmula 11 – Relação entre os volumes dos componentes do concreto	41
Fórmula 12 – Relação entre massa dos componentes do concreto.....	42

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVO	15
2.1 Objetivos Específicos	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Esgoto sanitário.....	16
3.2 Tratamento de esgotos	17
3.2.1 Reator Batelada Sequencial (SBR).....	18
3.3 Reúso	19
3.3.1 Tipos de reúso.....	20
3.3.2 Reúso na construção civil.....	21
3.4 Concreto.....	21
3.4.1 Componentes	23
3.4.1.1 Aglomerante – cimento Portland.....	23
3.4.1.2 Agregados.....	25
3.4.1.3 Água	26
3.5 Dosagem do concreto.....	28
3.5.1 Parâmetros e termos utilizados na dosagem	28
3.5.1.1 Massa específica e unitária.....	28
3.5.1.2 Diâmetro Máximo Característico e Módulo de Finura	29
3.5.1.3 - Resistência de dosagem	29
3.5.1.4 Tempo de início e fim de pega.....	30
3.5.1.5 Cura do concreto	30
4. METODOLOGIA.....	31
4.1 Área de estudo	31
4.2 O Reator de Bateladas Sequencial (SBR).....	31
4.3 Amostragem.....	33
4.4 Ensaios de caracterização dos agregados graúdo e miúdo.....	33
4.5 Ensaios de caracterização do efluente.....	33
4.6 Ensaio de caracterização da pasta de cimento	38
4.7 Dosagem do concreto.....	39
4.7.1 Resistência de dosagem	39

4.7.2	Fator água/cimento	39
4.7.3	Consumo de água/m ³ de concreto.....	40
4.7.4	Consumo de cimento/m ³ de concreto	41
4.7.5	Proporção dos agregados	41
4.7.6	Consumo de agregados/m ³ de cimento.....	41
4.7.7	Traço em peso (TUP)	42
4.8	Ensaio de caracterização do concreto produzido	42
4.9	Análise estatística dos resultados obtidos	44
5.	RESULTADOS E ANÁLISES	45
5.1	Caracterização do efluente.....	45
5.1.1	Potencial de Hidrogênio à 25°C	45
5.1.2	Cloretos e Sulfatos solúveis.....	46
5.1.3	Ferro	46
5.1.4	Sólidos	46
5.2	Caracterização dos agregados graúdo e miúdo	47
5.3	Dosagem do concreto.....	48
5.3.1	Ajuste no traço obtido	50
5.4	Análise do tempo de pega da pasta de cimento produzida	50
5.5	Análise da resistência à compressão do concreto produzido	51
5.5.1	Resistência à compressão axial aos 07 dias.....	52
5.5.2	Resistência à compressão aos 28 dias.....	53
6.	CONCLUSÕES.....	55
7.	RECOMENDAÇÕES.....	56
8.	REFERÊNCIAS	57
	ANEXO A - Ábaco experimental para determinação da proporção de agregados.....	61
	ANEXO B - Tabela de distribuição T <i>Student</i>	62

1. INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos são de grande influência no progresso da sociedade e em diversas atividades econômicas. Estes, considerados como essenciais à vida, estão intimamente vinculados à indústria, agricultura, transporte e tantos outros setores relacionados ao fornecimento de produtos e serviços (JACOBI; GRANDISOLI, 2017). O que os torna, além de relevante fisiologicamente, um importantíssimo fator de produção no desenvolvimento econômico segundo Goellner e Santin (2013).

Apesar da importância desse recurso, Florêncio *et al* (2006) apontam que a dinâmica atual de intensa e desorganizada urbanização, em conjunto com a constante poluição e degradação de mananciais e lençóis freáticos (principais fontes de água para abastecimento), vem reduzindo cada vez mais a disponibilidade de água doce no mundo. As projeções futuras não são atraentes de modo que, segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), em algumas décadas, a água doce será o recurso natural mais escasso e disputado pela maioria dos países (ANA, 2005).

Baseado futuro quadro de crise hídrica, torna-se imprescindível o desenvolvimento e aplicação de pesquisas sobre métodos e sistemas alternativos que restituam o equilíbrio entre oferta e demanda de água, garantindo a sustentabilidade no desenvolvimento econômico e social. É, seguindo essa linha de raciocínio, que o reúso é apontado como uma das principais práticas para gestão de recursos hídricos e para redução da poluição (SINDUSCON/SP, 2005).

Sabe-se que a indústria da construção civil consome quantidades significativas de água em todas suas atividades, cerca de 16% de toda a água potável consumida no país (ANA, 2012). Dentre essas atividades, é possível destacar a produção de concreto como atividade mais consumidora da água. Em termos numéricos, o consumo de concreto por ano é estimado de 11 bilhões de toneladas, o que resulta em uma demanda média de 1,9 tonelada por habitante por ano (PEDROSO, L. 2009 *apud* FHIP). Um índice elevado que, ao ser relacionado com o gasto médio de 180 litros de água por m³ de concreto (PESSARELLO, 2008), resulta em 400 mil litros de água por pessoa por ano.

Baseado no elevado gasto de água na produção de concreto e nas projeções de crise hídrica, torna-se de grande valia o desenvolvimento de alternativas que visem a redução do consumo desse insumo. A substituição de fontes é uma técnica interessante para a

construção civil, pois sugere a substituição de água doce por águas com qualidade inferior, como efluentes de esgotos sanitários, em atividades menos restritivas desde que haja conformidade com as normas vigentes (FLORÊNCIO *et al*, 2006).

2. OBJETIVO

Analisar a viabilidade técnica de utilizar o efluente de esgoto sanitário tratado em Reator de Batelada Sequencial (água de reúso) na construção civil, como água de amassamento e cura do concreto, de forma a estimular o uso de fontes alternativas de água.

2.1 Objetivos Específicos

- Determinar o traço para preparo de concreto de 25 MPa a partir do material adquirido;
- Determinar e comparar as características da água de reúso aos padrões físico-químicos descritos na Norma Mercosul 137 – sólidos totais, sulfato, ferro total e cloretos;
- Determinar e comparar a resistência à compressão aos 7 e 28 dias dos corpos de prova preparados com água de reúso e água abastecida;
- Determinar e compara o tempo de início e fim de pega exigidos das pastas de cimento preparadas com água de reúso e água abastecida.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta os aspectos teóricos do projeto conduzido. O esgoto sanitário e seu tratamento; as definições e requisitos para as práticas de reuso; e por fim, os componentes e características do concreto são os tópicos inclusos nesta revisão bibliográfica.

3.1 Esgoto sanitário

A água destinada ao abastecimento de uma residência é comumente utilizada para a higiene e as necessidades fisiológicas humanas. Estima-se que cerca de 80% desse volume de água consumido é transformado em esgoto e recebe, então, a definição de esgoto doméstico. O esgoto doméstico juntamente com águas de chuva e despejos industriais são recolhidos pelo sistema de esgotamento sanitário e destinados a Estações de Tratamento de Efluentes (NBR 9648).

O efluente resultante, ou água residuária, é composto basicamente por água, cerca de 99,9% de sua massa, e por sólidos, 0,1%. Uma parcela desses sólidos é dissolvida (sais) e outra insolúvel em água (gorduras e óleos). Também é possível encontrar uma grande quantidade de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, e microrganismos tais como vírus, bactérias, vermes e protozoários (VON SPERLING, 2005).

De acordo com von Sperling (2002), a correta disposição e tratamento do esgotamento sanitário é um importante fator na conservação do meio ambiente e na preservação da saúde pública. A descarga inadequada de esgoto se configura como um quadro de poluição visto que há a degradação da qualidade ambiental e propagação de diversas doenças como hepatite e poliomielite, cólera e diarreia.

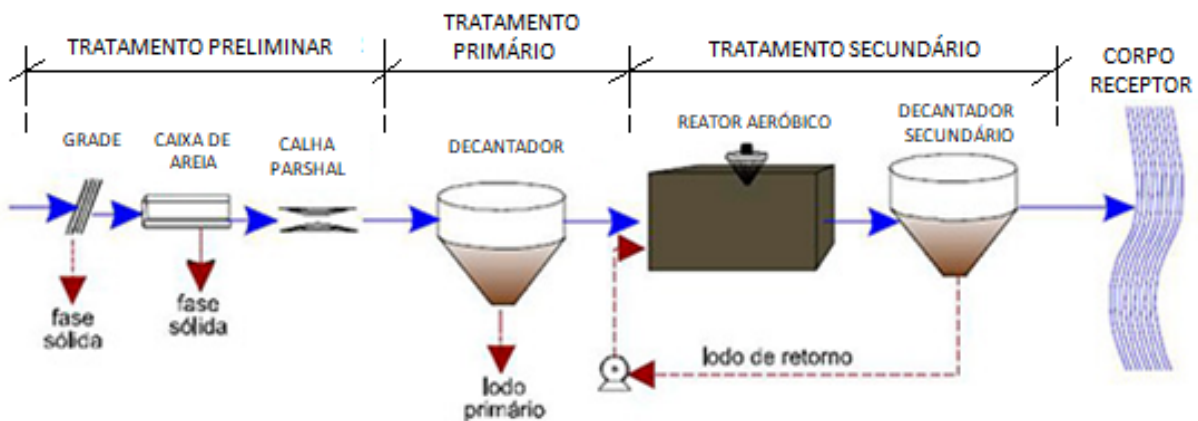
Vale ressaltar que o despejo inadequado de efluente em corpos de água merece destaque, pois pode torná-lo inóspito a vida aquática. Devido à grande carga nutrientes presente no esgoto, pode ocorrer a proliferação plantas aquáticas (eutrofização) que resulta em problemas estéticos e condições anaeróbicas no fundo do corpo de água. Outro problema se dá pela existência de grandes proporções de matéria orgânica no efluente que, ao ser lançado de maneira incorreta, pode modificar o equilíbrio do rio. Este, por sua vez, tenta restaura-lo, resultando no consumo de oxigênio dissolvido e em condições desfavoráveis para vida marinha.

3.2 Tratamento de esgotos

Em frente à necessidade de tratar e lançar o efluente de esgoto corretamente, diversas técnicas e mecanismos de tratamento foram elaboradas com a finalidade de fazê-lo atingir o padrão de qualidade determinado pela legislação ambiental em vigor de cada país. No Brasil, o lançamento de efluente de esgoto deve atender exigências dispostas na resolução CONAMA N°430/2011 do Ministério do Meio Ambiente.

O tratamento convencional do esgoto sanitário, como ilustrado na Figura 1, consiste em processos físicos, biológicos e químicos cuja a finalidade é a remoção de sólidos, matéria orgânica, macronutrientes e agentes patogênicos do mesmo.

Figura 1- Esquema de tratamento convencional de esgoto.



FONTE: Adaptado de Von Sperling (2002).

Von Sperling (2005) discrimina os níveis do tratamento convencional de águas residuárias da seguinte forma:

- **Tratamento preliminar:** Objetiva a remoção de sólidos grosseiros como vidros, plásticos, pedras, areias e galhos por meio de grades e desarenadores (mecanismos físicos).
- **Tratamento primário:** Objetiva a remoção de sólidos sedimentáveis por meio de mecanismos físicos como decantadores. Uma parcela da matéria orgânica também é removida visto que podem estar atreladas aos sólidos.
- **Tratamento secundário:** Objetiva a degradação da matéria orgânica e alguns nutrientes por meio de mecanismos biológicos semelhantes ao processo de autodepuração dos rios. Técnicas como lagoas aeróbicas e lodos ativados são as mais empregadas.

- **Tratamento terciário:** Objetiva a remoção de poluentes específicos como metais pesados, micronutrientes (nitrogênio, fósforo...) e patogênicos (bactérias, fungos). Normalmente é empregado quando se deseja que o efluente tenha qualidade superior.

3.2.1 Reator Batelada Sequencial (SBR)

O sistema conhecido como Reator de Batelada Sequencial, do inglês *Sequencing Batch Reactors* (SBR), consiste no sistema de tratamento biológico de esgoto em que colônias de microrganismos degradem a matéria orgânica presente no mesmo em um processo aeróbio. Essas colônias de microrganismos são constituídas essencialmente por bactérias e protozoários, e recebem a denominação de lodo ativo, ativado ou biológico (RECESA, 2008).

Segundo Kamiyama (1997) lodo ativado é “o processo biológico mais difundido no mundo no tratamento de esgotos sanitários”. Ele se destaca entre os outros métodos pela elevada eficiência na remoção de matéria orgânica e nitrogenada, além de ocupar pouca área física. Contudo, esse sistema apresenta alguns pontos negativos tais como a necessidade de mão de obra bem qualificada para operação e alto custo com a implantação e no consumo de energia elétrica, visto que a operação possui elevado grau de mecanização e automação.

O ciclo operacional de um Reator SBR se inicia com a admissão do esgoto na câmara do reator até um nível pré-definido. Nessa mesma câmara, encontra-se o lodo biológico que se mistura com o esgoto encaminhado para o tratamento. Quando o volume máximo no reator é atingido, a alimentação de efluente é interrompida e o processo de aeração se inicia. Nessa fase, os microrganismos do lodo se aglutinam com a matéria orgânica, formando flocos macroscópicos. A biomassa então passa a consumir o substrato às custas do oxigênio injetado, e produz água limpa, gás carbônico e energia. O gás carbônico é liberado para atmosfera, a energia é utilizada pela biomassa para síntese de novas células e a água é o efluente tratado almejado (OLIVEIRA, 2014).

Após o tempo de aeração determinado, o material permanece em repouso para que os flocos de biomassa possam precipitar. Ao fim do processo de decantação dos flocos, dá-se seguimento a drenagem do sobrenadante líquido que corresponde à água clara e limpa. Kamiyama (1997) considera essa etapa de drenagem de água tratada como o fim de um ciclo (Figura 2) podendo ou não incluir o descarte do lodo em excesso.

Figura 2 - Esquema do ciclo operacional de um Reator SBR.



FONTE: Adaptado de FRAGOSO (2017).

Decorrente da constante multiplicação do lodo no processo de degradação de matéria orgânica, uma parcela da biomassa disposta no reator deve ser regularmente descartada. A quantidade ou a frequência desse descarte depende da idade do lodo, do volume do reator, e outros parâmetros adotados no projeto (KAMIYAMA, 1997).

Vale ressaltar que o Reator SBR trata o efluente de forma intermitente, isto é, em bateladas ou descontinuamente. A quantidade de bateladas varia de acordo com o dimensionamento e com as vazões recebidas de esgoto. Entretanto, existem outros tipos de reatores em que é comum o tratamento por lodos ativos de forma ininterrupta. No tratamento contínuo, o processo de aeração e o de decantação ocorrem em unidades distintas. O lodo reage com a matéria orgânica no tanque de aeração, o conjunto é encaminhado para o decantador secundário e, após a água limpa estar separada, ele é então reciclado ao ser redirecionado para a unidade inicial. Estudos realizados por Kamiyama (1997) apontam que em comunidades de pequeno e médio porte, devido à grande variação na vazão de esgoto, o sistema em batelada é o mais eficiente, enquanto que o contínuo é mais interessante no caso de comunidades de grande porte.

3.3 Reúso

O reúso, base do presente trabalho, fundamenta-se no conceito de “substituição de fontes”. Ou seja, a substituição de fontes comuns de água potável por fontes alternativas com águas de menor qualidade para uso em atividades menos restritivas. Essa prática recebe

destaque uma vez que reduz o lançamento de esgotos em corpos receptores, reduzindo impactos ambientais; alivia a demanda e preserva a oferta de água para o abastecimento por exemplo (FLORENCIO *et al*, 2006).

Como fontes alternativas de água, Florêncio *et al* (2006) indicam “aquelas que não estão sob concessão de órgãos públicos ou que não sofrem cobrança pelo uso ou, ainda, que fornecem água com composição diferente da água potável fornecida pelas concessionárias”. Os autores ainda elencam as águas pluviais, de drenagem e águas cinzas como algumas fontes água tidas como satisfatórias para o aproveitamento.

O reúso de água pode ser praticado no meio urbano e industrial, abrangendo usos de refrigeração, rega de jardins, descargas sanitárias, lavagem de pavimentos e veículos. Adicionalmente, pode-se reutilizar este efluente na agricultura com a fertirrigação de plantas alimentícias, assim como na aquicultura com a produção de peixes e plantas aquáticas para consumo alimentar. Outra prática estudada para o reúso se encontra em sua utilização na recarga de aquíferos subterrâneos e na manutenção de vazões de rios em épocas de estiagem (WESTERHOFF, 1984 *apud* REZENDE, 2016).

3.3.1 Tipos de reúso

Além da diversidade de origens para a água de reúso, dependendo da forma de captação e o uso da água o reúso, esta pode ser classificada de diversas formas. A CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (2018), aponta os tipos de reúso de água da seguinte forma:

- **Reúso indireto não-planejado da água:** Corresponde a reutilização do efluente diluído, por ser despejado no meio ambiente, mas de maneira não intencional e não controlada.
- **Reúso indireto planejado da água:** Refere-se à reutilização controlada do efluente diluído despejado de forma planejada no meio ambiente.
- **Reúso direto planejado das águas:** Diz respeito aos efluentes que, depois de tratados, são direcionados diretamente de seu ponto de descarga até o local do reúso.
- **Reciclagem de água:** Representa um caso particular do reúso direto planejado em que há o reúso interno da água, antes de sua descarga em um sistema geral de tratamento ou outro local de disposição. Funciona como uma fonte suplementar de abastecimento do uso original.

3.3.2 Reúso na construção civil

Segundo o SINDUSCON/SP (2005), águas de reúso podem ser largamente utilizadas em edifícios. Atividades vão desde o empreendimento pronto com a irrigação de jardins e lavagem de pisos, até a construção do mesmo, na preparação de argamassas, concretos, controle de poeira e compactação do solo.

No Brasil, a prática de reúso na confecção do concreto ainda não é frequente, mas estudos acerca do tema já vem sendo elaborados. Como exemplo, é possível citar o trabalho de Silva (2008) que estudou o efluente de lagoas de estabilização como água de amassamento e cura de concreto, e concluiu que este efluente estava dentro dos parâmetros discriminados pela norma NM137/97 para uso em concreto.

3.4 Concreto

A necessidade de montar abrigos e moradias fez o homem desenvolver materiais e tecnologias construtivas cada vez mais eficientes ao longo dos anos. O concreto e seu processo de fabricação é um exemplo de material que mais sofreu avanços e hoje, encontra-se como o mais utilizado na construção civil (METHA; MONTEIRO, 2000).

O desenvolvimento desse material começou há muito tempo. Existem vestígios de obras humanas feitas com materiais de função e composição semelhantes ao do concreto que datam idades próximas a 3000 a. C. Segundo Kaefer (1998) é possível ainda admitir que os primeiros cimentos e concretos foram fabricados pela própria natureza ao considerar as rochas sedimentares como concretos naturais.

Em idades mais antigas, civilizações da Mesopotâmia substituíam elementos básicos da construção na época, pedra e madeira, por tijolos barro. Na mesma linha de raciocínio e percebendo a necessidade de assentar melhor os tijolos, a civilização egípcia preparava argamassas de gipsita e cal na construção de suas pirâmides. Posteriormente, com a necessidade de maior estabilidade e impermeabilidade das estruturas o império romano erguia muros e construía fundações de concreto que possibilitavam o contato com a água. Cada civilização criava ou aprimorava técnicas para que suas construções se adequassem as suas próprias necessidades. O concreto passou por algumas modificações nos anos seguintes, mas foi a partir do século XVIII que inovações significativas surgiram como a criação dos cimentos hidráulicos (KAEFER, 1998).

Os materiais que compõem o concreto sofreram diversas alterações até chegar na composição e proporção normatizada dos dias atuais. Antigamente, por exemplo, o império romano utilizava de leite, gordura vegetal, ou sangue como aditivo incorporador de ar na mistura (KAEFER, 1998). Já na atualidade, segundo a superintendência do CB-18 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o concreto é definido como “a mistura homogênea de cimento Portland, agregados miúdos e graúdos, com ou sem a incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos e adições), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento” (Figura 3).

Figura 3- Componentes do concreto: Cimento, areia e brita respectivamente.



FONTE: BASTOS (2004).

Após passar por diversos aprimoramentos e estudos, o concreto hoje é o material de maior utilização na construção civil e o mais consumido pelo homem, com exceção apenas da água (BRUNAUER; COPELAND, 1964 *apud* METHA; MONTEIRO, 1994). No setor da construção civil, o concreto recebe esse destaque em relação a outros materiais de resistências superiores, como a do aço por exemplo, deve-se pela sua propriedade de ser impermeável quando endurecido, pela possibilidade de criar estruturas de diversas formas, e seu baixo custo associado (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O concreto, após o endurecimento, é um material impermeável capaz de formar estruturas aptas a estar em contato contínuo com grandes quantidades de água, como barragens e revestimentos de canais de água. Outros elementos estruturais também expostos à umidade, tais como sapatas, estacas, telhados e muros podem ser executados uma vez que a durabilidade em frente a águas agressivas também é satisfatória.

A segunda característica marcante do concreto é sua flexibilidade de formas. Elementos de diversos tamanhos e formas podem ser produzidos com concreto uma vez que, no estado fresco, o mesmo possui consistência plástica, maleável o suficiente para adentrar e preencher fôrmas pré-fabricadas de diversas geometrias.

Outra particularidade de destaque é a fácil disponibilidade do material constituinte. Areia, brita e água são materiais acessíveis e de baixo custo associado. Vale salientar que o concreto apresenta outras características interessantes no meio da construção civil como a não necessidade de tratamento superficial como outros materiais, o aumento da resistência com o decorrer do tempo e a resistência ao fogo.

3.4.1 Componentes

Como explanado anteriormente, concreto é composto basicamente por cimento Portland, água, agregados miúdos e graúdos. Essa seção aborda algumas das principais características de cada material.

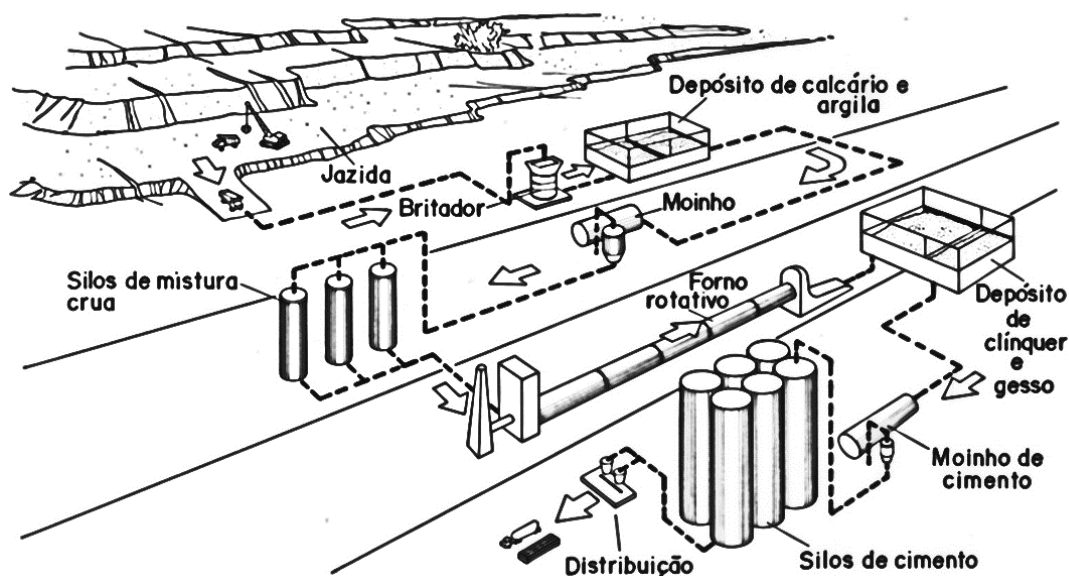
3.4.1.1 Aglomerante – cimento Portland

O cimento moderno, conhecido como cimento Portland, foi patenteado em 1824 por Joseph Aspin, um construtor da cidade de Leeds - Inglaterra, e se trata de um material seco e fino que desenvolve propriedades aglomerantes como resultado da hidratação de seus minerais, sendo então classificado como um aglomerante hidráulico (BROOKS; NEVILLE, 2013).

A fabricação do Cimento Portland comum se dá pela pulverização do clínquer com sulfato de cálcio (CaSO_4) encontrado na gipsita. O clínquer é um material de 5 a 25 mm de diâmetro sintetizado a partir da mistura de cálcio encontrado na pedra calcária com argilas, principal fonte de sílica e alumina. Essa mistura de calcário com argilas passa por processo de moagem em moinhos de bola e por queima a temperaturas de 1450°C em fornos rotativos para então resultar no material presente no cimento como representado na Figura 4 (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Os quatro principais constituintes do cimento Portland, resultantes dos processos descritos anteriormente, são os silicatos de cálcio: C3S (silicato tricálcico – $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) e C2S (silicato dicálcico – $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$); os aluminatos de cálcio: C3A (aluminato tricálcico – $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) e o C4AF (ferroaluminato de cálcio – $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$). Existe também a presença de gipsita adicionada no final do processo de fabricação com a função inibir a tendência à pega instantânea ocasionada alta reatividade do C3A.

Figura 4 - Esquema de fabricação de cimento Portland.



Fonte: ERSHC (2013).

Conforme a ABCP (2002), existem 8 (oito) tipos de cimento Portland normatizados e nomeados a partir da sigla CP seguido por algarismos romanos e árabes. O prefixo CP se refere ao material Cimento Portland, os algarismos romanos I a IV ao tipo de adições e por fim, os números 25, 32 e 40 as resistências à compressão aos 28 dias expresso em MPa.

- CP I (Cimento Portland comum): Cimento para uso geral sem adições.

- CP I-S (Cimento Portland comum com adições): Cimento semelhante ao anterior, mas com adição de 5% em massa de pozolanas.

- CP II (Cimento Portland Composto): Cimento de uso geral com resistência moderada a sulfatos. Apresentam-se normalmente com adições de materiais pozolânicos (CP II-Z), escórias de alto-forno (CP II – E) ou filer (CP II – F), sendo o filer o pó resultante da pulverização do calcário.

- CP III (Cimento Portland de Alto Forno): Cimento que resulta em um concreto de maior impermeabilidade, durabilidade e menor calor de hidratação que os anteriores.

- CP IV (Cimento Portland Pozolânico): Cimento recomendado para construção de estruturas de grande porte devido ao seu baixo calor de hidratação. Este cimento também que resulta em concreto de impermeabilidade e durabilidade superiores aos do CP II.

- CP V ARI (Cimento Portland de Alta Resistência): Cimento recomendado para estruturas que necessitem de elevada resistência inicial à compressão e desforma rápida, como no caso dos pré-moldados.

- Cimento Portland Branco (CPB): Cimento de cor branca que pode ser sub-classificado em estrutural ou não, dependendo de sua função na estrutura. Esse tipo de cimento é composto por baixos teores de óxidos de ferro para promover a coloração diferenciada.

- Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (CP BC): Cimento que produz um concreto com baixa liberação de calor durante o processo de hidratação e com isso, reduz fissuração de origem térmica.

- Cimento Portland Resistente a Sulfatos (CP RS): Cimento com elevada resistência à sulfatos. Direcionados para concretos utilizados em meios agressivos como a água do mar ou alguns tipos de solos.

3.4.1.2 Agregados

Os agregados são grãos minerais inertes e limpos que constituem cerca de 70 a 80% do volume concreto finalizado (BASTOS, 2004). Eles podem ser classificados como graúdos ou miúdos dependendo de suas dimensões físicas.

Os agregados são grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, que não contém substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto. (Norma 7211 da ABNT).

Os agregados miúdos, segundo a NBR NM 7211, correspondem a areias naturais ou oriundas da britagem de rochas cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μ m. Esse tipo de agregado possui alta área específica e, devido a isso, é capaz de influenciar diretamente na propriedade do concreto fresco de mudar de forma de modo irreversível quando submetido a tensão, ou seja, na sua plasticidade.

Alguns fatores como umidade e granulometria da areia afetam as propriedades do concreto e conseqüentemente devem ser analisados antes de realizar o preparo do mesmo. A umidade, isto é, o teor de água dos grãos deve ser verificado uma vez que afeta a quantidade de água total na mistura de concreto e este é um parâmetro de suma importância no alcance da resistência desejada e no consumo de cimento mais econômico. No que diz respeito a composição granulométrica, a areia mais adequada para trabalhar com concreto deve apresentar boa distribuição granulométrica, ou seja, ser composta por grãos de diversos tamanhos.

Ainda de acordo com a NBR NM 7211, os agregados graúdos são os pedregulhos e pedras 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.

Agregados graúdos são responsáveis pela massa unitária, pelo módulo de elasticidade e pela estabilidade dimensional do concreto. Essas propriedades dependem das características físicas do agregado como porosidade, forma e textura. Agregados leves e conseqüentemente com muitos vazios resultam em baixa resistência à compressão. Já no que se refere à forma, partículas grandes ou alongadas e achatadas possuem a tendência de acumular maiores quantidades de água junto a interface do agregado (exsudação interna), enfraquecendo a zona de transição na mistura de concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A proporção entre os tipos de agregados tem influência direta no tipo de concreto utilizado. Segundo a ABCP, concretos com menor proporção de agregado graúdo em relação ao miúdo são concretos com maior teor de argamassa e correspondem aos auto-adensáveis, bombeáveis, projetados, leves entre outros. No caso inverso, concretos com menor teor de argamassa são os convencionais, concretos para drenos, concretos pesados, e os concretos para pavimento rígido.

3.4.1.3 Água

A água, o quarto componente básico do concreto, é a responsável pela hidratação dos silicatos e aluminatos do cimento, ativando sua função aglutinadora e resultando no processo de solidificação de todo o conjunto. Esse material é utilizado tanto no amassamento da mistura quanto no processo de cura do concreto já endurecido.

A denominação água de amassamento é voltada para a água que entra em contato com a mistura seca, responsável pela hidratação dos sais de cimento e pelo caráter fluido do concreto no estado fresco. Já a água de cura, refere-se à água utilizada para manter o concreto já endurecido constantemente saturado, evitando a evaporação prematura da água de amassamento. Ambas as águas são normatizadas pela NM 137 na qual é preconizado que os requisitos físicos e químicos, expostos nas Tabela 1 e 2, sejam devidamente atendidos.

Tabela 1 – Requisitos físicos da água para amassamento e cura.

Requisito	Diferença máxima	Método de ensaio
Tempo de pega inicial (min)	30	NM 65
Tempo de pega final (min)	30	
Resistência à compressão (%)	10	05:01-0430

FONTE: Norma MN 137/97.

Tabela 2- Requisitos químicos da água para amassamento e cura.

Requisito	Limites		Método de ensaio (item da norma NM137)
	Mínimo	Máximo	
Resíduos Sólidos	--	5000	5.2.1
Potencial de hidrogênio (pH) ¹⁾	5,5	9	5.2.2
Ferro (Fe)	--	1	5.2.5
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	--	2.000	5.2.3
Cloretos (Cl-)	Concreto simples	--	2.000
	Concreto armado	--	700
	Concreto protendido	--	500
¹⁾ Os valores de pH são adimensionais. Unidades dos demais parâmetros: 10 ⁻⁶ g/cm ³ .			

FONTE: Norma MN 137/97.

É de interesse normatizar a qualidade água utilizada na produção do concreto, uma vez que a mesma pode influenciar de diversas formas comportamento e as propriedades do concreto. A redução da resistência, modificação no tempo de pega, ocorrência de carbonatação e eflorescência, aparecimento de manchas, corrosão do aço da armadura são alguns dos possíveis impactos adversos provenientes da má qualidade da água de amassamento.

Patologias como a eflorescência e carbonatação podem ocorrer devido às propriedades, como o pH e sais presentes na água. A eflorescência consiste na formação de depósitos salinos na superfície do material. Os sais, por serem solúveis, são carregados até a superfície por ação da água que é perdida para o meio ambiente. Já a carbonatação corresponde ao processo de corrosão da camada de óxidos “protetora” da armadura devido às condições ácidas do ambiente em que o material está inserido.

A queda de resistência pode ser originada, por exemplo, da presença de algas da água. As algas, além de indicarem uma possível presença de matéria orgânica no fluido, podem resultar na incorporação de ar no concreto e, conseqüentemente, formação de vazios e perda de resistência.

As impurezas e os sais dissolvidos na água, quando em excesso, podem ser nocivos para os aglomerantes e aço utilizados na confecção de concretos. Íons sulfatos e cloretos, comumente presentes na água do mar, por exemplo, reagem com os componentes do cimento e resultam na degradação e redução da durabilidade do material. O aço presente no concreto

armado pode ser atacado também, perdendo área na seção transversal ao ser corroído e, então, reduzindo sua capacidade de resistência física.

Vale salientar que a NM 137/97 aceita a utilização de águas provenientes da distribuição pública de água potável sem análises prévias. Entretanto, é sabido que algumas águas minerais potáveis apresentam altos teores de carbonatos alcalinos que podem afetar as reações álcali-sílica do cimento.

Em geral, a qualidade de água é um fator importante na qualidade do concreto, argamassas e pastas de cimento produzidos. Com a finalidade de evitar patologias e preservar a durabilidade e eficiência do material, a água de amassamento e cura devem atender aos padrões normatizados pela NM 137/97.

3.5 Dosagem do concreto

A dosagem do concreto consiste no processo de obtenção da melhor proporção entre seus materiais componentes (cimento, água, agregados ou aditivos). Essa proporção ideal, também denominada de traço, deve ser a mais econômica possível e que atenda simultaneamente os requisitos de resistência mecânica, trabalhabilidade e durabilidade (TUTIKIAN, 2011).

Segundo Tutikian (2011), o requisito de trabalhabilidade é atendido quando o concreto em estado fresco possui consistência adequada para sua aplicação, variando conforme as definições de fôrma e taxa de armadura dos projetos, os equipamentos utilizados para transporte e lançamento do mesmo, e o tipo de acabamento da estrutura. Já no estado endurecido, o concreto deve satisfazer a resistência à compressão exigida pelo projetista e possuir boa durabilidade em frente as solicitações às quais será exposto ao longo dos anos.

Com o objetivo de alcançar o melhor traço, diversos estudos são feitos em prol da elaboração da metodologia de dosagem mais eficiente. É válido ressaltar que uma vez que os estudos abarcam fatores como o tipo e marca de cimento, origem e dimensões dos agregados da própria região, torna-se difícil que uma metodologia do país A sirva para um outro país B. No caso Brasil, não há um consenso quanto a qual metodologia deve ser adotada.

3.5.1 Parâmetros e termos utilizados na dosagem

3.5.1.1 Massa específica e unitária

A Massa Específica do agregado é o valor resultante do quociente entre a massa seca da amostra e o seu volume correspondente, excluindo-se o volume de vazios. Em contraste, a

Massa Unitária é a razão entre a massa de um material e seu volume correspondente, considerando-se o volume de vazios.

3.5.1.2 Diâmetro Máximo Característico e Módulo de Finura

O Diâmetro Máximo Característico corresponde à abertura nominal da malha da peneira de série normal ou intermediária, em que o agregado apresenta porcentagem igual ou inferior a 5% de massa retida acumulada. Já o Módulo de Finura é determinado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa do agregado, nas peneiras de série normal, dividido por 100. As peneiras especificadas pela NBR NM ISO 3310-1 estão expostas na Tabela 3.

Tabela 3 - Aberturas nominais das peneiras da série 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 µm	-
300 µm	-
150 µm	-

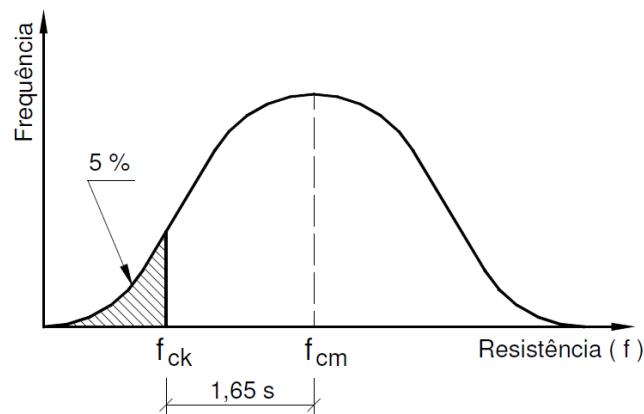
FONTE: NBR 7211 – Agregados para concreto.

3.5.1.3 - Resistência de dosagem

Como comentado anteriormente, a proporção ideal dos materiais componentes do concreto deve atender resistência à compressão definida pelo projetista. Entretanto, o cálculo do traço é fundamentado em outro parâmetro, também relacionado à resistência de projeto, denominado resistência média. A diferença entre as duas resistências reside no campo estatístico em que a resistência média, f_{cm} , é o valor intermediário da amostragem enquanto

que a resistência característica, f_{ck} , é o valor inferior à média cuja probabilidade de não ser atingida é 5 %. É válido salientar também que a curva resultante da plotagem das resistências à compressão de uma amostragem de concreto pela sua frequência de ocorrência, como representada na Figura 5, corresponde a curva de Distribuição Normal de Gauss e consequentemente atende a todas suas propriedades (BASTOS, 2004).

Figura 5 - Curva de Distribuição Normal para definição da resistência característica do concreto.



FONTE: BASTOS (2004).

3.5.1.4 Tempo de início e fim de pega

Tempo de início de pega é o intervalo de tempo decorrido entre o contato da água de amassamento com o cimento até o início do endurecimento da mistura, estado caracterizado pela perda de plasticidade da pasta de cimento. Já o tempo de fim de pega corresponde ao tempo decorrido entre o contato da água com o cimento até o fim do endurecimento do material.

3.5.1.5 Cura do concreto

A cura se refere às medidas adotadas com o objetivo de evitar a evaporação prematura da água de amassamento do concreto. A perda prematura da água da mistura para o meio ambiente provoca retrações plásticas e hidráulicas no concreto que resultam em possíveis fissurações. Uma superfície porosa e fissurada está mais sujeita a entrada de agentes agressivos e possui menor desempenho quando solicitada a tensões de compressão (BASTOS, 2014). Com a finalidade de obter a durabilidade e capacidade resistiva almejada, o processo de cura deve se iniciar 24 horas após a preparação da mistura, isto é, já no estado sólido e perdurar por no mínimo 7 (sete) dias no caso de cimento Portland comum e 14 dias para cimento Portland pozolânico e alto-forno.

4. METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

Este trabalho foi desenvolvido na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) operada pela CAGEPA e localizada no bairro de Mangabeira, no município de João Pessoa, Paraíba. Esta ETE foi projetada para tratar o esgoto bruto majoritariamente doméstico da zona sul do município por meio de um sistema de lagoas de estabilização e possui capacidade de atender uma população de 99.350 habitantes.

O efluente de esgoto tratado utilizado no estudo foi coletado após tratamento no Reator de Batelada Sequencial (SBR) e pertence às instalações experimentais do projeto Bramar.

O efluente encaminhado para ETE recebe o tratamento preliminar de grade e caixa de areia do sistema de lagoas, e parte dele é captado e direcionado para um reservatório localizado nas proximidades. Do reservatório, o esgoto é bombeado a cada 3 horas para o Reator em Batelada Sequencial (SBR) como ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Instalação do SBR na ETE Mangabeira.



FONTE: Autor.

4.2 O Reator de Bateladas Sequencial (SBR)

O efluente encaminhado para o SBR é inicialmente disposto em um compartimento interno no qual se realiza o processo de purificação mecânica. Em seguida, o mesmo é conduzido por meio de um orifício de transbordamento para o compartimento de

sedimentação. Ao atingir o volume máximo, uma boia emite um sinal para interromper a entrada de fluido, iniciando a fase de sedimentação e a entrada do lodo ativado. Em seguida, o lodo é misturado com o efluente a partir de vibrações e ar é injetado na mistura por meio de bombas de ar. A aeração da câmara dá início ao processo de tratamento biológico (CARVALHO, 2017).

O efluente tratado aerobiamente já se encontra com cor clara e é dirigido pela secção de amostra purificada para a saída. Segue para o descarte do mesmo, resultando no abaixamento do nível de material no tanque. A boia do sistema então libera novamente o sinal para entrada de esgoto e uma nova aeração. Inicia-se um novo ciclo.

O SBR utilizado na pesquisa foi fabricado pela PUROO, ATB Tecnologias Ambientais Ltda. (em alemão: *ATB Umwelttechnologien GmbH*) e se encontra disposto como na Figura 7. O equipamento entra em funcionamento diariamente às 07:00 e termina às 19:00, recebendo efluente a cada 3 horas e, conseqüentemente, completando 5 ciclos diários. Uma vez que o sistema foi projetado para atender a demanda de uma residência unifamiliar (0,90 m³ diários) e que se dispõe de 5 ciclos, o volume tratado em cada ciclo é de 180 litros. A capacidade de tratamento do sistema é de 0,36 kg de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅) diários de carga orgânica nominal de poluente.

Figura 7 - Reator de Bateladas Sequencial na Instalação Experimental do BRAMAR.



FONTE: Autor.

4.3 Amostragem

Foram coletadas, em dias distintos, três amostras do efluente do Reator SBR durante o mês de abril de 2018. Utilizou-se também uma amostra de água fornecida pela CAGEPA como água de referência para o estudo.

A NM 137 indica como água de referência para a análise comparativa a água destilada. Contudo, essa adequação foi feita com o intuito de manter com o foco da pesquisa e conferir o comportamento, no concreto e na pasta de cimento, da água de reúso com o da água utilizada comumente na construção civil, isto é, água de distribuição pública.

Os ensaios físico-químicos foram realizados no Laboratório de Saneamento Ambiental, enquanto que os ensaios de caracterização do material e a confecção do concreto no Laboratório de Materiais e Estruturas. Ambos laboratórios pertencentes à Universidade Federal da Paraíba.

4.4 Ensaios de caracterização dos agregados graúdo e miúdo

O primeiro passo para realizar a dosagem foi realizar a caracterização do material. Esse processo foi feito a partir dos ensaios de massa específica conforme a NBR NM 52, massa unitária pela NBR NM 45 e granulometria dos agregados miúdo e graúdo segundo a NBR NM 248. Ainda de conforme a NM 248 e com os resultados obtidos, determinou-se o Diâmetro Máximo Característico (DMC) e o Módulo de Finura (MF) dos agregados graúdo e miúdo.

4.5 Ensaios de caracterização do efluente

A caracterização do efluente do Reator SBR foi realizada a partir de parâmetros discriminados na Norma Mercosul 137. Os parâmetros requeridos pela norma para verificação de valores limites são: pH a 25°C, teor de sólidos totais, teor de Ferro total, teor de Cloretos e Sulfatos Solúveis.

As metodologias para efetuar os ensaios se encontram expostas no Manual de Análises Físico-Químicas de Águas de Abastecimento e Residuárias (SILVA; OLIVEIRA 2001), e seguem sintetizadas a baixo:

- A determinação do pH (Potencial Hidrogênio) foi feita eletronicamente a partir da imersão de um potenciômetro e de um eletrodo de vidro simultaneamente na amostra do efluente tratado bruto na temperatura de 25°C.

- O teor de Cloretos (Cl^-) foi calculado pelo Método Argentométrico a partir da titulação da amostra com nitrato de prata. Inicialmente, a amostra de efluente foi diluída 2 vezes com água destilada e um volume (VA) de 100 ml foi separado para o ensaio. O primeiro passo foi adicionar 3 ml da suspensão de hidróxido de alumínio na solução, misturar, esperar decantar e filtrar com auxílio de papel de filtro comum. Em seguida, adicionou-se 1 ml de peróxido de hidrogênio 30% ao filtrado e agitou a mistura. Foi feita então uma verificação de pH uma vez que se o mesmo não estivesse entre 7 e 10, haveria a necessidade de corrigi-lo com hidróxido de sódio ou ácido sulfúrico. Por fim, acrescentou-se 1 ml de solução indicadora de cromato de potássio na solução e iniciou a titulação, sob constante agitação, com solução padrão de nitrato de prata de normalidade N. O mesmo procedimento foi feito em paralelo com uma prova em branco na qual a amostra foi substituída completamente por água destilada. O volume de nitrato de prata gasto na titulação da amostra foi denominado A e na prova em branco foi denominado B. Para obter maior confiabilidade nos resultados, o ensaio foi feito em tréplica. Isto quer dizer que são analisados três exemplares da mesma amostra e o volume A corresponde à média aritmética dos três volumes gastos em cada exemplar. A concentração de cloreto da amostra foi encontrada por artifício da Fórmula 1, onde N é adimensional e A, B e VA expressos em ml. Uma vez que a amostra foi diluída duas vezes, o valor calculado também foi ser multiplicado por dois para resultar na concentração real de cloretos na amostra.

$$\text{Cloretos (mg/l)} = \frac{(A - B) \times N \times 35450}{VA}$$

Fórmula 1 – Determinação da concentração de Cloretos

- O teor de Ferro (Fe) foi determinado por meio do Método Colorimétrico da Fenantrolina no qual é possível calcular a concentração de Ferro a partir da leitura da intensidade de cor a 510 nm no processo de retirada de átomos de ferro ferroso da amostra pela fenantrolina. Inicialmente, a amostra de efluente foi diluída 4 vezes com água destilada e um volume de 50ml da diluição foi separado em um erlenmeyer (125 ml). O primeiro passo foi adicionar 2 ml de ácido clorídrico concentrado e 1 ml de solução de

hidroxilamina na amostra diluída. O erlenmeyer foi levado a uma chapa térmica para que a mistura entrasse em ebulição e foi retirado apenas quando o volume remanescente estivesse entre 15 a 20 ml. O conjunto foi então resfriado a temperatura ambiente e a solução transferida para um balão de volumétrico de 100 ml. Em seguida, foi adicionada 10 ml da solução tampão de acetato de amônio e 4 ml da solução de fenantrolina. O volume de 100 ml do balão volumétrico foi completado com água destilada e deixada em repouso por 10 minutos para o desenvolvimento completo da cor. Por fim, a absorvância a 510 nm foi medida através de um espectrofotômetro. O mesmo procedimento foi feito em paralelo com uma prova em branco na qual a amostra foi substituída completamente por água destilada e utilizada para “tarar” o espectrofotômetro uma vez que a água destilada possui zero teor de ferro. O equipamento utilizado se encontra na Figura 8. Para obter maior confiabilidade nos resultados, o ensaio foi feito em tréplica. Isto quer dizer que são analisados três exemplares da mesma amostra e a absorvância utilizada corresponde à média aritmética das medidas dos exemplares. O valor da absorvância foi convertido em concentração (mg/l) a partir da curva de calibração, elaborada para a fenantrolina utilizada por meio da lei de Beer . Uma vez que a amostra foi diluída quatro vezes o valor da conversão também precisou ser multiplicado por quatro, resultando na concentração real de ferro na amostra.

Figura 8 - Espectrofotômetro e material para análise do teor de Ferro.



FONTE: Autor.

- O teor de Sulfatos (SO_4^{2-}) foi determinado pelo Método Turbidimétrico no qual a concentração de sulfatos é encontrada a partir leitura da absorvância a 420 nm do processo de precipitação dos íons sulfatos ao reagir com cloreto de bário. Inicialmente, a amostra de

efluente foi diluída duas vezes com água destilada e um volume de 100 ml da diluição foi separado em um erlenmeyer (250ml). O primeiro passo foi adicionar 5 ml do reagente condicionante e um bastão magnético dentro do erlenmeyer e por meio de um agitador magnético (Figura 9), misturar a solução. Ainda no agitador, acrescentou-se 5 gramas de cloreto de bário e após 1 minuto de constante agitação, o erlenmeyer foi retirado. Imediatamente em seguida, parte da solução foi transferida para o tubo de vidro e posto para leitura da absorbância a 420 nm no espectrofotômetro. O mesmo procedimento foi feito em paralelo com uma prova em branco na qual a amostra é substituída completamente por água destilada e utilizada para “tarar” o espectrofotômetro uma vez que a água destilada possui zero teor de sulfatos. Para obter maior confiabilidade nos resultados, o ensaio foi feito em tréplica. Isto quer dizer que são analisados três exemplares da mesma amostra e a absorbância utilizada corresponde à média aritmética das medidas dos exemplares. O valor da absorbância foi convertido em concentração (mg/l) a partir da curva padrão de calibração, elaborada por meio da Lei de Beer. Uma vez que a amostra foi diluída duas vezes o valor da conversão também precisou ser multiplicado por dois resultando na concentração real de sulfatos na amostra.

Figura 9 - Agitador magnético e material para análise do teor de sulfatos.



FONTE: Autor.

- O teor de sólidos totais da amostra foi calculado a partir do auxílio de uma capsula de porcelana limpa, aquecida previamente na estufa a 103°C por 1 hora, seguida por

resfriamento a temperatura ambiente e pesada imediatamente antes do ensaio. Nesse momento, o peso em gramas da capsula recebeu a denominação A. O primeiro passo foi separar um volume (VA) de 100 ml da amostra bruta na capsula de porcelana e dispor o conjunto em banho-maria, no interior de uma capela. Após a completa evaporação do líquido na capsula, a mesma foi levada à estufa com temperatura de 105° por 1 hora com o objetivo de eliminar a umidade residual. Em seguida, o conjunto foi resfriado em um dessecador (Figura 10) e pesada. Esse peso em gramas foi denominado B. Por fim, o conjunto é posto no forno mufla pré-aquecido a 500° por 20 minutos e resfriado novamente no dessecador. O novo valor de peso do conjunto capsula e sólidos residuais, em gramas, corresponde a letra C. Vale salientar que a capsula foi manejada por meio de tesouras metálicas e pesada imediatamente após os resfriamentos para que não houvesse interferência de partículas de gordura ou de água no peso do conjunto. Através das Fórmula 2, 3 e 4 nas quais VA está expresso em litros, foi calculado o valor de sólidos totais, fixos e voláteis da amostra.

Figura 10 - Dessecador e Filtrador para análise do teor de Sólidos.



FONTE: Autor.

$$\text{Sólidos Totais (mg/L)} = \frac{1000 \times (B - A)}{VA}$$

Fórmula 2 – Determinação do teor de Sólidos Totais

$$\text{Sólidos Totais Voláteis (mg/L)} = \frac{1000 \times (B - C)}{VA}$$

Fórmula 3 – Determinação do teor de Sólidos Voláteis

$$\text{Sólidos Totais Fixos (mg/L)} = \frac{1000 \times (C - A)}{VA}$$

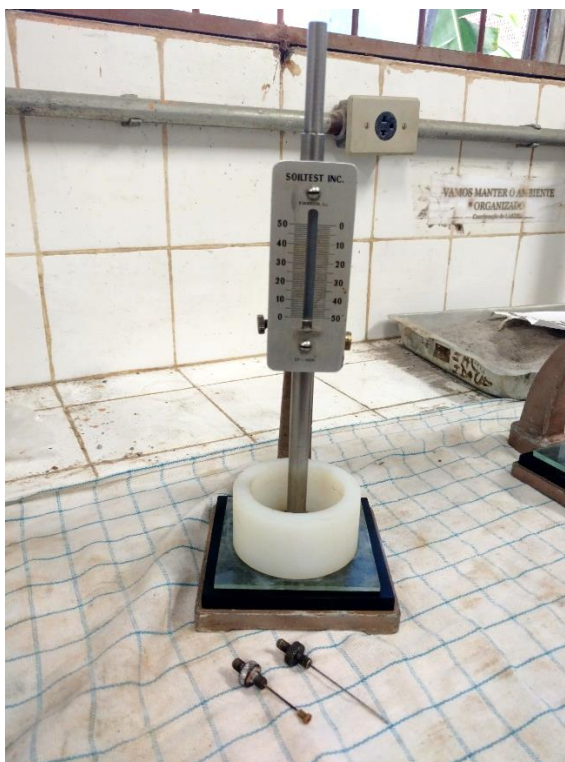
Fórmula 4– Determinação do teor de Sólidos Fixos

4.6 Ensaio de caracterização da pasta de cimento

A pasta de cimento foi caracterizada a partir do ensaio de tempo de início e fim de pega conforme indicado pela NM 137 e com os procedimentos descritos na NM 65.

No estudo, foram realizadas um total de 4 (quatro) determinações, sendo 3 (três) utilizando a pasta de cimento preparada com efluente do Reator SBR e 1 (um) com água de referência. Como exposto anteriormente, embora a NM 137 indique água destilada, foi adotada a água fornecida pela CAGEPA como a de referência. O ensaio foi realizado com os equipamentos dispostos na Figura 11.

Figura 11 - Aparelho de Vicat utilizado para determinação de tempo de pega.



FONTE: Autor.

4.7 Dosagem do concreto

A sequência de procedimentos utilizada no presente trabalho para a determinação do melhor do traço de concreto é apresentada nesta seção. Foi empregada a dosagem experimental da ABCP/ACI adaptada para as características dos agregados encontrados no Brasil, região da cidade de Belo Horizonte.

4.7.1 Resistência de dosagem

A resistência de dosagem corresponde a resistência média de compressão, f_c , e foi calculada por artifício da Fórmula 5.

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \times S_d$$

Fórmula 5 – Determinação da Resistência média aos j dias.

Onde:

F_c = Resistência média do concreto em MPa;

j = Idade do concreto (geralmente 28 dias);

f_{ck} = Resistência característica do concreto à compressão em MPa;

S_d = Desvio padrão de dosagem em MPa.

O desvio padrão foi determinado em função da condição de preparo do concreto adotada no estudo. Segundo a NBR-12655, o concreto pode estar na condição A, B ou C.

A Condição A se refere aos concretos com resistência característica na faixa de 10,0 MPa até 80,0 MPa. Quando o cimento e os agregados forem medidos em massa, a água de amassamento em massa ou volume. Adota-se então S_d de 4,0 MPa. Já a Condição B se refere aos concretos com resistência característica na faixa 10,0 MPa até 25,0 MPa. Quando o cimento for medido em massa, a água em volume e os agregados em volume. O S_d adotado seria de 5,5 MPa. Por fim, a Condição C se refere aos concretos com resistência característica na faixa 10,0 MPa até 15,0 MPa. Quando cimento for medido em massa, os agregados e a água em volume, mas feitas correções em função da estimativa da umidade dos agregados. Nesse caso, o S_d adotado deve ser de 7,0 MPa.

4.7.2 Fator água/cimento

A definição do valor do fator a/c foi feita segundo a Fórmula 6 (Fórmula de) Bolomey, como descrita a seguir:

$$f_{c28} = K \times \left(\frac{1}{a/c} - 0,5 \right)$$

Fórmula 6 – Relação entre resistência média e relação água/cimento

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.

O valor do coeficiente de atividade teórico do cimento (K teórico) foi calculado pela Fórmula 7 e se baseia na resistência nominal do cimento, ou seja, na resistência mínima prevista na normalização, equivalente a classe do cimento.

$$K \text{ teórico} = \frac{\text{Classe do cimento}}{1,5833}$$

Fórmula 7 – Cálculo do K teórico

4.7.3 Consumo de água/m³ de concreto

A partir do módulo de finura da areia utilizada, determinou-se a curva para determinação do consumo de água na Tabela 4. Correlacionando a curva com a dimensão máxima do agregado graúdo, obteve-se o consumo de água por 1m³ de concreto. Este consumo é definido para concretos com abatimento de 60 mm e no caso de abatimentos diferentes, é necessário acrescentar ou subtrair 2 litros de água para cada 10 mm de diferença em relação ao abatimento almejado.

Tabela 4 - Curva para determinação do consumo de água / m³

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

Dimensão Máxima (mm)	Consumo de Água / m ³		
	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
19,0	213	207	202
25,0	204	198	193
32,0	195	189	184
38,0	186	181	176
50,0	178	173	169

4.7.4 Consumo de cimento/m³ de concreto

O consumo de cimento foi calculado por meio da Fórmula 8 descrita abaixo.

$$\text{Consumo de cimento} = \frac{\text{Consumo de água}}{a/c}$$

Fórmula 8 – Determinação do consumo de cimento

Onde o consumo de cimento está em quilogramas, consumo de água em litros e relação a/c é adimensional.

4.7.5 Proporção dos agregados

O próximo passo no dimensionamento do concreto foi a definição da proporção adequada entre os agregados. Inicialmente, determinou-se o valor do parâmetro teórico S pelo Ábaco Experimental no Anexo A. A partir do valor encontrado e da Fórmula 9, foi possível calcular o percentual de areia e em seguida, por meio da Fórmula 10, o percentual de brita.

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

Fórmula 9 – Proporção de areia

$$B\% = 100 - A\%$$

Fórmula 10 – Proporção de brita

Onde A% é a porcentagem de agregado miúdo e B% porcentagem de agregado graúdo em relação aos agregados totais.

4.7.6 Consumo de agregados/m³ de cimento

O cálculo de dosagem do concreto foi feito visando obter o volume de 1 m³ da mistura. Ou seja, o montante com os volumes absolutos, em litros, de todos os materiais constituintes do concreto resultando no valor de 1000 litros (Fórmula 11).

$$Vol_{\text{cimento}} + Vol_{\text{ag. miúdo}} + Vol_{\text{ag. graúdo}} + Vol_{\text{água}} = 1000 \text{ litros}$$

Fórmula 11 – Relação entre os volumes dos componentes do concreto

Uma vez que a Massa Específica (M.E.) corresponde a razão de massa seca (kg) por volume (L) é possível ao substituir na Fórmula 11 e obter a Fórmula 12.

$$\frac{Massa_{cimento}}{M.E. \text{ cimento}} + \frac{Massa_{ag. \text{ miúdo}}}{M.E. \text{ ag. miúdo}} + \frac{Massa_{ag. \text{ graúdo}}}{M.E. \text{ ag. graúdo}} + \frac{Massa_{\text{água}}}{M.E. \text{ água}} = 1000 \text{ litros}$$

Fórmula 12 – Relação entre massa dos componentes do concreto

Para determinar consumo de agregados, primeiramente se calculou o consumo de agregado em sua totalidade e depois especificou o consumo de cada tipo a partir das proporções definidas no item anterior.

4.7.7 Traço em peso (TUP)

O traço em peso foi obtido ao dividir o consumo de cada componente pelo consumo de cimento, este expresso em valor unitário. A ordem de apresentação dos materiais do traço é Cimento (1) : Areia : Brita : a/c.

4.8 Ensaio de caracterização do concreto produzido

O concreto produzido foi analisado pelo ensaio de consistência (NBR NM 67) quando no estado fresco e pelo ensaio de resistência à compressão axial (NBR 5739) quando no estado sólido, conforme as indicações da NM 137.

O primeiro ensaio realizado com o concreto produzido foi o de consistência. O procedimento consistiu em preencher um molde de tronco de cone com o concreto preparado e verificar o quanto o material assenta após a retirada do molde. Inicialmente, o molde foi umedecido e disposto sobre uma placa base. Após fixar o molde ao posicionar os pés do operador sobre as hastes laterais, o concreto foi lançado em três camadas dentro do molde. Cada camada foi compactada com 25 golpes com auxílio da haste de socamento. O excesso de concreto foi retirado, rasando a superfície com uma desempenadeira e nivelando a superfície com as bordas do molde. Caso o concreto estivesse abaixo do nível das bordas, mais material seria disposto e depois realizada a retirada do excesso. Em seguida, o molde foi retirado verticalmente em um movimento constante e lento. Por fim, verificou-se com auxílio de uma trena, a diferença entre a altura do molde e do topo do monte de concreto resultante do desmolde.

No total, foram realizados 4 (quatro) ensaios de consistência, 3 (três) para concreto preparado com água de efluente do Reator SBR e 1 (um) água potável.

Para dar seguimento ao segundo ensaio, resistência à compressão, foram moldados 8 (oito) corpos de prova cilíndricos de concreto para cada uma das 3 (três) amostras de

efluente tratado. Com o objetivo de realizar o comparativo, outros 8 (oito) corpos de prova semelhantes foram moldados com água proveniente da CAGEPA. Os corpos de prova possuíam dimensões de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, resultando em um volume de 1,57 litros de concreto. Dos 8 (oito) cilindros de cada traço produzido, 4 (quatro) foram testados na idade de 7 dias e outros 4 (quatro), aos 28 dias. No total, 32 cilindros de concreto foram produzidos, sendo 16 rompidos aos 7 (sete) dias e os outros 16, aos 28 dias.

Vale ressaltar que todos os elementos passaram pelo processo de cura, mas que os corpos de prova confeccionados com efluente do Reator SBR permaneceram imersos em tanques contendo o mesmo fluido, e da mesma forma os corpos de prova elaborados com água potável.

O ensaio de resistência à compressão foi feito por instrumento da prensa hidráulica da Contenco Ind. e Com. Ltda (Figura 12). Inicialmente, visando o nivelamento do topo superior do corpo de prova foi encaixado um disco de Neoprene. Em seguida, o cilindro de concreto foi disposto sobre a bandeja da prensa e seus eixos verticais foram alinhados. A carga de ensaio foi então aplicada, continuamente e sem choques, em uma velocidade de carregamento de 0,20 MPa/s. O procedimento foi repetido para cada corpo de prova na idade prevista. O valor da resistência para cada elemento foi obtido pela razão entre a carga de ruptura pela área da secção transversal do mesmo expresso em Mega pascal (MPa).

Figura 12 - Prensa hidráulica utilizada na compressão axial dos corpos de prova.



FONTE: Autor.

4.9 Análise estatística dos resultados obtidos

Os resultados de resistência à compressão aos 07 e 28 dias, além de serem verificados quanto a tolerância de valores informados pela NM137, foram também analisados estatisticamente pelo Teste T *Student*. Pela análise feita por Silva (2008), pode-se admitir que a população analisada segue a distribuição normal. Utilizou-se o nível de significância 5% e da tabela de Distribuição T disposta no presente trabalho no Anexo B.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 Caracterização do efluente

Três traços de concreto foram produzidos a partir das três amostras distintas de efluente do Reator SBR da ETE Mangabeira. Para cada amostra de efluente, parte foi submetida às análises físico-químicas exigidas pela Norma Mercosul 137. Cada amostra foi analisada em tréplica e seus resultados estão expostos na Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 5 - Resultado das análises físico-químicas do efluente de esgoto.

Data de coleta	Parâmetro							
	pH a 25°C		Cloretos (mgCl-/L)		Sulfatos (mgSO ₄ ²⁻ /L)		Ferro total (mgFe/L)	
	Valor obtido	Faixa limite	Valor obtido	Limite	Valor obtido	Limite	Valor obtido	Limite
16/abr	3,68	5,5 a 9,0	67,98	Até 2.000	59,27	Até 2.000	0,36	Até 1,0
20/abr	3,64		60,47		70,96		0,33	
26/abr	3,33		57,59		68,82		0,23	
Média	3,55		62,78		66,35		0,30	

Tabela 6 - Resultado das análises de Sólidos Totais do efluente de esgoto.

Data de coleta	Sólidos Dissolvidos Totais			
	Totais Voláteis	Totais Fixos	Totais	Limite totais
16/abr	226	310	530	Até 5.000
20/abr	206	259	465	
26/abr	177	278	455	
Média	203	282	483	

5.1.1 Potencial de Hidrogênio à 25°C

Os valores de pH a 25°C obtidos para as três amostras de efluente analisadas estão fora da faixa recomendada de 5,5 a 9 requerido pela norma NM 137. A média dos valores obtidos foi igual a 3,55. Essa condição ácida do efluente se deve ao consumo de alcalinidade pelo processo de nitrificação que ocorre pelo tratamento via Reator SBR.

5.1.2 Cloretos e Sulfatos solúveis

Todas as três amostras de efluente obtiveram valores de Cloretos solúveis dentro do limite exigido pela norma NM 137 para todos os três tipos de concreto analisados. A média dos valores de cloreto da amostra foi de 62,78 mg Cl⁻/L.

Em relação aos Sulfatos solúveis, as amostras também obtiveram resultados dentro do limite de 2.000 mgSO₄²⁻/L requerido pela norma NM 137. A média dos valores obtidos foi igual a 66,35 mg SO₄²⁻/L.

Os limites de cloretos e sulfatos determinados pela NM 137 devem ser atendidos para o concreto já elaborado. Entretanto, foi realizada uma análise preliminar desses parâmetros no efluente tratado para ter uma sensibilidade da ordem da concentração final do material. Para a determinação dos teores no concreto pronto, deve-se incorporar os teores de sulfatos e cloretos provenientes de aditivos químicos, do cimento e dos agregados que foram utilizados.

Embora a ABNT apresente normas para a determinação dos teores de sulfatos e cloretos nos agregados (NBR NM 16) e no cimento (NBR 9917), estas não foram realizadas no estudo. As determinações foram feitas baseadas no tipo de cimento (CP II – Z 32) e na origem dos agregados utilizados, adotando-se um teor de 50% da média dos valores obtidos nas determinações do efluente. Não foram realizadas determinações para o teor de sulfato e cloretos no concreto produzido.

5.1.3 Ferro

Em relação ao teor de Ferro no efluente, as três amostras analisadas obtiveram resultados abaixo do valor limite (1,0 mgFe/L) exigido pela norma NM 137. A média dos valores foi igual a 0,30 mgFe/L.

5.1.4 Sólidos

Por fim, na determinação de sólidos totais, as três amostras obtiveram valores inferiores ao limite máximo (5.000 mgST/L) exigidos pela norma NM 137. A média dos valores foi igual a 483,56 mgST/L.

Foi realizado também uma análise quanto aos sólidos totais fixo e voláteis. Em média, a amostra obteve teor 282,44 mgSTF/L de sólidos totais fixos e 203,33 mgSTV/L de sólidos totais voláteis.

5.2 Caracterização dos agregados graúdo e miúdo

A composição granulométrica dos agregados graúdos e miúdos foram realizadas conforme a NBR NM 248. A partir dos dados obtidos, foi elaborada a curva granulométrica de cada agregado. Também conforme a NBR NM 248, foi determinada a Dimensão Máxima Característica e Módulo de Finura do material. Os resultados estão expostos na Tabela 7 e Tabela 8

Tabela 7 - Composição granulométrica do agregado miúdo.

Peneiras (mm)	Peso retido (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
4,75	0,00	0,00	0,00
2,36	4,00	0,40	0,40
1,18	41,00	4,10	4,50
0,60	282,10	28,21	32,71
0,30	534,20	53,42	86,13
0,15	116,40	11,64	97,77
Resíduo	22,30	2,23	100,00
Total	1000,00	100,00	-

Diâmetro máximo característico (mm)	1,18
Módulo de finura	2,21

Tabela 8 - 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

Tabela 8 (continuação) – Composição granulométrica do agregado graúdo.

6,3	250,80	5,02	99,04
4,75	47,80	0,96	100,00
2,36	0,00	0,00	100,00
1,18	0,00	0,00	100,00
0,60	0,00	0,00	100,00
0,30	0,00	0,00	100,00
0,15	0,00	0,00	100,00
Resíduo	0,00	0,00	100,00
Total	5000,00	100,00	-

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

Os ensaios de massa unitária e específica dos agregados foram obtidos conforme a NBR NM 45, a NBR NM 52 e a NBR NM 53. Os resultados estão expostos na Tabela 9.

Tabela 9 - Massa específica e unitária dos agregados utilizados.

Tipo	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (kg/dm ³)
Agregado miúdo	2,57	1,583
Agregado graúdo	2,70	1,505

5.3 Dosagem do concreto

Para o estudo, a resistência à compressão adotada foi no valor de 25 Mpa uma vez que este possui uso mais comum na região. Ainda seguindo a mesma linha de raciocínio, adotou-se o uso de cimento Portland CP II – Z 32 RS (fabricante: Nacional).

Outro dado importante para a determinação da proporção entre os materiais componentes do concreto é a consistência de trabalho do concreto. Adotou-se a consistência requerida para o concreto de 100mm, pois são concretos que apresentam maior fluidez. Concretos nessa consistência são comumente visados por construtoras pela facilidade de bombeamento em obras verticais.

De posse dos resultados da caracterização dos agregados utilizados na pesquisa, dos dados fornecidos pelo fabricante de cimento, na consistência adotada e na metodologia da

ABCP/ACI, foi calculado o traço experimental para produção do concreto conforme apresentado na Tabela 10. Nenhum aditivo ou adição foi prevista ou utilizada.

Tabela 10 - Dados para determinação de traço de concreto.

Dados iniciais		
Resistência característica desejada	25	MPa
Abatimento	100 ±20	mm
Diâmetro máximo	19	mm
Módulo de finura da areia	2,21	
Massa específica da areia	2,57	g/cm ³
Massa específica da brita	2,70	g/cm ³
Massa específica do cimento	3,10	g/cm ³
Massa unitária da brita	1,50	Kg/dm ³
Massa unitária da areia	1,58	Kg/dm ³
Resistência de dosagem (28dias)	31,6	MPa
Condição	A	
Desvio padrão	4,5	MPa
Fator água/cimento	0,48	
K teórico	20,2	
Consumo de água	217	l/m³ concreto
Consumo de cimento	452	Kg/m³ concreto
Proporção dos agregados		
S (Ábaco experimental)	1,5	
Areia	40	%
Brita	60	%
Consumo de agregados		
Agregados totais	1686,0	Kg/m ³ concreto
Agregado miúdo	674,5	Kg/m ³ concreto
Agregado graúdo	1011,5	Kg/m ³ concreto
Traço em peso		
1 : 1,49 : 2,24 - 0,48		

5.3.1 Ajuste no traço obtido

Com base nas informações expostas anteriormente, o traço experimental estimado foi de 1:1,49:2,24 – 0,48. Entretanto, observou-se que a proporção entre os agregados graúdo e miúdo foi de 1,5 o que resulta em um concreto dito como áspero. Isto é, um concreto de baixa trabalhabilidade e elevada tendência à segregação e exsudação. Como uma forma de evitar essa condição de aspereza, foi feito um ajuste na proporção dos agregados para o valor de 1,2. Como resultado, o traço final obtido foi de 1:1,49:1,78 – 0,48.

É válido salientar que, por meio do ensaio *speedy*, verificou-se a umidade da areia e a partir de seu valor, o consumo de água e agregado miúdo foi corrigido. A areia utilizada na pesquisa obteve umidade de 3%.

5.4 Análise do tempo de pega da pasta de cimento produzida

Fazendo uso do mesmo tipo e marca de cimento (CP II -Z 32 RS da Nacional), foram realizadas as análises do tempo de pega inicial e final de 4 pastas de cimento, 3 (três) elaboradas com efluente do Reator SBR e 1 (um) com água potável. Os resultados obtidos se encontram na Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 11 - Determinações de tempo inicial de pega.

Amostra	Tempo de pega inicial	Tempo de pega da água potável	Tolerância (definição da NM 137)
Amostra 1	150 min	160 min	30 min
Amostra 2	150 min		
Amostra 3	160 min		

Tabela 12- Determinações de tempo final de pega.

Amostra	Tempo de pega final	Tempo de pega da água potável	Tolerância (definição da NM 137)
Amostra 1	200 min	220 min	30 min
Amostra 2	205 min		
Amostra 3	220 min		

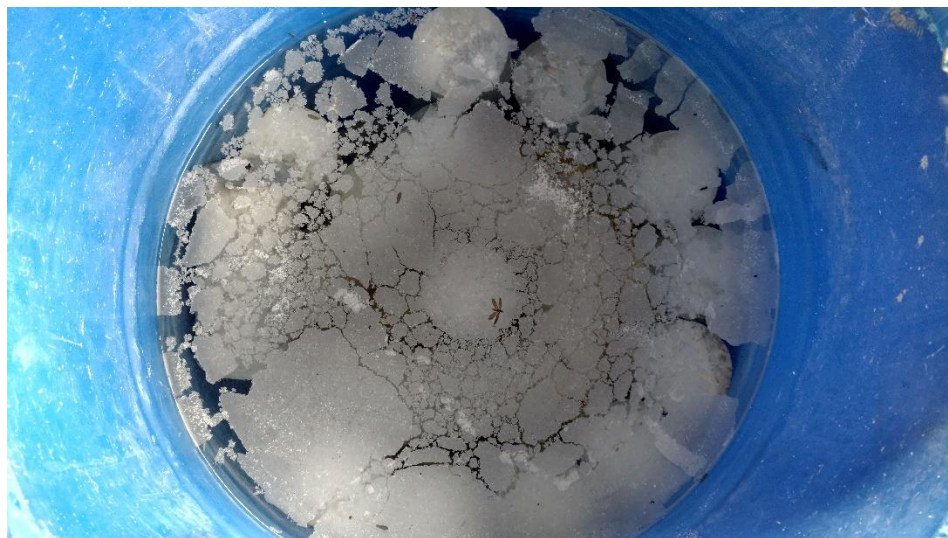
De acordo com a norma NM137, para a água em estudo ser aceita como água de amassamento e cura do concreto, o cimento elaborado com a mesma deve apresentar uma diferença de tempo de pega inferior a 30 min em relação ao produzido com água potável. Pelos valores obtidos e expostos na tabela anterior, observou-se que para todos os ensaios realizados, a tolerância foi obedecida.

O valor médio de tempo de pega inicial e final para a pasta de cimento produzida com efluente foi de 153 min e 208 min respectivamente. Comparando-os com os valores obtidos para a água potável, observou-se que os valores variaram em torno de 5%, mantendo-se muito próximos.

5.5 Análise da resistência à compressão do concreto produzido

A partir do traço experimental elaborado, foram realizadas 4 (quatro) determinações de resistência média à compressão. Conforme exposto anteriormente, foram moldados 8 (oito) corpos de prova com 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro para cada uma das 3 (três) amostras de efluente do Reator SBR e para a amostra de água da CAGEPA. No total, 32 cilindros de concreto foram produzidos, e após suas determinadas curas, 16 deles foram rompidos aos 7 (sete) dias e os demais 16 aos 28 dias. É válido ressaltar que os tanques de cura contendo efluente tratado apresentaram uma camada de sais cristalizados na superfície dos corpos de prova conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Tanque de cura preenchido com efluente tratado.



FONTE: Autor.

Para realizar a análise da resistência do concreto produzido, calculou-se as médias dos valores de resistência à compressão conforme indicado pela NM 137. Entretanto, observou-se que alguns corpos de prova obtiveram resultados discrepantes em relação aos demais cilindros de concreto da mesma amostra. Estes valores foram então escanteados no cálculo da resistência média e indicados com um asterisco (*).

5.5.1 Resistência à compressão axial aos 07 dias

Os resultados das análises de resistência à compressão aos 07 dias para água potável e efluente do Reator SBR são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13- Determinações de resistência à compressão aos 07 dias.

Amostra	Corpo de prova	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)
Amostra 1	1	19,34	20,82
	2	22,49	
	3	13,85*	
	4	20,64	
Amostra 2	1	24,28	20,83
	2	17,92	
	3	20,29	
	4	16,11*	
Amostra 3	1	22,34	23,16
	2	23,50	
	3	24,31	
	4	22,49	
Potável	1	24,09	24,07
	2	20,46	
	3	16,97*	
	4	27,65	

Para realizar a análise da resistência do concreto produzido, calculou-se as médias dos valores de resistência à compressão conforme indicado pela NM 137. A tensão média encontrada para o concreto de água potável foi de 24,06 MPa. Logo, as tensões médias mínimas toleráveis para os concretos produzidos com o efluente devem ser no valor de 21,65 MPa segundo à NM137. Pelos valores expostos na tabela anterior, verificou-se que a tolerância foi obedecida pela amostra 3, enquanto que a amostra 1 e 2 não. Contudo, observou-se que os valores encontrados para amostra 1 e 2 foram bastante próximos ao tolerável, e que possivelmente se a amostragem fosse maior a exigência seria atendida.

Com o objetivo de analisar melhor os resultados, foi realizado uma análise estatística pelo teste T *Student*. As tensões individuais correspondentes a água potável foram agrupadas, bem como as de efluente tratado. O grau de liberdade correspondente à comparação dos grupos foi de 11 referente à quantidade de elementos menos 2 (dois) e,

admitindo uma significância de 5%, o t crítico retirado da tabela T de distribuição foi de 2,201. Pelos cálculos, o t obtido pela análise foi de 0,57, e uma vez que $t > -t_c$ e $t < t_c$, foi possível afirmar que não há diferença estatística entre os valores médios do concreto de água potável e efluente tratado. Os dados para cálculo estão expostos na Tabela 14.

Tabela 14 - Análise estatística da resistência à compressão aos 7 dias.

Amostra		Potável	
Qnt. elementos	10	Qnt. elementos	3
Média	21,76	Média	24,07
Variância	4,59	Variância	12,91
Desvio padrão	2,142	Desvio padrão	3,59
Teste t student			
Grau de liberdade	11	Variância do conjunto	6,10
Significância	0,05	T obtido	0,57
T crítico	2,201		

5.5.2 Resistência à compressão aos 28 dias

Os resultados das análises de resistência à compressão aos 28 dias para água potável e efluente do Reator SBR são mostrados na Tabela 15.

Tabela 15 - Determinações de resistência à compressão aos 28 dias.

Amostra	Corpo de prova	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)
Amostra 1	1	28,88	27,24
	2	27,70	
	3	26,05	
	4	26,34	
Amostra 2	1	28,04	29,31
	2	29,49	
	3	30,41	
	4	24,23*	
Amostra 3	1	32,17	32,14
	2	31,10	
	3	31,90	
	4	33,41	
Potável	1	36,10	33,35
	2	33,47	
	3	30,30	
	4	33,54	

Assim como para a para a análise da resistência do concreto aos 7 dias, calculou-se as médias dos valores de resistência à compressão aos 28 dias conforme indicado pela NM 137. A tensão média encontrada para o concreto de água potável foi de 33,35 MPa. Logo, as tensões médias mínimas toleráveis para os concretos produzidos com o efluente devem ser no valor de 30,01 MPa segundo a NM137. Pelos valores expostos na tabela anterior, verificou-se que a tolerância foi obedecida pela amostra 3, enquanto que a amostra 1 e 2 não. Contudo, observou-se que os valores encontrados para amostra 2 foram próximos ao tolerável.

Com o objetivo de analisar melhor os resultados, foi realizado uma análise estatística pelo teste *T Student*. As tensões individuais correspondentes a água potável foram agrupadas, bem como as de efluente tratado. O grau de liberdade correspondente à comparação dos grupos foi de 13 referente à quantidade de elementos menos 2 (dois) e, admitindo uma significância de 5%, o *t* crítico retirado da tabela T de distribuição foi de 2,160. Pelos cálculos, o *t* obtido pela análise foi de 1,295 e uma vez que $t > -t_c$ e $t < t_c$, é possível afirmar que não há diferença estatística entre os valores médios do concreto de água potável e efluente tratado. Os dados para cálculo estão expostos na Tabela 16.

Tabela 16 - Análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias.

Amostra		Potável	
Qnt. elementos	11	Qnt. elementos	4
Média	29,59	Média	33,35
Variância	4,78	Variância	5,64
Desvio padrão	2,19	Desvio padrão	2,37
Teste t student			
Grau de liberdade	13	Variância do conjunto	4,98
Significância	0,05	T obtido	1,29
T crítico	2,16		

É válido salientar que os resultados obtidos em um estudo análogo, como o de SILVA (2008), utilizando efluente tratado por lagoas de estabilização foram similares ao trabalho presente. Os valores obtidos tanto nos parâmetros relacionados ao concreto e pasta de cimento, bem como as características físico-químicas da água residuária estiveram dentro dos padrões estabelecidos pela NM 137. Como diferencial, é possível mencionar a condição ácida do efluente do Reator SBR e os resultados de resistência à compressão axial à baixo do critério estipulado pela mesma norma no caso do efluente do Reator SBR. Contudo, no referente à resistência, análises estatísticas mostram compatibilidade entre as médias com água da distribuidora e a de reúso.

6. CONCLUSÕES

Constatou-se que o efluente de esgoto tratado por Reator de Batelada Sequencial (SBR) 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.

As análises físico-químicas realizadas no efluente apresentaram resultados satisfatórios, dentro da faixa de valores indicados pela NM137, com exceção apenas do pH. Essa condição ácida do efluente se deve ao consumo de alcalinidade pelo processo de nitrificação que ocorre pelo tratamento via Reator SBR.

No que se refere ao tempo de pega, o uso de efluente na produção da pasta de cimento não interferiu nos resultados, mantendo-se sempre próximo ao valor utilizando água potável.

Já no tocante a resistência à compressão axial, o concreto elaborado com efluente de Reator SBR não obteve 100% dos resultados exigidos pela NM 137. Contudo, devido à proximidade dos valores, foi feita uma análise estatística com nível de significância de 5%. A análise demonstrou que não havia diferença estatística entre as médias, indicando que o efluente não interferia na resistência à compressão do concreto nas idades de 07 e 28 dias.

Vale destacar também que a água residuária estudada apresentava odor característico, mas que o concreto e pasta de cimento preparados com a mesma não exibiam odores desagradáveis.

Por fim, é possível afirmar que o reúso de águas residuárias tratadas pelo Reator SBR na construção civil é viável à luz da NM 137. Essa prática seria interessante principalmente em locais com dificuldade na obtenção de água potável.

7. RECOMENDAÇÕES

Baseado no estudo conduzido, algumas recomendações para trabalhos futuros foram elencadas a seguir:

- Analisar a influência do uso da água residuária na hidratação dos silicatos e aluminatos de cimento e na taxa de consumo do mesmo.
- Analisar a interferência de se utilizar água de reúso no tanque de cura visto que, no mesmo, há a formação de uma camada de sais cristalizados na superfície dos corpos de prova.
- Verificar as possíveis interferências da utilização da água residuária em concretos de resistência superior.
- Verificar as possíveis interferências da utilização da água residuária em concretos que se utilizam de aditivos ou adições.
- Analisar o desempenho do aço em concreto armado elaborado com água de reúso, especialmente no tocante a corrosão pelos sais presentes no efluente (cloretos e sulfatos solúveis).
- Analisar o comprometimento da manipulação humana do concreto produzido com água de reúso devido à presença de microrganismos patogênicos no efluente.
- Verificar o comprometimento do concreto elaborado com águas residuárias em relação sua durabilidade.
- Analisar o desempenho do concreto elaborado com efluentes de outros tipos de sistema de tratamento como lagoas de estabilização.

8. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Disponibilidade de demanda de Recursos Hídricos no Brasil: estudo técnico. Caderno de Recursos Hídricos.** Brasília, DF: ANA, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico de utilização de cimento Portland.** 7.ed. São Paulo, 2002. 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 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

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 de maio de 2018.

FLORENCIO, 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

PESSARELLO, REGIANE GRIGOLI. **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.

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

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.

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

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

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: 31 de maio de 2018.

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

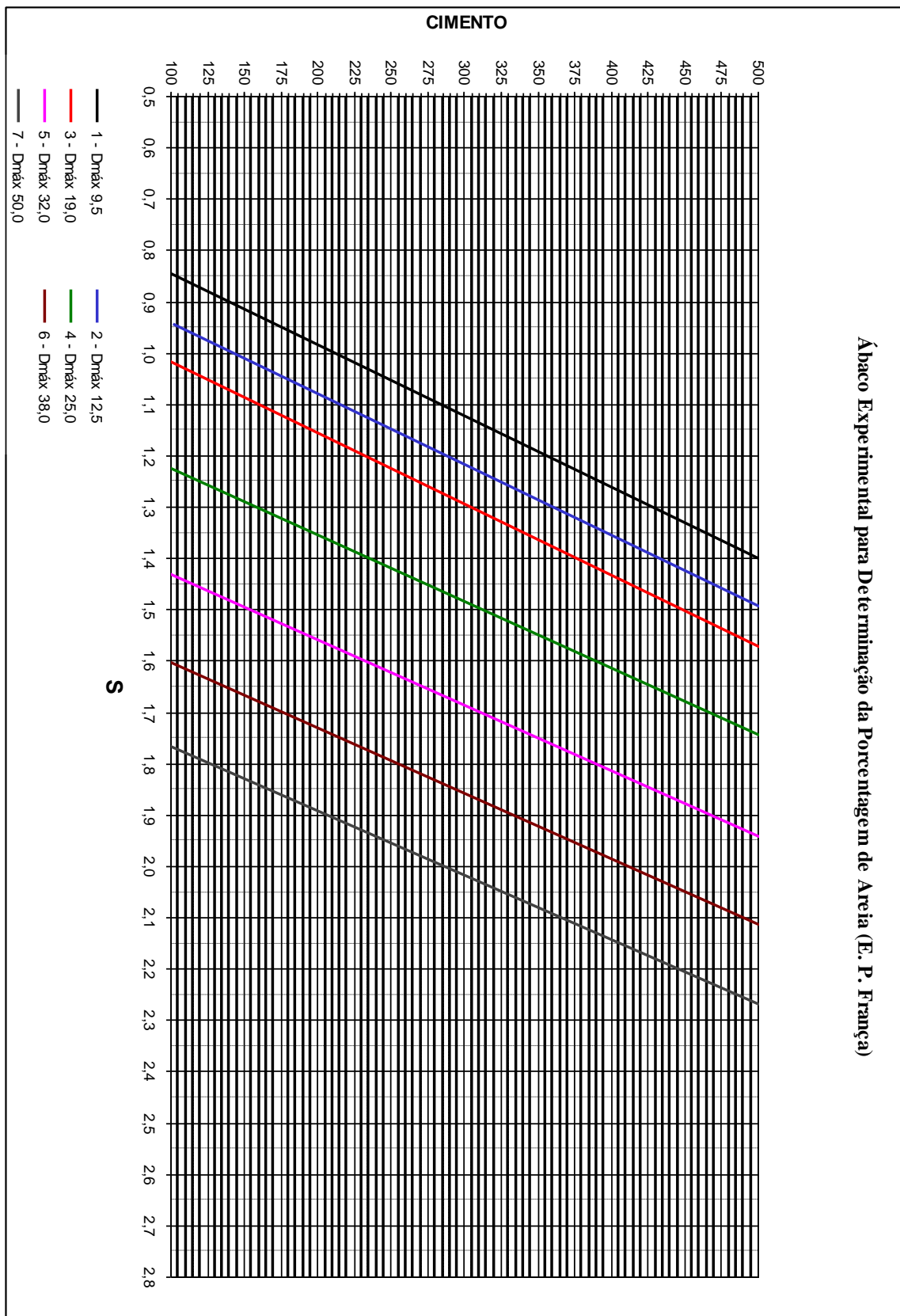
SINDICATO DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO (SINDUSCON)/ AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS/ FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO /. **Manual sobre a conservação e reúso de água em edificações**, São Paulo, 2005, 152p.

VON SPERLING, MARCOS. **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.

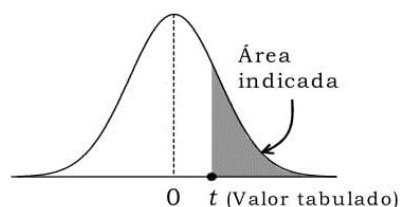
VON SPERLING, MARCOS. **Princípios básicos do tratamento biológico de águas residuárias – Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Vol. 1, 3ª Edição. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005, 452 p.

ANEXO A - Ábaco experimental para determinação da proporção de agregados



FONTE: ABCP/ACI.

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
z	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