

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

**MESTRADO EM SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA
URBANA**

CAROLINA CARNEIRO DE FREITAS SCAQUETTI

**INFLUÊNCIA DA ÁGUA DE REUSO NA DURABILIDADE
DO CONCRETO**

CAMPINAS

2021

CAROLINA CARNEIRO DE FREITAS SCAQUETTI

**INFLUÊNCIA DA ÁGUA DE REUSO NA
DURABILIDADE DO CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Lia Lorena Pimentel

PUC-CAMPINAS

2021

Ficha catalográfica elaborada por Fabiana Rizziolli Pires CRB 8/6920
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

620.136 S284i	Scaquetti, Carolina Carneiro de Freitas Influência da água de reuso na durabilidade do concreto / Carolina Carneiro de Freitas Scaquetti. - Campinas: PUC-Campinas, 2021. 111 f.: il. Orientador: Lia Lorena Pimentel. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2021. Inclui bibliografia. 1. Concreto. 2. Água - reutilização. 3. Materiais de construção - Durabilidade. I. Pimentel, Lia Lorena. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. III. Título. CDD - 22. ed. 620.136
------------------	---

CAROLINA CARNEIRO DE FREITAS SCAQUETTI

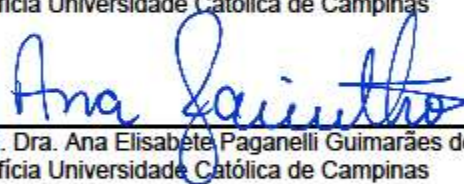
**INFLUÊNCIA DA ÁGUA DE REUSO NA DURABILIDADE
DO CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Lia Lorena Pimentel.

Dissertação defendida e aprovada em 23 de fevereiro de 2021 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de A. Jacintho
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Patricia Stella Pucharelli Fontanini
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me mantido com saúde e força para concluir este trabalho.

Agradeço à minha orientadora Prof. Dra. Lia Lorena Pimentel por aceitar conduzir a minha pesquisa, por acreditar no meu trabalho, por todo o apoio, orientação, correção e paciência.

Agradeço todos os professores do curso de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Universidade Católica de Campinas pela excelência e por cada conhecimento transmitido.

Aos meus pais, meu irmão e meu esposo por estarem ao meu lado durante toda a minha trajetória e pela compreensão nos momentos em que precisei estar ausente.

Agradeço à PUC-Campinas pela bolsa de estudos concedida.

Também tenho que agradecer aos técnicos de laboratório Pedro, Igor, Wellington e Fernando por todo o auxílio com os ensaios em laboratório.

Agradeço à SANASA pela doação de água de reuso para a elaboração desta pesquisa.

RESUMO

SCAQUETTI, Carolina Carneiro de Freitas. *Influência da água de reuso na durabilidade do concreto*. 2021. 116 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2021.

Devido à poluição dos corpos hídricos, ao aumento da população mundial, ao crescimento das atividades industriais, aos longos períodos de estiagem, dentre outros fatores, houve um desequilíbrio na relação oferta e demanda por água potável. Uma possível solução para este problema é a substituição da água potável por outra com menor qualidade para atividades que exijam um menor padrão de potabilidade. A indústria da construção civil consome grande quantidade de água em suas atividades, sendo que o aço e o concreto são os materiais de construção com a maior quantidade de água incorporada, aquela que considera a água utilizada para extração, produção e transporte. A água de reuso surge como uma alternativa para a diminuição do consumo de água potável. O interesse por utilizar água de reuso na construção civil vem crescendo em momentos de escassez, como a crise hídrica que o Brasil enfrentou em 2014 e a constante preocupação com a sustentabilidade. Este trabalho utilizou água de reuso como água de amassamento do concreto, com o objetivo de reduzir o consumo de água potável. A água de reuso foi doada por uma estação de tratamento de esgoto, localizada na região metropolitana de Campinas (RMC). A qualidade da água foi analisada de acordo com a NBR 15900-1 (ABNT, 2009). Foram realizados ensaios experimentais com o concreto no estado fresco, endurecido e após exposição a ambientes agressivos, visando avaliar a influência da água de reuso nas características físicas e mecânicas de concreto. Inicialmente foi avaliada a influência da água de reuso no calor de hidratação de vários tipos de cimento *Portland*. Na sequência foram produzidos dois traços, um com água potável (referência) e outro com água de reuso, para os quais foram determinadas a consistência e as características de resistência à compressão, módulo de elasticidade, determinação da capacidade de absorção de água por imersão, e por capilaridade, determinação da penetração de íons cloro, carbonatação e a permeabilidade ao ar. Para tal, após 28 dias de cura em câmara úmida, parte dos corpos de prova foram ensaiados. Os demais foram divididos em 3 grupos: um foi mantido em câmara úmida como controle, outro grupo de corpos de prova foi exposto à intempérie até atingir às idades de 135 e 220 dias e o terceiro grupo foi exposto à ataque em solução salina até atingir as idades de 220 e 340 dias. Aos 28 dias a resistência à compressão do traço com água de reuso foi 8% menor do que para o traço com água potável. Em relação ao Módulo de Elasticidade, não houve variação significativa entre o traço produzido com água potável e o com água de reuso. As características do concreto que influenciam a durabilidade do concreto como a absorção de água por capilaridade e por imersão, permeabilidade ao ar, profundidade da carbonatação e de íons cloro não apresentaram diferenças significativas entre o concreto produzido com água de reuso e o com água potável. Foi observado que a determinação da presença de açúcares na água de reuso para a produção de concreto é um parâmetro de fundamental importância.

Palavras-chave: concreto; água de reuso; durabilidade

ABSTRACT

SCAQUETTI, Carolina Carneiro de Freitas. *Influence of wastewater on the durability of concrete*. 2021. 116 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2021.

Due to the pollution of water bodies, the increase in the world population, the growth of industrial activities, the long periods of drought, among other factors, there was an imbalance in the supply and demand for drinking water. A possible solution to this problem is the substitution of drinking water for one of lower quality for activities that require a lower standard of drinking. The construction industry consumes a large amount of water in its activities, with steel and concrete being the building materials with the largest amount of incorporated water, the one that considers the water used for its extraction, production and transportation of the material. The reuse water appears as an alternative to reduce the consumption of drinking water. The interest in using reused water in civil construction has been growing in times of scarcity, such as the water crisis that Brazil faced in 2014 and the constant concern with sustainability. This research used wastewater as concrete mixing water, in order to reduce the consumption of drinking water. The wastewater was donated by a sewage treatment plant, located in the metropolitan region of Campinas (RMC). The water quality was analyzed according to NBR 15900 (ABNT, 2009). Experimental tests were carried out with the concrete in a fresh, hardened state and after exposure to aggressive environments, aiming to evaluate the influence of wastewater on the physical and mechanical characteristics of concrete. Initially, the influence of wastewater on the hydration heat of various types of Portland cement was evaluated. Next, two concrete mixtures were produced, one with drinking water (reference) and the other with wastewater, for which consistency and characteristics of compressive strength, modulus of elasticity, determination of the water absorption capacity by immersion were determined, capillary water absorption capacity, determination of chlorine ion penetration, carbonation and air permeability. For this, after 28 days of curing in a humid chamber, part of the specimens were tested. The others were divided into 3 groups: one was kept in a humid chamber as a control, another group of specimens was exposed to the weather until reaching the ages of 135 and 220 days and the third group was exposed to the attack in saline until reaching the ages of 220 and 340 days. At 28 days the compressive strength of the mix with reused water was 8% lower than that for the mix with drinking water. Regarding the Elasticity Module, there was no significant variation between the mixture produced with drinking water and that with wastewater. The characteristics of the concrete that influence the durability of the concrete, such as water absorption by capillarity and immersion, air permeability, depth of carbonation and chlorine ions, did not show significant differences between the concrete produced with water for reuse and that with drinking water. It was observed that the determination of the presence of sugars in the reuse water for the production of concrete is a parameter of fundamental importance.

Key-Word: concrete; wastewater; reuse; durability

LISTA DE FIGURAS

	<i>Página</i>
Figura 01 Potenciais usos da água de reuso.....	11
Figura 02 Total de água consumida nas bacias Hidrográficas no Brasil (em 2019).....	11
Figura 03 Países com publicações.....	15
Figura 04 Modalidades de reuso.....	21
Figura 05 Representação do conceito de adequação ao uso.....	23
Figura 06 Estação Produtora de Água de Reuso.....	24
Figura 07 Peneira Rotativa com abertura de 2mm.....	25
Figura 08 Detalhe interna da Peneira Rotativa.....	25
Figura 09 Sistema Biológico da Estação de Tratamento.....	26
Figura 10 Cassete de membranas.....	26
Figura 11 Cassete de membranas submersas.....	27
Figura 12 Efluente tratado saindo pela calha Parshal.....	27
Figura 13 Coloração inicial e final do efluente.....	28
Figura 14 Fluxograma de aceitação da água para amassamento do concreto.....	38
Figura 15 Permeabilidade de íons cloro em concreto.....	46
Figura 16 Tipos de poros.....	60
Figura 17 Diferença entre Porosidade e Permeabilidade.....	61
Figura 18 Procedimentos da pesquisa.....	65
Figura 19 Processo de hidratação do cimento interrompido pelo açúcar.....	67
Figura 20 Método Qualitativo.....	68
Figura 21 Método Quantitativo – amostra 1.....	69
Figura 22 Método Quantitativo – amostra 2.....	70
Figura 23 Aparato para o desenvolvimento do ensaio de calor de hidratação.....	71
Figura 24 Copo com a pasta de cimento.....	71
Figura 25 Calor de hidratação CP II F 32.....	72
Figura 26 Calor de hidratação – CP IV 32.....	73
Figura 27 Calor de hidratação – CP V ARI.....	74
Figura 28 Corpos de prova expostos a intempérie.....	77
Figura 29 Corpos de prova sendo secos ao tempo.....	78
Figura 30 Corpos de prova em tanque imersos.....	78
Figura 31 Corpo de prova após a aspersão de fenolftaleína.....	81

Figura 32	Tripé e corpo de prova após aspersão de fenolftaleína posicionado para as fotos.....	82
Figura 33	Detalhe do corpo de prova posicionado para as fotos.....	82
Figura 34	Corpo de prova após a aspersão de nitrato de prata.....	83
Figura 35	Porosiscopes TM	84
Figura 36	Ensaio para determinação de permeabilidade superficial com equipamento Porosiscopes TM	85
Figura 37	Resultados da resistência à compressão axial – água potável.....	89
Figura 38	Resultados da resistência à compressão axial – água de reuso.....	89
Figura 39	Resultados do Módulo de Elasticidade – água potável.....	92
Figura 40	Resultados do Módulo de Elasticidade – água de reuso.....	93
Figura 41	Resultados da Capacidade de absorção de água por imersão (%) – água potável.....	94
Figura 42	Resultados da Capacidade de absorção de água por imersão (%) – água de reuso.....	95
Figura 43	Resultados da Capacidade de absorção de água por capilaridade - Controle.....	96
Figura 44	Resultados da Capacidade de absorção de água por capilaridade – Expostos à intempérie.....	97
Figura 45	Resultados da Capacidade de absorção de água por capilaridade – imersão salina.....	98
Figura 46	Carbonatação – medição.....	100
Figura 47	Penetração de íons cloro – medição.....	101

LISTA DE TABELAS

	<i>Página</i>
Tabela 01 Contribuição dos materiais para a Pegada Hídrica (PH) para obras.....	13
Tabela 02 Padrão de qualidade para Água Classe B.....	29
Tabela 03 Ensaio químicos e substâncias prejudiciais.....	35
Tabela 04 Tópicos comparativos entre as Normas CEN EN 1008 (2002), ISO 12439 (2010) e ABNT 15900-1 (2009).....	36
Tabela 05 Ensaio químicos e substâncias prejudiciais.....	39
Tabela 06 Ensaio físicos e mecânicos.....	40
Tabela 07 Resultados dos ensaios de resistividade elétrica do concreto em 90 dias	48
Tabela 08 Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.....	52
Tabela 09 Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para Dc = 10 mm.....	52
Tabela 10 Resistência e tipos de cimento.....	53
Tabela 11 Principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado.....	54
Tabela 12 Ensaio químicos.....	66
Tabela 13 Delineamento para ensaio de Calor de hidratação do cimento.....	72
Tabela 14 Limites de composição do Cimento <i>Portland</i> – Tipo CP V ARI (porcentagem em massa).....	74
Tabela 15 Requisitos químicos do cimento <i>Portland</i> (expresso em porcentagem de massa).....	75
Tabela 16 Requisitos físicos e mecânicos do CP V ARI.....	75
Tabela 17 Traço unitário do concreto em massa.....	75
Tabela 18 Ensaio no estado endurecido.....	78
Tabela 19 Classificação do material quanto à permeabilidade ao ar.....	80
Tabela 20 Quantidade de corpos de prova.....	85
Tabela 21 Resultados <i>Slump Test</i>	87
Tabela 22 Resultados Resistência à compressão axial.....	88
Tabela 23 Resultados Resistência à compressão axial após ciclos de imersão em solução salina.....	88
Tabela 24 Análise de variância – Resistência à compressão.....	90
Tabela 25 Resultados Módulo de Elasticidade.....	91
Tabela 26 Resultados Módulo de Elasticidade após ciclos de imersão em solução salina.....	92
Tabela 27 Análise de variância – Módulo de Elasticidade.....	93

Tabela 28	Análise de variância – Capacidade de absorção por imersão.....	96
Tabela 29	Análise de variância – Capacidade de absorção por capilaridade.....	98
Tabela 30	Resultados ensaio de Permeabilidade ao ar - <i>Poroscope™</i>	99
Tabela 31	Resultados da Carbonatação.....	100
Tabela 32	Resultados Penetração de íon cloro.....	101

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivo	16
1.1.1	Objetivos Específicos	16
1.2	Estrutura do Trabalho	16
2	ÁGUA DE REUSO	18
2.1	Tratamento de efluentes	21
2.2	Regulamentação sobre a água de reuso no Brasil	28
3	INFLUÊNCIA DA ÁGUA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO	31
3.1	Padrão da água para amassamento do concreto	34
3.1.1	Propriedades físicas da água	39
3.1.2	Propriedades químicas da água	39
3.1.3	Influência da água de reuso nas propriedades do concreto	41
3.1.3.1	Trabalhabilidade	41
3.1.3.2	Tempo de pega	42
3.1.3.3	Resistência à compressão	43
3.1.3.4	Resistência à tração na flexão	44
3.1.3.5	Módulo de Elasticidade	44
3.1.3.6	Capacidade de Absorção de água	44
3.1.3.7	Carbonatação	45
3.1.3.8	Permeabilidade aos íons cloreto	45
3.1.3.9	Desgaste por abrasão	47
3.1.3.10	Porosidade	47
3.1.3.11	Resistividade elétrica do concreto	48
4	DURABILIDADE DO CONCRETO	49
4.1	Conceito de durabilidade	49
4.2	Classes de agressividade ambiental	51
4.3	Deterioração do concreto armado	53

4.3.1	Mecanismos de deterioração do concreto	55
4.3.2	Mecanismos de deterioração da armadura - corrosão	56
4.4	Mecanismos de transporte de gases e fluídos para o interior do concreto	60
4.4.1	Difusão	62
4.4.2	Absorção capilar	62
4.4.3	Permeabilidade.....	63
5	METODOLOGIA	65
5.1	Caracterização da água de reuso	66
5.2	Caracterização dos materiais.....	70
5.3	Durabilidade do concreto com água de reuso.....	75
5.3.1	Meios agressivos aplicados ao concreto	76
5.3.2	Características do concreto	78
5.3.3	Análise dos resultados	85
6	RESULTADOS.....	87
6.1	Características do concreto no estado fresco	87
6.2	Características mecânicas do concreto no estado endurecido	87
6.3	Ensaio de medição indireta de durabilidade.....	94
7	CONCLUSÃO	103
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	105

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para garantir a vida na terra, ela ocupa aproximadamente 70% da superfície do planeta; por conta disso, a ideia de que a falta de água pode inviabilizar a vida humana parece radical, mas não é. Do volume de água no planeta apenas 2,5% é doce, e deste apenas 0,3% constitui a porção superficial de água presente em rios e lagos (MMA, 2005).

O aumento da população mundial e das atividades industriais, a poluição dos corpos hídricos e os períodos de estiagem, causam um desequilíbrio na relação de oferta e demanda por água necessária para atividades como consumo humano, uso na agropecuária e uso doméstico.

O mau uso da água vem causando sérios problemas ambientais, como poluição da água e do ar, contaminação do solo, extinção de animais e mudanças climáticas (MMA, 2005).

Mesmo países com recursos hídricos abundantes não estão livres de uma ameaça de crise. Estima-se que o Brasil possui cerca de 12% da disponibilidade de água doce do planeta, porém essa distribuição não é igualitária para todas as regiões. A região Norte concentra cerca de 80% do volume de água do País, no entanto apenas 5% da população brasileira mora nesta esta região (ANA; FIESP; SINDUSCON-SP, 2005). Além disso, o consumo está diretamente ligado ao nível cultural e social da população.

Devido aos problemas mencionados, nota-se que existe a necessidade do desenvolvimento de soluções que revertam a situação e minimizem os impactos das atividades humanas sob os recursos hídricos, uma das possibilidades é a diminuição do consumo de água potável. Essa redução pode ocorrer com o uso de água de chuva e reutilização de água, programas de conscientização para evitar o desperdício, instalação de dispositivos como arejadores e redutores de vazão em torneiras, identificação e correção de vazamentos, manutenção em boias e regulação de válvulas.

O ciclo hidrológico é um sistema natural que produz água reciclada limpa e segura para ser utilizada. Através das atividades antrópicas a água é deteriorada, contudo pode ser recuperada e ter um novo uso, sendo que o nível de tratamento depende dos recursos disponíveis (HESPANHOL, 2002).

Devido ao aumento da demanda e a baixa disponibilidade, o custo da água tende a aumentar, elevando a sua participação no custo total de um empreendimento (PESSARELLO, 2008).

A utilização de água de reuso é possível em situações onde existe viabilidade de se utilizar água de menor qualidade para fins menos nobres, conservando a água potável para fins mais nobres, trazendo benefícios aos usuários, como o aumento da produtividade agrícola, a redução de custos com a compra de água e a preservação de aquíferos subterrâneos (RODRIGUES, 2005).

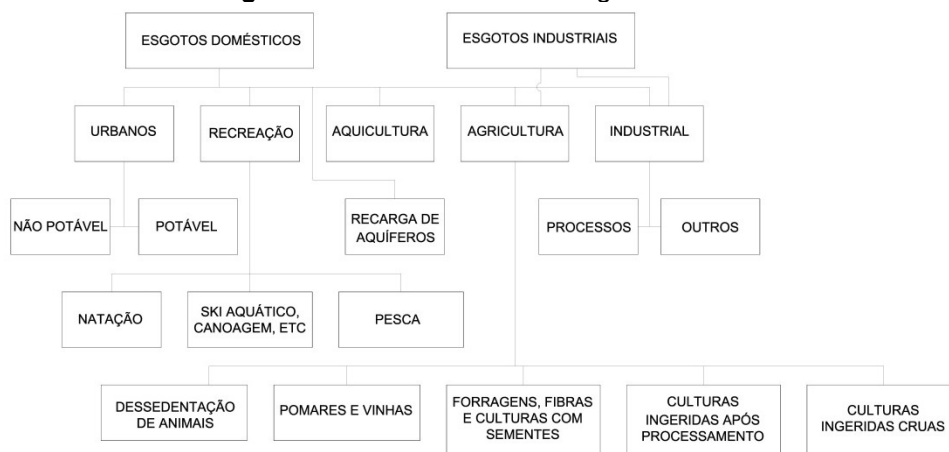
Apesar do aumento da utilização desta água, ainda não existe no Brasil uma legislação específica que regule esse setor, ou um sistema de informações sobre o reuso no País. De acordo com Almeida (2011) é necessário que o País crie projetos piloto, cujos resultados forneçam dados que possibilitem a formulação de diretrizes para a criação de normas e legislações adaptadas às características brasileiras.

Segundo Paes *et al.* (2010), a utilização de um sistema de reuso de água residencial (como a água descartada da máquina de lavar roupas) é importante como complemento ao abastecimento urbano, pois preserva a água potável para atendimento de necessidades que exigem a sua potabilidade, além de exigir menos dos sistemas públicos de água e esgoto.

As legislações sobre o lançamento de esgoto e qualidade da água potável e a divisão de águas em classes, definidas nas Resoluções 20 (1986) e 357 (2005) do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), podem fornecer subsídios para a elaboração de critérios adaptados à realidade nacional.

Na Figura 01 são apresentados os potenciais usos da água de reuso. Os esgotos industriais possuem menos opções de utilização devido às contaminações que essas águas sofrem durante os processos industriais, por isso o esgoto de fonte doméstica oferece mais opções de usos.

No Brasil os usos para a água de reuso são restritos para fins não potáveis como lavagem de ruas, irrigação paisagística e usos na construção civil, como terraplenagem e desobstrução de galerias.

Figura 01. Potenciais usos da água de reuso

Fonte: Adaptado de HESPANHOL (2008)

A Figura 02 apresenta o total de água consumida nas Bacias Hidrográficas no Brasil em 2019. A maior parcela de água é consumida principalmente para irrigação, abastecimento humano e animal, uso na indústria, geração de energia, mineração, aquicultura, navegação, recreação e lazer (ANA, 2020).

Figura 02. Total de água consumida nas bacias Hidrográficas no Brasil (em 2019)

Fonte: ANA (2020)

Portanto, se a indústria ou a agricultura melhorarem seus processos produtivos, reduzindo o consumo de água ou passando a utilizar a água de reuso, liberariam água potável para outros usos.

Um estudo australiano avaliou o consumo de água em 17 construções não residenciais e verificou que há uma quantidade considerável de água incorporada na construção, sendo que a obra com maior consumo atingiu o valor

de 20.100 l/m² de área bruta da construção, e a estrutura chegou a consumir 37% do total. O concreto foi o segundo material com maior quantidade de água incorporada, perdendo apenas para o aço. O estudo concluiu que a água requerida pelo processo principal da construção é mínima, porém a água incorporada na extração, produção, fabricação e entrega dos materiais e produtos é considerável (MCCORMACK *et al.*, 2007).

Outra fase da construção civil que consome grande quantidade de água é a pavimentação, para cada metro cúbico de aterro compactado são utilizados cerca de 300 litros de água, isso sem falar na água para a lavagem dos equipamentos (ISAIA, 2011). Embora o consumo de água na construção civil seja significativo, normalmente as empresas consideram em seu orçamento um valor estimado mensal baseado em obras anteriores.

O consumo de água nos canteiros de obras ainda é pouco estudado. O 76º Encontro Nacional da Indústria da Construção Civil abordou o consumo de água durante a construção de uma obra, mas gerou apenas um capítulo no “Manual de Conservação e Reuso da Águas em edificações” da ANA em 2005 (PESSARELLO, 2008).

Pessarello (2008) avaliou o consumo de água no canteiro de obras de três empreendimentos com tamanhos e características construtivas diferentes, e concluiu que o consumo de água em volume por área construída variou entre 0,37 a 0,68. O percentual de participação do consumo de água chegou a ser 0,7% do custo total do empreendimento.

Marques, Gomes e Brandli (2017) avaliaram o consumo de água e energia no canteiro de obras de seis diferentes empreendimentos, a variação do consumo de água esteve entre 0,02m³/m² e 0,28m³/m². Os autores notaram que a técnica construtiva, as soluções arquitetônicas adotadas e o tamanho dos empreendimentos influenciaram no consumo de água nos canteiros. A técnica construtiva adotada influenciou o consumo, visto que obras comerciais e obras residenciais possuem características diferentes no que diz respeito aos materiais utilizados, como por exemplo, o uso de divisórias em gesso acartonado, por isso obras comerciais tiveram um consumo inferior quando comparadas as demais.

O Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo (SindusCon-SP), a Caixa Econômica Federal e o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) lançaram em 2019 o Guia Metodológico de

Cálculo de Pegada Hídrica para edificações, o material busca trazer um método de mensuração do consumo de água na produção e operação de um empreendimento, considerando tanto o uso direto por um consumidor como o uso indireto.

O guia mostra que a maior parcela da Pegada Hídrica (PH) está relacionada aos usos indiretos, aquela incorporada aos materiais, e não ao uso direto em canteiro. A Tabela 01 apresenta a contribuição dos materiais para a pegada hídrica das obras do Grupo de Trabalho utilizada durante a produção do guia. As informações foram baseadas em literaturas relativas aos coeficientes de PH dos materiais.

Tabela 01. Contribuição dos materiais para a Pegada Hídrica (PH) para obras

MAT1	% média	% média acumulada
Concreto	42,6	42,6
Aço	40,5	83,0
Bloco de concreto	4,0	87,1
Laje pré-fabricada	3,4	90,5
Elétrica	2,3	92,8
Argamassa	1,9	94,7
Hidráulica	1,3	95,9
Tela	1,1	97,2
Bloco cerâmico	0,8	98,0
Cimento	0,8	98,8
Revestimento	0,3	99,1
Formas de madeira	0,3	99,4
Piso	0,2	99,7
Gesso	0,1	99,8
Tinta	0,1	99,9
Pedra	0,1	99,9
Madeira	0,0	100,0
Monocapa	0,0	100,0
Areia	0,0	100,0

Fonte: SINDUSCON-SP; CAIXA; PNUD, (2019)

O concreto e o aço detêm as parcelas mais altas de pegada hídrica, chegando a 83%. Isso aponta a necessidade de compreender melhor a cadeia produtiva dos materiais (SINDUSCON-SP; CAIXA; PNUD, 2019).

A procura por soluções para tornar a Construção Civil mais sustentável é inevitável, as ações abaixo podem contribuir com essa busca:

- Usar disposições construtivas que proporcionem maior conforto acústico, térmico e visual, e consequentemente menor consumo de energia;
- Limitar os impactos do empreendimento na vizinhança;

- Limitar os riscos de contaminação do solo, água e ar;
- Implantar soluções que facilitem a manutenção dos sistemas construtivos;
- Controlar o consumo de água e energia, como por exemplo, com o uso de acessórios economizadores.

Ao mesmo tempo existe a preocupação com os gastos para reparação de estruturas degradadas. Por isso, este trabalho avaliou os impactos nas características físicas e mecânicas do concreto produzido com água de reuso, tendo como foco sua durabilidade. A finalidade foi verificar a viabilidade de utilização da água de reuso na produção de concreto, expandindo possíveis campos de utilização para esta água e consequentemente incentivando a Sustentabilidade na Construção Civil.

São necessários estudos que ampliem o campo de conhecimento sobre a influência da água de reuso na produção do concreto, para entender como as propriedades da água de reuso podem influenciar nas características do concreto, analisando se o concreto produzido com este tipo de água atende a padrões de qualidade como a resistência à compressão e módulo de elasticidade, e parâmetros de durabilidade como a capacidade de absorção de água.

Para o início desta pesquisa foi realizado um levantamento bibliométrico em abril de 2019 nas bases de dados internacionais *ScienceDirect*, *Web of Science* e *Scopus*, essas bases foram selecionadas devido a sua relevância no mundo acadêmico. Nos termos da pesquisa avançada empregaram-se as palavras *concrete and wastewater and reuse*, e quando o complemento era necessário empregaram-se as palavras *concrete and wastewater* no título de pesquisa. A definição das palavras-chave foi importante, visto que sem os filtros de pesquisa os artigos retornados continham temas muito diferentes do que este trabalho propunha.

A pesquisa nas bases de dados mencionadas retornou 153 resultados, sendo que 60% correspondiam a artigos de revista. Porém, os trabalhos tratavam sobre diversos temas, olhando o título e o resumo de cada artigo, apenas 14 apresentam textos que realmente tratavam sobre o tema e contribuíam com o avanço do conhecimento sobre os impactos da água de reuso na produção do concreto. Os demais resultados tratavam sobre assuntos como,

por exemplo, o tratamento de água de lavagem do caminhão betoneira, gestão e utilização de usinas de concreto, utilização de lamas de tratamento de esgoto na produção de concreto e tratamento de águas residuais.

A distribuição histórica do tema mostra que a primeira publicação disponível é datada de 1991, e que partir de 2011 o número de publicações aumentou. O aumento confirma que o tema tem crescido nos últimos nove anos, que é atual e relevante. Uma das possíveis explicações são as recentes preocupações com a conservação de recursos não renováveis para as futuras gerações. Participaram das publicações 46 pesquisadores de 09 países diferentes; a Índia é o país com maior ocorrência de artigos com 05 publicações. Na Figura 03 é possível notar que os países que mais pesquisam sobre o tema estão localizados no Oriente Médio. Brasil, Canada, Iraque, Omã e Taiwan tiveram apenas uma publicação, o Irã realizou 02 estudos e a Índia realizou 03 estudos.

Figura 03. Países com publicações



Fonte: autor (2019)

Devido aos poucos resultados retornados, é possível concluir que existe a necessidade de implementação de estudos que visem a incorporação de água de reuso no concreto, pois ainda é limitada. Os estudos evidenciam a necessidade de novas pesquisas para aumentar o conhecimento sobre os impactos da água de reuso nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade do concreto.

Este estudo pretende incentivar o uso da água de reuso na construção civil, diminuir o consumo de água potável para a produção de concreto, e consequentemente diminuir os impactos da construção civil ao meio ambiente.

A pesquisa teve como foco a durabilidade das estruturas de concreto armado, sendo que os resultados desta pesquisa ampliaram o conhecimento sobre o impacto da água de reuso no concreto.

1.1 Objetivo

Avaliar o impacto do uso da água de reuso na produção do concreto.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Caracterizar a água de reuso, comparando-a com as especificações estabelecidas por norma para a água de amassamento;
- Comparar as características físicas e mecânicas de concretos produzidos com água potável e água de reuso;
- Avaliar o desempenho físico e mecânico do concreto produzido com água de reuso submetido a meios agressivos.

1.2 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está dividido em oito capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução do trabalho, objetivo e a estrutura do trabalho.

Os capítulos 2, 3 e 4 exibem o estado da arte. O capítulo dois traz a definição de água de reuso, seu nível de tratamento, legislações e os padrões de tratamento.

O capítulo três apresenta a influência da água nas propriedades do concreto, e os resultados encontrados por outros autores que utilizaram água de reuso e água de menor qualidade para a produção do concreto. O capítulo quatro apresenta os conceitos de durabilidade, finalizando a revisão bibliográfica.

O capítulo cinco expõe a metodologia que foi utilizada no trabalho. O capítulo seis traz os resultados e no capítulo sete são apresentadas as conclusões. E finalmente as referências utilizadas para a pesquisa.

2 ÁGUA DE REUSO

“A não ser que exista grande disponibilidade, nenhuma água de boa qualidade deve ser utilizada para usos que toleram águas de qualidade inferior” (United Nations, 1958, *apud* HESPANHOL, 2008).

De acordo com o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2020: água e mudanças climáticas, as mudanças climáticas afetarão a disponibilidade, a qualidade e a quantidade de água para as necessidades humanas básicas, acrescentando um desafio para a gestão sustentável de recursos hídricos. O consumo de água aumentou seis vezes nos últimos cem anos, e continua a crescer a uma taxa constante de 1% ao ano. Muitos impactos se manifestarão nas zonas tropicais, onde está localizada a maior parte dos países em desenvolvimento. Países da África Subsaariana, que já se encontram em situação de vulnerabilidade e escassez de água, tendem a ser impactados pelas mudanças climáticas relacionadas à água sobre a saúde humana, em função das doenças transmitidas pela água poluída e pela desnutrição. Sendo assim, é cada vez mais necessário considerar recursos alternativos como o reuso da água, desde que seja utilizada com segurança.

O reuso pode ser entendido como o reaproveitamento de água após o uso humano, chamada de água servida (TELLES; COSTA, 2010). A água de reuso pode ser definida como água residuária que se encontra dentro dos padrões exigidos para sua utilização (ANA; FIESP; SINDUSCON-SP, 2005).

Um programa de reuso também deve compreender o controle de perdas e desperdícios, a minimização do consumo de água e consequentemente da produção de efluentes. A água de reuso pode ser utilizada no meio urbano, podendo ter finalidades potáveis, não potáveis ou em indústrias. Para o uso no meio agrícola devem ser adotados alguns cuidados especiais, considerando parâmetros químicos e biológicos, com a finalidade de diminuir a probabilidade de propagação de patógenos, evitando o desenvolvimento de doenças e garantindo o sucesso na sua utilização (TELLES; COSTA, 2010).

De acordo com a Organização Mundial da Saúde, OMS, (1973) *apud* Santos e Mancuso (2007) a utilização da água de reuso pode ser classificada em:

- **Reuso indireto:** a água é utilizada, descartada nas águas superficiais ou subterrâneas e utilizada mais adiante, de forma diluída. Ele pode ser intencional ou não intencional;
- **Reuso direto:** uso planejado de esgotos tratados para certas finalidades como irrigação, recarga de aquífero e uso industrial;
- **Reciclagem interna:** reuso de água nas instalações industriais com o objetivo de economizar água e controlar a poluição.

A Resolução nº 54 de 28 de novembro de 2005 do Ministério do Meio Ambiente estabelece uma classificação de acordo com a modalidade para a prática de reuso direto não potável em:

- **Reuso para fins urbanos:** Utilização de água de reuso para fins de irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil, edificações, combate a incêndio, dentro da área urbana;
- **Reuso para fins agrícolas e florestais:** Aplicação de água de reuso para produção agrícola e cultivo de florestas plantadas;
- **Reuso para fins ambientais:** Utilização de água de reuso para implantação de projetos de recuperação do meio ambiente;
- **Reuso para fins industriais:** Utilização de água de reuso em processos, atividades e operações industriais;
- **Reuso na aquicultura:** Utilização de água de reuso para a criação de animais ou cultivo de vegetais aquáticos.

Moura *et al.* (2020) propuseram uma classificação que consideram mais atualizada, levando em consideração a origem da água de reuso:

- **Reuso local ou interno:** proveniente de águas cinzas a partir de reuso residencial (casa ou prédio) e reuso de novos empreendimentos comerciais ou não - considerando que, segundo Fiori, Fernandes e Pizzo (2005), as águas cinzas são aquelas provenientes dos lavatórios, dos chuveiros, dos tanques e das máquinas de lavar roupa e louça;

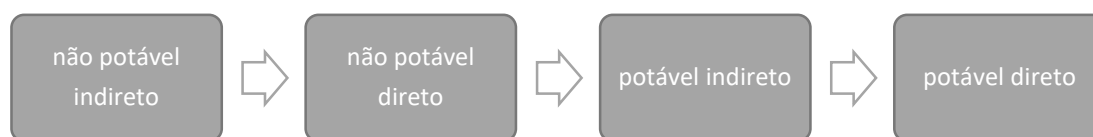
- **Reuso externo:** proveniente de águas negras (esgoto bruto) a partir de ETEs e que passam, na sequência, por ETAR - considerando que, segundo Gonçalves (2009), as águas negras são efluentes provenientes dos vasos sanitários, contendo, basicamente, fezes, urina e papel higiênico, ou de dispositivos separadores de fezes e urina, tendo em sua composição grandes quantidades de matéria fecal e papel higiênico, o que justifica a elevada carga orgânica e a presença de sólidos em suspensão, em grande parte sedimentáveis;
- **Reuso industrial:** proveniente de águas a partir de atividades industriais do próprio empreendimento (reuso direto interno) ou a partir de reuso externo.

O reuso potável direto apresenta muitos riscos devido à presença de organismos patogênicos e compostos orgânicos sintéticos, por isso a OMS não recomenda seu uso, além do mais existe um alto custo para o tratamento adequado, tornando-o praticamente inviável (TELLES; COSTA, 2010). Caso sua utilização seja imprescindível é necessário utilizar apenas esgoto doméstico, pois o esgoto industrial apresenta uma quantidade enorme de compostos de alto risco (HESPANHOL, 2002).

O ideal é utilizar o sistema de reuso indireto, aquele em que o esgoto é diluído em um corpo hídrico, e após um longo tempo de detenção, é feita a captação, seguido de tratamento adequado, distribuição e emprego de múltiplas barreiras nos sistemas de tratamento. Para o sucesso de um programa de reuso é necessário contar com a aceitação pública (HESPANHOL, 2002).

O reuso de água no meio urbano para fins não potáveis deve ser considerado como a primeira opção, pois oferece menos riscos, mas devem ser tomados cuidados especiais caso ocorra contato direto com o público.

Como regra geral, para se evitar os riscos sanitários associados à utilização da água de reuso, a seguinte sequência de modalidades de aplicação pode ser adotada, partindo da mais recomendada para a menos recomendada conforme Figura 04 (SANTOS; MANCUSO, 2007):

Figura 04. Modalidades de reuso

Fonte: SANTOS e MANCUSO (2007)

A aplicação da água de reuso no meio urbano pode ser classificada em duas categorias, quando o acesso não é controlado, ou seja, existe acesso ao público, exigindo um alto grau de tratamento. E o acesso controlado, quando o acesso ao público é restrito, exemplos disso são usos para limpeza de rodovias intermediárias ou cemitérios e irrigação de campos de golfe (USEPA 2004 *apud* TELLES; COSTA, 2010).

A utilização de água de reuso para a produção de concreto é classificada como reuso industrial direto e planejado das águas, contando com a incorporação desta água no produto final, no caso o concreto.

Os altos custos da água industrial têm levado a indústria a considerar a compra de efluentes tratados a preços menores que os da água potável do sistema de abastecimento (HESPANHOL, 2002).

Na cidade de Campinas-SP a tarifa de água tratada para indústrias com consumo acima de 50m³ é de R\$35,10/m³ para o ano de 2020 (CAMPINAS, 2019).

A compra de 1m³ de água de reuso com retirada custa R\$2,26/m³. A compra de 14m³ de água de reuso com entrega custa R\$369,35, o que representa R\$26,38/m³ (CAMPINAS, 2019). A compra da água de reuso a custos menores pode ser um incentivo para a indústria.

2.1 Tratamento de efluentes

O esgoto sanitário é o despejo líquido constituído de esgoto doméstico e industrial, água de infiltração e parcela de contribuição pluvial (ANA; FIESP; SINDUSCON-SP, 2005; ABNT NBR 9648, 1986).

O tratamento de esgoto é a remoção de poluentes contidos no efluente. O esgoto é formado por 99,9% de água e 0,1% de impurezas, o tratamento de efluentes visa remover essas impurezas. Para o tratamento, tudo

o que não é água é sólido. O tratamento de esgoto visa remover sólidos presentes, matéria orgânica, patógenos, nitrogênio e fósforo; resultando em água e lodo. O reuso é o aproveitamento do efluente após uma extensão de seu tratamento, com ou sem investimentos adicionais (TELLES; COSTA, 2010).

A adequação da água ao uso parte do pressuposto de que várias operações dispensam água potável, o nível de qualidade seria um intermediário entre esgoto bruto e água potável, deste modo é necessário decidir qual é esse nível e definir o tratamento mais adequado para atingi-lo (SANTOS; MANCUSO 2007).

Em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), a água com impurezas provenientes do uso municipal, passa por várias etapas para ser despoluída e devolvida aos corpos d'água. O tratamento a ser adotado depende das características físicas, químicas e biológicas do efluente.

A reutilização de água não é algo simples e exige cuidados quanto à qualidade da água e a sua destinação. No processo de tratamento de esgoto para produção de água de reuso são utilizadas várias técnicas para a remoção dos resíduos. Segundo Almeida (2011), podem ser citados os seguintes processos:

- Processos físicos: peneiramento, sedimentação e flotação;
- Processos biológicos: remoção efetuada por microrganismos;
- Processos físico-químicos: coagulação, floculação, decantação, filtração, adsorção por carvão, calagem e osmose reversa.

O tratamento se divide em duas grandes fases: físico-química, onde há a remoção dos contaminantes através de reações químicas e biológica, realizado por meio de bactérias ou microrganismos que consomem a matéria orgânica poluente através do processo respiratório.

Tradicionalmente os níveis de tratamento de esgoto são classificados em (VON SPERLING, 2014; OLIVEIRA, 2004):

- Preliminar: Remove apenas sólidos grosseiros;
- Primário: Remove sólidos em suspensão sedimentáveis e flotáveis;
- Secundário: Principal responsável pela remoção da carga orgânica;

- Terciário: Obtém-se alta qualidade com a remoção de outras substâncias não removidas em tratamentos anteriores como metais, nitrogênio, fósforo ou para desinfecção.

Existem ainda o pré-tratamento, que consiste em tratar o esgoto antes do mesmo ser lançado na rede coletora, visando atender ao sistema de tratamento, e o tratamento quaternário ou avançado, pouco utilizado no Brasil e normalmente requerido para aplicações em reuso, podendo tornar a água servida em novamente potável (VON SPERLING, 2014).

O padrão da qualidade da água de reuso depende do uso pretendido. Este conceito pode ser verificado na Figura 05. Sendo assim, é possível controlar os custos envolvidos (USEPA, 2012 *apud* CUNHA, 2020).

Figura 05. Representação do conceito de adequação ao uso



Fonte: Adequação de USEPA (2012) *apud* CUNHA (2020)

De acordo com Von Sperling (2014) os principais sistemas de tratamento são: lagoas de estabilização, disposição no solo, sistemas alagados construídos (*Wetlands*), sistemas anaeróbios, lodos ativados e reatores anaeróbios com biofiltros. As seis tecnologias de tratamento de esgoto mais utilizadas no País segundo Oliveira (2006) são:

- Fossa séptica seguida de filtro anaeróbio (FS + FA);
- Lagoas facultativas (LF);
- Lagoas anaeróbias seguidas por lagoas facultativas (LAN + LF);
- Lodos ativados (LA);
- Reatores *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) sem pós-tratamento (UASB);
- Reatores UASB com pós-tratamento (UABS+POS).

Este trabalho empregou água de reuso de uma Estação Produtora de Água localizada na Região Metropolitana de Campinas (RMC). Esta estação recebe esgoto doméstico e produz efluente tratado através da tecnologia de Biorreator com Membranas de Ultrafiltração (MBR), garantindo a desinfecção dentro dos limites legais, deixando a água com alto grau de qualidade (SANASA, 2014). O tratamento retém protozoários, bactérias, vírus e sólidos em suspensão. O município de Campinas-SP vem utilizando água de reuso na construção civil, principalmente em atividades como compactação do solo e terraplanagem (SANASA, 2015).

O processo de tratamento passa pelas seguintes unidades:

Figura 06. Estação Produtora de Água de Reuso



Fonte: SANASA (2014)

Na unidade 01 localiza-se o tratamento preliminar com gradeamento mecanizado com espaçamento de 15mm, a peneira rotativa de malha circular de 2mm de abertura e o desareador mecanizado. A Figura 07 apresenta uma foto lateral da peneira rotativa com abertura de 2mm e a Figura 08 a parte interna da peneira rotativa, onde é possível visualizar os mecanismos de rotação.

Figura 07. Peneira Rotativa com abertura de 2mm



Fonte: SANASA (2014)

Figura 08. Detalhe interna da Peneira Rotativa



Fonte: SANASA (2014)

Na unidade 02 está localizado o tanque anaeróbio, na unidade 03 o tanque anóxico, na unidade 04 o tanque de aeração, na unidade 05 o tanque de membranas de ultrafiltração submersas tipo fibra oca com poro nominal de 0,04 μm , na unidade 06 o tanque de desoxigenação, na unidade 07 está o tanque de permeado. A Figura 09 mostra uma foto aérea dos tanques de tratamento. Na Figura 10 é possível visualizar um cassete de membranas e na Figura 11 as membranas utilizadas para a desinfecção submersas dentro dos tanques.

Figura 09. Sistema Biológico da Estação de Tratamento



Fonte: SANASA (2014)

Figura 10. Cassete de membranas



Fonte: SANASA (2014)

Figura 11. Cassete de membranas submersas



Fonte: SANASA (2014)

Na unidade 08 está a calha Parshall de saída, possível de ser visualizada na Figura 12, e na unidade 09 o tanque de desidratação mecânica para a fase sólida.

Figura 12. Efluente tratado saindo pela calha Parshall



Fonte: SANASA (2014)

Os balões Erlenmeyer da Figura 13 mostram a coloração respectivamente o esgoto bruto e da água de reuso produzida, é possível observar que a água de reuso produzida apresenta uma coloração um pouco amarelada, o que é recorrente de sistemas de tratamento de reuso e aceitável nos ensaios físicos preliminares exigidos pela norma NBR 15900-1 (ABNT, 2009).

Figura 13. Coloração inicial e final do efluente



Fonte: SANASA (2014)

2.2 Regulamentação sobre a água de reuso no Brasil

A consciência de que os recursos hídricos têm fim e merecem tratamento jurídico ganhou definição com a Constituição Federal de 1988 e a Lei 9.433 que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (MANCUSO; SANTOS, 2007).

No Brasil não existe uma norma específica sobre água de reuso, portanto, normalmente quando uma entidade ou empresa pretende implantar um programa para utilizar água de reuso ela se baseia em normas internacionais.

Existem basicamente uma norma técnica e uma resolução que fundamentam empresas que investem nesse tipo de serviço: a Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos nº 54 de 2005, que descreve sucintamente quatro modalidades para a prática do reuso direto não potável e a NBR 13969 (ABNT, 1997) sobre tanques sépticos, que não é uma norma específica sobre água de reuso, mas possui um item dedicado ao tema.

A norma define que, em termos gerais, podem-se adotar as seguintes classificações para a água de reuso em função de sua aplicabilidade, sendo que para cada classe são definidos padrões a serem atendidos:

- Classe 1: Lavagem de carros ou outros usos, inclusive chafarizes, que requerem o contato direto do usuário com a água;

- Classe 2: Lavagens de piso, calçadas e irrigação dos jardins, manutenção de lagos e canais para fins paisagísticos, exceto chafarizes;
- Classe 3: Reuso nas descargas dos vasos sanitários;
- Classe 4: Reuso nos pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual.

Alguns municípios criam leis específicas para tratar este tema, como a Resolução Conjunta da Secretaria do Verde e Desenvolvimento do Verde e da Secretaria Municipal de Saúde SVDS/SMS nº 09/2014 (CAMPINAS, 2014) que estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para o reuso direto não potável de água proveniente de estações de tratamento de esgoto (ETES) de sistemas públicos para fins de usos múltiplos no município de Campinas-SP.

A Resolução divide as águas de reuso em classes:

- Classe A: Águas destinadas ao combate à incêndio e a lavagem automatizada externa de veículos;
- Classe B: Águas destinadas à irrigação paisagística, lavagem de logradouros, construção civil, desobstrução de galerias. A Tabela 02 apresenta o padrão de qualidade para Água Classe B, classificação esta que atende aos usos da água desta pesquisa.

Tabela 02. Padrão de qualidade para Água Classe B

Parâmetros	Valor máximo permitido
Coliformes termotolerantes ou E.coli	200 NMP (UFC/100ml)
Gladi e Cryptosporidium	0,05 cistos ou oocistos/l
Ovos e helmintos	<1 ovo/l
Turbidez	5 NTU
DBO 5,20	30 mg/l
Sólidos em suspensão totais	30 mg/l
Cloreto Total	250 mg/l
Sódio	200 mg/l
Cloro Residual Total (após 30 minutos de tempo de contato)	Máximo de 3,0 mg/l
Cloro Residual Livre (após 30 minutos de tempo de contato)	Máximo de 2,0 mg/l

Fonte: CAMPINAS (2014)

O destino da água de reuso para a construção civil previsto na resolução é a incorporação em concreto não estrutural, cura de concreto, umectação (umedecer, molhar) e compactação de terraplanagens, lamas de perfuração, resfriamento de rolos compressores em pavimentação e controle de poeira.

A Resolução Conjunta SVDS/SMS nº 09/2014 e a NBR 15900 (ABNT, 2009) que trata sobre água de amassamento para concreto, apresentam parâmetros e limites diferentes para a água, sendo que os parâmetros em comum são mais restritivos na Resolução Conjunta.

3 INFLUÊNCIA DA ÁGUA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

O concreto é um material obtido através da mistura entre aglomerante, água, agregado graúdo, agregado miúdo e, em alguns casos, aditivos e adições. Após a mistura espera-se obter um material semelhante a uma pedra.

Os principais parâmetros utilizados para caracterizar fisicamente a água são: cor, turbidez, temperatura, sabor, odor e níveis de sólidos em suas diversas frações (PIVELI, s.d.).

As propriedades mais importantes da água para o comportamento do concreto nos estados fresco ou endurecido são a dissolução e condutividade elétrica, a tensão superficial e a adsorção. A água é um solvente universal, por isso tem grande capacidade de manter pequenas partículas sólidas em suspensão, isso pode ser uma preocupação quando a procedência da água for de reciclagem ou reuso pois, a presença de substâncias em suspensão ou diluídas podem afetar o tempo de pega do cimento, interferindo no ganho de resistência, exemplos são a presença de matéria orgânica e a presença de sólidos em suspensão de águas recuperadas dos processos de produção do concreto (ISAIA, 2011).

Para o saneamento, os sólidos nas águas correspondem a toda partícula sólida que permanece como resíduo após evaporação, secagem ou calcinação da amostra. As frações dos sólidos podem ser classificadas em:

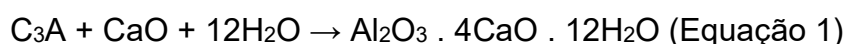
- Sólidos totais (ST);
- Sólidos em suspensão (SS);
- Sólidos voláteis (SV);
- Sólidos fixos (SF);
- Sólidos sedimentáveis.

Através da determinação dos níveis de concentração das diversas frações de sólidos e da distribuição das partículas com relação ao tamanho (sólidos em suspensão e dissolvidos) e com relação à natureza (fixos ou minerais e voláteis ou orgânicos) é possível entender o comportamento da água em questão. A presença de sólidos em suspensão pode se dar pela presença de partículas inorgânicas (areia, silte, argila) e de detritos orgânicos (algas e bactérias, plâncton em geral, etc.) (PIVELI, s.d.).

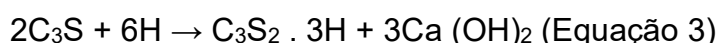
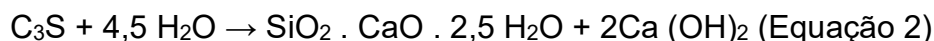
A água é um componente vital para o concreto, ela atua sob efeitos físico-químicos importantes de transformações na microestrutura das pastas cimentícias como a hidratação do cimento, propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido, que englobam a retração e a fluência, os mecanismos de transporte de fluidos, dentre outros fenômenos. Apesar disso, muito pouco é escrito sobre a qualidade da água, a grande maioria das publicações se dedica ao estudo dos aglomerantes, dos agregados e a dosagem do concreto (ISAIA, 2011).

Os compostos do cimento reagem com a água por hidrólise, de forma breve, as reações são demonstradas a seguir (VARELA, s.d.):

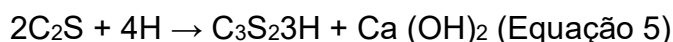
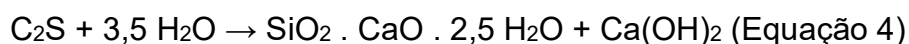
- a) O aluminato tri-cálcico (C_3A) é o primeiro a reagir, conforme a Equação 1:



- b) A seguir, o Silicato tri-cálcico (C_3S) reage, dando origem aos silicatos monocálcicos hidratados, indicados nas Equações 2 e 3:



- c) O silicato di-cálcico (C_2S), reage mais tarde, conforme as Equações 4 e 5:



Os silicatos de cálcio anidros dão origem a silicatos monocálcicos hidratados e ao hidróxido de cálcio, que cristaliza em escamas hexagonais, dando origem à portlandita (VARELA, s.d.).

As propriedades resultantes dependem do grau de hidratação do cimento em dada idade, além de condições das reações, condições de cura, condições ambientais, etc. Para que a hidratação do cimento seja completa,

deve haver uma quantidade de água suficiente para que as reações ocorram integralmente (ISAIA, 2011).

A relação água/cimento (a/c) na preparação de concreto afeta diretamente suas propriedades, como por exemplo, a consistência e a resistência à compressão. Quanto mais água é adicionada a mistura, maior é a fluidez, facilitando o lançamento e adensamento do concreto, no entanto, menor é a resistência devido a presença de poros deixados pela evaporação da água durante a fase de cura (FALLAS *et al.*, 2012).

Dependendo das características das peças, toda a água capilar absorvida é perdida, deixando-se os poros vazios, portanto a utilização de um baixo fator de água/cimento beneficia a durabilidade do concreto (GUIMARÃES, 2002).

A água é necessária para as reações de hidratação do cimento, para formar uma microestrutura compacta, durável e para propiciar resistência mecânica, por outro lado o excesso de água causa retração e fissuração, o que facilita o caminho para agentes agressivos, que podem comprometer a durabilidade (ISAIA, 2011).

A cura é uma fase importante da fabricação do concreto e consiste em um tratamento aplicado assim que se iniciam as reações de hidratação do cimento (Início de Pega) nas peças concretadas, consiste em um conjunto de ações cujo objetivo é impedir que a água do concreto evapore, provocando redução volumétrica, abertura de fissuras e porosidade, reduzindo a sua durabilidade. Existem várias formas de efetuar este tratamento no concreto, como por exemplo, cura úmida, cura química e cura térmica.

Apesar de apresentar importância inferior que a água de amassamento, a quantidade e qualidade da água para o processo de cura devem ser levadas em consideração. As chamadas águas moles, ou águas muito puras como água destilada ou água proveniente de degelo, apresentam uma quantidade muito pequena de sais dissolvidos, e por isso tendem a hidrolisar ou dissolver os produtos de cálcio, logo o hidróxido de cálcio fica susceptível a decomposição química, com alguma perda da resistência à abrasão. Por outro lado, águas com compostos que podem interferir na hidratação do cimento, normalmente são inócuas para a cura (ISAIA, 2011).

A substituição da água potável por água de reuso provoca uma diminuição do abatimento na medida de consistência de argamassas e concreto, bem como um aumento nos tempos de início e fim de pega (GHRAIR *et al.*, 2018; SAXENA e TEMBURKAR, 2018).

A falta de água impede a completa hidratação do cimento, produz um concreto muito seco de difícil trabalhabilidade e diminui a resistência final do concreto. Já o excesso de água favorece a trabalhabilidade, mas produz um concreto mais fraco e sem resistência, pois a água em excesso irá evaporar deixando vazios. Portanto a relação a/c é um fator primordial para a resistência do concreto. Quando for necessário aumentar a consistência do concreto o ideal é utilizar produtos plastificantes sem aumentar o teor de água.

Quem primeiro determinou essa dependência foi Abrams, conhecida como Lei de Abrams, quando demonstrou através de pesquisas laboratoriais que a resistência do concreto depende das características da pasta de cimento endurecida, que é uma função direta da relação a/c.

3.1 Padrão da água para amassamento do concreto

Existem normas específicas para água de amassamento do concreto como a norma internacional ISO 12439 (2010). Na Europa é usada a Norma Europeia EN 1008 (2002), os Estados Unidos contam com a ASTM 1602 (2018) e no Brasil o padrão da água de amassamento é definido através da NBR 15900 (ABNT, 2009).

As três normas CEN EN 1008 (2002), ISO 12439 (2010) e ABNT 15900 (2009) são muito semelhantes. A Tabela 03 apresenta as pequenas diferenças existentes entre elas, além disso, a norma brasileira apresenta os procedimentos para coleta para a água proveniente de cada tipo de fonte e os ensaios necessários para cada determinação (ISAIA, 2011).

A norma ASTM 1602 abrange a composição e os requisitos de desempenho da água empregada para amassamento, define as fontes de água, relata os requisitos e a frequência dos ensaios para qualificação da água. Quando a água de amassamento vem de outras fontes, para uso total ou combinada, devem ser preenchidas as condições constantes na Tabela 04.

Tabela 03. Tópicos comparativos entre as Normas CEN EN 1008 (2002), ISO 12439 (2010) e ABNT 15900-1 (2009)

Tópicos	CEN EN 1008	ISO 12439	ABNT 15900-1
Classificação, tipos de água	Item 3.5 Água do mar ou água salobra. Para concreto com armadura de aço ou metal embutido, o teor total de Cl ⁻ permitido no concreto é fator determinante	Item 3.6 Água do mar ou água salobra. Idem EN 1008.	Item 3.6 Água salobra Não é feita menção à observação das duas outras Normas, quanto a Cl ⁻
Material sólido (material em suspensão)	Tabela 1 Água de outras fontes, que não água de recuperação de processos de preparação do concreto: Sedimento máximo: 4cm ³ determinado conforme 6.1.1	Tabela 1 Idem EN 1008	Tabela 1 Máximo de 50.000mg/dm ³
Tempo de pega inicial	Item 4.4 Pega inicial não menor de 1h e não diferir mais de 25% do tempo de pega das pastas com água destilada ou deionizada.	Item 4.4 Idem EN 1008	Item 4.4 Os tempos de início e fim de pega não devem diferir mais de 25% do tempo de pega das pastas com água destilada ou deionizada.
Tempo de pega final	Item 4.4 Tempo de pega final não deve exceder 12h e não diferir mais de 25% do tempo de pega final das pastas com água destilada ou deionizada.	Item 4.4 Água potável pode ser usada desde que com resultados similares aos de água destilada.	
Volume de amostragem	Item 5 $V \geq 5\text{dm}^3$	Item 5 Idem EN 1008	NBR 15900-2 Item 4 Avaliação preliminar $\geq 3\text{dm}^3$ Ensaio c/ argamassa $\geq 3\text{dm}^3$ Ensaio c/ concreto $\geq 30\text{dm}^3$
Anexo A Água de recuperação de preparo do concreto	Item A 4.3 Distribuição do material sólido na água: Densidade $\geq 1,01\text{kg/dm}^3$. Para densidade $< 1,01\text{kg/dm}^3$ pode-se assumir que o teor de material sólido é desprezível.	Item A 4.3 Idem EN 1008	Item A 5.3 Distribuição de material sólido na água: Massa específica $\leq 1,03\text{kg/dm}^3$.
	Item A 4.4 Massa de material sólido na água recuperada. A Tabela A1 apresenta material sólido na água para densidade entre 1,02 e 1,15kg/dm ³ . Densidade de partículas = 2,1kg/dm ³ Para outras densidades usar fórmula de correção deste item.	Item A 4.4 Idem EN 1008	Item A 5.4 Para densidade $\leq 1,03\text{kg/dm}^3$, corresponde a 50.000mg/dm ³ de material sólido, quando a massa específica é $\geq 2,6\text{kg/dm}^3$. Para massa específica $\geq 1,03\text{kg/dm}^3$ fazer a correção definida pela equação deste item.

Fonte: ISAIA (2011)

Tabela 04. Requisitos de Desempenho do concreto para água de amassamento

Critério de desempenho	Limites	Método de ensaio
Resistência à compressão, % mín. do controle, a 7 dias	90	C31M e C39M
Tempo de pega, desvio do controle, h:min	De 1h antes a 1h30min depois	C403M
Substâncias	Limites	Método de ensaio
Cloretos, com Cl^- ppm		
Em concreto protendido, tabuleiro de pontes ou conforme designado	500 ¹	C114
Concreto armado em ambientes úmidos ou com metais embutidos	1000 ¹	C114
Sulfatos como SO_4, ppm	3000	C114
Álcalis como $(\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O})$, ppm	600	C114
Sólidos totais em massa, ppm	50.000	C1603

¹ Os requisitos para concreto na norma ACI 318 devem preponderar quando o fabricante puder demonstrar que estes limites para a água de amassamento possam ser superados. Para especificações que permitam o uso de cloreto de cálcio (CaCl_2) como aditivo acelerador, os limites de cloretos podem ser renunciados pelo comprador.

Fonte: ISAIA (2011)

Na Tabela 03 é possível verificar que a norma 15900-1 (ABNT, 2009) acompanhou o limite de materiais sólidos da norma ASTM C1602.

A NBR 15900 (ABNT, 2009) indica os requisitos para a água de amassamento de acordo com exigências físicas, químicas, também são indicados limites de alteração para ensaios de tempo de pega da pasta de cimento e de resistência à compressão do concreto.

A água de abastecimento público é adequada para uso em concreto e não precisa ser ensaiada. Isaia (2011) aponta que grande parte do concreto é produzido com esta água, por outro lado é possível obter concreto de boa qualidade com água de outras fontes, e que é possível identificar se a água é adequada para uso no concreto em função da sua origem.

Caso a água de amassamento não seja potável, proveniente do sistema de abastecimento público, é necessário aplicar uma sequência de ensaios para subsidiar o aceite, conforme mostrado na Figura 14.

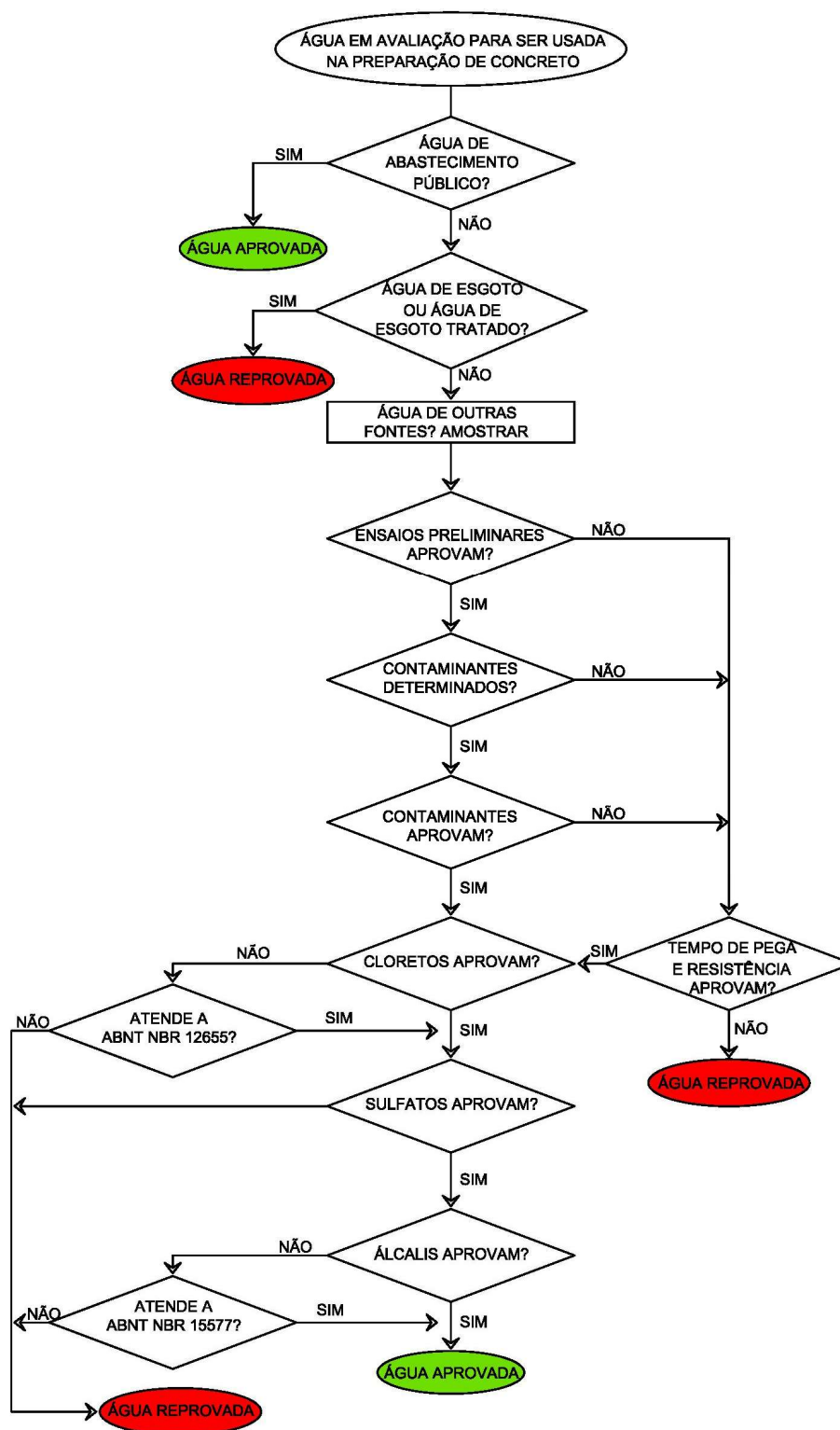
De acordo com a NBR 15900-1 (ABNT, 2009) a água de esgoto ou proveniente de tratamento de esgoto não é adequada e não deve ser utilizada para a fabricação de concreto. A água salobra deve ser testada e caso aprovada deve ser utilizada apenas para a fabricação de concreto não armado. A água recuperada de processos de preparação de concreto e a água de reuso proveniente de estações de tratamento de esgoto devem ser ensaiadas e devem atender aos requisitos da norma. Por isso a NBR 15900-1 (ABNT, 2009) traz em

seu Anexo A os requisitos para utilização de água recuperada de processos de preparo de concreto.

A água do mar pode afetar a pega e resistência do concreto, além de provocar a corrosão da armadura devido à presença de cloretos. Mesmo na produção de concreto simples, pode apresentar efeitos como descoloração, eflorescência e reação álcali-agregado quando este for potencialmente reativo. Os efeitos decorrentes do uso da água do mar como água de amassamento são diferentes dos resultantes do contato permanente da estrutura de concreto com ela. A primeira situação é bem agressiva e é até inaceitável quando o concreto recebe armadura em seu interior, já na segunda situação, se a produção do concreto seguiu todas as normas pertinentes, pode ser adequado do ponto de vista da durabilidade (ISAIA, 2011).

A água de reuso não possui um histórico de uso em produção de concreto suficiente para garantir seu uso de maneira generalizada, portanto o uso está condicionado a aplicações específicas e acordos entre o fornecedor de água e o fabricante de concreto.

Figura 14. Fluxograma de aceitação da água para amassamento do concreto



Fonte: Adaptado da NBR 15900-1 (ABNT, 2009)

3.1.1 Propriedades físicas da água

A água de amassamento deve ser examinada com requisitos preliminares de acordo com a NBR 15900-3 (ABNT, 2009). Não deve apresentar óleos e gorduras em traços visíveis, e qualquer espuma deve desaparecer em 2 minutos. A cor da água deve ser amarelo claro ou incolor, exceto para água recuperada de processos de preparação que devem seguir o Anexo A da NBR 15900-1 (ABNT, 2009). A água deve ser inodora, exceto um leve odor de cimento quando for proveniente da recuperação de processos de preparação de concreto e, quando houver escória, um leve odor de sulfeto de hidrogênio, após a adição de ácido clorídrico. Quanto a presença de matéria orgânica, a cor deve ser igual ou mais clara a solução padrão após a adição de hidróxido de sódio (NaOH). A quantidade de material sólido deve ser menor que 50.000 mg/l, o pH deve ser igual ou menor e 5.

Um trabalho conduzido por Ghrair *et al.* (2018) encontrou pH de 7,5 em água cinza sem tratamento, após passar por tratamento o pH passou a ser 7,9, mostrando que a água de reuso possui pH alcalino.

3.1.2 Propriedades químicas da água

A NBR 15900-1 (ABNT, 2009) especifica os elementos que podem ser prejudiciais no preparo do concreto, a Tabela 05 apresenta as normas para determinação dos teores de cada elemento químico e substâncias prejudiciais e os respectivos teores máximos.

Tabela 05. Ensaio químicos e substâncias prejudiciais

Determinação	Método	TEOR MÁXIMO
CLORETOS	ABNT NBR 15900-6	1000 mg/l (*)
SULFATOS	ABNT NBR 15900-7	2000 mg/l
ÁLCALIS	ABNT NBR 15900-9	1500mg/l
AÇUCARES	ABNT NBR 15900-11	100 mg/l
FOSFATOS	ABNT NBR 15900-8	100 mg/l
NITRATOS	ABNT NBR 15900-10	500 mg/l
CHUMBO	ABNT NBR 15900-5	1000 mg/l
ZINCO	ABNT NBR 15900-4	100 mg/l
MATERIAL SÓLIDO	ABNT NBR 15900-3	50000 mg/l

(*) para concreto armado Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15900-1 (ABNT, 2009)

Se for utilizado agregado potencialmente reativo a álcalis, a água deve ser ensaiada quanto aos teores de álcalis (ABNT NBR 15900-1, 2009).

Um estudo conduzido por Meena e Luhar (2019) analisou três qualidades de água: águas tratadas terciárias, secundárias e água potável. A água foi utilizada como água de amassamento do concreto e cura do concreto. Os autores concluíram que quando menor a qualidade da água, maior é a concentração de cloretos na amostra.

O Total de Sólidos em Suspensão é menor quando o efluente é tratado. Ghrair *et al.* (2018) analisaram água cinza com concentração inicial de 436mg/l, após o tratamento a concentração passou para 2mg/l, com base nesses valores e empregando os limites da NBR 15900-1 (ABNT, 2009) a água cinza bruta poderia ser utilizada para a produção de concreto, contudo a água cinza bruta apresentou *E. coli* alto, portanto é necessário um tratamento antes da exposição ao trabalhador.

Para aprovação da água em função de presença de contaminantes, podem ser executados os ensaios para determinação da presença de açúcar, fosfato, nitrato, chumbo e zinco. Na ausência desses ensaios ou quando os limites forem extrapolados, devem ser realizados os ensaios físicos e mecânicos, conforme descritos na Tabela 06 e comparar os resultados em função de uma amostra controle executada com água potável.

Tabela 06. Ensaios físicos e mecânicos

Determinação	Método
CIMENTO PORTLAND DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS DE PEGA	ABNT NBR 16607:2018
CIMENTO PORTLAND - DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS	ABNT NBR 7215:2019
CONCRETO - ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS	ABNT NBR 5739:2018

Fonte: adaptado de NBR 15900-1 (ABNT, 2009)

O tempo de início e fim de pega não devem diferir mais de 25% entre a amostra com a água testada e a amostra controle, e os limites devem estar de acordo com os limites da norma de especificação para cada tipo de cimento.

A resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias, tanto da argamassa, como do concreto moldado com água de outra fonte deve atingir pelo menos 90% da resistência dos corpos de prova da amostra controle.

De acordo com a norma ASTM C94 (2004) três características químicas são significativas para a produção de concreto: os teores de sulfato, cloreto e de sólido total (ASADOLLAHFARDI *et al.*, 2016-2).

A densidade de concretos não é atingida significativamente pelo uso da água de reuso. A densidade do concreto fresco produzido com água de reuso foi 0,44% inferior quando comparado ao concreto controle (SAXENA; TEMBURKAR, 2018).

3.1.3 Influência da água de reuso nas propriedades do concreto

3.1.3.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade não é muito afetada pela utilização da água de reuso.

Saxena e Temburkar (2018) utilizaram água potável e águas residuais domésticas coletadas na saída do sistema de esgoto do residencial institucional do campus universitário em Nagpur na Índia. A trabalhabilidade foi reduzida em 3% quando a água residual foi usada em comparação com a mistura controle. Isso significa que a água de reuso é mais pesada. Os autores também atribuem essa redução à presença de sólidos totais e sólidos em suspensão em quantidades maiores do que a amostra com água potável.

Asadollahfardi *et al.* (2016) compararam concreto simples moldado com consumo de cimento de 300kg/m³ e relação a/c de 0,6 ao concreto produzido e curado com águas residuais domésticas tratadas. A água de reuso teve um valor 11 mm menor quando comparada a amostras produzidas e curadas com água potável, demonstrando que a trabalhabilidade do concreto feito com água residual tratada não mudou significativamente em comparação com o concreto feito com água potável.

Um estudo conduzido por Ghrair *et al.* (2018) mostrou que o uso de água cinza bruta e água cinza tratada levou à diminuição do *slump* em 3,5 e 3,0 cm respectivamente. O tempo de início de pega da pasta de cimento misturada

com água cinza bruta e água cinza tratada foi de 20 e 25 min maior que o tempo obtido para o controle feito com água destilada. Os autores atribuem esses aumentos do tempo de pega, ao fato de a água de reuso conter sólidos dissolvidos, sólidos em suspensão e materiais orgânicos.

Meena e Luhar (2019) encontraram como resultado do ensaio de abatimento, 80 mm para concreto com água potável, 60 mm para com água tratada secundária e 40 mm para com água tratada terciária, mostrando que é necessário utilizar aditivos plastificantes para melhorar a trabalhabilidade.

Vários pesquisadores concluíram que o Total de Sólidos presentes na água de reuso pode ser responsável pela redução do abatimento (SAXENA; TEMBURKAR, 2018; MEENA; LUHAR, 2019).

A fonte da água utilizada pode interferir nos resultados. Ismail e Al-Hashmi (2011) utilizaram águas residuais da produção de acetato de polivinila e encontraram que o abatimento varia entre 0 e 17,5 mm em comparação com o abatimento da mistura controle que é de 65 mm e concluíram que a diminuição do abatimento pode estar relacionada à baixa absorção de água pelas partículas do produto polimérico.

3.1.3.2 Tempo de pega

Ghrair *et al.* (2018) determinaram o tempo de pega de concreto com água cinza bruta e com água cinza tratada e foi observado um aumento de 25 e 20 minutos a mais respectivamente, quando comparado à amostra padrão com água destilada.

Asadollahfardi *et al.* (2016) encontraram um acréscimo de 15 minutos no tempo de início de pega para a amostra com água de reuso de fonte doméstica quando comparado a uma amostra de controle. Já Saxena e Temburkar (2018) encontraram um acréscimo de 25 minutos.

As pesquisas trazem como justificativa para o aumento do tempo de pega a presença de impurezas e o alto teor de sólidos dissolvidos.

Noruzman *et al.* (2012) utilizaram água de fonte industrial para a produção de concreto e observaram que a presença de óleo na superfície dos grãos de cimento inibe a sua hidratação, por isso houve um prolongamento no tempo de pega.

3.1.3.3 Resistência à compressão

De maneira geral, a água de reuso afeta a resistência à compressão do concreto.

Ghraid *et al.* (2018) compararam a resistência do concreto produzido com água destilada e com dois tipos de água de reuso, água cinza bruta e água cinza tratada. Aos 7 dias, o concreto produzido com água cinza tratada apresenta um ligeiro aumento, no entanto, sua resistência à compressão aos 28 e 120 dias não mostra diferenças significativas. Já o concreto feito com água cinza bruta apresenta redução na resistência à compressão de até 7,7 e 13,9% aos 28 e 120 dias, respectivamente.

Após a substituição total da água de torneira por águas residuárias tratadas terciárias e cura em água potável e águas residuais terciárias, a resistência à compressão geral do concreto apresenta redução de 6% a 15% da resistência do concreto de referência (MEENA; LUHAR, 2019).

Asadollahfardi *et al.* (2016) mostram que a resistência à compressão aos 21 dias para concreto com consumo de 300kg/m³ fabricado com água de reuso residencial são até 10% menores quando comparado ao concreto produzido com água potável.

A redução da resistência do concreto pode ser comprovada por outro estudo que encontrou a redução de 9,36%, 9,47% e 5,07% em 3, 7 e 28 dias respectivamente. A redução pode ser devido à presença de matéria orgânica em águas residuais, o que pode interferir na reação de hidratação do cimento, por isso o concreto foi incapaz de atingir a sua resistência total (SAXENA; TEMBURKAR, 2018).

Trabalhos sobre o uso de água reciclada do caminhão betoneira em substituição a água potável também demonstram resistência compatível com a referência, atingindo 94% e 92% respectivamente para a substituição de 50% e 100% do volume de água potável utilizado para a fabricação do concreto (MATOS *et al.*, 2020).

3.1.3.4 Resistência à tração na flexão

Outro parâmetro que apresenta redução é a resistência à tração na flexão, cujos resultados são 18% menores em relação ao traço referência (SAXENA; TEMBURKAR, 2018).

A resistência à tração de amostras feitas e curadas com água potável e águas residuais tratadas aos 28 dias foi de 96% a 100% da resistência à tração da amostra de controle, portanto o uso de água de reuso não afeta significativamente a resistência à tração (ASADOLLAHFARDI *et al.*, 2016).

Com a utilização de água tratada terciária e cura em água tratada terciária a resistência diminui em 19,76% aos 28 dias e 25,73% aos 90 dias, e na utilização de água tratada secundária e cura na água potável, a resistência diminuiu em 29,73% aos 28 dias e 17,21% aos 90 dias. Durante a utilização de água tratada secundária e cura em água secundária, a resistência à flexão foi reduzida em 44,88% aos 28 dias e 29,83% aos 90 dias (MEENA; LUHAR, 2019).

As perdas de resistência à tração quando do uso de água de reuso na produção do concreto são significativas, variando de 18% a 45%.

3.1.3.5 Módulo de Elasticidade

Saxena e Tembukar (2018) encontraram uma redução de 5% do Módulo de Elasticidade, porém a revisão sobre a qualidade da água de reuso para a produção de concreto realizada por Babu, Reddy e Ramana (2016) indicou que o Módulo de Elasticidade de misturas com água de reuso são maiores que a amostra controle.

3.1.3.6 Capacidade de Absorção de água

A capacidade de absorção de água é um dos indicadores mais comuns de durabilidade e qualidade do concreto. Os estudos feitos por Ghrair *et al.* (2018) apresentaram resultados para concretos fabricados com água cinza bruta, água cinza tratada e água destilada de 1,69%, 1,75%, 1,74%, portanto o efeito da água cinza não foi significativo para esta característica.

O resultado da capacidade de absorção de água para diferentes amostras de concreto feitas com água potável e água de reuso ficou entre 2,1%

e 3,1%, o que demonstra que o concreto não foi afetado (ASADOLLAHFARDI *et al.*, 2016).

3.1.3.7 Carbonatação

Meena e Luhar (2019) testaram a resistência à carbonatação aos 7, 14, 21 e 28 dias após a cura de 28 dias utilizando corpos de prova de 50x50x100mm. Aplicaram dois revestimentos de tinta epóxi no lado longitudinal da amostra para evitar a penetração de dióxido de carbono. Os corpos de prova foram colocados em câmara controlada com carbonatação com 5% de dióxido de carbono, 50 +/- 5% de umidade e temperatura de 27 +/- 1°C. Nas idades desejadas os CPs foram cortados em duas metades e o indicador de fenolftaleína foi pulverizado sobre a superfície interna onde foi possível verificar a profundidade da carbonatação.

A resistência a carbonatação diminuiu com o uso de água tratada terciária em substituição a água potável. Foi encontrada a profundidade de 9,33mm aos 28 dias utilizando água terciária na mistura e na cura, enquanto no concreto controle a profundidade foi de 3,00mm (MEENA; LUHAR, 2019).

3.1.3.8 Permeabilidade aos íons cloreto

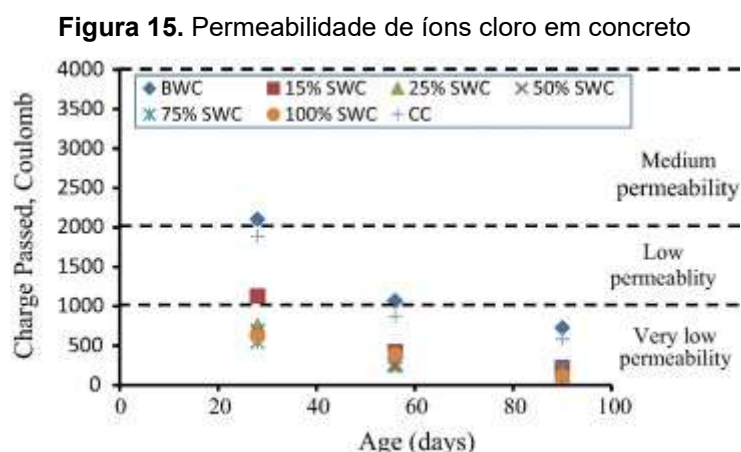
Ao usar água tratada terciária como substituto da água potável no concreto, a resistência ao cloreto diminui pois, a concentração de cloreto aumenta com a diminuição da qualidade da água da mistura (MEENA; LUHAR, 2019).

Meena e Luhar (2019) testaram a permeabilidade à íons cloro em corpos de prova de 70 mm de diâmetro e 50 mm de espessura, cujos lados foram revestidos com selante de silicone. O equipamento para determinação da permeabilidade ao íon cloreto tem duas partes, a célula a montante continha solução de cloreto de sódio a 3% (ânodo) e a célula a jusante contendo água destilada (cátodo). Entre as células foi posicionado o corpo de prova, a concentração de íon cloro foi determinada nas duas células por meio de ensaio de titulação, a cada quatro horas por um período de três dias, até atingir uma condição de estabilidade. A titulação foi feita tomando 20 ml de amostra da célula

a jusante e adicionando cromato de potássio como indicador. A quantidade de nitrato de prata (AgNO) foi medida nesta amostra quando apresentava cor de tijolo avermelhado. Ao usar água tratada terciária como substituto da água potável no concreto a permeabilidade ao íon cloro diminui, porque a concentração de cloreto aumenta com a diminuição da qualidade da água de mistura.

Saxena e Temburkar (2018) realizaram um Teste Rápido de Permeabilidade ao íon cloro de acordo com a ASTM C1202 para as idades de 28, 56 e 90 dias. As amostras de 50 mm de espessura e 100 mm de diâmetro foram preparadas e ensaiadas, sendo apresentado como resultado sua média.

Eles utilizaram duas soluções: solução de cloreto de sódio (3,0% em massa em água destilada) e solução de hidróxido de sódio (0,3 N em água destilada). O cálculo da carga total que passou pelo concreto foi correlacionado com a permeabilidade ao cloreto. A Figura 15 apresenta os resultados obtidos no ensaio.



Fonte: SAXENA e TEMBURKAR (2018)

A traço identificado com CC representa o concreto controle feito com água potável e o traço BWC representa o traço com água de reuso. Aos 28 dias o traço com água de reuso mostra média permeabilidade ao meio e o traço controle mostra baixa permeabilidade. Aos 56 dias o traço com água de reuso apresenta baixa permeabilidade e o traço controle já apresenta muito baixa permeabilidade. Apesar disso, é possível observar que os dois traços não apresentam muita diferença, atingindo resultados muito próximos. Aos 90 dias os dois traços apresentam muito baixa permeabilidade.

3.1.3.9 Desgaste por abrasão

Meena e Luhar (2019) testaram a resistência à abrasão utilizando a norma IS - 1237:2012, Cement concrete flooring tiles – specification, Bureau of Indian Standards, New Delhi, 2012, através da profundidade do desgaste de uma amostra disposta em máquina de teste, e em seguida determinaram o desgaste através de fórmula. A resistência à abrasão é aumentada em ambos os casos de águas residuárias terciárias, tanto para amostras curadas com água de torneira, como as curadas com água terciária.

3.1.3.10 Porosidade

Ghair *et al.* (2018) utilizaram diferentes relações de água/cimento para obter a mesma trabalhabilidade. Sendo assim, as relações usadas foram de 0,294, 0,296 e 0,292 para os traços com água cinza bruta, água cinza tratada e água destilada. Imagens feitas com Microscópio Estéreo não mostraram diferenças significativas da porosidade para os concretos produzidos com água cinza bruta, tratada e destilada.

Porém, o estudo de Saxena e Temburkar (2018) utilizou a relação água cimento 0,50 e encontrou diferenças, mostrando uma amostra mais porosa quando comparada à amostra controle, pois o concreto com água de reuso apresentava mais fissuras e vazios. Os autores atribuem o aumento de poros à presença de Sólidos Totais, Sólidos Suspensos e Dissolvidos e a presença de conteúdo orgânico.

Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura, feitas em concreto produzido com água de reuso com relação água/cimento de 0,60, mostram que o mesmo possui mais vazios entre os cristais do que concreto produzido com água potável. Os ensaios de Microscopia Eletrônica por Dispersão de RX (EDX) mostraram que a quantidade de alguns materiais como sódio, cloro e enxofre foi maior no concreto fabricado com água de reuso quando comparado com amostra padrão de água potável (ASADOLLAHFARDI *et al.*, 2016).

Em traços com relação água/cimento de 0,5 e 0,6 é possível identificar diferença entre os cristais, enquanto para relações a/c abaixo de 0,3 não é possível. Com base nesses resultados, é possível concluir que a relação a/c

afeta a porosidade do concreto e quando a relação a/c é baixa não é possível notar diferença na porosidade de materiais feitos com água potável e água de reuso.

3.1.3.11 Resistividade elétrica do concreto

Asadollahfardi *et al.* (2016) analisaram a resistividade elétrica do concreto moldado e curado com água potável, moldado com água potável e curado com água de reuso e moldado e curado com água de reuso, e avaliaram que a resistividade elétrica do concreto aos 90 dias não é afetada significativamente pelo uso da água de reuso. A diferença entre a água potável e a água de reuso foi de -3,4 para +5 $\Omega.m$ em comparação a amostra controle conforme apresentado na Tabela 07.

Tabela 07. Resultados dos ensaios de resistividade elétrica do concreto em 90 dias

Tipos de amostras de concreto	Resistividade elétrica do concreto ($\Omega.m$)	Diferença
A300 Amostra produzida e curada com água potável	58	-
B300 mostras de concreto produzidas com água potável e curadas com água residual tratada	56	-3,4
C300 amostras de concreto produzidas e curadas com água residual tratada	61	+5

Fonte: adaptado de Asadollahfardi *et al.* (2016)

4 DURABILIDADE DO CONCRETO

4.1 Conceito de durabilidade

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define a durabilidade de estruturas de concreto armado como a capacidade em resistir às influências ambientais previstas e definidas em projeto. A NBR 6118 (ABNT, 2014) define vida útil como:

“.... o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, conforme procedimentos estipulados nesta mesma norma, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais.”

Um material atinge o final da vida útil quando suas propriedades se deterioram de tal maneira que a sua utilização se torna insegura e antieconômica inviabilizando a continuação do uso, seja por razões econômicas, seja por segurança. Os projetistas de estruturas devem ter conhecimento das características dos materiais como propriedades mecânicas e custo inicial e, além disso, ter informação sobre a sua durabilidade (GUIMARÃES, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A durabilidade das estruturas de concreto leva em consideração aspectos relativos aos constituintes dessa estrutura, traço do concreto e condições de cura, mas também se faz necessário considerar a agressividade do meio em que está inserida, pois a mesma pode reduzir significativamente sua vida útil (LIMA, 2011).

O concreto é um material heterogêneo, e cada um de seus constituintes (agregado graúdo, agregado miúdo, cimento, água, aditivos e adições) possui características particulares que influenciam muito as características finais do concreto (SENTONE, 2011). Essas características influenciam a porosidade do concreto e conseqüentemente sua resistência às agressões do meio ambiente.

Portanto, a durabilidade do concreto é verificada a partir da sua capacidade de resistir à ação de intempéries, ataque químico, abrasão e outras condições de serviço (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Até os anos 80 para se projetar uma estrutura levava-se em consideração apenas a resistência à compressão (FERREIRA, 2000). Atualmente o projetista leva em consideração 04 métodos de previsão de vida útil: experiências anteriores, ensaios acelerados, enfoque determinista e enfoque estocástico ou probabilista (HELENE, 2004).

Segundo Lima (2011), a durabilidade das estruturas de concreto depende de 4Cs:

- Composição ou traço do concreto;
- Compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura;
- Cura efetiva do concreto na estrutura;
- Cobrimento da armadura.

As normas operacionais NBR 6118 (ABNT, 2014) e ACI 318-14 prescrevem procedimentos para garantir a durabilidade das estruturas de concreto armado, especificando a relação água/cimento, resistência de concreto, espessura do cobrimento em função da agressividade ambiental. O JSCE 17 (2007) também apresenta uma abordagem prescritiva, porém não fica limitado a ela, fornecendo também informações mais detalhadas sobre o processo de carbonatação (COUTO, 2017).

Devido às incertezas associadas a esses parâmetros para determinar a vida útil submetida aos efeitos da carbonatação utilizam-se métodos probabilísticos. O *fib* Model Code (2010) e o ACI 365-00 apresentam formas de se realizar a avaliação probabilística da vida das estruturas de concreto armado, através de três formatos de abordagem para o estado limite de durabilidade (COUTO, 2017):

- Probabilístico: apresentado a partir da utilização de funções de probabilidade das variáveis que descrevem o processo do avanço da frente de carbonatação;
- Semi-probabilístico: trabalhado a partir de fatores parciais de majoração e minoração;

- Prescritivo: apresentado a partir de experiências satisfatórias anteriores e comparação de desempenho.

Os métodos probabilísticos dependem de mais estudo sobre o tema, mas são uma tendência futura. As principais dificuldades para a implementação decorrem da seleção dos modelos a serem utilizados no cálculo da profundidade da carbonatação e na descrição estatística das variáveis intervenientes no problema (COUTO, 2017).

De acordo com a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) também devem ser adotados critérios adicionais em projeto visando à durabilidade das estruturas, como por exemplo, evitar a acumulação de água de chuva, evitar formas arquitetônicas que dificultem a manutenção ou que possam reduzir a durabilidade, garantir o cobrimento da armadura, garantir a qualidade do concreto, controlar a fissuração das peças e definir um plano de inspeção e manutenção preventiva.

O projeto arquitetônico também deve levar em consideração a durabilidade da estrutura e adotar soluções para que a quantidade de juntas e os cantos das estruturas não acumulem pó, umidade e água, sendo que esta última influencia diretamente a durabilidade das estruturas (FERREIRA, 2000).

Em resumo, a estrutura de concreto armado durável é aquela que conserva ao longo do tempo sua forma original, qualidade e capacidade portante.

4.2 Classes de agressividade ambiental

As estruturas devem ser projetadas para fornecer condições adequadas de uso e segurança, sendo que a vida útil deve considerar as condições climáticas como temperatura, amplitude térmica, maior ou menor influência da chuva, umidade relativa, vento, poluição, agressividade da água etc., pois estes fatores influenciam em sua degradação. Apesar da grande extensão territorial do Brasil, o país está localizado entre os trópicos de Câncer e Capricórnio, o que o torna um país com temperaturas médias elevadas, diferente do que ocorre nos Estados Unidos e em países da Europa (LIMA, 2011).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) classifica o tipo de ambiente para efeito de projeto em: rural, submersa, urbana, marinha, industrial e respingos de maré. A

Tabela 08 apresenta a correspondência entre a classe de agressividade e a relação de água/cimento para o concreto armado e para o concreto protendido. A Tabela 09 apresenta a correspondência entre as classes de agressividade e o cobrimento da armadura para cada elemento da estrutura (laje, viga/pilar, estrutural em contato direto com o solo) para o concreto armado e para o concreto protendido.

O cobrimento deve ser adotado para garantir o desempenho projetado, visto que tem um papel fundamental na vida útil da estrutura (LIMA, 2011).

Tabela 08. Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\leq C20$	$\leq C25$	$\leq C30$	$\leq C40$
	CP	$\leq C25$	$\leq C30$	$\leq C35$	$\leq C40$

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado

^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido

Fonte: adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014)

Tabela 09. Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $D_c = 10$ mm

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014)

A escolha do tipo de cimento deve levar em consideração o tipo de aditivo e adição que garanta a resistência à agressividade a qual a estrutura ficará exposta. As adições dos cimentos tipo CP III e CP IV apresentam maior resistência à lixiviação; para reduzir o risco de reações álcali-agregado são preferíveis os cimentos pozolânicos tipo CP IV. Os cimentos CP I e CP V são utilizados quando se pretende reduzir a profundidade de carbonatação, já os CP III e CP IV reduzem a penetração de cloretos, assim como a adição extra de microsilica e cinza de casca de arroz (HELENE, 2004). A Tabela 10 apresenta os cimentos mais recomendados de acordo com o tipo de agressividade.

Tabela 10. Resistência e tipos de cimento

Resistência esperada	Tipo de cimento
Resistência a lixiviação	CP III e CP IV
Minimizar o risco de reação álcali-agregado	CP IV
Reduzir a profundidade de carbonatação	CP I e CP V
Penetração de Cloretos	CP III e CP IV com adição extra de sílica ativa, metacaulim e cinza da casca de arroz

Fonte: MEDEIROS, ANDRADE e HELENE (2011)

4.3 Deterioração do concreto armado

Os processos de deterioração do concreto podem ser agrupados de acordo com a sua natureza em mecânicos, físicos, químicos, biológicos e eletromagnéticos. Os processos de degradação alteram a capacidade do material em desempenhar a suas funções e muitas vezes a deterioração ocorre pela combinação de diferentes fatores (LAPA, 2008).

A Tabela 11 apresenta uma visão geral sobre os principais mecanismos físico-químicos de deterioração das estruturas e respectivos efeitos em longo prazo.

Tabela 11. Principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado

Agressividade do ambiente		Consequências sobre a estrutura	
Natureza do processo	Condições particulares	Alterações iniciais na superfície do concreto	Efeitos a longo prazo
Carbonatação	UR 60% a 85%	Imperceptível	Redução do pH Corrosão da armaduras Fissuração superficial
Lixiviação	Atmosfera ácida, águas puras	Eflorescência, manchas brancas	Redução do pH Corrosão da armaduras Desagregação superficial
Retração	Umedecimento e secagem, ausência de cura UR baixa (< 50%)	Fissuras	Fissuras Corrosão de armaduras
Fuligem	Partículas em suspensão na atmosfera urbana e industrial	Manchas escuras	Redução do pH Corrosão da armaduras
Fungos e mofo	Temperaturas altas (>20°C e < 50°C) com UR > 75%	Manchas escuras e esverdeadas	Redução do pH Desagregação superficial Corrosão da armadura
Concentração salina, Cl⁻	Atmosfera marinha e industrial	Imperceptível	Despassivação e corrosão de armaduras
Sulfatos	Esgoto e águas servidas	Fissuras	Expansão → Fissuras Desagregação do concreto Corrosão da armadura
Álcali-agregado	Composição do concreto Umidade, UR >95%	Fissuras Gel ao redor do agregado gráúdo	Expansão → Fissuras Desagregação do concreto Corrosão da armadura

Fonte: MEDEIROS, ANDRADE e HELENE (2011)

A deterioração do concreto por reações químicas é o resultado das interações químicas entre os agentes agressivos presentes no meio ambiente externo e os constituintes da pasta de cimento, ou o resultado de reações internas do tipo álcali-agregado, ou reação da hidratação retardada de CaO e MgO cristalinos, ou da corrosão eletroquímica da armadura do concreto (LAPA, 2008).

A resistência do concreto ao ataque químico está diretamente ligada a porosidade, a composição do cimento e as condições sob as quais endureceu (FERREIRA, 2000).

As reações químicas que degradam o concreto se manifestam através de efeitos físicos nocivos, como o aumento da porosidade e da permeabilidade, diminuição da resistência, fissuração e lascamento. São resultantes de interações químicas entre um agente agressivo presente no meio ambiente e os constituintes do concreto, ou são resultantes de reações internas ao concreto, como o tipo de reação álcali-agregado, ou a hidratação retardada CaO e MgO se estes estiverem presentes em quantidades excessivas no Cimento *Portland*, ou ainda a corrosão eletroquímica da armadura do concreto (LAPA, 2008).

A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) indica os mecanismos de deterioração das estruturas divididos em mecanismos de deterioração do concreto e/ou da armadura.

4.3.1 Mecanismos de deterioração do concreto

a) Lixiviação, causada por águas puras e ácidas

A água é elemento fundamental para a composição do concreto, mas também atua como agente de degradação pela possibilidade de ser um veículo de transporte de íons agressivos que geram processos químicos de deterioração, sendo o fator central para a maioria dos problemas de durabilidade do concreto (GUIMARÃES, 2002).

Entende-se por água pura a água da condensação da neblina ou vapor, já a água mole é a água da chuva, que pode conter pouco ou nenhum íon de cálcio. Quando essas águas entram em contato com a pasta de cimento elas tendem a hidrolisar ou dissolver os produtos contendo cálcio (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Logo após a hidratação do concreto é formado um composto chamado hidróxido de cálcio, quando ocorrem infiltrações esse composto é dissolvido e levado para a superfície do concreto. Devido à eflorescência de carbonatos a superfície apresenta uma aparência arenosa, ou com exposição dos agregados e risco de aparecimento de fungos e bactérias. Outra consequência é a redução do pH com riscos a despassivação da armadura (HELENE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A hidrólise é uma das reações químicas que ocorre entre a água e a pasta de cimento, o hidróxido de cálcio é um dos constituintes das pastas de cimento *Portland* hidratadas com maior susceptibilidade à hidrólise. Água com pequenas quantidades de cloretos, sulfatos e bicarbonatos de cálcio e de magnésio geralmente não atacam os constituintes das pastas de cimento *Portland*. Águas com pouco ou nenhum íon de cálcio, como a água de condensação, tendem a hidrolisar ou dissolver os produtos que contêm cálcio (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

b) Expansão causada por sulfatos e por óxidos de Mg e Ca

Água ou solo com presença de sulfatos causa reações expansivas e deletérias com a pasta de cimento. Como sintoma dessa patologia aparecem fissuras aleatórias, esfoliação e redução da dureza e da resistência superficial do concreto, com consequente redução do pH e risco de despassivação da armadura (HELENE, 2004; CAPRARO; MEDEIROS, 2019).

Todos os sulfatos que são danosos ao concreto podem estar presentes nos materiais que compõem o concreto, como água de amassamento, agregados ou no próprio cimento, ou então em materiais que estão em contato com o concreto como o solo ou águas ricas neste composto. No ataque os íons sulfato reagem principalmente com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 e o aluminato tri-cálcio (C3A), originando a etringita e o gesso. O ataque causa expansão e consequentemente a diminuição progressiva da resistência e a perda de massa (LAPA, 2008; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A resistência do concreto ao ataque de sulfatos ocorre através da redução da relação a/c e uso de cimentos resistente à sulfatos (LAPA, 2008).

c) Reação álcali-agregado;

A reação álcali-agregado é um processo químico entre os álcalis da pasta de cimento e minerais reativos do agregado. Como consequência geram produtos expansivos destruindo o cobrimento do concreto e a proteção da armadura (HELENE, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Não foram encontrados trabalhos que tratassem sobre a ação da água de reuso neste mecanismo.

4.3.2 Mecanismos de deterioração da armadura - corrosão

A corrosão pode ser definida como a deterioração de um material por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, com participação ou não de esforços mecânicos. É a causa mais frequente de deterioração e redução de resistência das armaduras e de degradação do concreto. As principais causas da corrosão são a presença do íon cloro e a carbonatação do concreto (LAPA, 2008).

a) Corrosão devido à carbonatação;

A carbonatação é a reação do CO_2 e outros gases ácidos presentes na atmosfera com compostos hidratados do cimento, principalmente com o Ca(OH)_2 , removendo parte da pasta de cimento, resultando na formação de carbonato de cálcio (CaCO_3) e água, como consequência o pH do concreto, que é da ordem de 12,5, baixa para 9,4. O fenômeno só ocorre em ambientes com umidade relativa baixa (entre 60% e 98%) ou em ambientes sujeitos a molhagem e secagem, mas ao atingir a armadura pode promover corrosão (HELENE, 1997; LAPA, 2008; LIMA, 2011; FELIX *et al.*, 2019).

Os produtos alcalinos do concreto são formados pelos íons de sódio (Na), potássio (K) e principalmente cálcio (Ca) que permitem a entrada de água e são provenientes da reação de hidratação do cimento. Os gases ácidos que podem ser encontrados no ar atmosférico são o gás sulfídrico (H_2S), o dióxido de enxofre (SO_2) e o gás carbônico (CO_2), sendo o gás carbônico com maior preponderância (CADORE, 2018 *apud* SILVA e MELO, 2020).

Esse fator é importante para o início da corrosão das armaduras e a intensidade da corrosão devido à carbonatação ser influenciada pela espessura do cobrimento, portanto a corrosão tem início onde a espessura do cobrimento é menor (LAPA, 2008; FELIX *et al.*, 2019).

O aumento da relação a/c aumenta a permeabilidade e a profundidade da carbonatação, cimentos mais finos contribuem para diminuir a profundidade de carbonatação, a cura também tem influência neste processo, pois deficiências nela podem ocasionar maior porosidade e fissuras. Frente a isso, pode-se concluir que inúmeros fatores influenciam a carbonatação (LAPA, 2008; ARAUJO; REIS; AGULAR, 2019).

Para a determinação das áreas carbonatadas podem ser adotados métodos como difração de RX, análise térmica diferencial, termografia e microscopia, mas os mais utilizados são os indicadores químicos de pH, como fenolftaleína, que ao ser borrifada em perfis de concreto apresenta coloração característica, vermelho carmim, a partir de uma determinada faixa de pH da solução, sendo um método colorimétrico de avaliação. Portanto, admite-se que o concreto não está carbonatado caso após a aplicação do indicador não apresente alteração na cor (LAPA, 2008; CASCUDO; CARASEK, 2011; ARAUJO; REIS; AGULAR, 2019).

b) Corrosão por elevado teor de íon cloro

Frequentemente a ação dos íons cloro é visto como o principal causador da corrosão nas armaduras do concreto (LAPA, 2008; MEDEIROS *et al.*, 2019). Os íons cloro podem chegar até o interior do concreto de diversas maneiras, como por exemplo, pelo uso de aceleradores de pega que contenham cloreto de cálcio (CaCl_2), impurezas dos agregados e da água de amassamento, contato do concreto com íons cloro presentes na maresia, na água do mar ou no uso de sais de degelo e em processos industriais (FIGUEIREDO, 2011).

O ambiente marinho é umas das principais fontes de íon cloro que deteriora as estruturas de concreto (MEDEIROS *et al.*, 2019). Na composição da água do mar é possível encontrar todos os elementos naturais conhecidos na tabela periódica, variando consideravelmente com a localização, tempo e estação do ano e atividade biológica, sendo que a concentração de íons cloro é a mais abundante dentre os sais (LIMA, 2011).

Além da ação química, a cristalização dos sais da água do mar nos poros do concreto pode provocar sua degradação devido à pressão exercida nos locais onde há evaporação, por isso a impermeabilização é muito importante para evitar a penetração da água (LAPA, 2008).

Basicamente os parâmetros de composição, tipo e quantidade de cimento, relação água/cimento, adensamento e cura, fissuras, temperatura ambiente influenciam a penetração de CO_2 e também a penetração dos íons cloro, entretanto não agem da mesma maneira (FIGUEIREDO, 2011).

A relação a/c, o adensamento e a cura são fatores que influenciam a qualidade do concreto e por isso têm relação direta com a capacidade de penetração de cloretos (LAPA, 2008).

Os efeitos da carbonatação, juntamente com íons cloro levam a uma aceleração na velocidade da corrosão, quando comparado a ocorrência dos ataques de maneira independente (LAPA, 2008).

“O processo de corrosão do aço no concreto envolve uma fase inicial, na qual os agentes agressivos alteram as condições do concreto no entorno da barra, despassivando a armadura, seguindo-se da formação de uma célula de corrosão, responsável pela propagação da corrosão” (FIGUEIREDO; MEIRA, 2011).

Como resultado da penetração de íons cloro nos poros do concreto, ocorre a despassivação da superfície do aço e sua corrosão, surgem no concreto: manchas, fissuras, destacamento de pedaços do concreto devido a um aumento de volume da armadura resultante do processo de oxidação (HELENE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para evitar a corrosão é importante controlar a permeabilidade do concreto, pois a água, o oxigênio e os cloretos desempenham papel fundamental na corrosão das armaduras (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A resistência da estrutura depende da resistência do concreto e da resistência da armadura à agressividade do meio, pois qualquer um desses componentes pode comprometer a estrutura. Portanto, o cobrimento oferece uma proteção natural à armadura, e a sua perda causa diversos problemas, sendo o principal a despassivação da armadura pela presença de íons cloro (HELENE, 1997).

c) Outros mecanismos de deterioração

Fatores climáticos como a radiação solar, a temperatura, a água e a contaminação do ar, são importantes degradantes da estrutura. Porém a degradação resulta da ação conjunta desses fatores (FERREIRA, 2000).

Existem também, mecanismos de deterioração da estrutura causadas por ações mecânicas como desgaste superficial por abrasão, fissuração por variação volumétrica, dilatação, impactos, fadiga, fluência, relaxamento etc. que influenciam sua durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Além da despassivação e da carbonatação a NBR 6118 (ABNT, 2014) prevê os mecanismos de deterioração da estrutura por movimentação de diversas origens:

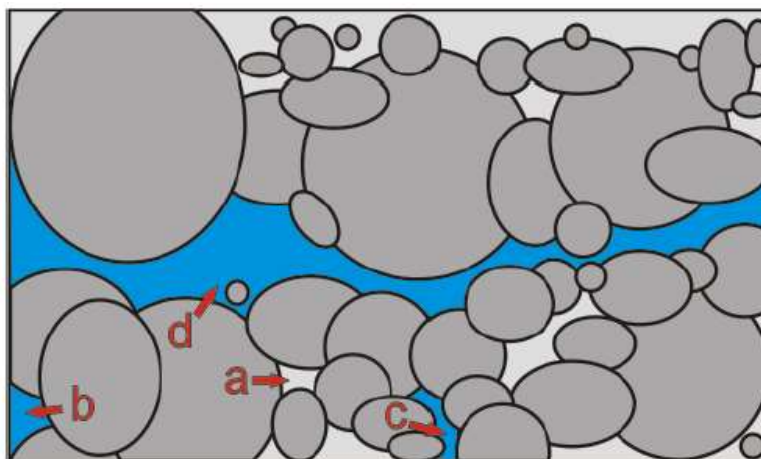
“São todos aqueles relacionados às ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas, retração, fluência e relaxação, bem como as diversas ações que atuam sobre a estrutura (ABNT NBR 6118, 2014).”

4.4 Mecanismos de transporte de gases e fluídos para o interior do concreto

A durabilidade das estruturas tem relação direta com a estrutura de poros, com microfissuras da pasta de cimento e com a forma de ingresso e transporte de agentes agressivos, por isso é fundamental o conhecimento sobre os mecanismos de transporte de fluídos e gases para o interior do concreto armado. Os mecanismos mais importantes são permeabilidade, difusão, absorção capilar e a migração, podendo ainda haver a combinação entre eles (GUIMARÃES, 2002; SILVA, 2011).

Para o entendimento da dinâmica do transporte é importante definir que poros são espaços vazios distribuídos através da matéria de tamanhos distintos. O tamanho dos poros e a sua continuidade influenciam diretamente na dinâmica de transporte. A Figura 16 apresenta 04 diferentes tipos de poros, o item (a) representa o poro fechado ou isolado, o item (b) representa o poro aberto, o (c) representa o poro interconectado e o item (d) representa o poro permeável (SENTONE, 2011).

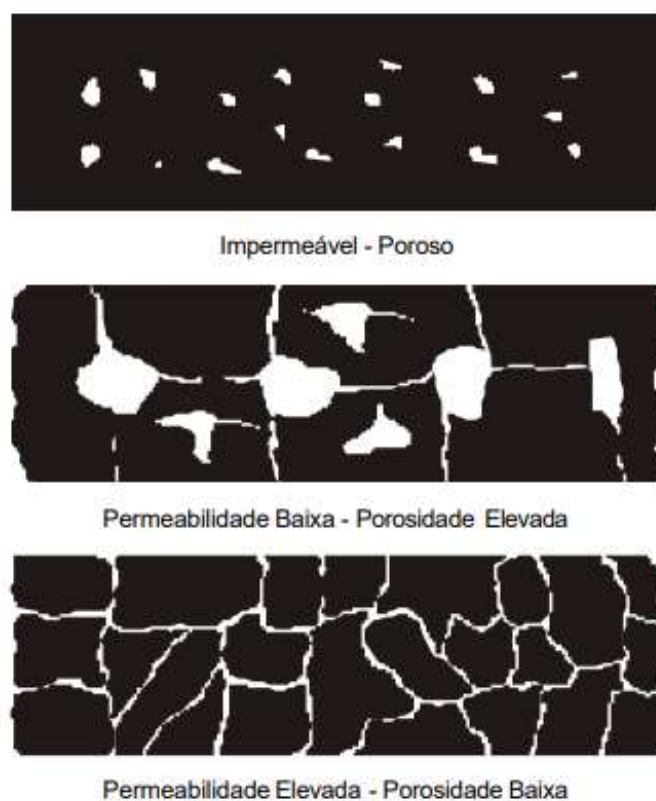
Figura 16. Tipos de poros



Fonte: SENTONE (2011)

Outro fator que influencia a durabilidade é o diâmetro dos poros. A Figura 17 mostra a diferença entre porosidade e permeabilidade, duas propriedades diferentes. A porosidade diz respeito ao volume de vazios, já a permeabilidade é a capacidade de circulação de um fluído.

Figura 17. Diferença entre Porosidade e Permeabilidade



Fonte: FERREIRA (2000)

A água é um material de moléculas pequenas que são capazes de penetrar em poros muito pequenos e, além disso, é um grande solvente (GUIMARÃES, 2002). Por isso, é um dos principais meios de transporte de substâncias agressivas ao concreto (SILVA, 2011).

A existência de água nos poros do concreto está associada aos mecanismos de transporte, mecanismos estes que regem as trocas com o meio ambiente e a disponibilidade de água livre para propiciar as reações de degradação. A disponibilidade de água nos poros depende do tempo em que há presença de água líquida na superfície dos poros, sendo condicionadas as condições climáticas como umidade relativa, temperatura e pressão de vapor de água. Um exemplo de degradação é o processo de corrosão da armadura, é eletroquímico e necessita de água para que os íons possam se movimentar e gerar correntes de corrosão (LIMA, 2011).

Os fatores que influenciam os mecanismos de transporte de substâncias no concreto podem ser agrupados em (SILVA, 2011):

- Intrínsecos: Decorrentes da composição do concreto e da sua execução, como a relação água/cimento, dimensão máxima do agregado, alterações causadas por adições. O fator resultante desse grupo é dimensão e a estrutura dos poros;
- Extrínsecos: Decorrentes do tipo e concentração de substâncias (como CO₂, temperatura e íon cloro), as condições ambientais, condições de uso e microfissuras.

Todos os mecanismos de transporte dependem de seus materiais constituintes, incluindo a composição cimentícia da mistura, o tamanho e a porosidade do agregado (GUIMARÃES, 2002).

4.4.1 Difusão

“A difusão é a transferência de massa por movimento aleatório de moléculas ou íons na solução dos poros das regiões com altas concentrações para regiões de baixas concentrações de substâncias” (SILVA, 2011), sendo a difusividade a taxa de difusão de líquidos, gases e íons através dos poros (GUIMARÃES, 2002).

Resumidamente existe a tendência de as moléculas migrarem de uma região de maior concentração para uma de menor concentração, até que o sistema entre em equilíbrio, entretanto é necessário que o meio esteja vazio e os átomos possuam energia suficiente para quebrar as ligações com os vizinhos, causando o movimento de arraste (SENTONE, 2011).

Para estruturas de concreto armado a entrada de íons cloro é um dos problemas de transporte mais preocupantes, pois a carbonatação, o ataque de sulfatos e o ataque por íons cloro dependem parcialmente ou totalmente da difusão (FERREIRA, 2000).

4.4.2 Absorção capilar

A sucção capilar e absorção capilar é um mecanismo de transporte de água comum em concretos e argamassas, sendo o processo pelo qual os

líquidos podem ser transportados para o interior do concreto através de poros capilares devido à tensão superficial (SILVA, 2011).

A capilaridade prevalece nas camadas superficiais, isto é, mesmo que a interconectividade dos poros se estenda até regiões mais internas do material, a capilaridade acaba sendo interrompida, pois os poros acabam promovendo resistência ao escoamento do fluido (SENTONE, 2011). Para avaliar a capilaridade, são empregados ensaios de exposição de uma superfície do corpo de prova a uma lâmina de água, e é realizada a pesagem dos mesmo em intervalos de tempo pré-estabelecidos.

Por isso o fenômeno de capilaridade é um mecanismo importante de entrada de fluídos, que podem ser agressores, para o interior do concreto (SENTONE, 2011). O transporte de líquidos é influenciado pela viscosidade, densidade e tensão superficial do líquido e pela estrutura dos poros do concreto (FERREIRA, 2000).

A absorção capilar é um mecanismo importante de ingresso de cloro no concreto, visto que um concreto seco em contato com solução salina irá absorver a solução por sucção capilar muito mais rapidamente que apenas a difusão. Todavia a combinação de ambos os meios de transporte é muito eficiente para o ataque à peça (FERREIRA, 2000).

4.4.3 Permeabilidade

A permeabilidade é o fluxo de líquidos ou gases, através do concreto, sujeitos a pressão (FERREIRA, 2000), é a propriedade que governa a taxa de um fluido ao escoar através de um sólido (GUIMARÃES, 2002).

O coeficiente de permeabilidade representa a passagem de água e gases através dos poros devido ao gradiente de pressão (SILVA, 2011), e depende do modo como é medido (FERREIRA, 2000).

A permeabilidade está diretamente ligada às características da estrutura porosa, logo pode funcionar como um parâmetro de qualidade para avaliação da durabilidade (SENTONE, 2011).

A água é um componente essencial para as reações de hidratação do cimento e facilita a mistura dos componentes do concreto. Dependendo das condições de cura do concreto a maior parte da água evapora, deixando os poros

vazios ou não saturados. Um concreto não será vulnerável a fenômenos destrutivos da água se houver pouca ou nenhuma água evaporável após a secagem e se a exposição subsequente ao meio ambiente não causar ressaturação dos poros. A ressaturação depende do coeficiente de permeabilidade (K) (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os poros são o meio que os agentes agressivos têm de adentrar o interior do concreto, a classificação e nomenclatura varia muito entre autores, mas os mais relevantes são os denominados macroporos e poros capilares. A porosidade pode ser determinada por ensaios laboratoriais através da determinação do volume de vazios (SILVA, 2011).

Quando a relação água/cimento é alta e o grau de hidratação é baixo, a pasta de cimento terá uma porosidade capilar alta, com alto número de poros grandes e bem conectados, portanto o coeficiente de permeabilidade será alto. A maioria dos poros terá seus tamanhos reduzidos com o desenvolvimento da hidratação, reduzindo a permeabilidade. Como a relação água/cimento raramente excede 0,7, teoricamente em concretos bem curados, a pasta de cimento não será o principal fator da permeabilidade do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Quanto maior a dimensão do agregado, maior o coeficiente de permeabilidade do concreto, isso se explica devido as microfissuras normalmente presentes na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento. Portanto a permeabilidade do concreto depende da relação água/cimento e da dimensão máxima do agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

5 METODOLOGIA

A abordagem científica adotada neste trabalho é a Pesquisa Experimental com testes em laboratório, sendo o parâmetro de estudo a qualidade da água na produção do concreto. Os ensaios foram realizados nos laboratórios do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia (CEATEC) da Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas).

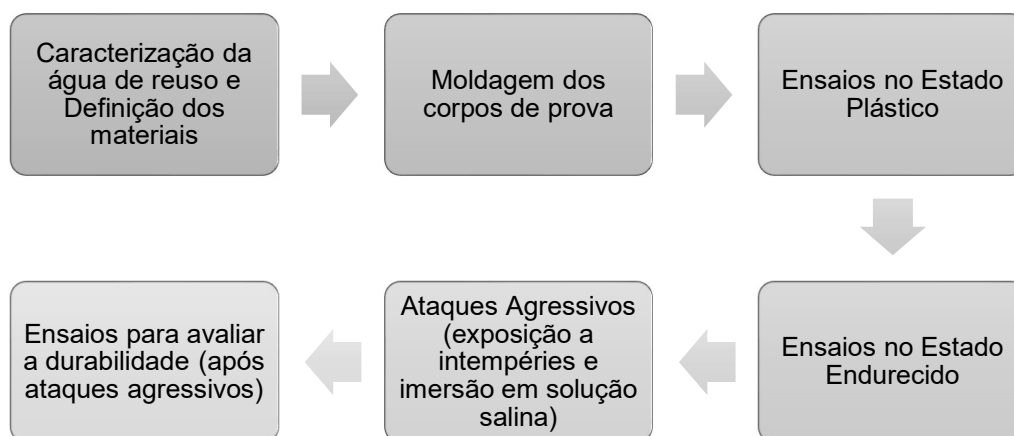
Inicialmente foi analisada a influência da água de reuso no Calor de Hidratação do cimento com o objetivo de escolher o tipo de cimento a ser utilizado para a produção do concreto.

O concreto foi fabricado com o cimento CP V ARI, que sofreu a menor influência da água de reuso no calor de hidratação e ensaiado no estado plástico. Em seguida, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm e prismáticos de 10x10x40 cm. Os corpos de prova foram curados em câmara úmida por 28 dias e ensaiados para caracterização do concreto no estado endurecido.

Os corpos de prova foram então expostos a ambientes agressivos (exposição a intempérie e imersão em solução salina). Após esta exposição os corpos de prova foram ensaiados com o objetivo de avaliar indiretamente a durabilidade do material.

A Figura 18 apresenta o fluxograma com a ordem dos procedimentos da pesquisa:

Figura 18. Procedimentos da pesquisa



Fonte: autor (2019)

5.1 Caracterização da água de reuso

A água de reuso veio de uma Estação Produtora de Água de Reuso localizada na cidade de Campinas - SP. A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos dos ensaios realizados pela própria Estação de Tratamento entre os meses de janeiro e agosto de 2019, e os teores máximos permitidos pela NBR 15900-1 (ABNT, 2009) para a qualidade da água de amassamento.

Tabela 12. Ensaios químicos

Determinação	SANASA	NBR 15900-1 (ABNT, 2009) (teor máximo)	Observação
pH	6,9 – 7,6	≥ 5	
Cloretos	100 mg/l	1.000 mg/l(*)	Concreto armado
Sulfatos	43,25 mg/l	2.000 mg/l	
Álcalis	54 mg/l	1.500 mg/l	
Açúcares	Não analisado	100 mg/l	
Fosfatos	2,7 mg/l	100 mg/l	
Nitratos	11,7 mg/l	500 mg/l	
Chumbo	< 0,01 mg/l	100 mg/l	
Zinco	0,045 mg/l	100 mg/l	
Material sólido	448 mg/l	50.000 mg/l	

(*) Teor para concreto armado

Fonte: autor (2019)

A média dos resultados das análises químicas dos parâmetros avaliados atendem aos requisitos da NBR 15900-1 (ABNT, 2009). No entanto a Estação não realiza o ensaio para determinar a presença de açúcares.

A presença de açúcar pode retardar o início de pega do cimento e consequentemente diminuir as resistências nas idades iniciais. A Figura 19 mostra como a presença de açúcar na areia prejudica o processo de hidratação, esse tipo de contaminação ocorre em regiões do Brasil onde há o transporte de materiais para usinas canavieiras (IKEMATSU e LAGUNA, 2017).

Figura 19. Processo de hidratação do cimento interrompido pelo açúcar



Fonte: IKEMATSU e LAGUNA (2017)

O mecanismo para retardar a hidratação do cimento por açúcares é parcialmente entendido, provavelmente ele age no cimento, retarda a hidratação e altera a microestrutura do silicato de cálcio (CSH). Além disso, quanto maior a quantidade de açúcar, maior a extensão do retardo. A adição de 1% de açúcar nas pastas de cimento curadas a 20°C retarda a hidratação por mais de 3 meses, porém a elevação da temperatura reduz o tempo do retardo. Também é importante notar que embora a reação seja retardada, logo que as amostras reagem, a evolução é bem rápida, sendo até possível superar o grau de hidratação de amostras sem adição de açúcar (JUENGER; JENNINGS, 2002).

Dependendo do tipo de cimento utilizado, da quantidade de açúcar e do instante em que ele entrou em contato com a mistura, a pega do concreto pode ser retardada em várias horas, prejudicando também a evolução da resistência à compressão. Os autores alertam que a contaminação do agregado com urina pode apresentar resultado positivo para testes de detecção de açúcar, já que a urina também apresenta açúcar. Portanto a presença de açúcar no concreto altera a sua microestrutura e prejudica o ganho de resistência (IKEMATSU E LAGUNA, 2017).

O ensaio da presença de açúcar na água foi realizado no Laboratório de Química da PUC-Campinas, em duas fases, como apresentado na NBR 15900-11 (ABNT, 2009).

Primeiramente foi feita a análise qualitativa, onde um pouco de água é colocado em um tubo de ensaio e são acrescentadas 3 gotas de alfa-fenol, o tubo de ensaio é inclinado e lentamente é acrescentado ácido sulfúrico (H_2SO_4), até que este forme uma camada de 1cm de espessura no fundo do tubo. Se a amostra apresentar cor púrpura-violeta na interface entre as soluções, indica que a amostra contém açúcar, deve-se então realizar a quantificação através do Método Quantitativo. A Figura 20 mostra um resultado positivo para a presença de açúcar.

Figura 20. Método Qualitativo



Fonte: autor (2019)

O Método Quantitativo consiste em medir com uma pipeta 10 ml da amostra filtrada e transferir para um balão volumétrico de 100 ml, adicionar, sob agitação, 1 ml de solução de fenol 80%, aguardar 10 minutos e adicionar rapidamente 15 ml de ácido sulfúrico concentrado. A amostra deve ser misturada com cuidado e resfriada até a temperatura ambiente. A curva-padrão é feita com

balões volumétricos com diferentes concentrações de solução-padrão de sacarose, 2%, 4%, 6% e 8%. Após isso, os balões volumétricos devem ser completados com água destilada ou deionizada. As leituras deverão ser realizadas em espectrofotômetro num comprimento de onda de 490nm.

O ensaio para determinação do açúcar foi realizado em quatro amostras diferentes, coletadas em dias distintos. Durante a análise da primeira amostra, coletada dia 04 de julho de 2019, o ensaio qualitativo apresentou cor violeta, sendo um positivo para a presença de açúcar. Por este motivo procedeu-se o ensaio quantitativo onde foi verificada a presença de 303,97 mg/l, sendo que a norma 15900-11 (ABNT, 2009) indica um limite máximo de 100 mg/l. A Figura 21 mostra a curva de ensaio para a leitura no espectrofotômetro.

Figura 21. Método Quantitativo – amostra 1



Fonte: autor (2019)

Uma possível solução para amostras que apresentem quantidade de açúcar acima do permitido pela norma é a utilização do volume diluído em água potável sem a presença de açúcar, ou a utilização de água de reuso resultante do tratamento de esgoto cujo método elimine o açúcar durante alguma fase do seu processo.

Duas novas amostras de água foram coletadas em datas diferentes (18 de novembro de 2019 e 20 de janeiro de 2020), os ensaios resultaram

negativo para o teste qualitativo, indicando que as amostras não possuíam açúcar.

A quarta amostra de água foi a água utilizada para a produção do traço com água de reuso moldado nesta pesquisa, a água foi coletada dia 20 de janeiro de 2020, o ensaio qualitativo deu resultado positivo, indicando a presença de açúcar, por isso deu-se prosseguimento e o ensaio quantitativo apontou a concentração de 179 mg/l. A Figura 22 mostra a curva de ensaio para a leitura no espectrofotômetro.

Figura 22. Método Quantitativo – amostra 2



Fonte: autor (2020)

É perceptível que a qualidade da água varia ao longo do tempo, sendo necessários ensaios constantes para averiguar a qualidade da água para uso como água de amassamento.

5.2 Caracterização dos materiais

Para determinação do tipo de cimento a ser usado na produção do concreto, inicialmente verificou-se a influência da água de reuso no calor de hidratação de três tipos de cimento com características conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018). A definição do tipo de cimento a ser utilizado na produção do concreto foi baseada neste ensaio, escolhendo-se o tipo de cimento que sofreu menor influência da água de reuso.

Foram testados os cimentos CP II F 32, CP IV 32 e CP V ARI. A avaliação foi por comparação de desempenho, por isso foram usadas duas

fontes diferentes de água, a água potável, fornecida por rede pela concessionária SANASA, que serviu de referência, e água de reuso, proveniente da Estação Produtora de Água de Reuso.

Para este teste a água de reuso foi captada no dia 04 de julho de 2019 às 08h23, a água foi armazenada em galões e acomodada em ambiente fechado e o ensaio para determinação do teor de açúcar apontou 303,97 mg/l.

O calor de hidratação do cimento durante as primeiras idades determina a velocidade do endurecimento do concreto e o crescimento da resistência. Para a determinação do calor de hidratação foi realizado um ensaio semelhante ao proposto por Pimentel (2000). Em uma caixa térmica com um furo na tampa que permitia a passagem de sensores, foram posicionados 04 copos de isopor, um para cada amostra de pasta de cimento como pode ser observado na Figura 24.

Figura 23. Aparato para o desenvolvimento do ensaio de calor de hidratação



Figura 24. Copo com a pasta de cimento



Fonte: autor (2019)

A temperatura foi aferida a partir de 04 termistores calibrados em laboratório com termômetro de mercúrio. Os dados foram processados por uma placa de arduino e armazenados em um cartão de memória. A placa foi programada para realizar medições em intervalos de 15 minutos durante 24 horas. A curva do calor de hidratação foi determinada através da média das temperaturas de duas amostras da mesma mistura.

Cada pasta de cimento foi constituída por 200 g de cimento e 50 g de água, obtendo assim uma relação água/cimento de 0,25. Foram misturadas 04

pastas de cimento, duas com água potável e duas com água de reuso para cada tipo de cimento, a Tabela 13 apresenta o delineamento deste experimento. Cada pasta foi acondicionada em saquinhos de plásticos, os sensores foram encapados com filme de PVC para evitar o contato direto do sensor com a pasta de cimento, o que poderia danificá-los.

Tabela 13. Delineamento para ensaio de Calor de hidratação do cimento

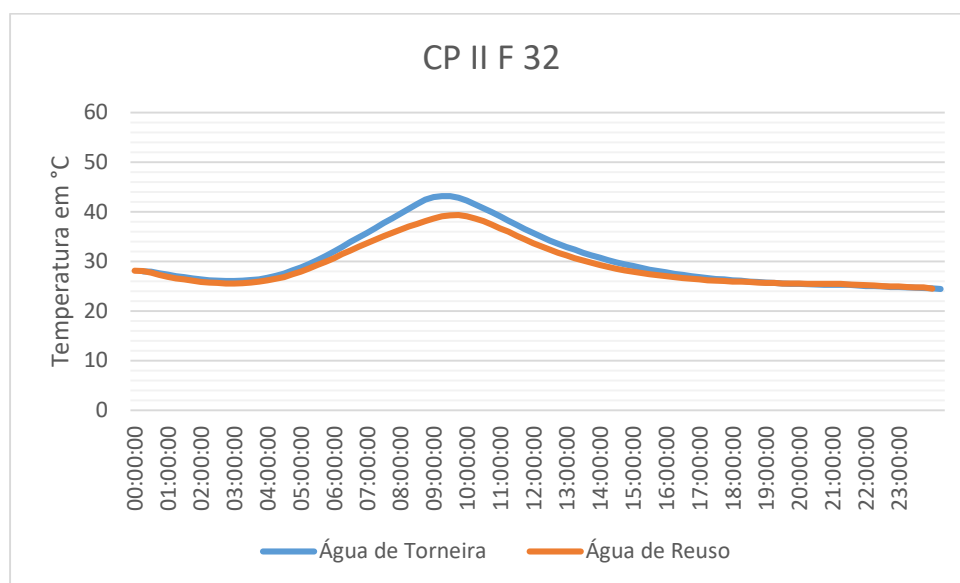
Cimento	Água potável	Água de reuso
CP II F 32	CP II F 32 + Potável	CP II F 32 + Reuso
CP IV 32	CP IV 32 + Potável	CP IV 32 + Reuso
CP V ARI	CP V ARI + Potável	CP V ARI + Reuso

Fonte: autor (2019)

A finalidade do ensaio foi verificar se existe redução da temperatura da reação de hidratação e atraso para obtenção da máxima temperatura quando da utilização da água de reuso, o que indicaria uma interferência da água na reação de hidratação do cimento. A análise é feita em função da comparação da temperatura de pico e do tempo necessário para sua ocorrência.

Nas Figuras 25, 26 e 27 são apresentadas as curvas tempo *versus* temperatura (°C) obtidas experimentalmente para os tipos de cimento CP II F 32, CP IV 32 e CP V ARI, respectivamente. Cada curva foi traçada tendo como resultado a média entre a temperatura de dois sensores.

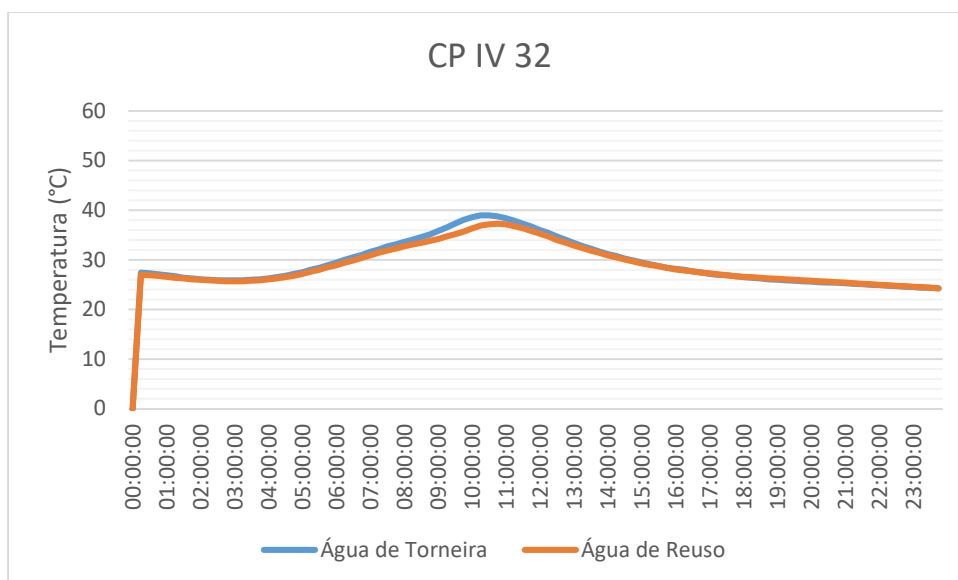
Figura 25. Calor de hidratação CP II F 32



Fonte: autor (2019)

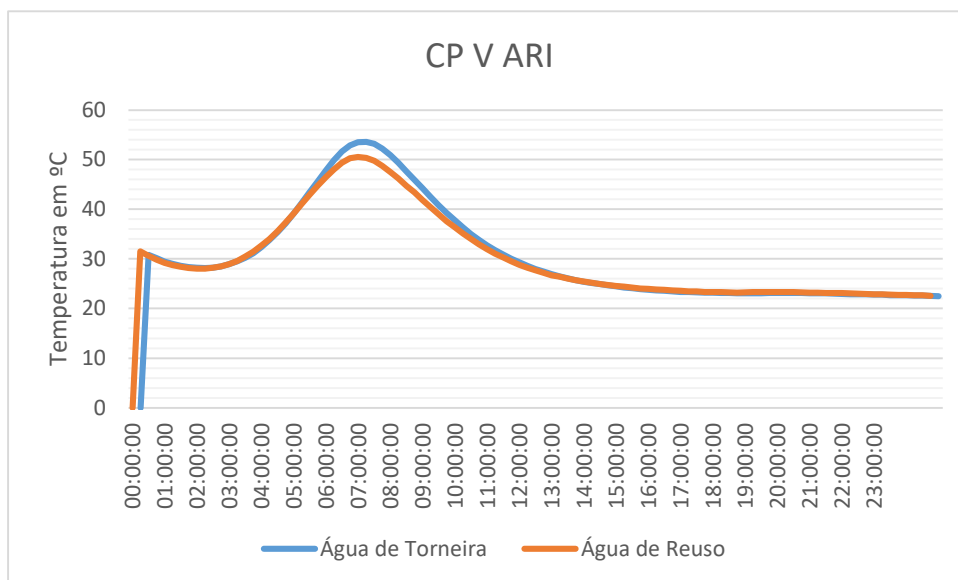
Para a pasta usando CP II F 32 o horário de pico de temperatura para a amostra com água potável aconteceu após 9h00 do início do ensaio e para a pasta de cimento com a água de reuso aconteceu após 9h45, portanto houve um atraso de 0h45 para atingir a temperatura máxima. A temperatura da mistura com a água de reuso foi 8,9% menor do que com a água potável.

Figura 26. Calor de hidratação – CP IV 32



Fonte: autor (2019)

Para o CP IV 32, observa-se que o horário de pico da amostra com água potável aconteceu após 11h00 da adição da água e que para a água de reuso aconteceu após 10h45. Portanto, houve uma antecipação de 0h15. A temperatura da mistura com a água de reuso foi 3,37% menor.

Figura 27. Calor de hidratação – CP V ARI

Fonte: autor (2019)

Para o CP V ARI, observa-se que o horário de pico das amostras ocorreu no mesmo horário, após 7h00 do início da mistura. A temperatura da mistura com água de reuso foi 5,7% menor.

O atraso em alcançar o pico de temperatura e a redução da temperatura máxima alcançada podem ser justificados pela presença de açúcares na água de reuso.

Dentre os cimentos testados para o Calor de Hidratação, o CP V ARI sofreu menor influência da água de reuso sobre o atraso do pico do calor de hidratação. Por isso, esta pesquisa optou por utilizar o CP V ARI.

As tabelas 14, 15 e 16 apresentam limites para a composição do cimento CP V ARI, seus requisitos químicos e requisitos físicos e mecânicos respectivamente.

Tabela 14. Limites de composição do Cimento *Portland* – Tipo CP V ARI
(porcentagem em massa)

Clínquer + sulfatos de cálcio	90 – 100
Escória granular de alto-forno	0
Material pozzolânico	0
Material carbonático	0 – 10

Fonte: adaptado na NBR 16697 (ABNT, 2018)

Tabela 15. Requisitos químicos do Cimento *Portland*
(expresso em porcentagem de massa)

Resíduo insolúvel (RI)	≤ 3,5
Perda ao fogo (PF)	≤ 6,5
Óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,5
Trióxido de enxofre (SO₃)	≤ 4,5

Fonte: adaptado na NBR 16697 (ABNT, 2018)

Tabela 16. Requisitos físicos e mecânicos do CP V ARI

Finura	Tempo de início de pega	Expansibilidade a quente	Resistência à compressão MPa				Índice de brancura
Resíduo na peneira 75 μm	(min)	(mm)	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	-
≤ 6,0	≥ 60	≤ 5	≥ 14	≥ 24	≥ 34	-	-

Fonte: adaptado na NBR 16697 (ABNT, 2018)

5.3 Durabilidade do concreto com água de reuso

Para avaliar o desempenho do concreto produzido com água de reuso foi preparado um traço de concreto, classe de resistência de 30MPa, baseado no traço proposto por Rizzo (2018), que foi determinado pelo método de dosagem preconizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). O traço é apresentado na Tabela 17. O concreto foi preparado com agregado miúdo natural, agregado graúdo natural beneficiado de origem basáltica e cimento CP V ARI. Como aditivo utilizou-se o ADVA CAST 525, um superplastificante com objetivo de aumentar a trabalhabilidade do concreto, reduzindo a demanda por água com resistência a segregação.

Tabela 17. Traço unitário do concreto em massa

Traço	Cimento	Areia	Brita	a/c	Adt (%)	CC (kg/m ³)
T Ref	1	2,71	3,79	0,6	0,4	308,5

a/c: relação água/cimento; adt: aditivo; CC: consumo de cimento

Fonte: RIZZO (2018)

Para avaliação da influência da água de reuso nas características do concreto, foram preparados dois traços, um com água potável e outro com água de reuso, com cura em câmara úmida. A partir disso, foi possível observar e quantificar as características que são influenciadas através da comparação dos resultados dos ensaios dos dois traços.

5.3.1 Meios agressivos aplicados ao concreto

Os traços de concreto foram ensaiados aos 28 dias para resistência à compressão, módulo de elasticidade, capacidade de absorção de água por capilaridade e capacidade de absorção de água por imersão.

Foi avaliado o desempenho do concreto produzido com água de reuso em comparação ao produzido com água potável quando submetido a duas condições ambientais, a primeira exposição a intempérie e a segunda em meio salino.

Parte dos corpos de prova foi retirado da câmara úmida aos 28 dias de idade e expostos a intempéries como sol, chuva e gases presentes na atmosfera até a idade de ensaio, 135 e 220 dias. Os corpos de prova foram colocados no Canteiro de Obras do Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas, em uma baia de agregados desocupada no espaço externo como mostrado na Figura 28.

Após o término do período de exposição foi avaliada a profundidade da carbonatação no concreto. Para isso os corpos de prova foram rompidos diametralmente e por aspersão de fenolftaleína foi possível determinar a profundidade da carbonatação aos 135 e 220 dias.

Figura 28. Corpos de prova expostos a intempérie



Fonte: autor (2020)

Outra parte foi retirada da câmara úmida aos 28 dias de idade, secos ao tempo durante 1 semana (conforme Figura 29) e imersos em solução salina (Figura 30) com concentração de 4% de NaCl em massa. O ataque consistiu em submeter os corpos de prova a ciclos, sendo 3 dias de imersão na solução salina seguidos de 4 dias de secagem ao ar. O objetivo inicial do trabalho era realizar 30 ciclos, porém eles foram paralisados, pois devido a pandemia de Covid-19 o laboratório permaneceu fechado e com acesso restrito. Por isso, os corpos de prova foram expostos a 08 ciclos, que correspondem a 56 dias e durante o restante do período os corpos de prova permaneceram imersos em solução salina, sendo ensaiados nas idades de 220 e 340 dias. O objetivo desta imersão é simular um ambiente marítimo.

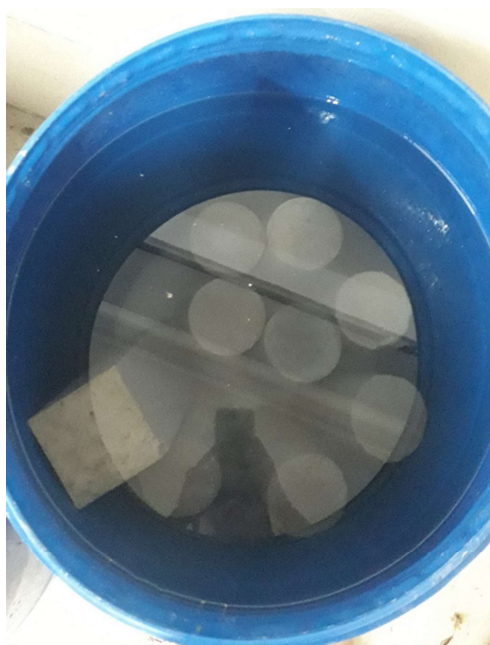
Após o término do período de exposição foi avaliada a profundidade da penetração de íons cloro no concreto. Para isso os corpos de prova foram rompidos diametralmente e por aspersão de solução de nitrato de prata 0,3M de concentração foi possível determinar a profundidade de penetração dos íons cloro, este ensaio foi realizado com 340 dias de idade.

Figura 29. Corpos de prova sendo secos ao tempo



Fonte: autor (2020)

Figura 30. Corpos de prova imersos



Fonte: autor (2020)

5.3.2 Características do concreto

A consistência do concreto foi determinada conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998) para a caracterização do concreto no estado plástico.

A Tabela 18 indica os métodos de ensaio para avaliar as características do concreto no estado endurecido. Foram realizados os ensaios para a determinação da resistência à compressão axial e do módulo de elasticidade.

Para a avaliação do comportamento do concreto frente à exposição a ambiente agressivo, foram realizados ensaios para determinação indireta da durabilidade, como a determinação da capacidade de absorção de água por imersão e por capilaridade, determinação da permeabilidade ao ar, carbonatação e penetração de íons cloreto, além dos ensaios para determinação de propriedades mecânicas.

Tabela 18. Ensaios no estado endurecido

Ensaio	Norma
Resistência à compressão axial	NBR 5739 (ABNT, 2018)
Módulo de elasticidade	NBR 8522 (ABNT, 2017)
Capacidade de absorção de água por imersão	NBR 9778 (ABNT, 2005)
Capacidade de absorção de água por capilaridade	NBR 9779 (ABNT, 2012)
Penetração de Íons cloreto	Método colorimétrico
Carbonatação	Método colorimétrico
Permeabilidade ao ar	<i>Equipamento – PorosiscopesTM</i>

Fonte: autor (2019)

O ensaio de capacidade de absorção de água por imersão avalia a capacidade dos poros passantes, enquanto a capacidade de absorção de água por capilaridade determina a capacidade dos poros finos que permitem a percolação da água pelo concreto.

Parte dos corpos de prova foi mantida na câmara úmida para controle, parte foi submetida a intempérie e a solução salina. A quantidade e a idade de amostras para cada ensaio estão dispostas na Tabela 19.

Tabela 19. Quantidade de corpos de prova

Ensaio	Idades / nº corpos de prova						
	28 dias	135 dias (controle)	135 dias (intempérie)	220 dias (controle)	220 dias (intempérie)	220 dias (imersão salina)	340 dias (imersão salina)
Resistência à compressão axial (CP 10 x 20cm)	3	3	3	3	3	3	-
Módulo de elasticidade (CP 10 x 20cm)	3	3	3	3	3	3	-
Capacidade de absorção de água por capilaridade (CP 10 x 20cm)	3	Repetir com o mesmo CP (guardado na câmara)	3	Repetir com o mesmo CP (guardado na câmara)	Repetir com o mesmo CP (guardado na intempérie)	3	-
Capacidade de absorção de água por imersão (CP 10 x 20cm)	3	Utilizar mesmo CPS da Capacidade de absorção de água por capilaridade	Utilizar mesmo CPS da Capacidade de absorção de água por capilaridade	Utilizar mesmo CPS da Capacidade de absorção de água por capilaridade	Utilizar mesmo CPS da Capacidade de absorção de água por capilaridade	Utilizar mesmo CPS da Capacidade de absorção de água por capilaridade	-
Permeabilidade ao ar (CP 10 x 10 x 40cm)	1	Repetir com o mesmo CP (guardado na câmara)	1	Repetir com o mesmo CP (guardado na câmara)	1	1	-
Penetração de íons cloreto (CP 10 x 20cm)	-	-	-	-	-	-	2
Carbonatação (CP 10 x 20cm)	-	-	2	-	2	-	-

Fonte: autor (2019)

a) Determinação da carbonatação

Após a exposição ao meio agressivo foram analisados o comportamento do concreto quanto a profundidade da carbonatação através da aspersão de fenolftaleína.

Após a exposição à intempérie, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral, nas idades de ensaio (135 e 220 dias). Em seguida as amostras foram colocadas em estufa à 100°C durante 48 horas para retirar a umidade. No dia do ensaio os corpos de prova foram retirados da estufa até voltarem a temperatura ambiente.

Na sequência foi aspergido uma solução de fenolftaleína com concentração de 1% sobre a superfície interna do corpo de prova, a Figura 31 mostra a coloração do corpo de prova após a aspersão.

Após a aspersão foram tiradas fotos com uma câmera digital Sony Cyber-shot a uma distância padronizada de 40 cm com auxílio de um tripé, em um ambiente com luminosidade controlada conforme as Figuras 32 e 33, com o objetivo de determinar a profundidade de carbonatação através da análise das imagens. As fotografias foram analisadas no programa AutoCAD®.

Figura 31. Corpo de prova após a aspersão de fenolftaleína



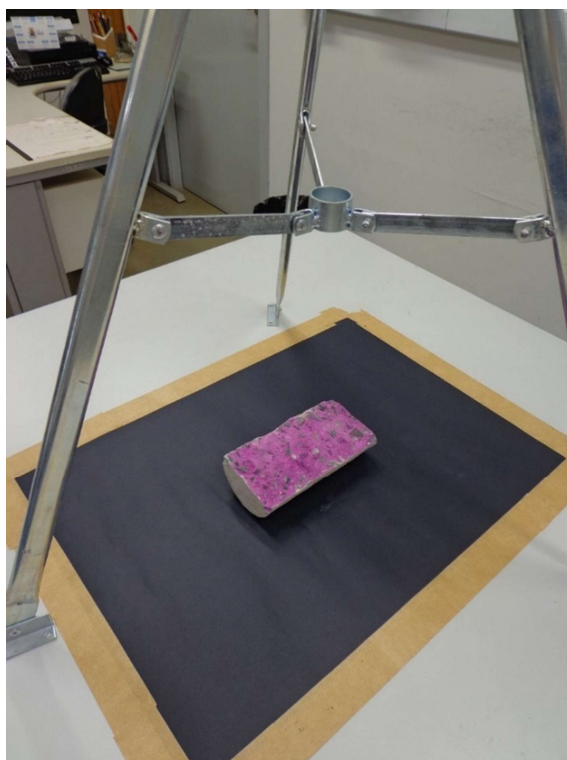
Fonte: autor (2020)

Figura 32. Tripé e corpo de prova após aspersão de fenolftaleína posicionado para as fotos



Fonte: autor (2020)

Figura 33. Detalhe do corpo de prova posicionado para as fotos



Fonte: autor (2020)

b) Determinação da penetração de íons cloro

O ensaio de penetração de íons cloro foi realizado após 340 dias de idade do concreto e imersão em solução salina. Os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral, em seguida as amostras foram colocadas em estufa à 100°C durante 48 horas para retirar a umidade. No dia do ensaio os corpos de prova foram retirados da estufa para voltarem a temperatura ambiente.

Na sequência foi aspergido uma solução de nitrato de prata de 0,3M sobre a superfície interna do corpo de prova, a Figura 34 ilustra a coloração do corpo de prova após a aspersão. Os corpos de prova foram então expostos por 5 minutos ao sol para aumentar a visibilidade da área de penetração.

O processo para realização das fotografias foi o mesmo descrito anteriormente para avaliação da carbonatação dos corpos de prova expostos às intempéries.

Figura 34. Corpo de prova após a aspersão de nitrato de prata



Fonte: autor (2020)

c) Determinação da Permeabilidade ao ar

A determinação da permeabilidade ao ar foi realizada nos corpos de prova prismáticos. Na idade dos ensaios os corpos de prova prismáticos de 10x10x40 cm foram divididos em quatro partes, resultando em 04 corpos de prova de 10x10x10 cm cada. Eles foram secos em estufa por 48 horas a 100°C para retirar a umidade.

A determinação da Permeabilidade foi feita através do equipamento chamado *Porosíscope* da James Instrument. O equipamento e sua montagem são apresentados nas Figuras 35 e 36, ele injeta ar sob pressão e determina a permeabilidade em função do tempo que o ar leva para penetrar em seu interior. Este trabalho avaliou a Permeabilidade ao ar na superfície do corpo de prova.

Figura 35. Porosíscope™



Fonte: NDT James Instrument (2021)

Figura 36. Ensaio para determinação de permeabilidade superficial com equipamento Porosiscopes™



Fonte: Rizzo (2017)

A tela do equipamento apresenta o tempo necessário para que a pressão do ar na câmara seja reduzida de 55 kPa para 50 kPa. Após a aferição do tempo em minutos e segundos, o tempo deve ser convertido para segundos e o material deve ser classificado a partir da tabela disponível no manual, conforme apresentado na Tabela 20.

Tabela 20. Classificação do material quanto à permeabilidade ao ar

Categoria do Concreto	Tempo ar (s)	Qualidade da proteção
0	< 30	Pobre
1	30 – 100	Moderado
2	100 – 300	Satisfatório
3	300 – 1000	Bom
4	> 1000	Excelente

Fonte: Manual Porosiscopes de James Instruments (2012)

5.3.3 Análise dos resultados

Com os resultados obtidos a partir dos ensaios normatizados (resistência à compressão, módulo de elasticidade, capacidade de absorção de água por capilaridade e por imersão) foi realizada uma análise de variância (ANOVA) no programa PAST para processar as características dos dados e assim

verificar se as médias diferem significativamente entre elas. A análise de variância teve o objetivo de avaliar se a substituição da água potável por água de reuso influenciou significativamente as características físicas e mecânicas do concreto. O nível de significância considerado foi de 5%.

A Análise de Variância (ANOVA) foi realizada para Resistência à compressão, Módulo de Elasticidade, Capacidade de absorção de água por imersão e Capacidade de absorção de água por capilaridade após 72 horas para os seguintes traços e idades:

- 1) Traço com água potável x Traço com água de reuso - controle - 28 dias;
- 2) Traço com água potável x Traço com água de reuso - controle – 135 dias;
- 3) Traço com água potável x Traço com água de reuso - controle - 220 dias;
- 4) Traço com água potável x Traço com água de reuso - intempérie - 135 dias;
- 5) Traço com água potável x Traço com água de reuso – intempérie - 220 dias;
- 6) Traço com água potável x Traço com água de reuso – solução salina - 220 dias.

6 RESULTADOS

6.1 Características do concreto no estado fresco

O mesmo volume de concreto foi produzido para os dois traços (com água potável e o com água de reuso) utilizando portanto, as mesmas quantidades de materiais. O aditivo foi sendo acrescentado aos poucos durante o processo de mistura, para manter a trabalhabilidade dentro do especificado para o traço.

Para o volume de concreto produzido a quantidade de aditivo adicionado a massa foi de 150ml. Essa quantidade foi dividida em 3 partes de 50ml, sendo que cada parte foi sendo acrescentada à concretagem para garantir que a trabalhabilidade não seria ultrapassada.

Para a concretagem com água potável o concreto estava bem seco e foi necessário adicionar todo o volume de aditivo. O resultado do *Slump Test* foi de 1,5cm, não atingindo a consistência esperada de 6,5cm. Para a concretagem com água de reuso, com metade do volume do aditivo o abatimento já era de 3,0cm, por isso decidiu-se parar o acréscimo de aditivo, para que não houvesse diferença de consistência entre os dois traços.

A Tabela 21 apresenta os resultados de abatimento, obtidos para o concreto no estado fresco. Frente a utilização de aditivo, não se pode avaliar a influência da água de reuso na consistência do concreto.

Tabela 21. Abatimento resultado do *Slump Test*

Traço	% aditivo	Slump Test (cm)
Potável	0,4	1,5
Reuso	0,2	3,0

Fonte: autor (2020)

6.2 Características mecânicas do concreto no estado endurecido

a) Resistência à compressão axial

Para a resistência à compressão axial os resultados foram comparados quanto à qualidade da água (água potável e água de reuso), com e sem agressividade ambiental para as idades de 28, 135 e 220 dias.

As médias dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial estão relacionadas nas Tabelas 22. Para o ensaio de imersão em água salina, os resultados são apresentados na Tabela 23. Foi considerado um Coeficiente de Variância de 10% para o aceite do valor da resistência à compressão dos corpos de prova.

Tabela 22. Resistência à compressão axial – com e sem agressividade ambiental

Idade e meio agressivo	28 dias		135 dias		135 dias Intempérie		220 dias		220 dias Intempérie	
	Potável	Reuso	Potável	Reuso	Potável	Reuso	Potável	Reuso	Potável	Reuso
Traço										
Resistência à compressão	30,49	28,05	52,21	26,27	48,39	32,59	45,77	32,85	49,95	35,89
Média (MPa)										
DP (MPa)	1,982	2,300	4,103	2,366	0,775	1,376	3,380	3,195	3,277	3,343

Fonte: autor (2020)

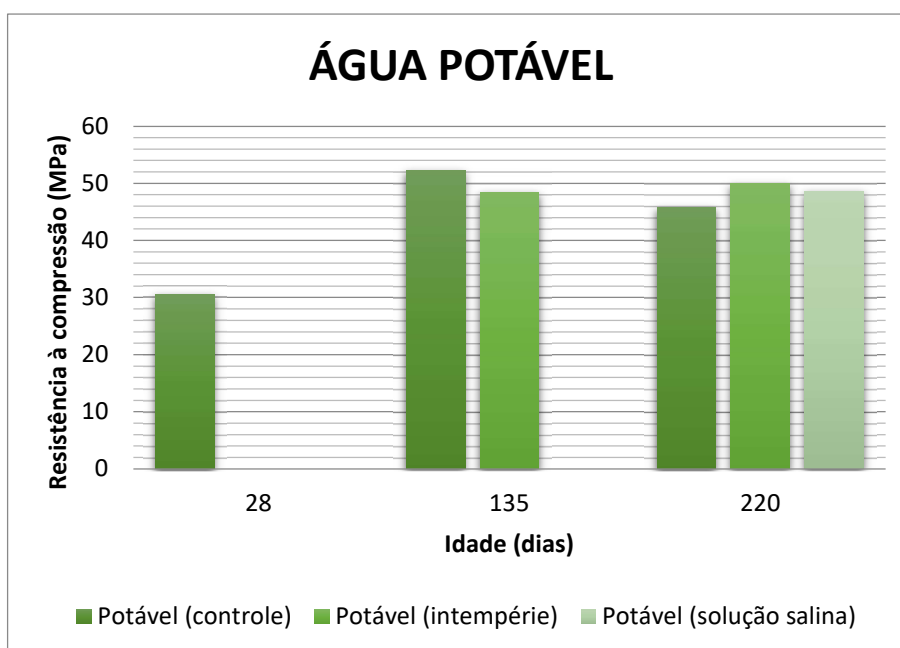
Tabela 23. Resistência à compressão axial após ciclos de imersão em solução salina

Idade e meio agressivo	220 dias	
	Potável	Reuso
Traço		
Resistência à compressão	48,62	31,17
Média (MPa)		
DP (MPa)	3,250	1,015

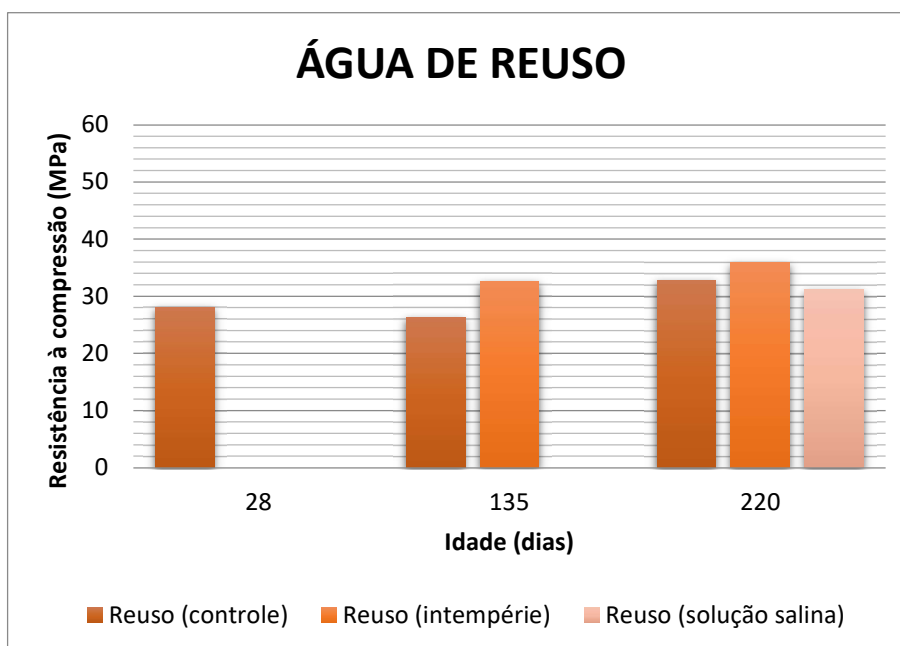
Fonte: autor (2020)

A Figura 37 apresenta os resultados médios de resistência à compressão axial aos 28, 135 e 220 dias com água potável, submetido a agressividade ambiental (intempérie) ou não submetido (controle) e submetido a imersão em solução salina.

A Figura 38 apresenta os resultados médios de resistência à compressão axial aos 28, 135 e 220 dias com água de reuso, submetido a agressividade ambiental (intempérie) ou não submetido (controle) e submetido a imersão em solução salina.

Figura 37. Resistência à compressão axial – água potável

Fonte: autor (2020)

Figura 38. Resistência à compressão axial – água de reuso

Fonte: autor (2020)

Comparando os dois traços de concreto (água potável e água de reuso), observa-se que os resultados da resistência à compressão de concretos moldados com água de reuso são sempre menores que os obtidos com água potável.

Aos 28 dias a resistência à compressão do traço com água de reuso é 8% menor que o traço com água potável, esse resultado está dentro do esperado para concretos moldados com água de reuso, pois estão de acordo com o que foi encontrado por Asadollahfardi *et al.* (2016), Saxena e Temburkar (2018) e Meena e Luhar (2019). Ghrair *et al.* (2018) encontraram uma redução de 7,7% da resistência aos 28 dias para concretos moldados com água sem tratamento.

Esta redução da resistência, apesar de não ser estatisticamente significativa, pode ter sido causada pela presença de açúcar na água de reuso.

A diferença se acentuou para idades maiores, aos 135 dias o concreto controle moldado com água de reuso foi 47,08% menor que o controle moldado com água potável e aos 220 dias foi 28,24% menor. Apesar disso, aos 220 dias de idade, a resistência foi superior a 30 MPa pretendida.

Apesar do concreto com água de reuso atingir valores de resistência à compressão menores que o traço com água potável, o ganho de resistência foi contínuo até os 200 dias, assim como apontado por Ghrair *et al.* (2018).

O concreto moldado com água de reuso e exposto ao intemperismo apresentou redução de 32,65% e 28,15% respectivamente para as idades de 135 e 220 dias em comparação ao concreto moldado com água de torneira.

A comparação do concreto imerso em solução salina também mostra que o concreto moldado com água de reuso possui resistência à compressão 35,90% menor do que aquele moldado com água potável.

A tabela 24 apresenta o resultado da Análise de Variância feita para a característica da Resistência à Compressão.

Tabela 24. Análise de Variância – Resistência à compressão

Traço	p-valor
Controle – 28 dias	0,318
Controle – 135 dias	0,0015
Controle – 220 dias	0,1088
Exposto à Intempérie – 135 dias	0,0001
Exposto à Intempérie – 220 dias	0,0131
Após imersão em solução salina – 220 dias	0,0638

Fonte: autor (2021)

A análise estatística mostra que o concreto mantido como controle apresentou diferença significativa apenas os 135 dias de idade. Para as demais

idades não houve diferença significativa entre os traços, visto que o valores de p-valor são maiores que 0,05.

O concreto que foi exposto à intempérie apresentou diferença significativa para todas as idades. Para o concreto submetido a imersão em solução salina, não houve diferença significativa

Pode-se concluir que a água de reuso impediu o ganho de resistência à compressão do concreto, provavelmente devido a presença de teor de açúcar superior ao limite imposto pela norma de 100mg/l.

Apesar disso, o concreto moldado com água de reuso atendeu ao requisito imposto pela norma NBR 15900-1 (ABNT, 2009) de atingir 90% da resistência à compressão aos 28 dias em comparação à amostra controle produzida com água potável, mostrando que é viável a sua utilização.

Os ataques de intempéries e de solução salina não impediram o ganho de resistência ao longo do tempo.

b) Módulo de Elasticidade

Da mesma forma, as análises dos resultados de Módulo de Elasticidade foram executadas comparando-se a influência da qualidade da água (água potável e água de reuso), inicialmente para os corpos de prova mantidos como controle na câmara úmida, seguido daqueles que foram submetidos a intempéries e à solução salina.

As médias dos resultados do Módulo de Elasticidade estão relacionados na Tabela 25. Para o ensaio de imersão em água salina, os resultados são apresentados na Tabela 26.

Tabela 25. Resultados Módulo de Elasticidade – com e sem agressividade ambiental

Idade e meio agressivo	28 dias		135 dias		135 dias Intempérie		220 dias		220 dias Intempérie	
	Potável	Reuso	Potável	Reuso	Potável	Reuso	Potável	Reuso	Potável	Reuso
Módulo de Elasticidade	38,29	39,10	42,36	39,83	38,23	36,25	43,50	43,17	39,99	35,54
Média (GPa)										
DP	2,21	1,67	2,01	0,73	3,97	3,39	3,88	1,12	2,15	4,77

Fonte: autor (2020)

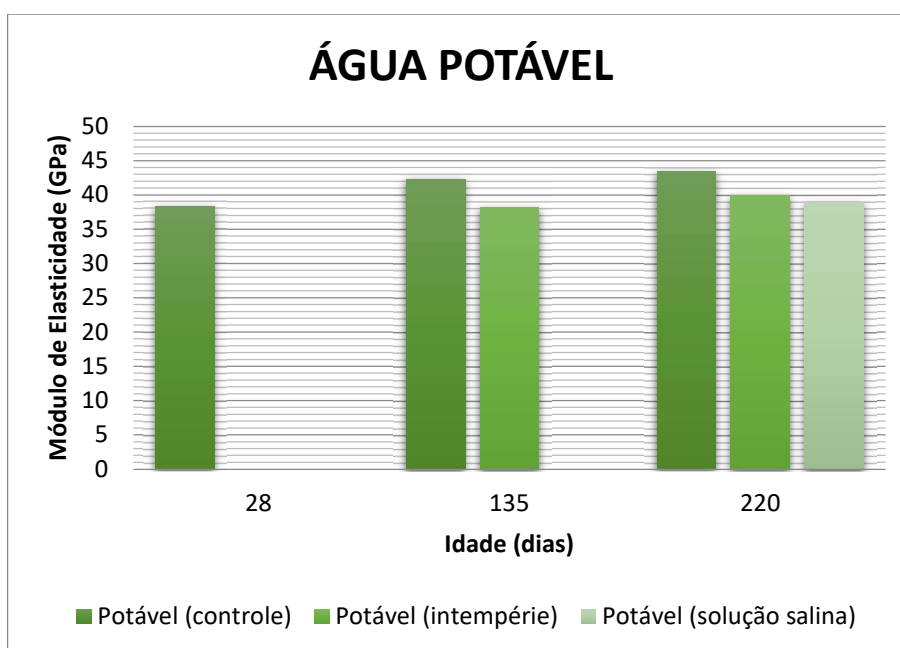
Tabela 26. Resultados Módulo de Elasticidade após ciclos de imersão em solução salina

Idade e meio agressivo	220 dias	
	8 ciclos de solução salina	
Traço	Potável	Reuso
Módulo de Elasticidade	38,98	35,49
Média (GPa)		
DP	1,77	2,65

Fonte: autor (2020)

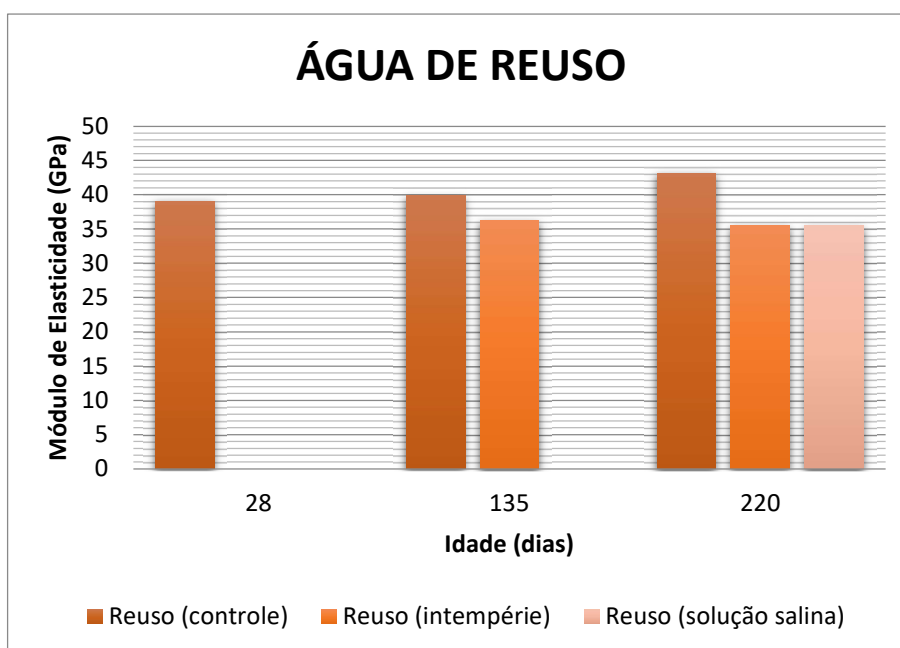
A Figura 39 apresenta os resultados médios do Módulo de Elasticidade aos 28, 135 e 220 dias com água potável, submetido a agressividade ambiental (intempérie) ou não submetido (controle) e submetido a imersão em solução salina.

Figura 39. Módulo de Elasticidade – água potável



Fonte: autor (2020)

A Figura 40 apresenta os resultados médios de Módulo de Elasticidade aos 28, 135 e 220 dias com água de reuso, submetido a agressividade ambiental (intempérie) ou não submetido (controle) e submetido a imersão em solução salina.

Figura 40. Módulo de Elasticidade – água de reuso

Fonte: autor (2020)

Os resultados do Módulo de Elasticidade foram similares quando comparados entre si. Aos 28 dias o Módulo de Elasticidade do traço controle com água de reuso é 2,10% maior que o traço com água potável.

O resultado difere de resultados encontrados por Saxena e Tembukar (2018), onde os pesquisadores encontraram uma redução de 5% do Módulo de Elasticidade, porém a revisão sobre a qualidade da água de reuso para a produção de concreto realizada por Babu, Reddy e Ramana (2016) indicou que o Módulo de Elasticidade de misturas com água de reuso são maiores que a amostra controle.

Para as demais idades o resultado do Módulo de Elasticidade do concreto moldado com água de reuso ficou entre 0,74% e 11,14% menor.

A Tabela 27 apresenta a análise de variância para o Módulo de Elasticidade.

Tabela 27. Análise de variância – Módulo de Elasticidade

Traço	p-valor
Controle – 28 dias	0,6379
Controle – 135 dias	0,1096
Controle – 220 dias	0,8935
Exposto à Intempérie – 135 dias	0,5476
Exposto à Intempérie – 220 dias	0,2144
Após imersão em solução salina – 220 dias	0,1307

Fonte: autor (2021)

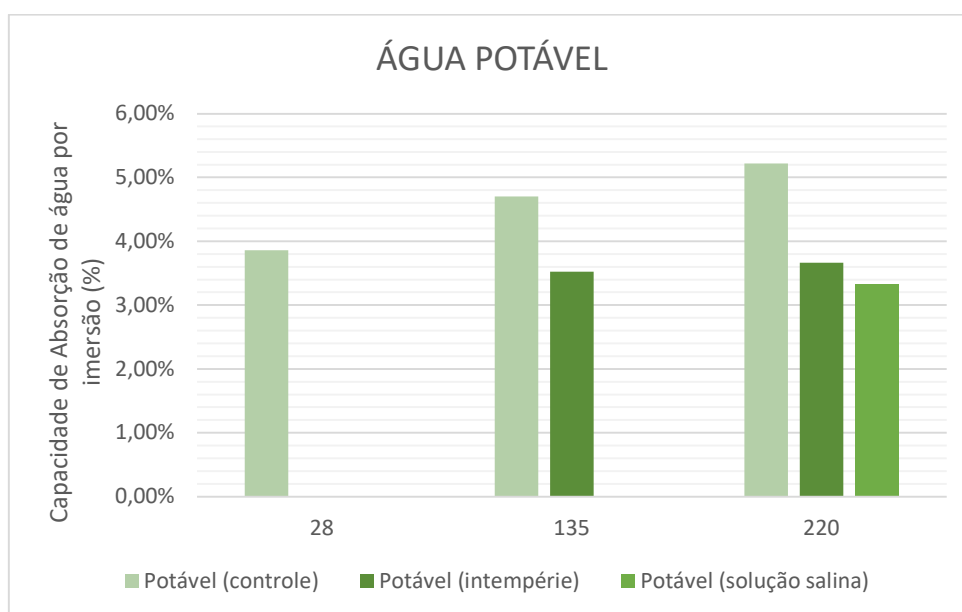
Para todas as idades e forma de agressividade não existe diferença estatisticamente significativa entre os traços com água potável e água de reuso.

6.3 Ensaios de medição indireta de durabilidade

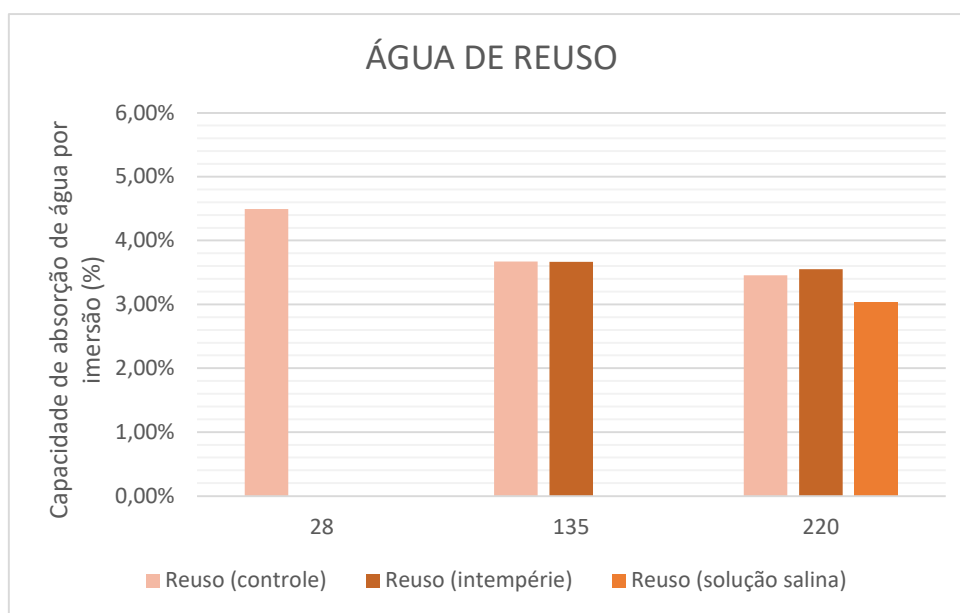
a) Capacidade de absorção de água por imersão

As Figuras 41 e 42 apresentam os resultados médios da capacidade de absorção de água por imersão aos 28, 135 e 220 dias com água potável e água de reuso, submetido a agressividade ambiental (intempérie) ou não submetido (controle) e submetido a imersão em solução salina.

Figura 41. Capacidade de absorção de água por imersão (%) – água potável



Fonte: autor (2020)

Figura 42. Capacidade de absorção de água por imersão (%) – água de reuso

Fonte: autor (2020)

Aos 28 dias a Capacidade de Absorção de água por imersão obtida para o traço controle com água potável e água de reuso foram similares, atingindo valores de 3,86% e 4,50%, respectivamente. A diferença da capacidade de imersão de água foi aumentando sendo que, aos 220 dias de idade a capacidade de absorção de água do concreto moldado com água de reuso é 33,72% menor que o concreto moldado com água potável.

De modo geral, os resultados estão em acordo com os obtidos por Ghrair *et al.* (2018), onde o concreto com água de reuso apresenta capacidade de absorção de água menor que a amostra controle com água destilada.

Os resultados de absorção de água por imersão, dos corpos de prova que foram expostos a intempérie foram bem similares aos 135 dias o concreto moldado com água potável apresentou capacidade de absorção de 3,52% e o concreto com água de reuso apresentou resultado de 3,69%.

Dos corpos de prova que foram imersos em solução salina, os moldados com água potável apresentaram capacidade de absorção de água média de 3,32% e os moldados com água de reuso, 3,03%.

Esse resultado difere do encontrado por Raza *et al.* (2020), os autores observaram uma maior capacidade de absorção de água para traços de concreto fabricados com águas residuárias de esgoto doméstico. Aos 28 e 90 dias a capacidade de absorção de água de amostras com água residuais é de 11,1% e

9,1% respectivamente, o que representa um aumento de 14,05% e 20,65% em comparação à amostra controle. Os autores observaram um aumento no número de poros e atribuem isso a quantidade de matéria orgânica residual do esgoto doméstico.

Tabela 28. Análise de variância – Capacidade de absorção por imersão

Traço	p-valor
Controle – 28 dias	0,7018
Controle – 135 dias	0,0002
Controle – 220 dias	0,0022
Exposto à Intempérie – 135 dias	0,0300
Exposto à Intempérie – 220 dias	0,3295
Após imersão em solução salina – 220 dias	0,0062

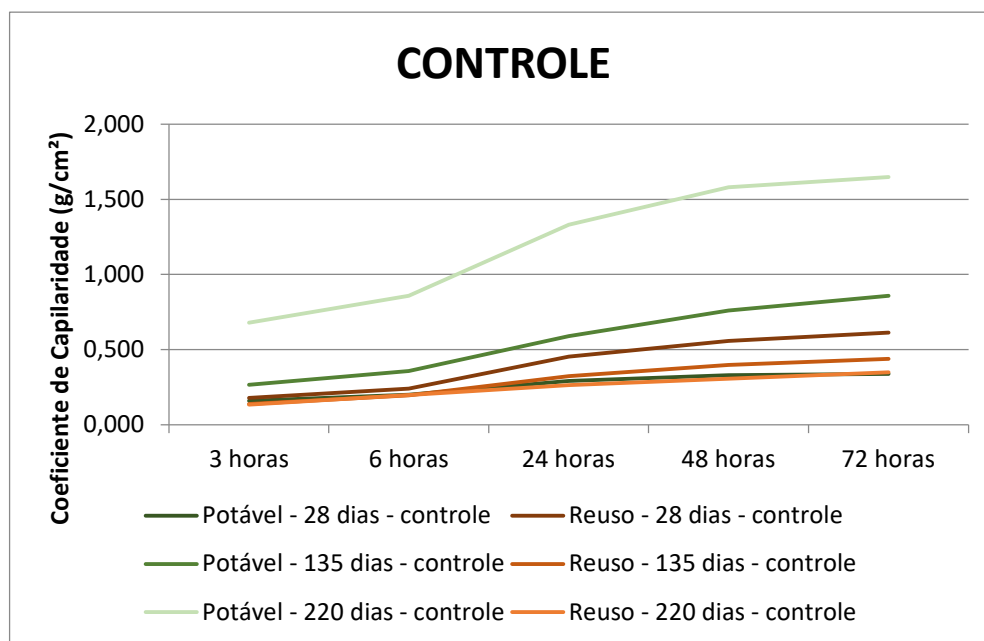
Fonte: autor (2021)

A análise de variância foi significativa para os concretos controle aos 135 e 220 dias de idade, o concreto exposto à intempérie aos 135 dias de idade e o concreto que foi imerso em solução salina.

b) Capacidade de absorção de água por capilaridade

Os resultados para a capacidade de absorção de água por capilaridade são apresentados na Figuras 43, 44 e 45.

Figura 43. Capacidade de absorção de água por capilaridade – Controle

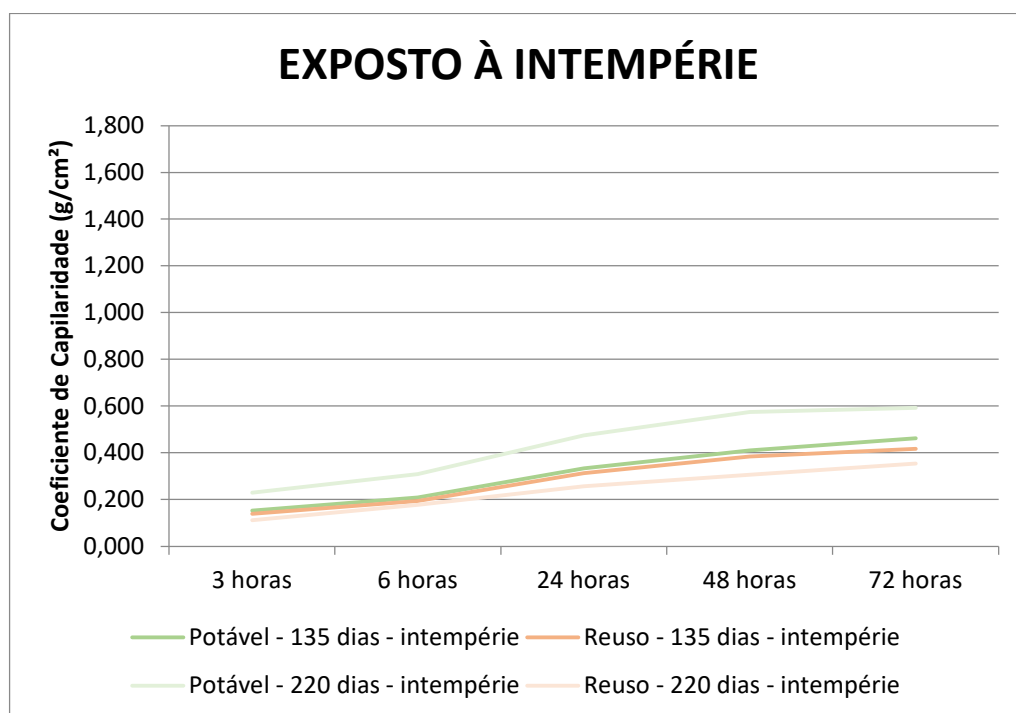


Fonte: autor (2020)

Aos 28 dias o traço do concreto produzido com água de reuso possui uma maior capacidade de absorção de água por capilaridade.

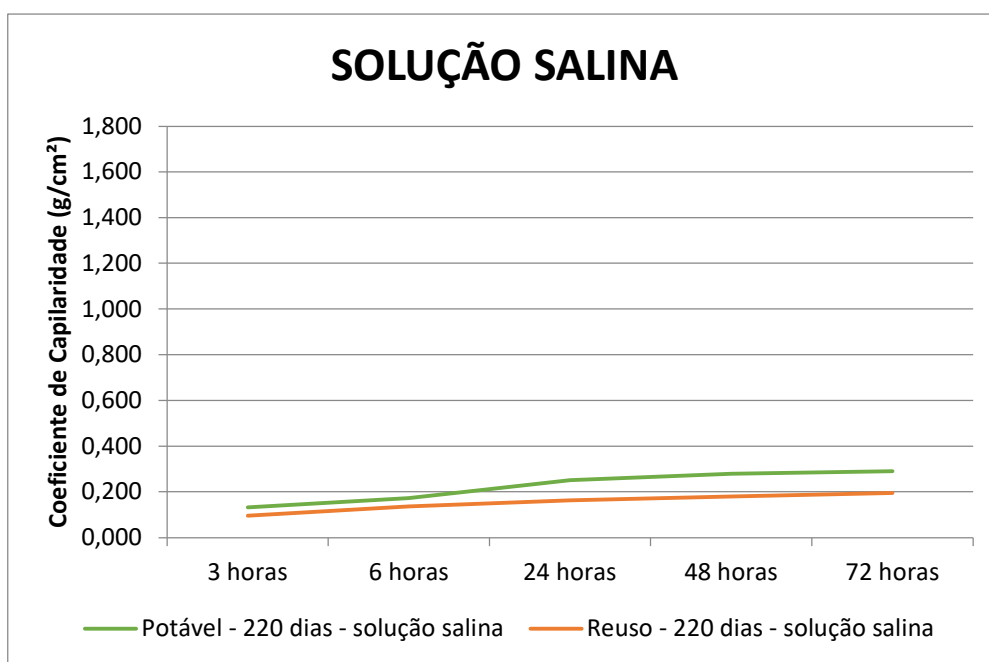
Para as demais idades o traço produzido com água de reuso possui menor capacidade de absorção de água por capilaridade. O resultado está de acordo, pois o esperado era que a capacidade de absorção de água por capilaridade fosse reduzida (BABU, REDDY; RAMANA; 2016).

Figura 44. Capacidade de absorção de água por capilaridade – Expostos à intempérie



Fonte: autor (2020)

O concreto submetido a intempérie para as idades de 135 dias, com água de reuso e potável e idade de 220 dias com água de reuso não apresentaram diferenças significativas entre si. O concreto feito com água potável aos 220 dias apresentou capacidade de absorção de água significativamente superior ao concreto produzido com água de reuso.

Figura 45. Capacidade de absorção de água por capilaridade – imersão salina

Fonte: autor (2020)

Tabela 29. Análise de variância – Capacidade de absorção por capilaridade

Traço	p-valor
Controle – 28 dias	0,0042
Controle – 135 dias	0,0159
Controle – 220 dias	0,0955
Exposto à Intempérie – 135 dias	0,2569
Exposto à Intempérie – 220 dias	0,0144
Após imersão em solução salina – 220 dias	0,0119

Fonte: autor (2021)

Não houve diferença significativa entre o concreto com água de reuso e o produzido com água potável, apenas para os concretos mantidos na câmara úmida na idade de 220 dias e para aqueles expostos à intempérie aos 135 dias.

c) Permeabilidade ao ar

A Tabela 30 apresenta os resultados obtidos para cada traço, conforme a classificação do manual do equipamento.

Tabela 30. Resultados ensaio de Permeabilidade ao ar - *Poroscope™*

	IDADE	AGRESSIVIDADE	POTÁVEL	REUSO
			Classificação	Classificação
1	28 dias	Controle	Moderado	Moderado
2	135 dias	Controle	Moderado	Moderado
3	220 dias	Controle	Moderado	Pobre
4	135 dias	Intempérie	Pobre	Pobre
5	220 dias	Intempérie	Pobre	Pobre
6	220 dias	Solução salina	Moderado	Moderado

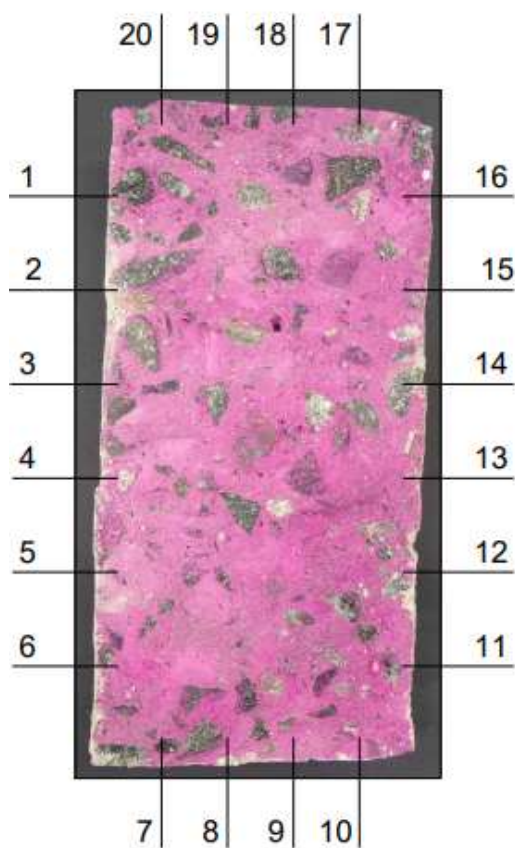
Fonte: autor (2021)

Mesmo o concreto com água potável não possui uma boa classificação quanto à permeabilidade ao ar. Tanto os traços controle moldados com água potável como os com água de reuso apresentaram classificação moderada para os 28 e 135 dias de idade, a mesma classificação ocorreu para o concreto que sofreu os ciclos de imersão salina. A diferença de classificação ocorreu entre os concretos controle aos 220 dias, quando o concreto moldado com água de reuso apresentou classificação pobre.

Todos os corpos de prova que foram expostos à intempérie apresentaram em seus resultados a classificação pobre, demonstrando que o intemperismo tem ação sobre a superfície externa do concreto.

d) Carbonatação

Utilizando o programa AutoCAD® foi calculada a espessura da carbonatação em centímetros. A Figura 46 apresenta a disposição dos 20 pontos que foram utilizados para medir a profundidade da carbonatação.

Figura 46. Carbonatação – medição

Fonte: autor (2020)

A Tabela 31 apresenta os resultados obtidos após a análise da espessura média da profundidade de carbonatação.

Tabela 31. Resultados da Carbonatação

Traço	Amostra	e (cm)	e médio (cm)
135 dias – POTÁVEL	1	0,109	0,148
	2	0,187	
135 dias – REUSO	1	0,127	0,155
	2	0,184	
220 dias – POTÁVEL	1	0,159	0,149
	2	0,138	
220 dias – REUSO	1	0,133	0,145
	2	0,157	

Fonte: autor (2020)

Analisando os resultados, nota-se que a água de reuso não provocou um grande aumento na profundidade da carbonatação dos corpos de prova.

e) Íon cloro

A profundidade da penetração de íons cloro foi determinada utilizando o programa AutoCAD®. A Figura 47 apresenta a disposição dos 20 pontos que foram utilizados para medir a profundidade da penetração dos íons cloro.

Figura 47. Penetração de íons cloro – medição



Fonte: autor (2020)

A Tabela 32 apresenta os resultados obtidos após a análise da profundidade da penetração de íons cloro.

Tabela 32. Resultados Penetração de íon cloro

Traço	Amostra	e (cm)	e médio (cm)
340 dias – POTÁVEL	1	0,123	0,113
	2	0,104	
340 dias – REUSO	1	0,112	0,089
	2	0,067	

Fonte: autor (2020)

De acordo com os dados da tabela é possível notar que a água de reuso diminuiu a profundidade da penetração de íons cloro em 21,24%.

Raza *et al.* (2020) avaliaram a penetração de íons cloro em cinco em amostras diferentes águas residuais para a mistura de concreto com relação água/cimento 0,41. A mistura controle apresentou os valores de penetração do cloreto de 1,213 cm e 0,76 cm aos 28 e 90 dias, respectivamente. A mistura com esgoto doméstico apresentou valores muito semelhantes para a penetração de cloreto.

7 CONCLUSÃO

A água de reuso atendeu a quase todos os parâmetros químicos da NBR 15900-1 (ABNT, 2009) que especifica a qualidade da água de amassamento, no entanto o ensaio para a determinação da concentração de açúcar não é normalmente executado na estação produtora de água de reuso, pois não é um parâmetro utilizado pelas estações de tratamento como parâmetro de qualidade da água produzida.

O ensaio para a determinação da concentração de açúcar, desenvolvido para as quatro amostras coletadas apresentou resultados variáveis, pois duas amostras apresentaram concentração de açúcar superior à quantidade especificada pela NBR 15900-1 (ABNT, 2009). Isso demonstra que para essa fonte de água e tratamento é necessário avaliar a concentração de açúcar para sua aplicação como água de amassamento na produção de concreto.

Apesar deste parâmetro estar acima da concentração determinada na norma, o concreto sofreu uma redução da resistência à compressão aos 28 dias de somente 8%. A Resistência à Compressão do concreto moldado com água de reuso atendeu ao requisito da NBR 15900-1 (ABNT, 2009) atingindo pelo menos 90% da resistência do concreto controle aos 28 dias de idade. Em idades mais avançadas a resistência do concreto com água de reuso não cresceu de forma significativa.

A determinação da presença de açúcares na água de reuso para a produção de concreto é um parâmetro de fundamental importância para água utilizada na produção de concreto.

O Módulo de Elasticidade não apresentou variação significativa entre o traço com água de reuso e o com água potável, com uma leve tendência de queda.

As capacidades de absorção de água por imersão e por capilaridade foram menores para o concreto moldado com água de reuso, indicando que as características do concreto relativas à sua durabilidade não foram afetadas significativamente pelo uso da água de reuso na produção do concreto.

Em relação a carbonatação não se observa diferenças significativas entre a espessura de carbonatação do concreto produzido com água de reuso e com água potável. O mesmo ocorre para a penetração de íons cloro.

Recomenda-se o aumento de ensaios para examinar o comportamento do concreto com água de reuso de diversas fontes e com diferentes tipos de cimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Quantidade de água. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua>. Acesso em: 31 maio 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Relatório Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2020. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/>. Acesso em: 05 janeiro 2021.

ALMEIDA, Rodrigo Gomes de. Aspectos legais para a água de reúso. *Vértices*, Campos dos Goytacazes, v. 2, n. 13, p.31-43, maio/ago 2011. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/42ca/e1fbb90c1be14ed725ac141b8915ac5371a4.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2020.

(ANA), Agência Nacional de Águas; (FIESP), Federação das Indústrias do Estado de São Paulo; (SINDUSCON-SP), Sindicato da Indústria da Construção do Estado de São Paulo (org.). Conservação e Reúso de água em Edificações. São Paulo: Prol Editora Gráfica, 2005. 152 p. Disponível em: <http://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/conservacao-e-reuso-de-aguas-em-edificacoes-2005/>. Acesso em: 29 mar. 2019.

ARAÚJO, M. V.; REIS, L. C.; AGUIAR, E. A. B.; Análise da interferência da carbonatação na resistência do concreto através de ensaios não destrutivos. In: CONGRESSO NACIONAL DE PATOLOGIA e ALCONPAT INTERNACIONAL - CONPAT 2019, Chiapas, México, v. 2, p. 1-13, 1 set. 2019. <http://dx.doi.org/10.21041/conpat2019/v2pat238>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 67*: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739*: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7215*: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8522*: Concreto – Determinação dos módulos elásticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017. 20 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9778*: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9779*: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13969*: Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 2017. 60 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15577-1*: Agregados – reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2018. 15 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15900-1*: Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009. 15 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15900-2*: Água para amassamento do concreto - Parte 2: Coleta de amostras de ensaio. Rio de Janeiro, 2009. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15900-3*: Água para amassamento do concreto - Parte 3: Avaliação preliminar. Rio de Janeiro, 2009. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15900-4*: Água para amassamento do concreto - Parte 4: Análise química - Determinação de zinco solúvel em água. Rio de Janeiro, 2009. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15900-5*: Água para amassamento do concreto - Parte 5: Análise química - Determinação de chumbo solúvel em água. Rio de Janeiro, 2009. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15900-6*: Água para amassamento do concreto - Parte 6: Análise química - Determinação de cloreto solúvel em água. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15900-7*: Água para amassamento do concreto - Parte 7: Análise química - Determinação de sulfato solúvel em água. Rio de Janeiro, 2009. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15900-8*: Água para amassamento do concreto - Parte 8: Análise química - Determinação de fosfato solúvel em água. Rio de Janeiro, 2009. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15900-9*: Água para amassamento do concreto - Parte 9: Análise química - Determinação de álcalis solúveis em água. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15900-10*: Água para amassamento do concreto - Parte 10: Análise química - Determinação de nitrato solúvel em água. Rio de Janeiro, 2009. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15900-11*: Água para amassamento do concreto - Parte 11: Análise química - Determinação de açúcar solúvel em água. Rio de Janeiro, 2009. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16697*: Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.

ASADOLLAHFARDI, G. *et al.* Use of treated domestic wastewater before chlorination to produce and cure concrete. *Construction and Building Materials*, [s.l.], v. 105, p.253-261, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.039>.

ASADOLLAHFARDI, Gholamreza *et al.* Dataset of producing and curing concrete using domestic treated wastewater. *Data In Brief*, [s.l.], v. 6, p.316-325, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dib.2015.12.020>.

ASTM C1602 / C1602M-18, Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

BABU, G. Reddy; RAMANA, N. Venkata. Feasibility of wastewater as mixing water in cement. *Materials Today: Proceedings*, [s.l.], v. 5, n. 1, p.1607-1614, 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.253>.

BABU, G. Reddy; REDDY, B. Madhusudana; RAMANA, N. Venkata. Quality of mixing water in cement concrete "a review". *Materials Today: Proceedings*, [s.l.], v. 5, n. 1, p.1313-1320, 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.216>.

BRASIL. Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. Brasília, 09 mar. 2006.

CAMPINAS (Município). Resolução Conjunta SVDS/SMS Nº 09/2014, de 04 de agosto de 2014. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para o reúso direto não potável de água, proveniente de estações de tratamento de esgoto (ETES) de sistemas públicos para fins de usos múltiplos no município de Campinas. Campinas, SP, 04 ago. 2014. Disponível em: <http://www.campinas.sp.gov.br/governo/meio-ambiente/resolucao-09-2014.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2020.

CAMPINAS (Município). Resolução nº 331, de 19 de dezembro de 2019. Dispõe sobre o reajuste dos valores das Tarifas de Água e Esgoto e dos Preços Públicos dos Demais Serviços a serem aplicados no Município de Campinas e dá outras providências. Resolução Ares-pcj Nº331. Campinas, SP, 19 dez. 2019. Disponível em: <http://www.sanasa.com.br/document/noticias/2803.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2020.

CAPRARO, A.P.B.; MEDEIROS, M.H.F.; Relação entre a Reação Sulfática Interna (RSI) por contaminação do agregado com minerais sulfetados e a corrosão de armaduras. Conpat 2019, Chiapas, México, v. 2, p. 1-10, 1 set. 2019. ALCONPAT INTERNACIONAL. <https://doi.org/10.21041/CONPAT2019/V2PAT97>.

CASCUDO, Oswaldo; CASAREK, Helena. Ações de Carbonatação no Concreto. In: ISAIA, Geraldo C. (ed.). *Concreto: ciência e tecnologia*. Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 24. p. 849-886.

CUNHA, Rodrigo José Gonçalves da. *Aprimoramento em sistema de ETE/EPAR com foco em melhoria da qualidade da água de reúso: Estudo de caso*. 2020. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação Strictu Sensu em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2020.

EUROPEAN STANDARD. *EN 1008: Mixing water for concrete*. Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete. London, 2002. 22 p.

FALLAS, Génesis Guevara; MADRIGAL, Carolina Hidalgo; GARCÍA, Mariannys Pizarro; VALENCIANO, Iván Rodríguez; VEGA, Luis Diego Rojas; GUZMÁN, Georgana Segura. Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. *Revista Tecnología En Marcha*, [s.l.], v. 25, n. 2, p.80-86, 21 ago. 2012. Instituto Tecnológico de Costa Rica. <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v25i2.1632>.

FELIX, E. F. *et al.* Análise da vida útil de serviço de estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão: uma abordagem mecânico-probabilística. *Memorias Conpat 2019*, Chiapas, México, v. 2, n. 00, p. 1-13, 1 set. 2019. ALCONPAT INTERNACIONAL. <http://dx.doi.org/10.21041/conpat2019/v2pat21>.

FERREIRA, Rui Miguel. *Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto*. 2000. 246 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia do Minho, Guimarães, 2000.

FIGUEIREDO, C. P. *et al.* O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos. *Rev. IBRACON Estrut. Mater. [online]*. 2014, vol.7, n.4, pp.685-708. ISSN 1983-4195. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952014000400008>.

FIGUEIREDO, Enio Pazini. Ações dos Cloretos no Concreto. In: ISAIA, Geraldo C. (ed.). *Concreto: ciência e tecnologia*. Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 25. p. 887-902.

FIGUEIREDO, Enio J. Pazini; MEIRA, Gibson Rocha. Corrosão das Armaduras das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, Geraldo C. (ed.). *Concreto: ciência e tecnologia*. Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 26. p. 903-932.

GUIMARÃES, Jaqueline Passamani Zubelli. *Estudo experimental das propriedades do concreto de alto desempenho*. 2002. 121 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Puc-rio, Rio de Janeiro, 2002. Cap. 3. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=3937@1>. Acesso em: 13 maio 2020.

GHRAIR, Ayoup M. *et al.* Influence of grey water on physical and mechanical properties of mortar and concrete mixes. *Ain Shams Engineering Journal*, [s.l.], v. 9, n. 4, p.1519-1525, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2016.11.005>.

HELENE, Paulo R. L. Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto. *Ambiente Construído*, São Paulo, v. 1, n. 2, p.45-57, jul. 1997. Disponível em: <https://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/3355>. Acesso em: 13 mar. 2020.

HELENE, Paulo. A Nova NB 1/2003 (NBR 6118) e a Vida Útil das estruturas de Concreto, Leme, II SEMINÁRIO DE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES DO LEME/UFRGS 1, 1/30-30/30, 2004.

HESPANHOL, Ivanildo. Potencial de Reuso de Água no Brasil Agricultura, Industria, Municípios, Recarga de Aquíferos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, [s.l.], v. 7, n. 4, p.75-95, 2002. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v7n4.p75-95>.

HESPANHOL, Ivanildo. Um novo paradigma para a gestão de recursos hídricos. *Estud. av. [online]*. 2008, vol.22, n.63, pp.131-158. ISSN 0103-4014. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200009>.

IKEMATSU, Paula; LAGUNA, Luis Antonio. A influência da sacarose no tempo de pega do cimento. *Intercement*, São Paulo, 2017.

ISAIA, Geraldo C. (ed.). *Concreto: ciência e tecnologia*. São Paulo: Ibracon, 2011. 931 p.

ISMAIL, Zainab Z.; AL-HASHMI, Enas A.. Assessing the recycling potential of industrial wastewater to replace fresh water in concrete mixes: application of polyvinyl acetate resin wastewater. *Journal Of Cleaner Production*, [s.l.], v. 19, n. 2-3, p.197-203, jan. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.09.011>.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. 12.439: Mixing water for concrete. Genebra, 2010. 14 p.

JAMES INSTRUMENTS. C-P-600, C-P-6050 Poroscope: Poroscope Operator's Manual. Chicago, IL-USA, 2012. 29 p.

JAMES INSTRUMENT. POROSCOPE™ DETERMINES AIR AND WATER PERMEABILITY IN CONCRETE BOTH AT AND BELOW THE SURFACE. Disponível em: https://www.ndtjames.com/Poroscope_p/c-p.htm. Acesso em: 07 jan. 2021.

JUENGER, M. C. G.; JENNINGS, H. M. New insights into the effects of sugar on the hydration and microstructure of cement pastes. *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 393-399.

LAPA, José Silva. *Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto*. 2008. 56 f. Monografia (Especialização) - Curso de Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

LIMA, Maryangela Geimba de. Ações do Meio Ambiente sobre as Estruturas de Concreto. In: ISAIA, Geraldo C. (ed.). *Concreto: ciência e tecnologia*. Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 21. p. 733-772.

MARQUES, Cristian Teixeira; GOMES, Bárbara Maria Fritzen; BRANDLI, Luciana Londero. Consumo de água e energia em canteiros de obra: um estudo de caso do diagnóstico a ações visando à sustentabilidade. *Ambiente Construído*, [S.L.], v. 17, n. 4, p. 79-90, dez. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000400186>.

MATOS, Paulo Ricardo de *et al.* Use of recycled water from mixer truck wash in concrete: effect on the hydration, fresh and hardened properties. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 230, p. 1-12, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116981>.

MCCORMACK, Michael; TRELOAR, Graham J.; PALMOWSKI, Laurence; CRAWFORD, Robert. Modelling direct and indirect water requirements of construction. *Building Research & Information*, [s.l.], v. 35, n. 2, p. 156-162, 20 mar. 2007. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/09613210601125383>.

MEDEIROS, A. *et al.* ESTUDO DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS EXPOSTOS POR DOIS ANOS EM AMBIENTE MARINHO. *Conpat 2019*, Chiapas, México, p. 1-9, 11 set. 2019. ALCONPAT INTERNACIONAL. <http://dx.doi.org/10.21041/conpat2019/v2pat140>.

MEENA, Khushboo; LUHAR, Salmabanu. Effect of wastewater on properties of concrete. *Journal Of Building Engineering*, [s.l.], v. 21, p.106-112, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.10.003>.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2. ed. São Paulo, IBRACON, 2014. 751.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Governo Federal. Manual de Educação para Consumo Sustentável. Brasília: Edit, 2005. 160 p. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/educamb/arquivos/consumo_sustentavel.pdf. Acesso em: 31 maio 2019.

MOURA, Priscila Gonçalves *et al.* Água de reuso: uma alternativa sustentável para o Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, [S.L.], v. 25, n. 6, p. 791-808, dez. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-4152202020180201>.

NORUZMAN, Ainul Haezah *et al.* Characteristics of treated effluents and their potential applications for producing concrete. *Journal of Environmental Management*, [s.l.], v. 110, p.27-32, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.019>.

OLIVEIRA, Sílvia Maria Alves Corrêa. *Análise de desempenho e confiabilidade de estações de tratamento de esgotos*. 2006. 232 f. Tese (Doutorado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

OLIVEIRA, Sonia Valle Walter Borges de. *Modelo para tomada de decisão na escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário*. 2004. 197 f. Tese (Doutorado) - Curso de Administração, Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PAES, Rafael; SILVA, Gabrielly; PRIANTE, Josita; LIMA, Eliana; NICOLAU FILHO. Aplicação de Tecnologias de Conservação do Uso da Água Através do Reuso - Estudo de Caso Cuiabá, MT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, [S.L.], v. 15, n. 3, p. 97-107, 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v15n3.p97-107>.

PESSARELLO, Regiane Grigoli. *Estudo exploratório quanto ao consumo de água na produção de obras de edifícios: avaliação e fatores influenciadores*. 2008. 114 f. Monografia (Especialização) - Curso de Tecnologia e Gestão da Produção de Edifícios, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.poli-integra.poli.usp.br/library/pdfs/7f3c9143404e82ba87639255e32062e6.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2020.

PIMENTEL, Lia Lorena. *Telhas onduladas à base de Cimento Portland e resíduos de Pinus Caribaea*. 2000. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

PIVELI, Roque Passos. Curso: "Qualidade das águas e poluição: aspectos físico - Químicos": características físicas das águas: cor, turbidez, sólidos, temperatura, sabor e odor. Aula 5. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 26 p. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/leb/disciplinas/Fernando/leb360/Fasciculo%205%20-%20Caracteristicas%20Fisicas%20das%20Águas.pdf>. Acesso em: 06 jan. 2021.

RAZA, Ali *et al.* Performance evaluation of concrete developed using various types of wastewater: a step towards sustainability. *Construction and Building Materials*, [S.L.], v. 262, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120608>.

RIZZO, Giovanna Falzeta. *Durabilidade de concretos com agregados reciclados*. 2018. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2018.

RODRIGUES, Raque dos Santos. *As dimensões legais e institucionais do reuso de água no Brasil: proposta de regulamentação do reuso no Brasil*. 2005. 192 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SANASA. SOCIEDADE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E SANEAMENTO S/A. 10ª Edição prêmio FIESP de conservação e reúso de água. Campinas, p.1-19, mar. 2015.

SANTOS, Hilton Felício dos; MANCUSO, Pedro Caetano Sanches. Reuso de água. Barueri, SP: Manole, 2007. xvii, 579 p. (Ambiental). ISBN 8520414508.

SAXENA, Shekhar; TEMBHURKAR, A.r.. Impact of use of steel slag as coarse aggregate and wastewater on fresh and hardened properties of concrete. *Construction and Building Materials*, [s.l.], v. 165, p.126-137, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.030>.

SENTONE, Daniel Tourinho. *Desenvolvimento de método para medida de permeabilidade superficial de revestimentos de argamassa*. 2011. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SILVA, Turibio J. da. Mecanismos de Transporte de Massa no Concreto. In: ISAIA, Geraldo C. (ed.). *Concreto: ciência e tecnologia*. Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 22. p. 809-848

SINDUSCON; CAIXA. PNUD. Guia Metodológico de Cálculo de Pegada Hídrica para edificações. Brasil, 2019. 147 p. Disponível em: <https://sindusconsp.com.br/biblioteca/guia-metodologico-de-calculo-de-pegada-hidrica-para-edificacoes/>. Acesso em: 05 jan. 2021.

TELLES, Dirceu D'alkimin; COSTA, Regina Pacca (comp.). Reuso da água: conceitos, teorias e práticas Coordenadores Dirceu Alkmin Telles, Regina Pacca Costa. 2ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010. 408 p.

UNESCO. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2020: água e mudança climática. Itália: Programa Mundial da Unesco Para Avaliação dos Recursos Hídricos, 2020. 12 p. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372882_por?fbclid=IwAR0yBI24uVUHZp5Gm4pLws8vYjRmdq4AX282A-aUfcpyXtYjC8olwrON4JA. Acesso em: 06 jan. 2021.

VARELA, Marcio. Apostila de materiais de construção: Curso técnico em edificações. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. 96 p. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/valtencirgomes/disciplinas/materiais-de-construcao/apostila-de-materiais-de-construcao>. Acesso em: 06 jan. 2021.

VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos, 4ª edição revisada. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.