

Estudo de caso: uso de água recuperada na construção civil

Case study: use of reclaimed water in civil construction

• **Data de entrada:**
14/12/2017

• **Data de aprovação:**
13/03/2018

André Schramm Brandão*/ Antônio Eduardo Bezerra Cabral/ Ênio Pontes de Deus/
Wanner Kelly Damasceno da Silva/ Wyoskynária Mihaly Maia da Silva.

DOI: 10.4322/dae.2019.021

Resumo

Tendo em vista o elevado crescimento populacional e a escassez dos recursos hídricos na região nordeste do Brasil, o uso da água para fins diferentes do consumo humano vem sendo avaliado. Com a finalidade de prover um destino sustentável às águas oriundas do processo de tratamento de esgoto, este trabalho averigua a aplicabilidade da água recuperada, coletada na saída do tratamento terciário da estação Guadalajara, como água de amassamento na construção civil. Observou-se total conformidade na análise da água em estudo com a norma NBR 15.900. Foram produzidos corpos de prova cilíndricos de concreto, sendo executados ensaio de resistência à compressão axial aos 3, 7, 28 e 91 dias, bem como ensaios de índice de vazios, absorção e massa específica. Através do teste estatístico ANOVA, observou-se que não há diferença significativa nos valores apresentados nos ensaios realizados.

Palavras-chave: Sustentabilidade hídrica. Água recuperada. Concreto. Construção civil.

Abstract

Given the high population growth and scarcity of water resources in the Northeast region (Brazil), the use of water for purposes other than human consumption is being evaluated. With the purpose of providing a sustainable destination to the waters coming from the sewage treatment process, this work investigates the applicability of the recovered water, collected at the exit of the tertiary treatment of the Guadalajara station, as kneading water in the civil construction. Full compliance was observed in the analysis of the water under study with the norm NBR 15.900. Cylindrical specimens of concrete were produced, and tests of resistance to axial compression were performed at 3, 7, 28 and 91 days, as well as tests of voids index, absorption and specific mass. Through the ANOVA statistical test, it was observed that there was no significant difference in the values presented in the tests performed.

Keywords: Water sustainability. Reclaimed water. Concrete. Civil construction.

André Schramm Brandão – Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade Federal do Ceará. Engenheiro Pleno da Companhia de Água e Esgoto do Ceará, atualmente atua como Gerente de Obras do Interior do Estado cearense.

Antônio Eduardo Bezerra Cabral – Professor Doutor Associado do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará. Atua nas áreas de tecnologia do concreto e na gestão de resíduos sólidos da construção civil.

Ênio Pontes de Deus – Professor Doutor Associado IV do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará. É vice coordenador do curso de graduação e atua no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Wanner Kelly Damasceno da Silva – Graduanda em Engenharia Civil na Universidade Federal do Ceará. Estagiária da Gerência de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação Tecnológica da Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará em 2016.

Wyoskynária Mihaly Maia da Silva – Graduanda em Engenharia Civil na Universidade Federal do Ceará. Técnica em Edificações formada pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte.

***Endereço para correspondência:** Universidade Federal de Ceará, Campus Universitário do Pici – Bloco 729, Engenharia e Ciência dos Materiais, CEP 60440-554 – Fortaleza-CE.

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial à vida, um elemento vital como componente bioquímico dos seres vivos ou habitat natural de várias espécies, além de possuir valor econômico e social, sendo importante fator para o desenvolvimento de diversas atividades.

Este recurso, porém, não é distribuído de maneira uniforme para a população do planeta. Pelo menos 8% da reserva mundial de água doce estão no Brasil. Apesar da grande quantidade disponível trazer um aparente conforto, os recursos hídricos são mal distribuídos temporal e espacialmente, sendo que 80% concentram-se na Região Amazônica e somente 20% encontram-se distribuídos nas regiões onde vivem 95% da população brasileira (MANCUSO e SANTOS, 2003).

A região Nordeste do Brasil sofre com escassez hídrica constante. Segundo dados da Agência Nacional de Águas de 2017, os reduzidos valores de disponibilidade hídrica para a região se devem aos baixos índices pluviométricos e irregularidade no regime de chuvas, além de a região apresentar temperaturas elevadas o ano todo, forte insolação e altas taxas de evapotranspiração.

Em paralelo, de acordo com MEYER (2004), a indústria do concreto consome cerca de 3,79 trilhões de litros de água por ano em todo o mundo, não incluindo as águas de lavagem dos equipamentos de produção e de cura.

A água é utilizada em quatro etapas do processo de produção das estruturas de concreto, que são: para lavar os agregados, para o amassamento do concreto, para limpar equipamentos, tais como as betoneiras, e para a cura da estrutura, tendo para cada uma destas utilizações requisitos em comum, mas não idênticos (NEVILLE, 2000).

Segundo HANNAD et al (2013), para cada litro de água utilizada para produção de concreto e ma-

teriais similares, como argamassas, é necessário cerca de 2,5 vezes mais litros de água para realizar atividades secundárias ligadas à produção, como lavagem dos equipamentos e cura.

No cenário persistente de escassez hídrica em que o Nordeste brasileiro perdeu 49 trilhões de litros de água por ano no período de 2012 a 2015, segundo GENTIRANA (2016), e de alto índice de exploração de água, onde a demanda sobrepõe a oferta, tem-se um ambiente propício para avaliar a substituição da água bruta na construção civil por tipos alternativos de água, desta forma realizou-se o estudo de caso com a aplicação de água de reúso proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Guadalajara em Caucaia/CE sob controle da Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará (CAGECE).

Segundo HESPANHOL (2003), a construção civil figura como um dos usos industriais onde o reúso da água pode ser viabilizado, inclusive para as atividades relacionadas à produção e cura de concreto e compactação de solos. De acordo com SILVA e NAIK (2010), são necessárias mais pesquisas sobre o uso de água recuperada na indústria do concreto. Como reflexo do mencionado, no Brasil existem poucos trabalhos publicados para substituição da água de amassamento na construção civil.

Assim, o presente artigo tem por finalidade avaliar a viabilidade técnica da substituição da água bruta por águas da indústria de saneamento, especificamente água recuperada (reúso) oriunda do processo de tratamento terciário de esgoto. Avaliando-se o ponto de vista técnico, atendendo parâmetros preconizados pela norma NBR 15.900 – Água para amassamento do concreto. Assim, após análises à luz da referida norma técnica, utilizou-se a água em estudo para a reforma e melhoria das infraestruturas da ETE Guadalajara.

2 MATERIAIS E METODOLOGIA

2.1 Água de reúso utilizada no amassamento do concreto

A água utilizada no estudo em questão é proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Guadalajara, composta por um tratamento preliminar formado por gradeamento, caixa de areia e calha Parshall e por lagoas de estabilização, sendo uma anaeróbia, uma facultativa e três de maturação, com processo oxidativo avançado, sendo o corpo receptor o Rio Tabapuá. A ETE mencionada conta também com uma Estação de Tratamento de Reúso compacta, que utiliza filtros de areia e de carvão ativado; a água oriunda desse tratamento terciário é armazenada em um tanque para água de reúso.

No processo de tratamento, após as lagoas de estabilização, o efluente passa por chicanas, evitando os problemas causados pelas vibrações, havendo posterior pré-cloração. Em seguida, é adicionado o coagulante policloreto de alumínio (PAC), que condiciona o efluente do ponto de vista físico-químico. O PAC é amplamente utilizado no tratamento de

efluentes industriais, contendo em sua estrutura valores do ingrediente ativo entre 10 e 25% de Al₂O₃. Tem como principal vantagem a capacidade de gerar flocos em uma grande faixa de pH, contando com uma eficiência superior à dos sais de alumínio na remoção de sólidos e gerando um menor volume de lodo (FONSECA, 2011).

O efluente é direcionado para filtros de areia e para uma central de ozonização, sendo realizada a desinfecção do efluente através de método oxidativo avançado de tratamento de água (Ozônio/UV), que busca a efetiva oxidação e destruição de poluentes orgânicos, agentes patogênicos dentre outros contaminantes presentes em águas de reúso (VARGAS, 2008).

Posteriormente, este ozônio é removido em uma central de ultravioleta e a água em tratamento prossegue por dois filtros de carvão ativado e por nova pré-cloração, antes de ser armazenada em reservatórios com capacidade de 16 mil litros.

A **Figura 1** abaixo apresenta a estação de tratamento de esgoto Guadalajara.

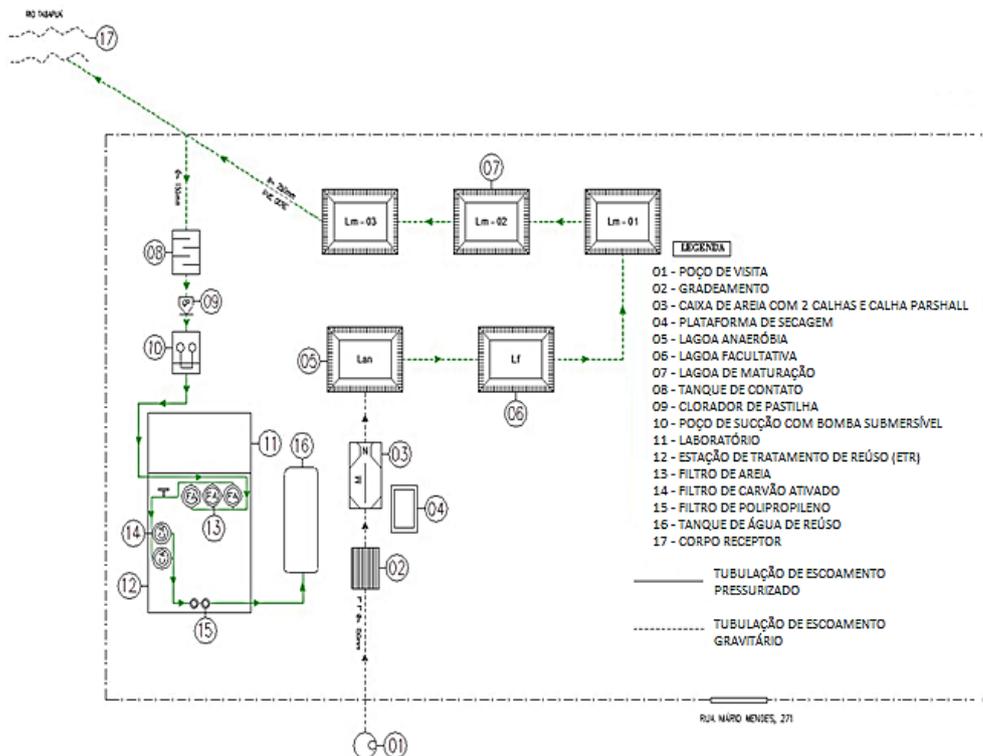


Figura 1 – Descrição do Sistema de Tratamento de Esgoto da Estação Guadalajara

O Brasil carece de legislação específica acerca do reúso da água, MANCUSO e SANTOS (2003) afirmam que “até o momento, as avaliações legais relativas a essa prática, tem sido baseadas em legislações de outros países, principalmente, nos critérios de qualidade para reúso de água da Organização Mundial de Saúde (OMS), entendida como referência mundial, em que pese a necessidade de considerações de carácter regional e de outras naturezas”.

CAIXETA (2010) diz que não existe uma política estabelecida para a prática do reúso no país, mesmo que já sejam presentes iniciativas para o reúso não potável da água e fundamentação legal e jurídica através da Política Nacional de Recursos Hídricos e da Resolução 357/2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente. Ainda, CAIXETA (2010) afirma que “é preciso se definir uma política de reúso, estabelecendo critérios para sua implementação em nível federal (...), além da necessidade de desenvolver uma base legal específica”. Uma iniciativa dessa natureza foi a publicação, em novembro de 2005, da Resolução nº 54 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, que estabelece modalidades, definições e diretrizes gerais para o reúso não potável da água.

2.2 Produção dos corpos de prova

Foram produzidos corpos de prova cilíndricos (10x20cm) de concreto utilizando as seguintes águas para fins de verificação da adequabilidade destas variáveis para uso como água de amassamento.

1. Água destilada: sendo esta a água de referência para os resultados obtidos, conforme estabelecido pela norma brasileira NBR 15.900;

2. Água recuperada (água de reúso): originada do tratamento terciário de esgoto proveniente da ETE Guadalajara, situada em Caucaia/CE, cujo

processo de tratamento segue conforme explicado na seção anterior.

As águas mencionadas acima foram analisadas em seu aspecto físico-químico segundo as prescrições da NBR 15.900 no Laboratório de Saneamento (LABOSAN) da Universidade Federal do Ceará (UFC), sendo, também, realizados ensaios no Laboratório Central da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) para maior controle dos dados obtidos.

Foram avaliados os seguintes parâmetros físico-químicos das águas: óleos e gorduras, detergentes, cor, material sólido, odor, pH, matéria orgânica, cloretos, sulfatos, álcalis, açúcares, fosfatos, nitratos, chumbo e zinco, conforme a referida norma.

A fim de avaliar possíveis modificações nos tempos de início e fim de pega das pastas (águas em estudo com cimento), a NBR 15.900 também exige que tais pastas sejam ensaiadas. Foram realizados ensaios de consistência normal da pasta e início e fim de pega. Esses ensaios foram executados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFC para as duas águas de amassamento, tendo como valores de referência os obtidos para a água destilada, conforme as normas MERCOSUL NBR NM 43:2002 e NBR NM 65:2002.

Realizou-se, também, uma dosagem experimental de concreto com resistência característica (f_{ck}) de 20 MPa, segundo o método proposto pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), e abatimento (*Slump Test*) de 100 ± 20 mm pelo método tronco de cone. O traço obtido está apresentado na **Tabela 1**.

Tabela 1 – Traço de concreto dosado

	Cimento	Areia	Brita	Água
Traço unitário	1	1,85	2,02	0,56
Consumo de materiais por m ³ de concreto (kg)	420	777	848	235

2.3 Produção dos corpos de prova

Os corpos de prova para as águas de amassamento (destilada e de reúso) foram produzidos utilizando Cimento Portland tipo composto com pozolana de clas-

se 32 MPa (CP II Z 32, fabricante POTY). Nas **Tabelas 2 e 3** têm-se as exigências químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado segundo relatório técnico fornecido pelo fabricante, onde foram comparados tais valores aos normalizados na NBR 11.578:1997.

Tabela 2 – Exigências químicas do aglomerante CP II Z 32

	Resíduos insolúveis (%)	Perda ao fogo (%)	Óxido de magnésio (%)	Trióxido sulfúrico (%)	Dióxido de carbono (%)
Valores normalizados	≤ 16	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4	≤ 5
Valores experimentais	11,82	5,62	2,57	3,59	-

Tabela 3 – Exigências físicas e mecânicas do aglomerante CP II Z 32

	Finura		Tempo de pega		Expansibilidade		Resistência à compressão (MPa)			
	R.P. (%)	Área esp. (m ² /kg)	Início (h)	Fim (h)	A frio (mm)	A quente (mm)	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Valores normalizados	≤ 12	≥ 260	≥ 1	≤ 10	≤ 5	≤ 5	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32
Valores experimentais	1,33	491,1	2,47	3,47	-	0,39	-	25,46	29,67	35,30

Legenda: R.P.: Resíduos nas peneiras 75 mm e Área esp.: Área específica.

Para a execução dos corpos de prova de concreto foi utilizado agregado miúdo caracterizado segundo as exigências das normas MERCOSUL NBR NM 248:2003 e NBR NM 52:2009, as quais determinam a composição granulométrica do material e de sua massa específica, respectivamente. As normas NBR NM 53:2003 e NBR NM 45:2006 determinam, consecutivamente, as massas específica e unitária do agregado graúdo, que também foi caracterizado em sua granulometria segundo a NBR NM 248:2003.

2.4 Método de pesquisa

No concreto fresco, foram realizados ensaios de abatimento do tronco de cone, visando avaliar a trabalhabilidade do concreto no estado plástico.

Com a finalidade de averiguar a influência do tipo de água de amassamento nas propriedades do concreto, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, conforme pres-

creve a NBR 5738:2016, executados com as duas águas de amassamento em estudo.

Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram colocados em cura úmida até as idades de 3, 7, 28 e 91 dias, tendo em vista o ensaio de resistência à compressão axial e os demais ensaios. O ensaio de resistência à compressão axial foi executado de acordo com as diretrizes da norma NBR 5739:2007. Os corpos de prova foram capeados com argamassa de enxofre, de modo a corrigir irregularidades de planície na seção transversal sem interferir nos resultados do ensaio.

Conforme preconiza a norma NBR 9778:2009, foram ainda executados os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica aos 28 dias.

Após análises laboratoriais, foi realizada a obra de construção de mureta do entorno da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Guadalajara. Devido a inconvenientes que surgiram com o funcionamento da estação, tais como a entrada de sacos plásticos e outros materiais nas lagoas, a presença de estacas

danificadas e ausência de fiadas de arame, comprometeu-se o funcionamento do sistema, além de permitir o acesso de pessoas não autorizadas ao interior da estação.

A água de reúso analisada neste artigo foi utilizada nos processos de construção de alvenaria com argamassa, alvenaria de embasamento, chapisco, reboco e caiação. Na **Tabela 4** apresentam-se os traços utilizados na execução dos serviços supracitados.

Tabela 4 – Traços utilizados para os serviços determinados.

Serviço	Traço
Construção de alvenaria com argamassa	1:2:8
Alvenaria de Embasamento	1:4
Chapisco	1:3
Reboco	1:3
Caiação	5 kg / 15 litros água de reúso

2.5 Análise dos dados

Foi realizada a Análise estatística de Variância (ANOVA) para os resultados obtidos, a fim de verificar possíveis diferenças significativas através da comparação múltipla de médias, por meio do teste de Duncan (MONTGOMERY, 1997). De modo complementar, foi realizada uma comparação dos valores calculados e os tabelados por meio do teste de Fisher, com o objetivo de avaliar a significância dos resultados obtidos e a influência da variável *tipo de água de amassamento*.

3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Ensaio físico-químico das águas de amassamento

Segundo a norma NBR 15.900, a água destilada é utilizada como referência para estudo comparativo. Todavia, mediu-se o pH da água destilada utilizada, obtendo-se o valor de 6,5, sendo esta ligeiramente ácida. Para a água recuperada,

obteve-se pH igual a 8,13, atendendo ao limite estabelecido por norma. A Tabela 5, a seguir, apresenta os valores para os demais parâmetros analisados, bem como os limites de tolerância estabelecidos pela NBR 15.900.

Visando comparar os dados obtidos e os parâmetros atribuídos pela norma brasileira, também são apresentados teores limites segundo a norma europeia BS EN 1008:2002, publicada pelo British Standards Institution (BSI). Se a água em estudo não satisfizer às exigências da norma BS EN 1008:2002, ela só pode ser usada como água de mistura, nas quantidades que garantam que os limites das exigências sejam obedecidos (BSI, 2002).

Observou-se que a água em estudo atende a todos os parâmetros físico-químicos exigidos pela norma NBR 15.900 e pela norma BS EN 1.008. No entanto, a primeira necessita de uma atualização, pois a portaria do Ministério da Saúde que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade não é mais MS 518/2004, e sim a portaria 2.914/2011.

Conforme a tabela 5, a seguir, os valores de sulfatos foram inferiores ao limite de tolerância prescrito pela norma. A análise do teor de sulfatos solúveis presentes na água de amassamento é de fundamental importância, pois quando em excesso resulta na formação de sulfoaluminato de cálcio, ou etringita, sendo normalmente acompanhada por um aumento de volume considerável, iniciando a expansão do concreto, comprometendo assim sua durabilidade através do surgimento de fissuras. (YILMAZ et al. 1997; DHIR e NEWLANDA, 1992; SU et al., 2002)

EL-NAWAWY e AHMAD (1991) sugerem que a concentração máxima de sólidos totais não seja superior a 3.788 mg/L visto que podem afetar negativamente a resistência do concreto, sendo observada quantidade de material sólido inferior aos limites aceitáveis para a água avaliada segundo normas.

Tabela 5 – Resultados da análise físico-química das águas avaliadas.

Parâmetro	Água recuperada	Limite de tolerância (NBR 15.900)	Limite de tolerância (EN 1.008)
Óleos e gorduras	Ausência	Não mais do que traços visíveis	Apenas traços (quantidades quase imperceptíveis)
Detergentes	Ausência	Qualquer espuma deve desaparecer em 2 min	A espuma deve desaparecer no máximo em 2 minutos
Cor	Amarelo claro	A cor deve ser comparada qualitativamente com água potável devendo ser: amarelo-claro a incolor	Sem cor, até um amarelo-claro
Material sólido	1.786	< 50.000	≤ 1% do total de agregado
Odor	Inodoro	Deve ser inodora e sem odor de sulfeto de hidrogênio, após adição de ácido clorídrico	Apenas odor de água potável de beber e leve odor de cimento ou de odor de enxofre no caso de Cinzas Volantes (Fly-ash) na água.
pH	8,13	Entre 6 e 9	≥ 4,0
Matéria orgânica	Mais claro	A cor da água deve ser mais clara ou igual à da solução-padrão, após a adição de NaOH	N.A.
Cloretos (mg/L)	28,08	Concreto protendido < 500; Concreto armado < 1.000; Concreto simples (sem armadura) < 500	≤ 4.500
Sulfatos (mg/L)	52,04	< 2.000	≤ 2.000
Álcalis (mg/L)	28,70	< 1.500	< 1.500
Açúcares (mg/L)	< L.D	< 100	< 100
Fosfatos (mg/L)	0,25	< 100	< 100
Nitratos (mg/L)	0,73	< 500	< 500
Chumbo (mg/L)	< L.D	< 100	< 100
Zinco (mg/L)	0,13	< 100	< 100

Legenda: L.D – Limite de detecção (para o zinco = 0,1203 mg/L; chumbo = 0,1339 mg/L; açúcares = 10 mg/L). N.A – não aplicada à norma.

3.2 Caracterização dos agregados

Através dos ensaios de granulometria e massa específica, foram obtidas as **Tabelas 6 e 7** que apresentam os valores para a caracterização dos agregados miúdo e graúdo, respectivamente.

Tabela 6 – Características do agregado miúdo utilizado.

Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)	Módulo de finura	DMC (mm)
2,57	1,51	2,60	4,80

Legenda: DMC: Dimensão máxima característica.

Tabela 7 – Características do agregado graúdo.

Massa unitária (g/cm ³)	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica saturada de superfície seca (g/cm ³)	DMC (mm)
1,50	2,61	2,67	9,5

3.3 Ensaios no concreto em estado fresco

3.3.1 Ensaio de consistência normal da pasta

Os resultados das porcentagens de água necessária para obtenção da pasta de consistência normal e os tempos de pega estão relacionados nas **Tabelas 8 e 9**, respectivamente. Como os tempos não diferiram mais de 30 minutos entre as amostras, todos os ensaios foram considerados válidos, segundo critério estabelecido pela norma NBR NM 65:2002.

A variância da percentagem das águas em estudo para a obtenção da pasta de consistência normal foi na ordem de 10⁻⁷.

Tabela 8 – Percentagens de água para obtenção da pasta de consistência normal.

Tipo de água	Quantidade de água (g)	Distância da placa (mm)	% de água
Destilada (referência)	147,50	5	29,50
Reúso	147,20	5	29,44

Tabela 9 – Tempos de início e fim de pega das pastas de cimento.

Tipo de água	Início de pega (min.)	Diferença do início de pega (min.)	Fim de pega (min.)	Diferença do fim de pega (min.)
Destilada (referência)	115	-	170	-
Reúso	114	-1	175	+5

Observou-se que a água de reúso apresentou o tempo de início de pega menor do que a água destilada (referência). Segundo BOARDMAN (1999), tal fato se deve ao pH do meio, que ajuda na precipitação de metais, minimizando o efeito de retardação na hidratação do cimento.

Os tempos de início e fim de pega da pasta com água de e reúso não diferiu em mais de 5% dos tempos de início e fim de pega das amostras produzidas com a água de destilada (referência), portanto para esta propriedade analisada, a utilização de água recuperada como água de amassamento no concreto está validada, atendendo aos critérios da NBR NM 65:2002.

3.3.2 Ensaio de abatimento de troco de cone (Slump Test)

Foram executados concretos utilizando a água destilada como água de amassamento, referência para o estudo, e a água recuperada (reúso), separadamente. Realizou-se o abatimento do concreto em estado plástico pelo método tronco de cone a fim de averiguar a trabalhabilidade dos concretos produzidos com as diferentes águas. Os resultados obtidos para o abatimento estão apresentados na **Tabela 10**.

Tabela 10 – Abatimento de tronco de cone para as diferentes águas de amassamento.

Tipo de água	Abatimento (mm)	f_i/f_R
Destilada (referência)	80	-
Reúso	91	1,14

De acordo com a tabela anterior, observou-se que os concretos executados tiveram abatimento no intervalo previsto de 100 ± 20 mm. Também foi verificado que os valores de abatimento do concreto utilizando água de reúso foi 14% superior ao apresentado para os concretos com água destilada, tendo em vista a relação f_i/f_R equivalente a 1,14.

3.4 Ensaio no concreto em estado endurecido

3.4.1 Ensaio de resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi executado à luz da norma NBR 5739/2007 aos 3, 7, 28 e 91 dias. Os resultados obtidos para os diferentes tipos de água em suas respectivas idades estão relacionados na **Tabela 11**. A mesma tabela também apresenta o fator de variação do concreto de referência feito com água destilada através da relação f_i/f_R .

Tabela 11 – Resistência à compressão axial aos 3, 7, 28 e 91 dias.

Idade de cura úmida	Resistência à compressão axial (MPa)		f_i/f_R	
	Água destilada	Água de reúso	Água destilada	Água de reúso
3 dias	18,9	18,4	1	0,98
7 dias	21,9	22,0	1	1
28 dias	23,0	23,8	1	1,03
91 dias	29,6	30,3	1	1,02

Observou-se que as resistências variaram 2%, 3% e novamente 2% para as idades de 3, 28 e 91 dias, respectivamente, em relação à resistência do concreto produzido com água destilada, não havendo variação na idade de 7 dias. Constatou-se tam-

bém acréscimo na resistência ao longo de todas as idades analisadas.

Para analisar a significância das diferenças entre os resultados alcançados, foi realizada uma análise estatística ANOVA, onde a variável resposta é a própria resistência à compressão e o fator controlável, a água de amassamento. As **Tabelas 12, 13, 14 e 15** apresentam os resultados para a análise de variância e o Teste F (Fischer) nas idades avaliadas, o qual compara a relação entre as médias quadradas dentro do grupo e entre o grupo com o valor encontrado na tabela de limites unilaterais de Fisher. Havendo diferença significativa será executado o teste Duncan, através da comparação múltipla de médias.

Tabela 12 – Análise ANOVA para resistência à compressão axial aos 3 dias

	SQ	GDL	MQ	Teste F	Referência
Entre Grupo	0,3031	1	0,3031	1,665385	7,71
Dentro Grupo	0,7280	4	0,1820	-	-
Total	1,0311	5	-	-	-

Legenda: SQ: Soma dos quadrados; GDL: Grau de liberdade; MQ: Média dos quadrados.

Tabela 13 – Análise ANOVA para resistência à compressão axial aos 7 dias

	SQ	GDL	MQ	Teste F	Referência
Entre Grupo	0,0162	1	0,0162	0,052627	7,71
Dentro Grupo	1,2343	4	0,3086	-	-
Total	1,2506	5	-	-	-

Tabela 14 – Análise ANOVA para resistência à compressão axial aos 28 dias

	SQ	GDL	MQ	Teste F	Referência
Entre Grupo	0,9381	1	0,9381	1,787198	7,71
Dentro Grupo	2,0996	4	0,5249	-	-
Total	3,0377	5	-	-	-

Tabela 15 – Análise ANOVA para resistência à compressão axial aos 91 dias

	SQ	GDL	MQ	Teste F	Referência
Entre Grupo	0,4631	1	0,4631	0,039448	18,51
Dentro Grupo	23,4791	2	11,7396	-	-
Total	23,9422	3	-	-	-

Para todas as idades, foi verificado que não há diferença significativa entre os grupos analisados para a propriedade mecânica Resistência à compressão, visto que o F calculado é menor que o F tabelado. Logo, o teste Duncan para comparação múltipla das médias não se fez necessário.

Na **Tabela 16**, KUCCHE et. al (2015) apresentam os limites de tolerância para a resistência à compressão axial segundo normas internacionais, sendo verificada total conformidade dos dados obtidos com as referidas normas.

Tabela 16 – Limites de tolerância para a resistência à compressão axial

Normas	Limites	Observações
ASTM C94-96	≥ 90% da resistência média da amostra de controle preparada com água destilada ou potável	A resistência à compressão média de 7 dias da amostra preparada com a água que deve ser proveniente da amostra controlada.
EN 1008	≥ 90% da resistência média da amostra de controle preparada com água destilada ou deionizada	A resistência à compressão média de 7 dias e 28 dias da amostra de concreto preparada com água de lavagem.

3.4.2 Ensaios de absorção, índice de vazios e massa específica do concreto

Como preconizado na norma NBR 9778:2009, foram realizados ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica para o concreto aos 28 dias, cujos resultados estão apresentados na **Tabela 17**. Assim como para a re-

sistência à compressão axial, realizou-se uma análise estatística ANOVA para verificar a significância das diferenças nos resultados, onde novamente foi constatada a não diferenciação significativa dos grupos para tais ensaios. Saliencia-se que os ensaios foram realizados em 3 corpos de prova por tipo de água. Os desvios padrões para todos os tipos de águas estudadas foram nulos.

Tabela 17 – Propriedades do concreto no estado endurecido

Propriedade	Água destilada	Água de reúso
Absorção (%)	4,67	4,62
Índice de vazios (%)	10,23	10,16
Massa específica da amostra seca (g/cm ³)	2,19	2,20
Massa específica da amostra saturada (g/cm ³)	2,29	2,30
Massa específica real (g/cm ³)	2,44	2,45

3.5 Estudo de caso

Os serviços realizados na ETE Guadalajara foram executados em aproximadamente 04 meses, apresentando consumo total da água de reúso equivalente a 8.967,50 litros ou 8,97 m³.

De acordo com HANNAD et al. (2013), estima-se que a cada litro de água utilizada para produção de 1 m³ de concreto ou similares (reboco, chapisco, argamassa de assentamento, dentre outros) utiliza-se cerca de 2,65 vezes mais água para tarefas periféricas, tais como: lavagem de agregados, limpeza de materiais/equipamentos, umectação de poeira em suspensão e cura. Logo, o volume estimado utilizado de água de reúso na obra de reforma da ETE Guadalajara foi de 23,77 m³. As Figuras 2, 3 e 4 a seguir apresentam a execução da mureta da Estação de Tratamento de Esgoto Guadalajara, onde foram utilizadas amostras coletadas da mesma estação após parecer favorável das análises realizadas.



Figura 2 - Vista da fase inicial de construção da mureta com estaca



Figura 3 - Vista da fase final de construção da mureta com estaca



Figura 4 - Vista da mureta interna concluída

4 CONCLUSÕES

Diante do cenário de escassez dos recursos hídricos no Brasil, é necessária uma investigação mais aprofundada das propriedades da água para amassamento do concreto estrutural, buscando viabilizar o uso de águas de reúso na indústria da construção civil.

A análise da composição química da água de reúso da ETE Guadalajara mostrou total conformidade aos parâmetros da NBR 15.900:2009, que regulamenta os parâmetros para água para amassamento do concreto, bem como à norma europeia BS EN 1.008:2002.

A água de reúso não acarretou diferenças significativas nos tempos de início e fim de pega da pasta de cimento, quando comparada com os resultados do uso da água destilada, tidos como valores de referência no experimento. O emprego da água de reúso como amassamento também proporcionou concretos com resistência à compressão axial estatisticamente equivalente à resistência encontrada para o concreto de mesmo traço com o emprego da água destilada, em diferentes idades. Assim, a água proveniente do sistema de reúso é satisfatória como água de amassamento, e não afeta a propriedade mecânica estudada.

Os resultados obtidos para as propriedades físicas de absorção, índice de vazios e massa específica para o concreto executado com água de reúso foram estatisticamente equivalentes aos resultados do concreto com água destilada.

Conclui-se que não houve diferença significativa nas propriedades estudadas em virtude da substituição da água de amassamento.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5.738:2015**: Concreto – Procedimento para moldagem de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 09p.

_____. **NBR 5.739:2007**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 09p.

_____. **NBR 9.778: 2009**: Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 07p.

_____. **NBR 11.578:1997**: Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 05p.

_____. **NBR 15.900:2009**: Água para amassamento do concreto – Partes de 1 a 11: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 54p.

_____. **NBR NM 43:2002**: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2002. 06p.

_____. **NBR NM 45:2006**: Agregado – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 18p.

_____. **NBR NM 52:2009**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 13p.

_____. **NBR NM 53:2003**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 15p.

_____. **NBR NM 65:2002**: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2002. 04p.

_____. **NBR NM 248:2003**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 13p.

ASTM INTERNACIONAL. **C94/C94M-17A: Standard Specification for Ready mix Concrete**. West Conshohocken, Estados Unidos da América: ASTM, 2017. 15p.

BOARDMAN, D. I. **Lime Stabilization: clay-metal-lime interactions**. 1999. 566 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Loughborough University, Leicestershire, Reino Unido, 1999.

BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil 2013**. Brasília: ANA, 2013.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 1008:2002**: 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. Londres: BSI, 2002. 22 p.

CAIXETA, C. E. T. **Avaliação do atual potencial de reúso de água no estado do Ceará e propostas para um sistema de gestão**. 2010. 323 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

EL-NAWAWY, O. A.; AHMAD, S. **Use of treated effluent in concrete mixing in an arid climate**. Cement and Concrete Composites. Volume 13. [S.l.], p. 137-141. 1991.

FONSECA, C. F. **Uso combinado de processos de separação visando a destoxificação de hidrolisado hemicelulósico**. 2011.

149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

GETIRANA, A. Extreme Water Deficit in Brazil Detected from Space. **Journal Of Hydrometeorology**. Volume 17. [S.l.], p. 591-599. fev. 2016. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/JHM-D-15-0096.1>>. Acesso em: 13 nov. 2017.

HANNAD, B. et al. Water Usage Optimization During Concrete Operations. In: WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS, 2013, Cincinnati, Estados Unidos da América. **Proceedings...**. Cincinnati: ASCE, 2013. p. 3114 - 3121.

HESPANHOL, I. Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, município e recarga de aquífero. In: MANCUSO, P.C.S.; SANTOS, H. F. **Reúso da água**. Barueri: Manole, 2003. Cap. 3, p. 37-95.

KUCCHE, K. J.; JAMKAR, S. S.; SADGIR, P. A.. Quality of Water for Making Concrete: A Review of Literature. **International Journal Of Scientific And Research Publications**. [S.l.], p. 1-10. jan. 2015. Disponível em: <<http://www.ijsrp.org/research-paper-0115/ijsrp-p3720.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2017.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F.. A escassez e o reúso de água em âmbito mundial. In: MANCUSO, P.C.S.; SANTOS, H.F.. **Reúso da Água**. Barueri: Manole, 2003. p. 4-19.

MEYER, C. **Sustainable Development and the Concrete Industry**. [S.l.]: CIB Bulletin, 2004. Disponível em: <http://www.columbia.edu/cu/civileng/meyer/publications/publications/80_sustainable_development.pdf>. Acesso em: 13 set. 2017.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. Nova York: John Wiley and Sons, Inc: 1997.

NEVILLE, A. Water – Cinderella ingredient of concrete. **Concrete International Journal**, Volume 22, p. 66-77. 2000.

SILVA, M.; NAIK, T. R. Sustainable use of resource – Recycling of sewage treatment plant water in concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS AND TECHNOLOGIES, II, 2010, Ancona, Itália. **Proceedings...**. Ancona, Itália: SCMT, 2010. p. 1731 - 1740.

VARGAS, G. D. L. P. **Tratamento terciário de esgoto sanitário através de Processos Oxidativos Avançados para a obtenção de águas de reúso**. 2008. 264 p. (Doutorado em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

YILMAZ, A.B.; YAZICI, B.; ERBIL, M. The effects of sulfate ion on concrete and reinforced concrete. **Cement and Concrete Research Journal**, Volume 27. [S.l.], p. 1271-1279. 1997.