

Análise estatística da resistência à compressão de concreto preparado com águas de reúso

Statistical analysis of the compressive strength of concrete prepared with reused waters

- **Data de entrada:**
17/11/2020
- **Data de aprovação:**
19/08/2021

Ana Rachel Melo Nascimento^{1*} | Gracielle Ferreira de Souza¹ | Leonardo Vieira Soares¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2022.069>

ORCID ID

Nascimento ARM  <https://orcid.org/0000-0003-3219-8683>

Souza GF  <https://orcid.org/0000-0001-6634-5018>

Soares LV  <https://orcid.org/0000-0001-8367-2766>

Resumo

Para o enfrentamento de situações de crise hídrica, o uso de efluentes de estações de tratamento de esgoto como fonte alternativa de água vem sendo investigado. Buscando maior entendimento sobre o tema, este trabalho propõe analisar a resistência à compressão de concretos preparados com dois efluentes nos processos de amassamento e cura: um proveniente do sistema de Reator de Bateladas Sequenciais (SBR) e outro efluente oriundo de Lagoas de Estabilização, ambos os sistemas localizados no município de João Pessoa - PB. Os efluentes estavam em conformidade com as normas NBR 15.900 e NM 137 e os corpos de prova produzidos foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial aos 7, 28 e 120 dias. Os dados de resistência obtidos foram sujeitos à análise estatística, pela qual se observou redução na influência da água de amassamento na resistência à compressão do concreto com o aumento do tempo de cura e se constatou semelhança significativa das resistências apenas aos 120 dias de cura.

Palavras-chave: Reúso. Tratamento de esgoto. Produção de concreto.

Abstract

In order to face situations of water crisis, the use of effluents from sewage treatment plants as an alternative source of water has been investigated. Seeking for greater understanding on the subject, this work proposes to analyze the compressive strength of concretes prepared with two effluents in the kneading and curing processes: one from the Sequential Batch Reactor (SBR) system and the other effluent from Stabilization Lagoons, both systems located in the city of João Pessoa – PB. The effluents were in compliance with the NBR 15,900 and NM 137 standards and the concrete samples produced were submitted to axial compression resistance test at 7, 28 and 120 days. The resistance data were subjected to statistical analysis by which it was possible to conclude that the water's influence on the compressive strength of the concrete reduces as the curing time increases and that there is a significant similarity between the resistances only at 120 days of curing.

Keywords: Reuse. Sewage treatment. Concrete production.

¹ Universidade Federal da Paraíba (UFPB) - João Pessoa - Paraíba - Brasil.

* **Autora correspondente:** anaracheleng@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial à vida e que está intimamente ligado ao progresso da sociedade e de diversas atividades econômicas. Apesar de ter sido considerado como inesgotável em décadas passadas, atualmente esse recurso gera sérias preocupações em decorrência do estado de escassez observado em diferentes localidades e das projeções de crise hídrica para o futuro. De acordo com o Relatório Mundial das Nações Unidas Sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos (UNESCO; WWAP, 2019), mais de dois bilhões de pessoas vivem em países que apresentam alto estresse hídrico, e cerca de quatro bilhões de pessoas experimentam escassez severa de água durante pelo menos um mês do ano.

A crise hídrica tende a piorar quando projetada para o futuro. Estima-se que a demanda mundial por água se mantenha semelhante à taxa de consumo atual de forma que, até o ano de 2050, haja aumento de 20% a 30% em relação ao nível atual de uso, destacando crescimento majoritário na demanda dos setores industrial e doméstico (BUREK et al., 2016).

Dentre as indústrias de maior consumo de água, o ramo da construção civil se encontra como autor de 9% da demanda industrial total (FAO, 2014) e gasta mais de um trilhão de litros de água anualmente na preparação concreto (MILLER et al., 2018). De maneira geral, estudos estimam o consumo médio entre 180 e 211 litros de água para a confecção de um metro cúbico de concreto dosado (BARRETO, 2015; SILVA et al., 2013; TSIMAS et al., 2011). Não obstante, para realizar as atividades secundárias ligadas à produção, como processo de cura e lavagem dos equipamentos, são necessários cerca de 2,5 vezes mais litros de água em relação ao usado na confecção (HANNAH et al., 2013).

Dessa forma, frente à perspectiva de crise hídrica, tornam-se necessárias soluções tecnológicas e sustentáveis em setores com elevado consumo de água, especialmente na indústria da construção civil, para proporcionar o equilíbrio entre a oferta e demanda de água. Assim, diversos estudos investigaram o uso de água de reúso na produção do concreto.

Al-Jabri et al. (2011) investigaram a influência de efluentes de lavagem de carros nas propriedades do concreto de alta resistência. Para isso, empregaram diferentes porcentagens de águas de reúso e água potável variando entre 25 e 100% e verificaram as resistências à compressão axial aos 7 e 28 dias. Outra pesquisa realizada por Brandão et al. (2019) utilizou água de reúso proveniente do tratamento terciário, caracterizado por filtros de areia e carvão ativado de uma Estação de Tratamento de Reúso compacta, para preparação de concreto e investigou os parâmetros de índice de vazios, a absorção, a massa específica e a resistência à compressão axial aos 3, 7, 28 e 91 dias. Ambas as pesquisas concluíram que não houve diferença significativa na resistência à compressão do concreto produzido com água de reúso em comparação ao preparado com água potável.

Raza et al. (2020) apresentaram um estudo utilizando cinco tipos diferentes de águas residuais oriundas de fábricas têxteis, fábrica de fertilizantes, esgoto doméstico, esgoto de posto de gasolina e fábrica de açúcar. Os resultados demonstraram diferença significativa entre as resistências à compressão de misturas de concreto, apontando que o concreto preparado com águas residuais de fábricas têxteis apresentou maior resistência à compressão que o desenvolvido com água potável.

Ghrai et al. (2018) relataram que água cinza tratada é adequada para a produção de concreto. Os resultados desse trabalho indicaram que resistên-

cia à compressão aos 28, 120 e 200 dias de cura não foi influenciada negativamente quando comparada ao concreto feito com água destilada.

Portanto, com o intuito de sugerir uma forma de redução no consumo de água extraída de mananciais para produção de concreto e amenizar a problemática acerca da disposição final de águas residuais domésticas, o presente trabalho tem como finalidade avaliar estatisticamente o desempenho de concretos preparados com águas de reúso — efluentes tratados em Reator de Bateladas Sequenciais (SBR) e Lagoas de Estabilização — em relação à resistência à compressão axial.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Águas de reúso utilizadas no amassamento e cura do concreto

Dois tipos de efluentes foram utilizados nesta pesquisa como água de amassamento e cura para a preparação do concreto: um proveniente do tratamento de esgoto doméstico tratado em Reator de Bateladas Sequenciais (SBR) e Lagoas de Estabilização. Ambos os sistemas de tratamento estão instalados na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Mangabeira, si-

tuada no município de João Pessoa, Paraíba, e gerenciada pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA).

O SBR, ilustrado na Fig. 1 (a), faz parte da instalação experimental projetada, construída e operada pelo Projeto Bramar (Estratégias e tecnologias para a escassez de água no nordeste brasileiro). Funcionando em escala piloto, o SBR possui capacidade de tratamento de 16,2 mg/l de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_5) de carga orgânica nominal de poluente e atende à demanda de uma residência unifamiliar (0,90 m³ diários). O sistema trata 180 litros esgoto por ciclo e realiza cinco ciclos por dia (ABELS et al., 2018).

Já o sistema de Lagoas de Estabilização, indicado na Fig. 1 (b), funciona em escala plena com vazão de 8.275 m³/dia e está funcionando conforme o sistema australiano: duas Lagoas Anaeróbias (LA) seguidas por uma Lagoa Facultativa (LF) operadas em série. As Lagoas Anaeróbias possuem volume de 14.800 m³, área superficial de 0,4 ha e tempo de detenção hidráulica (TDH) de 1,8 dias cada uma, enquanto a Lagoa Facultativa (LF) apresenta 57.600 m³ de volume, 3,2 ha de área superficial e 7 dias de TDH (CAGEPA, 1981; SILVA et al., 2016).

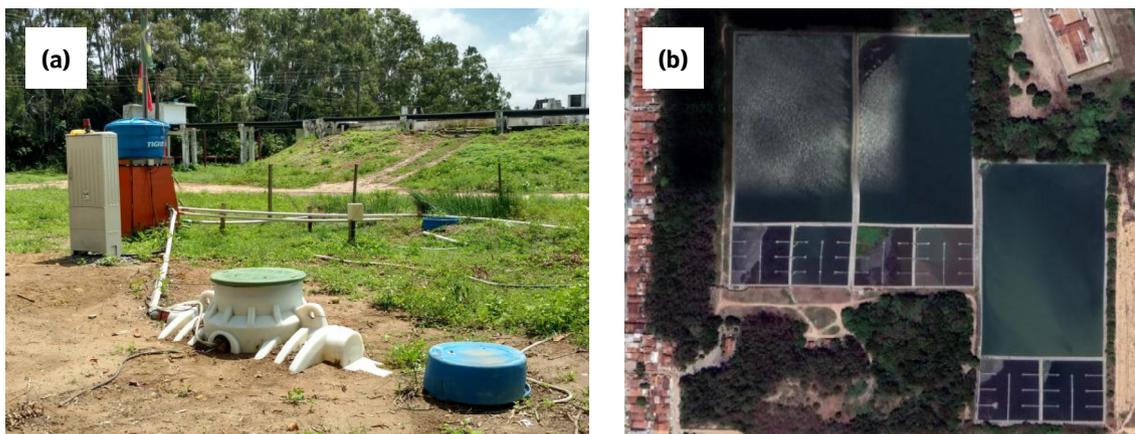


Figura 1 – Sistemas de tratamento: a) Instalações experimentais do Reator de Bateladas Sequenciais; b) Módulos de Lagoas de Estabilização.

Fontes: a) Autores (2018); b) Google Earth (2020). Acesso: 20 out. 2020.

2.2 Ensaios e análises realizadas

Para cada um desses sistemas de tratamento, foram coletadas três amostras dos efluentes no decorrer dos meses de abril e junho de 2018. De forma a obter uma referência comparativa com os efluentes em estudo, a água proveniente do sistema de abastecimento público do município de João Pessoa, fornecida pela CAGEPA, foi utilizada como água de referência.

Os efluentes foram caracterizados por meio de análises físico-químicas conforme os parâmetros discriminados na NBR 15.900 (ABNT, 2009) e na Norma Mercosul 137 (1997). Desse modo, foram realizadas as determinações de pH a 25°C (valor adimensional); Teor de Sólidos Totais (mgST/L); Teor de Ferro total (mgFe/L); Teor de Cloretos (mgCl⁻/L) e Teor de Sulfatos Solúveis (mgSO₄²⁻/L) de acordo com *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA et al., 2012) para cada amostra dos efluentes. Todas as análises foram realizadas em réplica no Laboratório de Saneamento Ambiental (LABSAM) do Centro de Tecnologia da UFPB.

Os demais componentes do concreto — cimento e agregados graúdo e miúdo — foram caracterizados de forma a servir como base para a definição do traço experimental e dosagem do material. As composições granulométricas dos agregados foram obtidas conforme a NM 248 (ABNT, 2003), massa unitária pela NBR NM 45 (ABNT, 2006) e massa específica para agregado miúdo foi obtida com base a NBR NM 52 (ABNT, 2003) e NBR NM 53 (ABNT, 2003) para agregado graúdo. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LABEME) do Centro de Tecnologia da UFPB.

2.3 Produção e ensaios no concreto

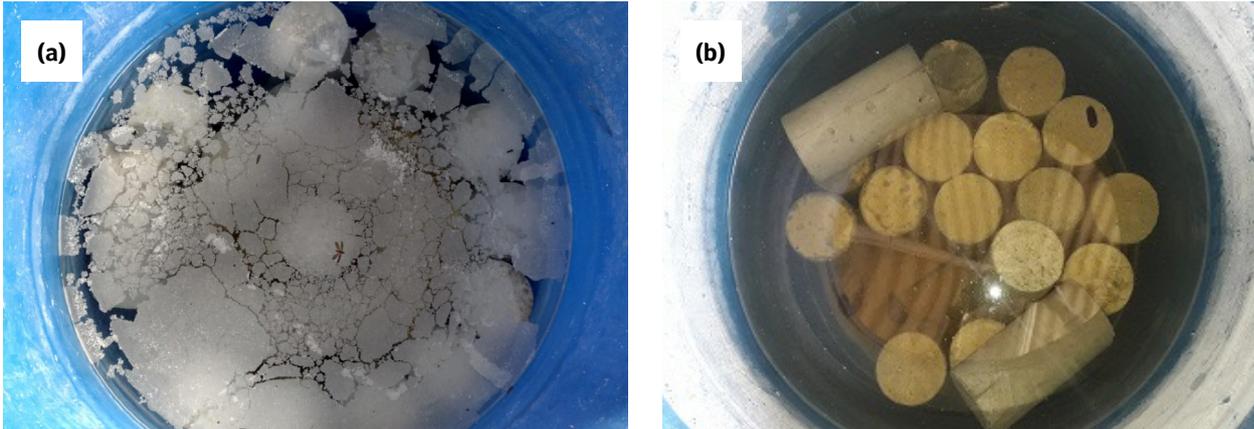
Baseado nos dados encontrados, foi realizada a dosagem do concreto em concordância com a metodologia experimental ABCP/ACI. Adotou-se para o concreto, a resistência característica (fck) de 25 MPa e o abatimento (*Slump Test*) de 100 ± 20 mm pelo método tronco de cone. De posse do traço experimental, preparou-se o concreto que, no estado fresco, foi testado a partir de ensaios de abatimento do tronco de cone para 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 prescreve a NBR 5738 (ABNT, 2015), confeccionados com as três águas de amassamento em estudo (efluente do SBR, efluente das Lagoas de Estabilização e água de abastecimento público).

Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram colocados em cura úmida até as idades de 7, 28 e 120 dias (Tabela 1), tendo em vista o ensaio de resistência à compressão axial. No processo de cura úmida, os corpos de prova foram imergidos em tanques contendo o mesmo tipo de líquido que o utilizado como água de amassamento na preparação do concreto (Fig. 2). O ensaio de resistência à compressão axial foi executado de acordo com as diretrizes da norma NBR 5739 (ABNT, 2007). Para realizar o ensaio, foi realizada a regularização dos topos dos corpos com auxílio de uma máquina retificadora e de um disco de Neoprene, denominado capeador elástico, com o intuito de garantir a distribuição uniforme das tensões de compressão axial.

Tabela 1 - Corpos de prova confeccionados por tipo de água de amassamento e idade de ruptura.

Água de amassamento	Número de corpos de prova			Total de corpos de prova
	7 dias	28 dias	120 dias	
Abastecimento	8	12	12	32
SBR	12	18	18	48
Lagoas	12	18	18	48

**Figura 2** - Tanques de cura contendo corpos de prova e efluente do a) SBR; b) das lagoas de estabilização.

Fonte: a) Autores (2018).

2.4 Características dos efluentes

O efluente do SBR e o efluente das lagoas de estabilização foram caracterizados a partir de análises físico-químicas de acordo com a NBR 15.900 (ABNT, 2009). Os resultados obtidos foram comparados aos teores limites da citada norma brasileira e da Norma Mercosul 137 (1997), que apresenta limites de tolerâncias mais rígidos em comparação a NBR 15.900.

Das três determinações provenientes das três amostras por efluente, realizou-se o cálculo de média aritmética e os resultados por tipo de efluente estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização dos efluentes de Reator SBR e das lagoas de estabilização utilizados como água de amassamento e cura

Parâmetros	SBR	Lagoas
pH a 25°C	3,55	7,55
Cloretos (mgCl/L)	62,78	60,35
Sulfatos (mgSO ₄ ²⁻ /L)	66,35	38,29
Ferro total (mgFe/L)	0,304	0,455
Sólidos Totais (mgST/L)	483,56	374,50

2.5 Características do traço experimental de concreto

A massa específica do cimento utilizado nos experimentos foi de 3,10 g/cm³. Os demais materiais componentes do concreto, agregado graúdo (brita) e miúdo (areia) foram caracterizados por meio dos ensaios de granulometria e massa específica, e os resultados estão apresentados na Tabela 3 e 4.

Devido a problemas no estoque, foram utilizadas duas areias diferentes na confecção dos concretos de forma que foram calculados dois traços experimentais diferentes, um para cada tipo de água de amassamento. A Tabela 5 indica os traços experimentais calculados para cada tipo de concreto assim como o consumo de agregados, água e cimento. Destaca-se que para produção de 1 m³ de concreto, foram gastos 270 litros de água de amassamento e que esse volume foi destinado apenas para a preparação do concreto, sem considerar os gastos nos processos de cura e limpeza de equipamento.

Tabela 3 - Características do agregado graúdo.

Parâmetro	SBR	Lagoas
Diâmetro máximo (mm)	19	19
Massa específica (g/cm ³)	2,70	2,70
Massa unitária (Kg/dm ³)	1,50	1,50

Tabela 4 - Características do agregado miúdo.

Parâmetro	SBR	Lagoas
Módulo de finura	2,21	2,09
Massa específica (g/cm ³)	2,57	2,63
Massa unitária (kg/dm ³)	1,58	1,63

Tabela 5 - Traço experimental e consumo de material por metro cúbico de concreto.

Parâmetro	Cimento	Areia	Brita	Água
Traço 1 (efluente do SBR)	1	1,49	1,78	0,48
Consumo 1	442 kg	674,5 kg	1011,5 kg	270 litros
Traço 2 (efluente das Lagoas)	1	1,50	1,80	0,48
Consumo 2	452 Kg	680,9 kg	1021,4 kg	270 litros

2.6 Análises estatísticas dos dados de resistência

Os resultados de resistência à compressão aos 7, 28 e 120 dias para os três tipos de concreto receberam dois tratamentos estatísticos. O primeiro tratamento consiste na comparação das médias de cada tipo de concreto preparado com as águas de reúso com o concreto comum (preparado com água de referência) a partir do teste *t-student* ou Mann-Whitney. Para essa análise, os resultados foram previamente analisados em relação à distribuição normal pelo teste de normalidade Shapiro-Wilk (SW) e Kolmogorov-Smirnov. De forma complementar, realizou-se um segundo tratamento estatístico por meio da Análise

Estatística de Variância (ANOVA), em que foram verificadas possíveis diferenças significativas por meio da comparação múltipla de médias por meio do teste de Tukey.

2.6.1 Teste de comparação de médias (*t-student* ou Mann-Whitney)

A análise de médias foi realizada em função do tipo de distribuição apresentado pelos dados de resistência do concreto, definido pelo teste Shapiro-Wilk. Caso a amostra apresentasse comportamento conforme a distribuição Normal, utilizou-se o teste paramétrico de comparação de médias "*t-student*" com prévia verificação da homogeneidade de variâncias pelo teste de Levene. Caso contrário, fez-se uso do teste não paramétrico de Mann-Whitney. O fluxograma apresentado na Fig. 3 esquematiza de forma geral os passos executados para realizar a análise de médias.

Ambos os testes paramétrico e não-paramétrico foram realizados no software SPSS-23, todos com nível de significância α de 5% e formulados sob as seguintes hipóteses:

- H0 (hipótese nula) → Não há diferença significativa entre as médias das amostras, isto é, os três tipos de concreto apresentam resistências semelhantes.
- H1 (hipótese alternativa) → Há diferença significativa entre as médias das amostras, isto é, os três tipos de concreto não apresentam resistências semelhantes.

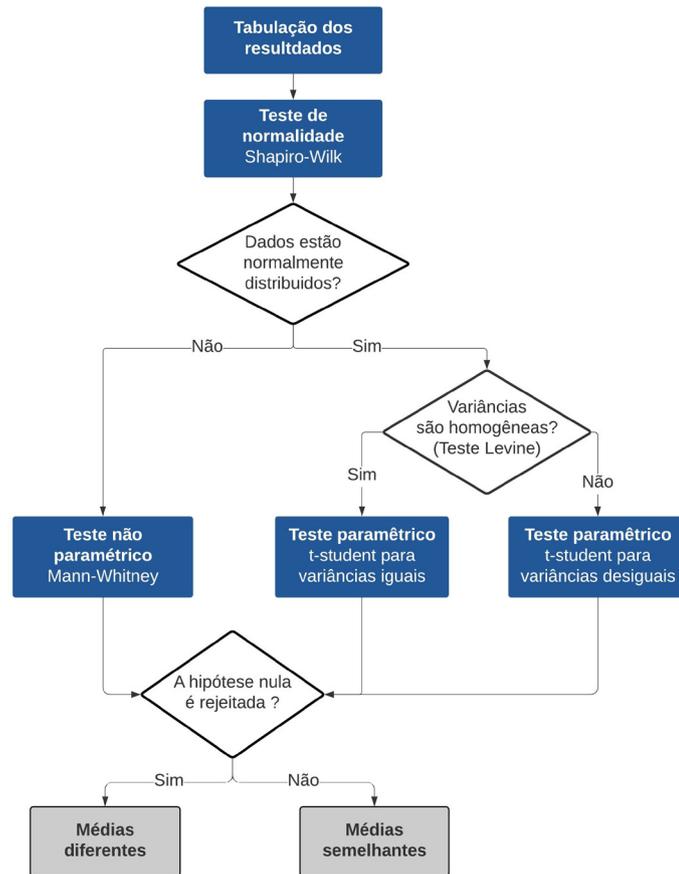


Figura 3 - Fluxograma para comparação de médias
 Fonte: Adaptado de Farto (2018)

2.6.2 Análise estatística de Variância

Análise estatística de Variância (ANOVA) foi realizada para verificar a influência da variável tipo de água de amassamento sobre os resultados obtidos de resistência à compressão nos tempos de cura de 7, 28 e 120 dias. Para isso, foi utilizado o Teste de Fischer e, de forma complementar, o Teste Tukey.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios de resistência à compressão axial foram executados conforme norma NBR 5739

(ABNT, 2007) aos 7, 28 e 120 dias. Os resultados obtidos para os diferentes tipos de água de amassamento e idades de ruptura estão descritos estatisticamente na Tabela 6. Foi calculado preliminarmente um fator de variação do concreto de referência (FR) preparado com água de abastecimento através da relação f_i/FR (Tabela 7). De forma geral, os resultados de resistência a compressão axial estão apresentados no diagrama de boxplot da Fig. 4.

Tabela 6 - Estatística descritiva dos dados de resistências à compressão aos 7, 28 e 120 dias

Concreto		Parâmetro estatístico					
Idade de ruptura	Água de amassamento	Média	Variância	Desvio padrão	Mediana	Mínimo	Máximo
7 dias	Abastecimento	25,5	12,95	3,60	25,0	20	30
	SBR	20,8	6,62	2,57	21,5	16	24
28 dias	Lagoas	14,6	0,83	0,92	15,0	13	16
	Abastecimento	32,5	3,83	1,96	32,0	30	36
	SBR	29,4	5,67	2,38	29,0	26	33
120 dias	Lagoas	25,0	22,00	4,69	22,5	20	31
	Abastecimento	33,0	11,43	3,38	32,5	28	39
	SBR	36,7	8,32	2,88	37,0	32	41
	Lagoas	33,7	10,77	3,28	34,0	28	38

Tabela 7 - Análise preliminar das resistências à compressão axial aos 7, 28 e 120 dias

Idade de cura úmida	Resistência à compressão axial (MPa)			f _i /f _R		
	Água de referência	Efluente SBR	Efluente Lagoas	Água de referência	Efluente SBR	Efluente Lagoas
7 dias	25,57	20,80	14,63	1	0,81	0,57
28 dias	32,50	29,45	25,00	1	0,91	0,77
120 dias	33,00	36,76	33,78	1	1,11	1,02

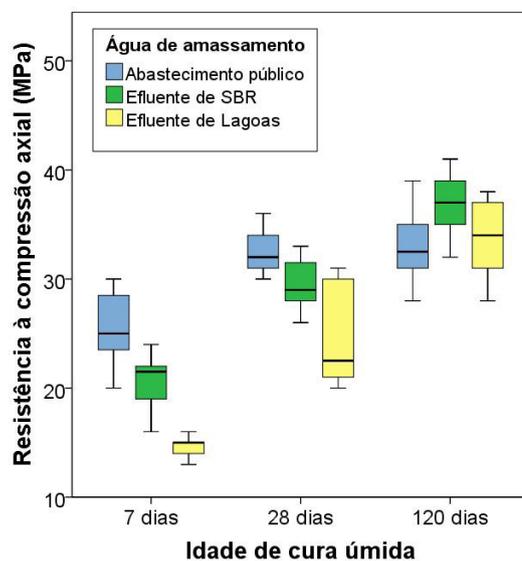


Figura 4 - Resistências à compressão aos 7, 28 e 120 dias

Pelos dados apresentados nas Tabelas 6 e 7 e ilustrados na Fig. 4, observa-se que, para as idades de 7 e 28 dias, o concreto confeccionado com qualquer efluente não obteve resistência à compressão semelhante ao encontrado no concreto de fabricado com água potável, estando a maioria dos valores abaixo da mediana deste. Por outro lado, no estudo feito por Brandão et al. (2019) ao utilizar água de reúso proveniente de tratamento terciário, caracterizado por filtros de

areia e carvão ativado, os corpos de prova apresentavam resistência satisfatória com 7 dias.

Para a idade de 120 dias, o concreto fabricado com efluente das Lagoas de Estabilização foi equivalente ao concreto de água potável no tocante à resistência à compressão, enquanto o concreto feito com efluente do SBR não só se igualou como a maioria dos valores foram superiores a mediana do concreto de referência.

Os valores de resistência à compressão obtidos pelos corpos de prova rompidos foram analisados de duas maneiras:

- Tratamento estatístico por comparação de médias (*t-student* ou *Mann-Whitney*);
- Tratamento estatístico de múltiplas médias pelo ANOVA.

3.1 Teste de comparação de médias (*t-student* ou *Mann-Whitney*)

Para o primeiro tratamento estatístico, foram feitas análises de distribuição de dados por meio dos métodos Shapiro-Wilk e Kolmogorov-

v-Smirnov, conforme apresentado na Tabela 8. Observou-se que apenas a análise das resistências do concreto confeccionado com o efluente das Lagoas de Estabilização, rompido aos 28 dias, resultou em p inferior a 0,05 e, portanto, não obedeceu a distribuição normal. Desse modo, neste caso foi utilizado o teste não paramétrico de Mann-Whitney para comparar a média com o concreto preparado com água de abastecimento público de mesmo tempo de cura. As demais análises resultaram no valor de p superior a 0,05, o que indica comportamento normal para tais distribuições de médias, e então foram analisados posteriormente por meio de testes paramétricos.

Tabela 8 - Análise de normalidade pelos testes Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov para as resistências à compressão de cada tipo de concreto

Água de amassamento	Idade de ruptura	Kolmogorov-Smirnov (p)	Shapiro-Wilk (p)	Resultado dos testes
Abastecimento público	7 dias	0,200*	0,772	Normal
	28 dias	0,200*	0,394	Normal
	120 dias	0,200*	0,915	Normal
Efluente do SBR	7 dias	0,200*	0,574	Normal
	28 dias	0,200*	0,553	Normal
	120 dias	0,094	0,228	Normal
Efluente das Lagoas	7 dias	0,057	0,324	Normal
	28 dias	0,039	0,009	Não-Normal
	120 dias	0,073	0,124	Normal

* Este é um limite inferior ao verdadeiro resultado.

A análise paramétrica foi realizada por meio do teste t-student, de forma a comparar os resultados obtidos de cada tipo de concreto confeccionado com água de reúso com o concreto confeccionado com água de abastecimento. Em paralelo, o teste Levene foi realizado, visando identificar os grupos amostrais que não apresentavam homogeneidade entre as variâncias, o que permitiu corrigir os valores calculados pelo teste t-student. Os resultados da comparação de

médias, assim como os valores calculados pelos testes paramétricos e não paramétricos, estão expostos nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 - Comparação de médias em relação ao concreto de água de abastecimento público pelo teste U de Mann-Whitney

Efluente (Idade)	Teste não paramétrico (Mann-Whitney)	Resultado comparação das médias
Lagoas (28 dias)	0,000	Diferente

Tabela 10 - Comparação de médias em relação ao concreto de água de abastecimento público pelo teste t-student

Efluente (Idade)	Teste Levene	Resultado teste Levene	Teste paramétrico (t-student)			Resultado comparação das médias
			t	df	p	
SBR (7 dias)	0,253	Igualdade de variâncias	3,200	15	0,006	Diferente
Lagoas (7 dias)	0,004	Sem igualdade de variâncias	7,828	6,681	0,000*	Diferente
SBR (28 dias)	0,482	Igualdade de variâncias	3,181	19	0,005	Diferente
Lagoas (28 dias)	-	-	-	-	-	-
SBR (120 dias)	0,858	Igualdade de variâncias	-2,885	23	0,008	Diferente**
Lagoas (120 dias)	0,875	Igualdade de variâncias	-0,553	24	0,585	Semelhante

* Valor já corrigido após o teste Levene.

** As médias deram diferentes, porém os valores de resistência do concreto de reúso foram superiores aos do concreto com água potável.

O teste *t-student* mostrou que há diferença significativa entre as médias de resistência à compressão calculadas para o concreto preparado com as águas de amassamento propostas em relação ao concreto preparado com a água de abastecimento para o tempo de cura de 7 e 28 dias. Contudo, esperava-se que houvesse semelhança entre os valores obtidos conforme experimentado por Silva et al. (2008) ao utilizar efluente de lagoas de estabilização.

Com relação aos corpos de prova com idade de ruptura de 120 dias, o teste indicou que não houve diferença significativa ao utilizar o efluente de lagoas em vez da água de abastecimento. Já no caso do efluente de SBR, existiu diferença significativa, porém isso se deve ao melhor desempenho do concreto de reúso em relação ao concreto preparado com água abastecimento.

A resistência à compressão de concretos de reúso com idades de ruptura mais avançadas (120 e 200 dias) também foi avaliada por Ghair et al. (2018)

fazendo uso de águas cinzas tratadas, e como resultado o autor também evidenciou semelhança significativa entre os resultados obtidos.

3.2 Análise Estatística de Variância

Para analisar a significância das diferenças entre os resultados alcançados, foi realizada uma análise estatística ANOVA, em que a variável resposta é a própria resistência à compressão e o fator controlável é o tipo de água de amassamento, que neste trabalho foram os efluentes das lagoas de estabilização, do SBR e água de abastecimento como referência.

As Tabelas 11, 12 e 13 apresentam os resultados para a análise de variância e o Teste F (Fischer) para os tempos de cura considerados, 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. Considera-se probabilidade de significância (valor-P) de 5%.

Tabela 11 - Análise ANOVA para resistência à compressão aos 7 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F-crítico
Entre grupos	344,5632	2	172,2816	18,95	0,000014	3,42
Dentro dos grupos	209,0801	23	9,0904	-	-	-
Total	553,6433	25	-	-	-	-
R2	62%	-	-	-	-	-

Legenda: sq: soma dos quadrados; gl: grau de liberdade; MQ: média dos quadrados; F: Teste Fischer; valor-P: referência de 0,05; F-crítico (tabelado); R2: coeficiente de determinação que é igual a razão entre SQ entre grupos e SQ total.

Tabela 12 - Análise ANOVA para resistência à compressão aos 28 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F-crítico
Entre grupos	324,4480	2	162,2240	14,43	0,000041	3,32
Dentro dos grupos	337,1698	30	11,2390	-	-	-
Total	661,6178	32	-	-	-	-
R2	49%	-	-	-	-	-

Legenda: SQ: soma dos quadrados; gl: grau de liberdade; MQ: média dos quadrados; F: Teste Fischer; valor-P: referência de 0,05; F-crítico (tabelado); R2: coeficiente de determinação que é igual a razão entre SQ entre grupos e SQ total.

Tabela 13 - Análise ANOVA para resistência à compressão aos 120 dias.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F-crítico
Entre grupos	122,0174	2	61,0087	6,31	0,004163	3,23
Dentro dos grupos	386,9686	40	9,6742	-	-	-
Total	508,9860	42	-	-	-	-
R2	24%	-	-	-	-	-

Legenda: SQ: soma dos quadrados; gl: grau de liberdade; MQ: média dos quadrados; F: Teste Fischer; valor-P: referência de 0,05; F-crítico (tabelado); R2: coeficiente de determinação que é igual a razão entre SQ entre grupos e SQ total.

Observa-se nas Tabelas 11, 12 e 13, que os valores valor-P se encontram abaixo do valor de referência 0,05, bem como os valores de F estão acima do F-crítico para todos os tempos de cura estudados. Isso indica que a hipótese de que as médias para as resistências à compressão calculadas para cada tipo de água de amassamento são iguais é nula, ou seja, pelo menos uma das médias é diferente de outra ou de todas. Porém, para que se identifique quais médias são diferentes, foi necessário realizar o Teste Tukey.

Ainda se pode observar pelas Tabelas 11, 12 e 13 que o valor do coeficiente de determinação (R2) diminui à medida que se aumenta o tempo de cura, passando de 62% (7 dias) para 24% (120 dias). Isso quer dizer que a importância da água de amassamento para a resistência à compressão diminui à medida que aumenta o tempo de cura.

As Tabelas 14, 15 e 16 apresentam os resultados para a análise de Tukey para os tempos de cura considerados. Os valores em destaque e inferiores a 0,05 indicam que as médias são, estatisticamente diferentes.

Tabela 14 - Análise Tukey para resistência à compressão aos 7 dias

Tipo de água de amassamento	Efluente das Lagoas de Estabilização	Efluente do SBR	Água de abastecimento
Efluente das Lagoas de Estabilização	-	0,005786	8,68E-06
Efluente do SBR	4,894	-	0,01544
Água de abastecimento	8,666	4,299	-

Tabela 15 - Análise Tukey para resistência à compressão aos 28 dias

Tipo de água de amassamento	Efluente das Lagoas de Estabilização	Efluente do SBR	Água de abastecimento
Efluente das Lagoas de Estabilização	-	0,007991	2,89E-05
Efluente do SBR	4,581	-	0,1066
Água de abastecimento	7,499	2,972	-

Tabela 16 - Análise Tukey para resistência à compressão aos 120 dias

Tipo de água de amassamento	Efluente das Lagoas de Estabilização	Efluente do SBR	Água de abastecimento
Efluente das Lagoas de Estabilização	-	0,01592	0,7353
Efluente do SBR	4,113	-	1,14E-02
Água de abastecimento	1,061	4,296	-

Para o tempo de cura de 7 dias (Tabela 14), observa-se que há diferença significativa entre as médias calculadas de resistência à compressão para todos os tipos de águas de amassamento estudados.

Em relação aos resultados obtidos para o tempo de cura de 28 dias (Tabela 15), observa-se que há diferença significativa entre as médias calculadas de resistência à compressão para os casos do efluente das lagoas de estabilização em relação ao efluente do SBR e à água de abastecimento, mas não há diferença significativa entre os valores médios obtidos entre o efluente do SBR e a água de abastecimento.

Por fim, analisando os dados obtidos para o tempo de cura de 120 dias (Tabela 16), observa-se que há diferença significativa entre as médias calculadas para os efluentes das lagoas de estabilização e do SBR, bem como entre os valores médios do efluente SBR e água de abastecimento. Logo, não há diferença significativa entre os valores médios obtidos para o efluente das lagoas de estabilização e da água potável.

4 CONCLUSÕES

A Análise Estatística de Variância (ANOVA) permitiu constatar diferença entre as médias de

resistência à compressão calculadas para os concretos produzidos com os dois tipos de água de amassamento estudados (efluente de SBR e efluente de Lagoas de estabilização), independentemente do tempo de cura. Pode-se observar que, para todas as idades de cura úmida, a resistência obtida para o concreto preparado com efluente do SBR apresentou valores superiores aos valores do concreto preparado com efluente das Lagoas. Nota-se também que ambos os concretos preparados com efluentes de sistema de tratamento apresentaram médias de resistência à compressão inferiores às médias do concreto produzido com água de abastecimento nas idades de 7 e 28 dias.

Analisando a variação do coeficiente de determinação (R^2), conclui-se que a importância da água de amassamento sobre os demais fatores que determinam a resistência à compressão diminui à medida que aumenta o tempo de cura. Restringindo-se à análise de resistência à compressão dos corpos de prova, conclui-se que a água de reúso apresenta resultados satisfatórios para uso no preparo do concreto apenas quando verificado na idade de 120 dias de cura. Caso seja adotado esse tipo de água em estruturas de concreto armado, deve-se estudar a eventual ação deletéria quando em contato com a armadura.

Conclui-se a água de reúso é satisfatória como água de amassamento e cura apenas quando considerados elevados tempos de cura para o concreto em razão de que não houve diferença significativa entre as médias de resistência à compressão axial do concreto elaborado com efluente e água de abastecimento apenas na idade de 120 dias.

5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

6 REFERÊNCIAS

- ABELS, A. et al. Tratamento e reúso de águas residuárias. In: Anna Abels; Marcos Freitas; Johannes Pinekamp; Bernd Rusteberg. (Org.). **Mitigação da escassez de água no nordeste do Brasil**. 1ed. Alemanha, 2018, v. 1, p. 80-105.
- APHA, WWA, WPCR. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22a ed. Washington: AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS/ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NBR 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro
- ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 137**: Argamassa e concreto - Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 1997.
- AL-JABRI, K.S.; AL-SAIDY, A. H.; TAHA, R.; AL-KEMYANI, A. J. Effect of using wastewater on the properties of high strength concrete. **Procedia Engineering**. v.14, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2011.07.046>
- BARRETO, L. P. G. L. **O estudo da água real e virtual no concreto usinado**. Belém: UFPA, 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PP-GEC. Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.
- BRANDÃO, A. S.; CABRAL, A. E. B.; DEUS, E. P.; SILVA, W. K. D.; SILVA, W. M. M.. Estudo de caso: uso de água recuperada na construção civil. **Revista DAE**. v. 67, n. 217, Maio 2019. Edição especial. <https://doi.org/10.4322/dae.2019.021>
- BUREK, P. et al. Water Futures and Solution. **International Institute for Applied Systems Analysis**, [s. l.], n. May, p. 1–113, 2016.
- CAGEPA - Companhia de Agua e Esgotos da Paraíba. **Relatório Técnico: Estudo que modificarão a concepção do tratamento dos modulos da ETE de Mangabeira, de lagoas aeradas para lagoas anaerobias**. Joao Pessoa - PB, 1981.
- FARTO, C. D. **Análise comparativa da qualidade da água de chuva e de açudes armazenada em cisternas na região do Cariri Oriental no estado da Paraíba**. João Pessoa: UFPB, 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - PPGECAM. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- AQUAFAS - FAO'S GLOBAL INFORMATION SYSTEM ON WATER AND AGRICULTURE. **Water withdrawal by source**. 2014. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/aquastat>. Acesso em: 20 de out. 2020.
- HANNAH, B.; MARTIN, L.; URIARTE, M.; HAASE, T. Water usage optimization during concrete operations. In: ASCE (org.). **World Environmental and Water Resources Congress**. Cincinnati, Estados Unidos da América. p. 3114–3121. <https://doi.org/10.1061/9780784412947.308>
- MILLER, S. A.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. **Nature Sustainability**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 69–76, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5>. <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5>
- RAZA, A.; SHAH, S. A. R.; KAZMI, S. N. H.; ALI, R. Q.; AKHTAR, H.; FAKHAR, S.; KHAN, F. N.; MAHMOOD, A. Performance evaluation of concrete developed using various types of wastewater: A step towards sustainability. **Construction and Building Materials**. v. 262, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120608>
- GHRAIR, A. M.; AL-MASHAQBEH, O. A.; SARIREH, M. K.; AL-KOUZ, N.; FARFOURA, M.; MEGDAL, S. B. Influence of grey water on physical and mechanical properties of mortar and concrete mixes. **Ain Shams Engineering Journal**. v. 9, n.4, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.11.005>

SILVA, I. M.; PONTES, M. L. F. C.; LEITE, J. P. R.; SANTOS, K. D. **Caracterização do efluente da estação de tratamento de esgoto – unidade Mangabeira – João Pessoa/PB.** In: VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Campina Grande, 2016.

SILVA, R. R.; VIOLIN, R. Y. T. **Gestão da água em canteiros de obras de construção civil.** In: Encontro Internacional de Produção Científica Cesuma, 8, Maringá, 2013.

UNESCO, WWAP. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos - Não deixar ninguém para trás.** Perugia, Itália. 2019.

TSIMAS, S.; ZERVAKI, M. Reuse of waste water from ready-mixed concrete plants. **Management of Environmental. Quality: An International Journal.** Vol. 22, n. 1, 2011, 7-17 p. <https://doi.org/10.1108/14777831111098444>