APROVEITAMENTO DE EFLUENTE TRATADO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA AUTOADENSÁVEL

USE OF TREATED EFFLUENT FROM SEWAGE TREATMENT PLANT FOR THE PRODUCTION OF SELF-COMPACTING MORTAR

Andressa Florentino Labat Uchôas[1]; Ana Carolina Gomes Velloso[1]; Bianca Carla de Oliveira Manfredini[1]; Marcia Viana L. Martins[1]; Valquíria Claret dos Santos[1] Vander Alkmin dos Santos Ribeiro[1]

Artigo recebido em: 26/09/2026 e aceito para publicação em: 11/06/2026.
DOI: https://doi.org/10.14295/holos.v26i1.12512

Resumo: A construção civil tem buscado a racionalização e o aproveitamento dos materiais e água de modo a garantir a sustentabilidade ambiental do setor. Neste contexto, o objetivo do artigo foi investigar o emprego do efluente tratado como água de amassamento na argamassa autoadensável - AAA, assumindo como estudo de caso a avaliação do efluente da estação de Tratamento de Esgoto de Itajubá – ETE Sapucaí. A caracterização preliminar do efluente tratado neste estudo foi aderente à norma NBR 15900, com exceção da presença de odor. As substâncias químicas presentes no efluente apresentaram-se dentro dos limites estabelecidos na norma, mas sugere-se a realização de ensaios complementares dada as limitações apresentadas pelo reator UASB para remoção de DBO, nitrogênio, fósforo e patógenos. Para verificação das propriedades da argamassa autoadensável foram produzidos traços com 50% e 100% de substituição da água de amassamento por efluente tratado e um traço controle com água potável. Foram realizados os ensaios no estado fresco de mini-funil V e mini-slump e, no estado endurecido, de resistência à compressão axial. O tempo de escoamento dos traços com efluente foi superior ao traço controle e o espalhamento inferior. A resistência à compressão, aos 28 dias, se apresentou superior para ambas as concentrações do efluente ultrapassando 20% do valor do traço controle. Porém, o traço com concentração de 50% apresentou diferença significativa de dados por meio da análise ANOVA, sendo sugerido a verificação de resistência em outras idades e a realização de cura com efluente tratado para enriquecer a viabilidade de sua utilização na AAA. Com relação ao ensaio no estado endurecido da AAA, a resistência à compressão média dos corpos de prova produzidos com efluente tratado apresentou resistência superior aos corpos de prova.

Palavras-chave: Argamassa autoadensável. Água de reuso. Efluente tratado. Resistência à Compressão.

Abstract: Civil construction has sought the rationalization and use of materials and water in order to guarantee its environmental sustainability. In this context, the objective of the article is to investigate the use of the effluent treated as mixing water in self-compacting mortar assuming as a case study the Sewage Treatment plant of Itajubá - ETE Sapucaí. The physicochemical characterization of the effluent treated in this study was adherent to the NBR 15,900 standard, except for the presence of odor, as well as the comparison data obtained in manfredini's study. However, it was proposed to perform complementary post-treatment tests of the effluent given the limitations presented by the UASB reactor of the Sapucaí TEE for the removal of BOD, nitrogen, phosphorus and pathogens. To verify the properties of self-compacting mortar, traces with 50% and 100% replacement of the saming water by treated effluent and a control trace with drinking water were produced. The tests were performed in the fresh state of mini-funnel V and mini-slump and, in the hardened state, of axial compressive strength. The flow time of the traces with effluent were higher than the control trait and the lower scattering. Compressive strength at 28 days was higher for both effluent concentrations exceeding 20% of the control trait value. However, the trait with a concentration of 50% showed a significant difference in data through ANOVA analysis, and it was suggested to verify resistance at other ages and to perform cure with treated effluent to enrich the viability of its use in AAA. Regarding the test in the hardened state of autoadensable mortar, the average compressive strength of the specimens produced with treated effluent presented superior resistance to the specimens.

Keywords: Self-compacting mortar. Reuse water. Treated effluent. Compressive Strength.

[1] Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Itajubá, Minas Gerais. E-mails: andressa.uchoas@gmail.com; ana.carolina.gv@unifei.edu.br; bianca_manfredine@unifei.edu.br; marciaviana@unifei.edu.br; valquiria@unifei.edu.br; vanderalkmin@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos pilares da economia brasileira, pois gera empregos, impulsiona a indústria, fomenta investimentos nas empresas e estimula outros setores econômicos. A indústria da construção civil é uma das atividades humanas com maior impacto ambiental. Estima-se que 50% dos recursos naturais extraídos estejam diretamente ligados a essa atividade. Dado o seu papel expressivo na economia nacional, é inevitável que a construção civil também seja um dos maiores responsáveis pelos danos ambientais. Ela lidera o consumo de matérias-primas, chegando a utilizar até 50% dos recursos consumidos pela sociedade, e envolve processos de elevado consumo energético – cerca de 80% da energia necessária para construir um edifício é gasta na produção e transporte de materiais. Além disso, a construção gera poluição em quase todas as etapas, desde a extração de recursos até a produção de materiais como cimento e concreto, segundo (Vasilca *et al*., 2021).

O uso da argamassa autoadensável se correlaciona com a temática de sustentabilidade ambiental por gerar redução parcial da poluição sonora, dada a ausência de vibradores, além de diminuir de custos e prazos de execução da obra devido à maior trabalhabilidade do concreto e à necessidade de um menor número de trabalhadores.

As características exigidas dos compósitos autoadensáveis no estado fresco são alcançadas por meio de altos teores de finos e maior consumo de cimento, o que, por outro lado, contraria os princípios de sustentabilidade.

Com o objetivo de contribuir para a sustentabilidade na indústria de cimento investigaram a viabilidade técnica e econômica do concreto autoadensável com baixo consumo de cimento, (Barboza; Storch; Almeida Filho, 2020).

A quantidade de água de amassamento utilizada na indústria do concreto é da ordem de 1 bilhão de metros cúbicos por ano e, ainda, são consumidas quantidades elevadas de água na lavagem de caminhões betoneiras, bombas de concreto, lavagem de agregados e cura de concreto, segundo Varshney *et al.* (2021). Diante da crescente escassez de água, a construção civil tem buscado alternativas para reduzir esse consumo.

O reuso de água proveniente das estações de tratamento de efluentes apresenta-se com uma alternativa sustentável para suprir as demandas de água não potável no setor, contribuindo para a preservação da água de qualidade superior para usos mais nobres e redução da poluição dos corpos de água, ao diminuir o descarte de águas residuárias, conforme Varshney *et al*. (2021). Contudo, uma revisão bibliográfica realizada pelos autores sobre as características físicas e químicas de diferentes águas residuárias e seus efeitos nas propriedades do concreto revelou que as pesquisas sobre o uso de água de

reuso para a produção de concreto ainda são limitadas, apesar da ampla disponibilidade de efluentes.

Com intuito de expandir as alternativas de reuso de água na construção civil, o objetivo da pesquisa foi estudar a viabilidade de substituição da água potável utilizada para amassamento da argamassa autoadensável por efluente tratado, tendo como estudo de caso o efluente da Estação de Tratamento de Esgoto de Itajubá - ETE Sapucaí.

A NBR 15900-1 não recomenda que a água de esgoto tratado seja utilizada na produção do concreto e estabelece uma série de requisitos químicos e físicos para que a água seja aceita como água de amassamento do concreto (ABNT, 2009a). Quando esses limites não são atendidos, é necessário realizar ensaios de tempo de pega e resistência para garantir o desempenho esperado.

Zaleski, Marangoni e Vanzetto (2022) concluíram que é possível utilizar o efluente de esgoto industrial tratado por lagoas facultativas para produção de concreto sem comprometer sua qualidade, mas desde que atendam às exigências da norma da NBR 15900-1 (ABNT 2009a).

Bouaich *et al*. (2022) constatou que a resistência do concreto produzido com água de reuso atinge 90% da resistência do concreto produzido com água tratada. Esta diferença se deve à maior presença de matéria orgânica e sólidos suspensos totais na água de reuso. O autor sugere misturar as águas a fim de obter uma eficiência superior a 90%.

Assim, propôs-se analisar a qualidade da água de reuso conforme as diretrizes da NBR 15900-1 e comparar as propriedades da argamassa autoadensável produzida com a água de reuso com as da argamassa produzida com água potável (ABNT, 2009a). A partir dessa comparação pode-se mensurar a eficiência do uso do efluente tratado para produção argamassa autoadensável.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização da estação de tratamento de esgoto de Itajubá – ETE Sapucaí

A estação de tratamento de esgoto sanitário do município de Itajubá – ETE Sapucaí, está localizada no Bairro Jardim das Colinas, zona urbana do município de Itajubá, Minas Gerais.

O sistema de esgotamento sanitário é composto pela estação de tratamento, interceptores, emissários, elevatórias para reversão de esgoto sanitário. Segundo Jorge, Almeida e Covas (2021).

De acordo com a ARSAE-MG (2021), 84,6% da população é atendida com coleta de esgoto e 83,3% é atendida com tratamento de esgoto. A meta é tratar 90% do esgoto até 2033 para atingir a universalização.

A eficiência esperada da ETE Sapucaí, em termos de remoção de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), é de no mínimo 70%, e de DQO (Demanda Química de Oxigênio) é 65% (ARSAE-MG, 2021). A DBO média afluente para o período de estudo foi 563,4 mg/l e a média do efluente foi de 77,4 mg/l, que resulta numa eficiência de 86,3% acima do esperado.

A eficiência da ETE Sapucaí está relacionada diretamente ao emprego de reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Este tipo de reator anaeróbio é amplamente empregado no Brasil e prevalece em 78% das ETEs implantadas em Minas Gerais, sendo a principal razão o baixo custo de implantação (capital expenditure, CAPEX) e manutenção e operação (operational expenditure OPEX), quando comparados aos sistemas aeróbios (Chernicharo *et al*., 2018). No entanto, o Reator UASB apresenta como desvantagens a baixa eficiência de remoção de carga orgânica (65 a 75%), nutrientes (nitrogênio e fósforo) e microrganismos, e por isto carecem de uma etapa de pós-tratamento. Chernicharo *et al*. (2018) analisou 637 ETEs e verificou que 51% possuíam um sistema de pós-tratamento.

Em geral, quando se visa o reuso de água, há necessidade de adicionar tecnologias avançadas de tratamento de esgoto sanitário.

A finalidade é reduzir ainda mais os nutrientes, sólidos em suspensão, microrganismos ou outros poluentes ainda presentes, até que o efluente final atenda os parâmetros de reuso estabelecidos para o uso pretendido.

Há diversas opções de tecnologias mais avançadas, como a nano e ultrafiltração e osmose reversa, e alternativas mais simples, que utilizam materiais filtrantes (areia, carvão, etc.), coagulação-floculação e sistemas combinados de reatores biológicos de membrana – MBR (Salgot; Folch, 2018).

2.2 Avaliação dos parâmetros preliminares e físico-químicos da água de reuso

A avaliação da qualidade da água de reuso oriunda da ETE Sapucaí para a produção da argamassa autossustentável foi realizada com base nos requisitos estabelecidos pela NBR 15900 (ABNT, 2009a) parte 1, que determina os critérios para aceitação ou recusa de uma amostra de água para uso no amassamento de concreto.

As amostras de efluente tratado foram coletadas seguindo os procedimentos estabelecidos na NBR15900-2 (ABNT, 2009b) . Amostras foram coletadas tanto no período

seco quanto no úmido, com o ponto de coleta situado no poço de visita a jusante da ETE Sapucaí, antes do lançamento do efluente no corpo hídrico.

As características preliminares do efluente analisadas foram óleo ou gordura, detergentes, cor, material sólido, odor, pH e matéria orgânica. A metodologia empregada para determinação de cada parâmetro está especificada na NBR15900-3 (ABNT, 2009c).

Os parâmetros químicos analisados foram cloretos, sulfatos, álcalis. A determinação da quantidade de cloreto presente na amostra foi realizada conforme metodologia descrito por (Lipps; Braun-Howland, 2023). Para sulfatos e álcalis foram seguidas, respectivamente, a NBR15900-7 (ABNT 2009f).

Os ensaios para determinação do fosfato seguiram a metodologia conforme descrito por Lipps e Braun-Howland (2023), enquanto a determinação de Nitrato foi adotada a metodologia apresentada por (Crumpton; Isenhart; Mitchell, 1992).

Para quantificação de álcalis, nitrato, zinco e chumbo, foram seguidas as normativas: NBR15900-4, NBR15900-5, NBR15900-9 e NBR15900-10 (ABNT, 2009d, 2009e, 2009g, 2009h).

Ressalta-se que a determinação de álcalis, chumbo e zinco foi realizada somente para a primeira amostra em função da indisponibilidade de equipamentos.

2.3 Avaliação das propriedades da argamassa autoadensável (AAA)

2.3.1 Materiais e normas

Os materiais utilizados na produção da argamassa autoadensável foram cimento CP V-ARI, metacaulim e areia média. Os nomes dos ensaios, materiais e suas respectivas normas são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Materiais e normas utilizadas

Ensaios	Materiais	Normas ABNT
Massa Específica	CPV-ARI Metacaulim	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Massa Específica	Areia	NM 52 (ABNT, 2009i)
Mini-slump	Estado Fresco	(Gomes; Barros, 2009)
Funil-V		(Gomes; Barros, 2009)
Resistência à compressão	Estado Endurecido	NBR 5739 (ABNT, 2018)
Módulo de Elasticidade tangente		NBR 8522-1 (ABNT, 2021)
Resistência à tração		NBR 7222 (ABNT, 2010)

Fonte: Autor.

A dosagem da argamassa autoadensável foi realizada de acordo com a metodologia de pasta descrita por (Gomes; Barros, 2009). A proporção de água e cimento foi ajustada com base na resistência desejada, enquanto a concentração de superplastificante e de finos variou em função da quantidade de cimento empregada.

A partir da dosagem de materiais, foram confeccionados dois traços utilizando o efluente tratado, com a substituição de 100% e 50% em relação à água potável, e, posteriormente, um traço controle foi feito com 100% de água potável.

2.3.2 Ensaio no estado fresco da argamassa

Finalizado o processo de mistura da argamassa, foram realizados os ensaios de autoadensabilidade: mini-slump e mini-funil V.

O ensaio de espalhamento consistiu em posicionar a base umedecida sobre uma superfície nivelada e regular. Foram desenhadas duas circunferências de 20 cm e de 50 cm de diâmetro concêntricas em relação a base e fixado o cone umedecido na marca circular central, com apoio do peso do executor. O cone foi preenchido com argamassa e suspenso perpendicularmente em relação ao centro da base para permitir o espalhamento da argamassa. Esse espalhamento foi cronometrado até atingir a marca circular com diâmetro de 50 cm. Mediu-se diâmetro final de espalhamento (D_{final}) com base na média de dois diâmetros perpendiculares (d_1 e d_2).

O ensaio de mini-funil V formou-se pelo posicionamento do funil umedecido sobre uma superfície plana e regular, com a abertura superior nivelada horizontalmente. Com a saída fechada, fez-se o preenchimento do funil com argamassa e disposto um recipiente logo abaixo do funil.

Após 15 s foi aberta a saída e cronometrado o tempo de fluidez até que a passagem inferior estivesse visível.

Para fins de comparação, considerou-se o espalhamento entre 230 mm e 330 mm e tempo de fluidez de até 10 s, conforme os valores encontrados por (Mendes; Bauer; Silva, 2017). Com intuito de se ter um valor mínimo para o tempo de fluidez, tomou-se a resolução de 3,5 s (Gomes; Barros, 2009). Logo após os ensaios no estado fresco, foram moldados cinco corpos de prova cilíndricos com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura para cada proporção de efluente e água potável. A moldagem e cura dos corpos de prova seguiram as normas vigentes.

2.3.3 Ensaio no estado endurecido da argamassa

A determinação da resistência à compressão do cimento Portland foi realizada de acordo com a NBR 5739, para corpos de prova de 28 dias (ABNT, 2018). O ensaio de compressão deve ser realizado com tolerância de 24 horas a partir da idade especificada.

Conforme a NBR 6118 o módulo de elasticidade inicial (Eci) pode ser estimado usando a Expressão 1 para fck entre 20 MPa e 50 Mpa (ABNT, 2023).

$$Eci = \propto_E .5600.\sqrt{fck} \quad (1)$$

Onde: $\propto_E$ = 0,7 para arenito.

O cálculo da resistência à tração (fct,m) também foi realizado a partir dos valores de resistência à compressão (fc) utilizando a mesma norma.

2.3.4 Teste de normalidade e análise de variância

Para analisar os resultados dos ensaios de resistência de cada concentração de efluente e água potável, foi realizada a análise de normalidade das distribuições de frequência utilizando o suplemento Action do Microsoft Excel 2021. Com esse suplemento, foi aplicado o teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov e obtido o valor da estatística Dn e o valor-p para cada grupo de amostras.

Para avaliar a resistência à compressão da argamassa autoadensável aos 28 dias, com água de amassamento com as proporções de 50% e 100% de efluente tratado e 100% de água potável, empregou-se a análise estatística ANOVA (análise de variância).

A aplicação da ANOVA foi empregada para verificar se as médias das resistências à compressão são iguais ou diferentes, considerando duas hipóteses: a hipótese nula (H_0) e a alternativa (H_1).

Para verificação das hipóteses foi calculada a razão Fisher (F) entre as variáveis e verificado se o valor obtido foi superior ou inferior a F crítico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Comparativo entre amostra de efluente tratado e os requisitos de qualidade estabelecidos na ABNT NBR 15900:2009

Na avaliação preliminar da amostra da água de reuso, com o objetivo de usá-la como água de amassamento da argamassa autoadensável, não houve identificação de

espuma formada, validando a ausência de detergentes, assim como não se observou indícios de óleo ou gordura. Em relação ao odor, pôde ser identificado um odor sutil em relação à água potável.

O tom amarelo claro apresentado na amostra no período seco e verde claro no período úmido podem ser atribuídos a presença de ácidos húmicos e fúlvicos, que são compostos naturais difíceis de degradar por processos biológicos (Moravia *et al*., 2021).

O pH do efluente após o tratamento ficou próximo da neutralidade, com valores de 6,93±0,12 no período seco e 7,07± 0,16 no período úmido, e dentro do requisito da NBR 15900-1, (pH ≥ 5) (ABNT, 2009a).

Estes valores indicam um equilíbrio entre as etapas de conversão de matéria orgânica no reator anaeróbio, pois a produção excessiva de ácidos graxos pode levar a acidificação do meio e inibir a produção de metano (Neves *et al.*, 2019).

Çomak (2018) observou que a água com pH entre 6 e 8 e sem material orgânico é adequada para amassamento de concreto, enquanto águas com valores de pH abaixo de 6 ou acima de 8 interferem nas características do concreto.

O maior valor de sólidos encontrado nas amostras foi de 240 mg/l, estando dentro do limite permitido pela NBR15900-3, pois a presença de sólidos aceitável é até 50.000 mg/l (ABNT, 2009c).

Uma concentração elevada de sólidos no efluente final do reator UASB pode indicar irregularidades operacionais, como arraste de partículas ou excesso de lodo, resultando em aumento indesejado de DBO e DQO no efluente tratado (Neves *et al*., 2019).

É importante destacar que níveis elevados de sólidos em suspensão na água de amassamento podem comprometer a resistência do concreto, pois o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) pode se deteriorar, enfraquecendo a estrutura (Almeida *et al.*, 2024). Varshney *et al*. (2021) observaram que a presença de sólidos em águas residuais reduz o valor de abatimento do concreto fresco.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos da análise química e os respectivos limites de tolerância estabelecidos pela NBR15900-9 (ABNT, 2009g).

Observa-se na Tabela 2 uma aproximação dos resultados quando comparado os valores de Nitrato nas amostras no período seco e úmido, com diferença de 11,76%. Há uma diferença de aproximadamente 22% em relação ao Fosfato e 14% quanto a Cloretos e Sulfatos.

Tabela 2 - Resultados da análise físico-química das amostras do efluente tratado

Parâmetro	Requisito (NBR 15900)	Resultado da análise da amostra		
		Período úmido	Período seco	Desvio padrão
Cloretos (mg/L)	Concreto protendido ou graute máximo 500; concreto armado máximo 1.000; Concreto simples (sem armadura) máximo 4.500	49,7	42,6	46,2±3,6
Sulfatos (mg/l)	Máximo 2.000	20,4	17,5	19,0±1,5
Álcalis Sódio (mg/l)	Máximo 1.500	-	9,7	-
Álcalis Potássio (mg/l)	Máximo 1.500	-	2	-
Fosfatos (mg/l)	Máximo 100	1,8	1,4	19,0±1,5
Nitratos (mg/l)	Máximo 500	1,7	1,9	1,8±0,2
Chumbo (mg/l)	Máximo 100	-	0,24	-
Zinco (mg/l)	Máximo 100	-	0,06	-

Na Tabela 2 atenta-se, porém, que não foi possível avaliar a quantidade presente de álcalis, chumbo, zinco e açúcares presentes na amostra de efluente no período úmido dada a indisponibilidade do equipamento Espectrofotômetro, reagentes e outros materiais necessários para os ensaios. A ausência de dados analíticos para álcalis, metais pesados e açúcares nas amostras do período úmido compromete parcialmente a interpretação completa dos mecanismos físico-químicos envolvidos nos resultados observados. Isso limita a robustez das hipóteses sobre a atuação pozolânica, a aceleração da hidratação ou potenciais efeitos deletérios, sendo necessário reforçar a recomendação de análises complementares para a validação dos resultados e avaliação de riscos a longo prazo.

Conforme estabelece a NBR 15900-1, os ensaios de tempo de pega (inicial e final) e de resistência à compressão devem ser realizados apenas nas seguintes situações: Quando não forem efetuadas análises químicas para identificação de substâncias potencialmente prejudiciais e quando os resultados dessas análises excederem os limites máximos indicados na Tabela 3 da norma (ABNT, 2009a).

No presente estudo, foram conduzidas análises físico-químicas para os seguintes parâmetros: cloretos, sulfatos, álcalis (sódio e potássio), fosfatos, nitratos, chumbo e zinco. Os resultados obtidos, apresentados na Tabela 2, demonstram que todos os valores estão dentro dos limites estabelecidos pela NBR 15900-1, tanto no período seco quanto no úmido (ABNT, 2009a).

Dessa forma, não se fez tecnicamente necessária a realização dos ensaios de tempo de pega e resistência à compressão, uma vez que: Todos os parâmetros analisados atenderam integralmente aos limites estipulados na Tabela 3 da norma e a própria norma prevê que tais ensaios são exigidos apenas na ausência de análises químicas ou na ocorrência de não conformidades. Varshney *et al.* (2021) investigaram que o cloreto causa diversos problemas como a lixiviação do hidróxido de cálcio, o que leva à diminuição das propriedades mecânicas do concreto. Com relação ao sulfato, Varshney *et al*. (2021) verificaram que provoca a formação de cristais de etringita inadequados à resistência do concreto.

Além disto, o sulfato pode reagir com a Portlandita (hidróxido de cálcio) presente no concreto, levando a descalcificação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Esse processo resulta em uma expansão do material, o que pode causar fissuras, desintegração e, consequentemente, uma perda significativa de resistência estrutural (Silva *et al*., 2022).

Nikhil, Sushma e Gopinath (2014) estudaram o impacto da qualidade da água na resistência do concreto e verificaram que quando a água contém grandes quantidades de cloretos, como a água do mar, o tempo de pega do cimento acelera ligeiramente, pois a água do mar tende a causar umidade persistente e eflorescência superficial.

De modo geral, as impurezas contidas na água podem interferir no tempo de pega do cimento, afetando negativamente a resistência do concreto ou causar manchas em sua superfície e também levar à corrosão (Nikhil; Sushma; Gopinath, 2014).

De modo geral, os parâmetros físico-químicos analisados atenderam aos limites estabelecidos pela norma, com exceção do odor.

A presença de odor no efluente tratado está geralmente relacionada à ocorrência de compostos voláteis, como o gás sulfídrico (H_2S), comumente encontrados em estações de tratamento de esgoto que utilizam processos anaeróbios, como é o caso deste estudo.

Tal característica pode limitar seu uso como água de amassamento em materiais cimentícios. Para mitigar esse efeito, recomenda-se a aplicação de tratamentos complementares, como aeração, oxidação química ou filtração com carvão ativado, visando à remoção de substâncias odoríferas e ao atendimento das exigências normativas. Ainda assim, os resultados obtidos reforçam a viabilidade do uso do efluente tratado na produção da argamassa autoadensável.

Brandão *et al.* (2018) analisaram a composição química da água de reuso proveniente da ETE Guadalajara e observaram resultados semelhantes aos obtidos neste estudo. A água analisada apresentou total conformidade com os parâmetros estabelecidos pela NBR 15900-1 (ABNT, 2009a).

Caracterização dos materiais e resultados dos ensaios com argamassa autoadensável no estado fresco. Os resultados para massa específica do cimento CPV, metacaulim e areia foram: 3,04 g/cm³, 2,56 g/cm³, 2,58 g/cm³ respectivamente e para a absorção da areia o valor de 0,37%.

O traço utilizado foi apresentado na Tabela 3, com 1323 g de cimento utilizando água potável e efluente tratado (Silva *et al*., 2022).

Tabela 3 - Traços com taxas de substituição de 100% e 50% da Argamassa

Material	**Traço efluente 50%**	**Traço efluente 100%**	**Traço controle**
Cimento (%)	1	1	1
Metacaulim (%)	0,05	0,05	0,05
Areia (%)	1,83	1,83	1,83
Superplastificante (%)	0,03	0,03	0,03
Água potável (%)	0,18	-	0,36
Efluente tratado (%)	0,18	0,36	-

Seguindo a metodologia expressa anteriormente, foram efetuadas as devidas misturas para cada traço com efluente tratado e o traço controle, posteriormente foram sucedidos os ensaios de mini-funil V e mini-Slump e os corpos de prova foram moldados com os materiais dispostos conforme o planejado.

Na Tabela 4 estão expostos os resultados dos ensaios de avaliação do autoadensabilidade: mini-slump e mini-funil-V. Para o mini-slump foram retirados 3 diâmetros de cada traço.

Tabela 4 - Espalhamento no ensaio mini-slump e mini-funil-V das argamassas com diferentes teores de efluente tratado

Medida	Traço efluente 50%	Traço efluente 100%	Traço controle	Limites
A (mm)	305	305	260	230 a 330 mm
B (mm)	308	298	270	
C (mm)	313	302	270	
Média (mm)	309	302	267	
Medida	Traço efluente 50%	Traço efluente 100%	Traço controle	Limites
Tempo (s)	9,6	8,6	7,8	3,5 e 10 s

Fonte: Primária (2022).

Nota-se que a presença de efluente tratado garantiu uma adequação ao intervalo máximo de tolerância proposto, enquanto a argamassa produzida integralmente com água potável apresentou valor superior à faixa considerada utilizável. Observa-se que os valores da Tabela 4 estão dentro dos valores limites de espalhamento no ensaio mini-slump.

Observa-se que o escoamento no ensaio mini funil-V das argamassas com diferentes teores está dentro do intervalo de tempo esperado.

3.2 Resultados dos ensaios com argamassa autoadensável no estado endurecido

Conduzindo-se a metodologia apresentada anteriormente, foram obtidos os valores de resistência à compressão (fck) para a argamassa autoadensável com 28 dias, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados de resistência à compressão das argamassas com diferentes teores de efluente tratado

Corpo de prova	Traço efluente 50% (MPa)	Traço efluente 100% (MPa)	Traço controle (MPa)
1	47,66	64,37	32,36
2	41,09	32,10	51,15
3	65,33	71,45	38,53
4	51,16	60,75	51,65
5	63,52	50,77	45,63
Média	53,76	55,89	43,87

Fonte: Primária (2022).

Analisando os resultados na Tabela 5, verifica-se que o traço substituindo 50% da água pelo efluente o valor de resistência a compressão ficou 22,50% maior e o de 100% uma porcentagem de 27,40% quando comparado ao traço controle.

A ação pozolânica refere-se à reação química entre materiais ricos em sílica (SiO_2) e/ou alumina (Al_2O_3), geralmente em forma amorfa, com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) liberado durante a hidratação do cimento. Essa reação forma compostos adicionais, principalmente silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que é o principal responsável pela resistência mecânica nas matrizes cimentícias. Os lodos provenientes de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) contêm uma variedade de resíduos orgânicos e inorgânicos. Quando esse lodo é termicamente ativado (ou seja, submetido a tratamento térmico como calcinação), parte da matéria orgânica é eliminada, e os componentes inorgânicos (principalmente sílica, alumina e ferro) tornam-se mais reativos — passando, em muitos casos, a apresentar comportamento pozolânico. Ou seja, o lodo calcinado passa a se comportar como uma pozolana artificial, reagindo com o $Ca(OH)_2$ para formar mais C-S-H, o que: Preenche vazios na matriz, tornando-a mais densa; aumenta a resistência à compressão; melhora a durabilidade da argamassa.

De maneira semelhante, Brandão *et al*. (2018) verificaram variações positivas na resistência à compressão do concreto produzido com água de reuso, em comparação

àquele preparado com água destilada. Os acréscimos observados foram de 2%, 3% e 2% nas idades de 3, 28 e 91 dias, respectivamente, enquanto na idade de 7 dias não houve diferença significativa. Além disso, constatou-se aumento progressivo da resistência ao longo de todas as idades analisadas, indicando bom desempenho do concreto mesmo com a substituição da água convencional.

Adotou-se a norma NBR 5739, a qual estabelece o procedimento para a avaliação estatística dos resultados — apresentados na Tabela 6 — no que se refere à dispersão decorrente das variabilidades inerentes às operações do ensaio (ABNT, 2018).

Conforme a norma citada a amplitude é a diferença entre o maior e o menor resultado encontrado que seria: efluente 50% = 24,24; efluente 100%= 39,35; controle = 19,19.

A estimativa do desvio padrão dentro do ensaio é dado pela Expressão 2:

$$Se = \sum A/d2.n \quad (02)$$

Onde:

Se = estimativa do desvio padrão dentro do ensaio;

A = média das amplitudes,

d2 = coeficiente dependendo do número de ensaios, para este caso com 5 ensaios 2,326.

n = número de amostra

O Se encontrado foi de 2,37 MPa, o cálculo do coeficiente de variação dentro do ensaio (cve) segue a Expressão 3:

$$Cve = \frac{Se}{fcm} x\ 100 \quad (03)$$

Onde:

Cve = coeficiente de variação dentro do ensaio,

Fcm = médias de resistência à compressão.

Os resultados do *cve* para os três traços realizados podem ser vistos na Tabela 6, juntamente com a sua classificação conforme a norma:

Tabela 6 - Resultados dos coeficientes de variação dentro do ensaio de resistência à compressão das argamassas com diferentes teores de efluente tratado

Traços	*Se*	*Fcm*	*cve*	NBR5739:2018
Efluente 50%	2,38	53,75	4,42	Nível 3 – Bom
Efluente 100%	2,38	55,89	4,25	Nível 3 – Bom
Controle	2,38	43,88	5,42	Nível 4 – Razoável

Fonte: Primária (2022).

A NBR 5739 traz a classificação do nível 1 a 5 (excelente ao deficiente) com a variação do cv de ≤3; 3<cve≤4; 4<cve≤5; 5<cve≤6 e cve≤6, sendo o último o deficiente (ABNT, 2018).

Nos três traços realizados, o ensaio atingiu a classificação bom para as misturas com efluente e razoável para o controle.

A partir dos resultados de resistência à compressão, foram calculados os valores do módulo de elasticidade tangente (Eci) e da resistência à tração (fct,m), de acordo com a NBR 6118 conforme mostrados nas Tabelas 7 e 8 (ABNT, 2023).

Tabela 7 - Resultados de módulo de elasticidade tangente das argamassas com diferentes teores de efluente tratado aos 28 dias

Corpo de prova	Traço efluente 50%	Traço efluente 100%	Traço controle
1	27,06	31,45	22,30
2	25,13	22,21	28,04
3	31,68	33,14	24,33
4	28,04	30,55	28,17
5	31,24	27,93	26,48
Média	28,63	29,05	25,86

Fonte: Primária (2022).

Tabela 8 - Resultados de resistência à tração das argamassas com diferentes teores de efluente tratado aos 28 dias

Corpo de prova	Traço efluente 50%	Traço efluente 100%	Traço controle
1	3,94	4,43	3,05
2	3,57	3,03	4,13
3	4,46	4,62	3,42
4	4,13	4,32	4,16
5	4,40	4,11	3,83
Média	4,10	4,10	3,72

Fonte: Primária (2022).

Varshney *et al.* (2021) analisaram os efeitos físicos e químicos das águas residuais, propriedades reológicas, propriedades endurecidas e durabilidade do concreto. Os autores concluíram que o uso de água de lavagem resultou na redução da trabalhabilidade do concreto fresco, mas aumentou sua resistência à compressão assim como encontrado neste trabalho.

De acordo Varshney *et al*. (2021), o efluente proveniente de estações de tratamento de esgoto pode ser utilizado de forma específica, conforme o uso pretendido. O uso do efluente aumenta o tempo de pega da argamassa e a resistência à compressão, quando comparada a argamassa produzida com água potável.

3.3 Resultados do teste de normalidade e análise de variância

O teste Kolgomorov-Smirnov (KS) busca avaliar a distância entre uma distribuição conhecida e uma distribuição que foi observada empiricamente. O valor de p é a probabilidade de se obter uma estatística de teste que seja pelo menos tão extrema quanto o valor que é calculado a partir da amostra, quando os dados são normais.

Por meio do teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov nota-se que o valor-p obtido a partir da resistência à compressão para cada concentração de efluente tratado e água potável apresenta-se superior a 0,05 (5%), então não se rejeita a hipótese nula, ou seja, o conjunto de dados apresenta distribuição normal.

Os resultados do teste de normalidade (valor-p) para Traço com 50% e100 de efluente % e Traço controle foram: 0,55; 0,55 e 0,67, respectivamente.

Com intuito de avaliar a significância das diferenças entre os resultados obtidos com as distintas proporções de efluente tratado e a água potável utilizada na água de amassamento, foi realizada uma análise estatística ANOVA assumindo a resistência à compressão como variável resposta e a água de amassamento como fator de controle, conforme apresentado na Tabela 9 e 10.

Tabela 9 - ANOVA da resistência à compressão entre concentração de efluente de 50% e controle

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	4118,40	5	823,679	8,4477	0,0176	5,0503
Colunas	199,77	1	199,773	2,0489	0,2117	6,6079
Erro	487,51	5	97,503			
Total	4805,68	11				

Fonte: Primária (2022).

Tabela 10 - ANOVA da resistência à compressão entre concentração de efluente de 100% e controle

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	4341,88	5	868,38	4,3451	0,0663	5,0503
Colunas	291,27	1	291,27	1,4575	0,2813	6,6079
Erro	999,25	5	199,85			
Total	5632,40	11				

Fonte: Primária (2022).

Considerando o valor de F calculado inferior ao F crítico para a resistência à compressão, quando analisadas o traço com concentração de efluente igual a 100% e traço controle, pôde-se constatar que não houve diferença significativa entre elas referente a propriedade mecânica resistência à compressão. Porém o traço de concentração de efluente igual a 50% apresenta diferença significativa em relação à resistência à compressão quando comparado ao traço controle.

4 CONCLUSÃO

O cenário de escassez dos recursos hídricos e a crescente necessidade de reduzir o consumo de água potável na construção civil tornam o uso de efluente tratado como água de amassamento da argamassa ou concreto uma proposta relevante.

Essa prática pode incentivar as autoridades governamentais a estabelecerem uma legislação específica que assegure a qualidade sanitária e físico-químicas e biológica da água de reuso, além de promover a instalação de unidades de tratamento de efluentes mais avançadas para otimizar a reciclagem de água.

A análise da composição físico-química da água de reuso da ETE Sapucaí apresentou conformidade com os limites de tolerância da NBR 15900-1 evidenciando a aderência aos parâmetros normativos (ABNT, 2009a).

Os traços de argamassa autoadensável elaborados com 50% e 100% de efluente tratado apresentaram pouca diferença, tanto no estado fresco quanto endurecido, em relação ao traço controle produzido com água potável.

Os dados referentes à resistência à compressão foram submetidos a análises estatísticas, demonstrando que tanto os traços com efluente quanto o traço controle apresentaram uma distribuição normal pelo teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov. Contudo, a análise de variância ANOVA indicou uma diferença significativa na resistência à compressão do traço com 50% de efluente tratado em comparação ao traço controle.

Para pesquisas futuras, sugere-se a realização de ensaios que considerem a implementação de unidades de tratamento na estação de tratamento de esgoto existente, com a finalidade de assegurar que o efluente final apresente características qualitativas ainda mais adequadas para o reuso.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (Copasa) pelo fornecimento do efluente.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 15900-1**: água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

ABNT, **NBR 15900-2**: água para amassamento do concreto - parte 2: coleta de amostras de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

ABNT. **NBR 15900-3**: água para amassamento do 'concreto - parte 3: avaliação preliminar. Rio de Janeiro: ABNT, 2009c.

ABNT. **NBR 15900-4**: água para amassamento do concreto - parte 4: análise química - determinação de zinco solúvel em água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009d.

ABNT. **NBR 15900-5**. água para amassamento do concreto parte 5: análise química - determinação de chumbo solúvel em água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009e.

ABNT. **NBR 15900-7**: água para amassamento do concreto - parte 7: análise química - determinação de sulfato solúvel em água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009f.

ABNT **NBR 15900-9**: água para amassamento do concreto - parte 9: análise química - determinação de álcalis solúveis em água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009g.

ABNT. **NBR 15900-10:** água para amassamento do concreto - parte 10: Análise química - Determinação de nitrato solúvel em água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009h.

ABNT. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó — determinação da massa específica. Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 2017.

ABNT. **NBR 5739:** concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto, procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ABNT. **NBR 7222:** concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ABNT. **NBR 8522-1:** concreto endurecido - determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - parte 1: módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ABNT. **NBR NM 52:** agregado miudo - massa específica e massa especifica aparente. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009i.

ABNT. **NBR 5739**: concreto - ensaio de compressao de corpos-de-prova cilindricos. Rio de Janeiro: ANBT, 2018.

ALMEIDA, J. B. P. A. de; BEZERRA, J. da S.; LAFAYETTE, K. P. V.; AMORIM, E. S.; SILVA, T. A. da; LIMA, H. S. de A.; SILVA, A. R. A. da; TORRES, T. L. Análise da água utilizada para amassamento de concreto em obras da cidade do Recife-PE Analysis of water used for mixing concrete in works in the city of Recife-PE Análisis del agua utilizada para el amasado de concreto en obras de la ciudad de Recife-PE. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, [*s. l.*], v. 17, n. 13, p. 1–19, 2024. DOI: 10.55905/revconv.17n.13-153.

ARSAE-MG. **Panorama da prestação dos serviços de abastecimento de água e de esgotamento sanitário no município de Belo Horizonte (Copasa)**. Belo Horizonte, 2021. Disponível em: https://www.arsae.mg.gov.br/. Acesso em: 23 set. 2024.

BARBOZA, L. S.; STORCH, I. S.; ALMEIDA FILHO, F. M. de. Concreto autoadensável ecoeficiente com baixo consumo de cimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 59–71, 2020. DOI: 10.1590/s1678-86212020000200387.

BOUAICH, F. Z.; MAHERZI, W.; EL-HAJJAJI, F.; ABRIAK, N.-E.; BENZERZOUR, M.; TALEB, M.; RAIS, Z. Reuse of treated wastewater and non-potable groundwater in the manufacture of concrete: major challenge of environmental preservation. **Environmental Science and Pollution Research**, [*s. l.*], v. 29, n. 1, p. 146–157, 2022. DOI: 10.1007/s11356-021-15561-3.

BRANDÃO, A. S.; CABRAL, A. E. B.; DEUS, Ê. P.; SILVA, W. K. D.; SILVA, W. M. M. Estudo de caso: uso de água recuperada na construção civil. **Revista DAE**, [*s. l.*], v. 67, n. 217, p. 34–46, 2018.

CHERNICHARO, C. A. de L.; RIBEIRO, T. B.; GARCIA, G. B.; LERMONTOV, A.; PLATZER, C. J.; POSSETTI, G. R. C.; ROSSETO, M. A. L. L. R. Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. **Revista DAE**, [*s. l.*], v. 66, n. 213, p. 5–19, 2018. DOI: 10.4322/dae.2018.028.

ÇOMAK, B. Effects of use of alkaline mixing waters on engineering properties of cement mortars. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, [*s. l.*], v. 22, p. 736–754, 2018. Disponível em: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:138120048.

CRUMPTON, W. G.; ISENHART, T. M.; MITCHELL, P. D. Nitrate and organic N analyses with second-derivative spectroscopy. **Limnology and Oceanography**, [*s. l.*], v. 37, n. 4, p. 907–913, 1992. DOI: 10.4319/lo.1992.37.4.0907.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. 1. ed. São Paulo: Editora PINI, 2009.

JORGE, C.; ALMEIDA, M. do C.; COVAS, D. Energy Balance in Wastewater Systems with Energy Recovery: A Portuguese Case Study. **Infrastructures**, [*s. l.*], v. 6, n. 10, 2021. DOI: 10.3390/infrastructures6100141. Disponível em: https://www.mdpi.com/2412-3811/6/10/141.

LIPPS, W. C.; BRAUN-HOWLAND, E. B.; BAXTER, T. E. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 24. ed. Washington: APHA, 2022.

MENDES, M.; BAUER, E.; SILVA, F. Avaliação dos parâmetros de autoadensabilidade e de reologia do concreto autoadensável Evaluation of the workability and rheology parameters of self-compacting concrete. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 4, 2017. DOI: 10.1590/S1517-707620170004.0212.

MORAVIA, W. G.; MOREIRA, V. R.; LEBRON, Y. A. R.; LANGE, L. C.; AMARAL, M. C. S. Influence of humic substances on the landfill leachate biodegradability with a focus on temporal seasonality. **Water Science and Technology**, [*s. l.*], v. 84, n. 12, p. 3780–3790, 2021. DOI: 10.2166/wst.2021.499.

NBS. **BS 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. Newcastle upon Tyne: NBS, 2002.

NEVES, A. P. N. das; FERREIRA, D. da S.; CASTRO, D. A.; CAVALLINI, G. S. Avaliação da eficiência de remoção de matéria orgânica em efluente sanitário em função da idade do lodo de reator UASB: um estudo de caso. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, [*s. l.*], v. 7, n. 4, p. 449–456, 2019. DOI: 10.20873/jbb.uft.cemaf.v7n4.neves.

NIKHIL, T.R; SUSHMA. R.; GOPINATH, S.M.; SHANTHAPP, B. C. Impact of Water Quality on Strength Properties of Concrete. **Indian Journal Of Applied Research**, [*s. l.*], n. 4, n. 7, p. 197–199, Jul. 2014.

SALGOT, Miquel; FOLCH, Montserrat. Wastewater treatment and water reuse. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, [*s. l.*], v. 2, p. 64–74, 2018. DOI: 10.1016/j.coesh.2018.03.005.

SILVA, A. P. T. da; SILVA, L. R. R. da; RIBEIRO, V. A. dos S.; MELO, M. de L. N. M.; GONÇALVES, P. C.; MARTINS, M. V. L.; SANTOS, V. C.; SOUZA, M. H. B. de. Use of water treatment sludge in Self-Compacting Mortar (SCM). **Research, Society and Development**, [*s. l.*], v. 11, n. 2, p. e0111225112, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i2.25112.

VARSHNEY, H.; KHAN, R. A.; KHAN, I. K. Sustainable use of different wastewater in concrete construction: A review. **Journal of Building Engineering**, [*s. l.*], v. 41, p. 102411, 2021. a. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102411.

VASILCA, I.-S.; NEN, M.; CHIVU, O.; RADU, V.; SIMION, C.-P.; MARINESCU, N. The Management of Environmental Resources in the Construction Sector: An Empirical Model. **Energies**, [*s. l.*], v. 14, n. 9, 2021. DOI: 10.3390/en14092489.

ZALESKI, A.; MARANGONI, B.; VANZETTO, S.C. Comportamento mecânico e de durabilidade de concretos produzidos com efluente industrial tratado e bruto. **Engenharia Civil UM**, Guimarães, n. 61, p. 44–54, 2022. DOI: 10.21814/ecum.4153.