

SUBMETIDO 22/08/2021

APROVADO 01/09/2021

PUBLICADO ON-LINE 01/11/2021

PUBLICADO 30/06/2023

EDITOR ASSOCIADO
André Luís Christoforo

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6294>

ARTIGO ORIGINAL

Carbonatação e penetração de cloretos em compósitos cimentícios com incorporação de lodo de estação de tratamento de água

 Thiago Alex Hemkemeier ^[1]

 Mariana de Almeida Motta Rezende ^[2]

 Carla Signori Dal Ri ^[3]

 Almir Sales ^{[4]*}

[1] thiagolexutfr@hotmail.com

[2] marianamottarezende@gmail.com

[3] csdalri@gmail.com

[4] almir@ufscar.br

Departamento de Engenharia
Civil, Universidade Federal de São
Carlos (UFSCar), Brasil

RESUMO: O descarte inadequado de lodo de estação de tratamento de água (LETA) em corpos d'água é um problema ambiental que preocupa os gestores de cerca de 7.500 estações de tratamento de água das cidades brasileiras. No presente artigo o LETA foi tratado em laboratório e utilizado em substituição parcial à areia natural na proporção de 3% em massa para produzir um novo compósito cimentício. Esse compósito cimentício foi avaliado em relação a alguns requisitos de durabilidade (carbonatação e penetração de cloretos). Para avaliar a profundidade de carbonatação e a penetração de cloretos nos compósitos cimentícios, foi utilizado o método colorimétrico, com solução indicadora da penetração de gás carbônico e solução de cloreto de sódio, respectivamente. Em relação a um compósito cimentício convencional (sem LETA), o compósito com LETA apresentou comportamento similar, podendo ser recomendado para fins estruturais no que se refere à profundidade de carbonatação e à penetração de cloretos.

Palavras-chave: carbonatação; concreto; corrosão; lodo de estação de tratamento de água; penetração de cloretos.

Carbonation and chloride penetration in cementitious composite with water treatment sludge

ABSTRACT: The inadequate disposal of water treatment sludge (WTS) in water bodies is an environmental problem that concerns the managers of around 7,500 water treatment plants in Brazilian towns. In order to produce a new cementitious composite, WTS was treated in laboratory and used as a partial replacement for natural sand in the proportion of 3% by mass. That durability requirements (carbonation and chloride penetration). To evaluate the carbonation depth and the penetration of chlorides in the cementitious

*Autor para correspondência.

composites, the colorimetric method was used with a solution indicating the penetration of carbon dioxide and a sodium chloride solution, respectively. The behavior of composite with WTS was shown to be similar to a conventional cementitious composite (without WTS), so it can be recommended for structural purposes in terms of carbonation depth and chloride penetration.

Keywords: carbonation; chloride penetration; concrete; corrosion; water treatment sludge.

1 Introdução

A disposição inadequada de lodo de estação de tratamento de água (LETA) pode promover mudanças danosas ao ambiente. Esse lodo é um resíduo resultante do processo de tratamento da água bruta de rios e córregos. O Brasil possui cerca de 7.500 estações de tratamento de água (ETA) e todas produzem resíduos em seu processo de purificação da água para o consumo humano (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2013). Em países em desenvolvimento, os resíduos de tratamento de água geralmente são descartados nos mesmos rios e córregos que fornecem água para o tratamento, pois não há tecnologia adequada para sua reciclagem (SALES; SOUZA, 2009). A maior parte dos resíduos de ETA consiste em lodo retido nos decantadores, e a busca por estratégias para sua destinação correta é um desafio para os gestores das ETA.

O LETA é um resíduo composto de matérias orgânicas e inorgânicas sólidas, líquidas e gasosas, com características físicas, químicas e biológicas variadas. Entre as alterações prejudiciais ao meio ambiente causadas pelo descarte irregular de LETA estão a redução do oxigênio dissolvido e o aumento da concentração de alumínio e outros metais nos cursos d'água receptores, causando grande impacto ao ambiente (ESHTIAGHI *et al.*, 2013).

A recuperação do alumínio presente no lodo e sua utilização no tratamento de efluentes domésticos (SENGUPTA; BO, 1992), o espalhamento do lodo no solo para fins agrícolas e a recuperação de áreas degradadas (CUCINA *et al.*, 2019), a aplicação de lamas como material cimentício suplementar (GODOY *et al.*, 2019) e como argamassa hidráulica (GONZÁLEZ *et al.*, 2020) são alternativas para a destinação correta de resíduos provenientes de ETA.

Com a possibilidade de utilização de LETA em incorporação a compósitos cimentícios será possível agregar valor a esse resíduo, todavia há necessidade de verificar a durabilidade desses compósitos. O problema mais recorrente na construção civil no que se refere ao concreto armado é a corrosão das armaduras. Em média 4% do PIB de países industrializados são desembolsados com a manutenção de materiais deteriorados pela corrosão (FRANÇOIS; LAURENS; DEBY, 2018). Como a corrosão de armaduras é a principal causa de degradação das estruturas de concreto armado (RIBEIRO *et al.*, 2018), ela colabora com uma parcela significativa desse percentual.

As principais causas da corrosão de armaduras são a carbonatação e a penetração de cloretos nos compósitos cimentícios. A carbonatação é uma reação físico-química na qual o gás carbônico (CO₂), presente na atmosfera, reage com o hidróxido de cálcio, presente no compósito cimentício, em meio aquoso, formando água e carbonato de cálcio (CaCO₃) (Figura 1a). Embora o preenchimento dos poros dos compósitos cimentícios com CaCO₃ aumente sua resistência mecânica, a formação desse sal ocorre com o consumo dos álcalis da pasta de cimento, fazendo com que o pH da solução de poros do concreto se reduza para um pH em torno de 9. Como a formação da camada

passivadora das armaduras depende do pH altamente alcalino (12,5 a 13), a carbonatação possibilita a despassivação do aço, favorecendo o início do processo corrosivo no metal.

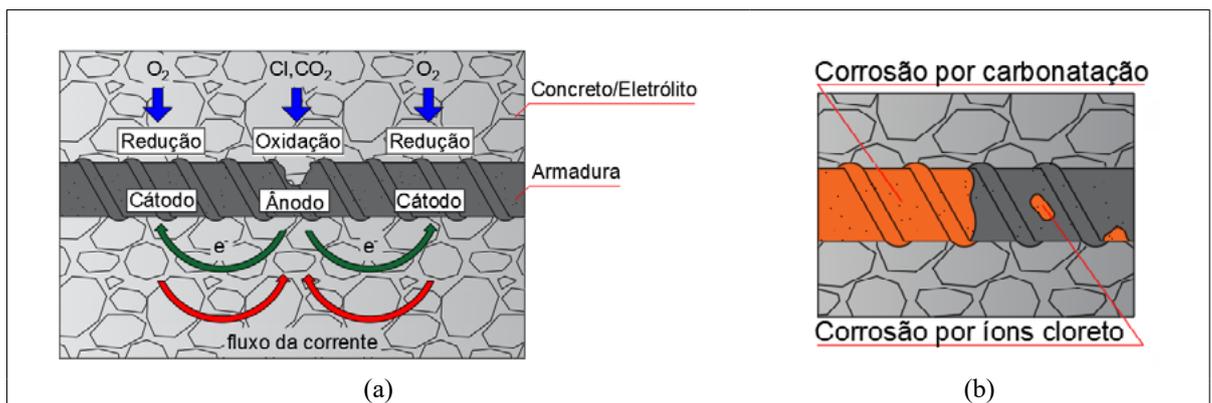
A corrosão por carbonatação é um fenômeno que se manifesta de maneira generalizada (Figura 1b), podendo corroer uma grande área da armaduras, com uma corrosão mais superficial e não tão agressiva às barras de aço quanto a corrosão por íons cloreto (RIBEIRO *et al.*, 2018). Salienta-se que a probabilidade de ocorrência de corrosão em estruturas de concreto armado aumenta com a profundidade de carbonatação, principalmente em ambientes urbanos.

Quando ocorre penetração de cloretos (Cl^-) – devido à presença de maresia, por exemplo –, esses íons podem alcançar a região das armaduras e, na forma de íons livres, desencadear reações químicas. Essas reações entre os cloretos e o metal resultam na corrosão do aço pela dissolução de ferro e na formação de 12 vezes mais Cl^- , colaborando para a continuação da reação. Essa corrosão é localizada, ocorre apenas onde se encontram íons livres de cloro, rompendo o filme passivador do aço em uma região pontual e culminando na corrosão por pites, uma corrosão em pequena área, podendo ser profunda, conforme a Figura 1b. Dessa forma, a corrosão por pites é mais preocupante do que a corrosão por carbonatação porque favorece a perda de seção da armadura (RIBEIRO *et al.*, 2018). Salienta-se que a probabilidade de ocorrência de corrosão em estruturas de concreto armado aumenta com a penetração de cloretos, principalmente em ambientes próximos à orla marítima.

Figura 1 ▼

Processo de corrosão de armaduras por carbonatação e penetração de cloretos (a) e os tipos de corrosão associados aos fenômenos (b).

Fonte: adaptado de Hemkemeier (2021, p.29)



Além do problema ambiental do descarte inadequado de LETA e da corrosão de armaduras nos concretos, outro grande problema na engenharia civil foi também considerado no presente artigo: a areia e o cascalho são os materiais mais extraídos no mundo (TORRES *et al.*, 2017), causando escassez desses recursos naturais no mercado e um aumento crescente no preço. Por exemplo, no Brasil, o preço da areia rosa natural aumentou 15,77% de abril de 2018 a abril de 2019 (WIZIACK, 2019). Portanto, a busca por alternativas para a substituição dos agregados naturais por recicláveis na produção de concreto armado é fundamental e ambientalmente necessária.

Nesse contexto, o presente artigo avaliou a viabilidade da incorporação de LETA em compósitos cimentícios no que tange à carbonatação e à penetração de cloretos. Para tanto, foi produzido um compósito cimentício com teor de 3% de incorporação de LETA em massa em relação ao agregado miúdo. Esse teor permite atingir valores de propriedades físicas e mecânicas consideradas satisfatórias, segundo pesquisas já desenvolvidas por Sales e Souza (2009).

No caso, Sales e Souza (2009) avaliaram a possibilidade de utilização de LETA sozinho ou em conjunto com resíduo de construção civil, como agregados reciclados

para concreto armado. No caso do LETA utilizado de forma isolada, este foi estudado nas proporções de 1% a 5% de substituição em massa da areia fina natural. Os autores concluíram que os concretos produzidos com as duas porcentagens de substituição poderiam ser utilizados em concretos para fins estruturais, pois apresentam resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral, ambos aos 28 dias, próximos ou maiores quando comparados ao concreto de referência. Considerando que a maior porcentagem de substituição de LETA por areia fina é mais benéfica ao ambiente, a porcentagem de 3% foi escolhida para ser estudada no presente trabalho.

A seção 2 aborda os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do estudo, apresentando desde as características físico-químicas do LETA até os procedimentos de moldagem e ensaios de carbonatação e penetração de cloretos. Por outro lado, na seção 3 estão apresentados os resultados e a discussão acerca das principais contribuições do estudo sobre a carbonatação e penetração de cloretos em compósitos cimentícios com incorporação de lodo de estação de tratamento de água.

2 Materiais e métodos

Nesta seção estão apresentados os materiais e os métodos experimentais utilizados na pesquisa.

2.1 Materiais

O lodo utilizado nesta pesquisa foi coletado na Estação de Tratamento de Água de São Carlos, no estado de São Paulo, Brasil. Essa ETA trata 500 l/s de água em um sistema tradicional que possui as seguintes etapas: coagulação (utilizando $Al_2(SO_4)_3$ como coagulante), floculação, sedimentação e filtração. Na etapa de sedimentação, o lodo é depositado no fundo do tanque por gravidade. Em um ano, a ETA de São Carlos produz cerca de 1.500 m³ de lodo (CORDEIRO, 2001).

No laboratório, o lodo coletado na ETA foi mantido em bandejas metálicas por 48 h para evaporação da água em temperatura ambiente. Em seguida, o LETA foi completamente seco em estufa a 110 °C por 24 h, conforme a literatura (GODOY *et al.*, 2020; SALES; SOUZA, 2009). O LETA, então, foi padronizado por peneiramento (com malha de 4,8 mm), e a moagem foi realizada em triturador de agregados até apresentar uniformidade, conforme a Figura 2. O LETA apresentou dimensão máxima de 2,40 mm e módulo de finura de 1,51 mm, conforme ensaio granulométrico preconizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (ABNT, 2003).

Figura 2 ►

Amostra de LETA padronizado em laboratório.

Fonte: arquivo dos autores



Segundo Cordeiro (2001), a ETA de São Carlos realiza uma lavagem a cada três meses dos decantadores de forma tradicional, o que resulta no acúmulo de lodo no fundo do tanque. Esse lodo ocupa um volume considerável, levando ao aumento na concentração de sólidos. Em sistemas como esse, as concentrações de metais são maiores, com isso o seu descarte inadequado pode causar um impacto ambiental maior. A Tabela 1 apresenta as características físico-químicas do LETA.

Tabela 1 ►
Características físico-químicas do LETA da ETA de São Carlos-SP.
Fonte: Cordeiro (2001)

Características físico-químicas	Valores médios
Concentração de sólidos (%)	4,68
pH	7,20
Demanda química por oxigênio (mg/L)	4800
Sólidos totais (mg/L)	58,63
Sólidos suspensos (mg/L)	26,52
Sólidos dissolvidos (mg/L)	32,11
Alumínio (mg/L)	2,16
Zinco (mg/L)	4,25
Chumbo (mg/L)	1,60
Cádmio (mg/L)	0,02

Os outros materiais utilizados neste estudo foram: o cimento Portland com uma alta resistência inicial (ABNT, 2018), com composição química de (% em peso): 64,0% CaO; 19,2% SiO₂; 5,0% Al₂O₃; 3,2% Fe₂O₃; 2,8% SO₃; 2,4% CO₂; 0,6% MgO; 0,6% K₂O; 0,1% Na₂O; e areia de quartzo. A areia de quartzo foi obtida na região territorial de São Carlos-SP e caracterizada por Moretti *et al.* (2018). A areia fina apresentou massa específica de 2,64 g/cm³, dimensão máxima de 0,60 mm e módulo de finura de 1,32 (ABNT, 2003). Já a areia média apresentou massa específica de 2,60 g/cm³, dimensão máxima de 4,80 mm e módulo de finura de 2,54 (ABNT, 2003).

No ensaio de penetração de cloretos (AASHTO, 1980), os compósitos cimentícios foram expostos a uma solução de cloreto de sódio (NaCl) com concentração de 3,5%, simulando a água do mar, conforme a ASTM C876-15 (ASTM, 2015).

Para medir a penetração de cloretos e a profundidade de carbonatação foi utilizado o método colorimétrico (item 2.2), também adotado por Almeida *et al.* (2015), conforme recomendação RILEM CPC 18 (RILEM, 1988). No procedimento para medição da penetração de cloretos, utilizou-se solução de nitrato de prata (AgNO₃) P.A., da marca Synth, com teor mínimo de 99% (HE *et al.*, 2012). Para obter os valores da profundidade de carbonatação, utilizou-se solução indicadora à base de fenolftaleína (C₂₀H₁₄O₄) P.A., da marca Qhemis, com teor acima de 98% em álcool isopropílico (C₃H₈O) P.A. da marca Qhemis (teor acima de 99,5%) (RILEM, 1988).

2.2 Preparação das amostras

Para avaliar o comportamento do LETA incorporado aos compósitos cimentícios, foram utilizados dois traços – um de referência (REF), sem a incorporação do resíduo, e um com substituição de 3% da massa de areia fina natural por LETA –, moldados

conforme os traços da Tabela 2 (SALES; SOUZA, 2009). Segundo Sales e Souza (2009), esse teor de substituição pode levar a resultados de resistência à compressão e absorção de água semelhantes aos concretos convencionais. No caso, os autores obtiveram resistência à compressão aos 28 dias de 24,70 MPa e 29,20 MPa para REF e LETA, respectivamente. Já a absorção de água na mesma idade foi de 8,79% e 8,09% para REF e LETA, respectivamente.

Tabela 2 ▶

Traço unitário dos compósitos cimentícios.
Fonte: Sales e Souza (2009)

Material	Traço	
	REF	LETA
Cimento	1	1
LETA	0,000	0,041
Areia fina	1,35	1,31
Areia média	1,65	1,65
Relação a/c ^{Nota 1}	0,55	0,55

Nota 1: água/cimento

A mistura foi realizada em uma argamassadeira com capacidade de 5 litros. Foram moldados corpos de prova (CP) cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015). Para o ensaio de carbonatação, foram moldados três corpos de prova de cada traço para cada idade, totalizando 48 CP. Já para o ensaio de penetração de cloretos foram moldados dois CP de cada traço para cada idade, totalizando 36 CP – 18 destinados a ensaios com ciclos e imersão parcial e 18 destinados a ensaios sem ciclos e com imersão total dos CP em solução de NaCl. O adensamento ocorreu de forma manual, em quatro camadas de compósito cimentício e apiloadas com 30 golpes em cada camada por meio de um soquete. Ao final do procedimento de adensamento das camadas, foi inserida uma lâmina de vidro para garantir que os CPs não perdessem água de amassamento, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 ▶

Corpos de prova em câmara seca.
Fonte: arquivo dos autores



Em seguida, foram mantidos em câmara seca a 23 ± 1 °C com umidade relativa de $60 \pm 5\%$ para cura inicial (Figura 3), e após 24 horas, foram desmoldados.

2.3 Profundidade de carbonatação

Este experimento foi realizado por meio do ensaio acelerado de carbonatação (RILEM, 1988). O formato escolhido para o CP foi o cilíndrico, pois dessa maneira a profundidade de carbonatação geralmente é maior quando comparada aos corpos de prova prismáticos. Isso ocorre devido à difusão de CO_2 de forma radial nos CPs, resultando na soma vetorial.

Após a cura inicial e desmoldagem, os CPs foram identificados e inseridos em um recipiente contendo solução de hidróxido de cálcio saturado, onde permaneceram totalmente imersos por 28 dias para cura úmida (ABNT, 2006). Após esse período de cura, os CPs passaram por um período de pré-condicionamento, o qual consistiu em mantê-los em estufa para a secagem a 50 ± 5 °C por sete dias até que fosse atingida a constância de massa. Posteriormente, foram transferidos para câmara seca a 23 ± 1 °C com umidade relativa de $60 \pm 5\%$, onde permaneceram durante cinco dias (ALMEIDA *et al.*, 2015). Finalmente, os CPs foram levados para a câmara de carbonatação (Figura 4), na qual permaneceram até que fossem rompidos em suas respectivas idades.

Figura 4 ►

Câmara de carbonatação.
Fonte: arquivo dos autores



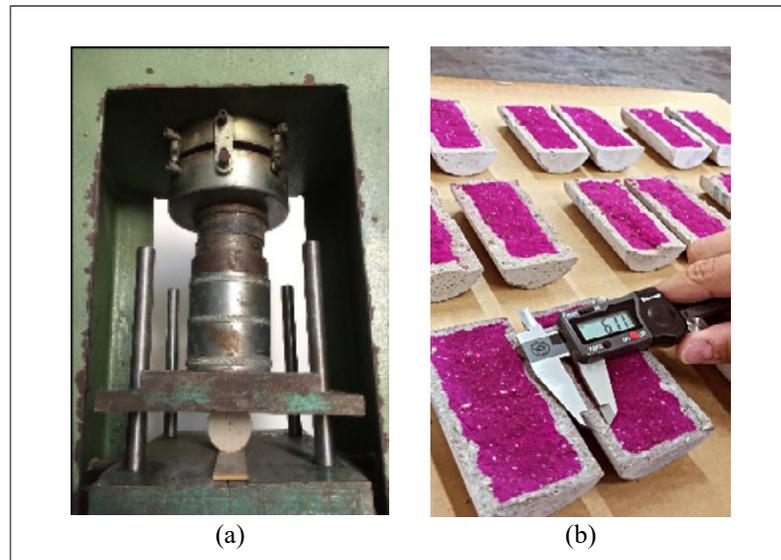
O teor de CO_2 da câmara de carbonatação foi de $15 \pm 5\%$ e a umidade no interior foi controlada entre 60% e 85% devido a o teor de CO_2 abaixo de 20% e a umidade entre 50% e 90% proporcionarem condições ótimas para reação de carbonatação (PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007). Os dados de profundidade de carbonatação foram coletados nas idades de 7, 14, 28, 56, 84, 112, 140 e 168 dias e, para cada idade, foram rompidos três CPs de cada um dos traços (REF e LETA).

O rompimento foi realizado por compressão diametral, obtendo-se duas faces de cada corpo de prova, sem a consideração da resistência à compressão diametral, visto que o principal intuito do estudo foi avaliar a profundidade de carbonatação em função da corrosão generalizada que esse fenômeno poderia desencadear nas armaduras em virtude da redução do pH na solução dos poros dos compósitos cimentícios. Em cada face obtida pelo rompimento foram coletadas três medidas de profundidade de carbonatação para cada lateral, totalizando seis medidas por face e 12 medidas por corpo de prova. Para distinguir a profundidade de carbonatação, a fim de realizar as aferições, foi utilizado o método colorimétrico com solução indicadora de fenolftaleína, de acordo com RILEM (1988). Essa solução foi aplicada nas faces dos corpos de prova logo após o rompimento (Figura 5a).

Figura 5 ▶

Rompimento e aferição dos corpos de prova.

Fonte: Hemkemeier (2021, p.65)



O instrumento utilizado para medir a profundidade de carbonatação foi um paquímetro digital (Figura 5b). Como os valores de profundidade de carbonatação apresentaram normalidade em relação à média, com base no teste de Shapiro-Wilk, os dados obtidos foram tratados por meio de análise de variância de forma paramétrica (ANOVA), considerando nível de significância α de 5%, para averiguar se havia diferença estatística significativa entre os valores obtidos para os diferentes traços. O tratamento estatístico foi realizado por meio do software gratuito PAST (HAMMER; HARPER; RYAN, 2001).

2.4 Penetração de cloretos

Os processos de preparação, moldagem e cura úmida dos CPs ocorreram da mesma maneira que no ensaio de carbonatação (seção 2.3). Após a cura úmida, os CPs foram colocados em estufa (Figura 6) a $50 \pm 5^\circ\text{C}$ por 7 dias (ALMEIDA *et al.*, 2015). Posteriormente, foram imersos em solução de NaCl a 3,5% de concentração em massa, a fim de simular ambientes marinhos e dar início ao ensaio de penetração de cloretos.

Figura 6 ▶

Corpos de prova em estufa.

Fonte: arquivo dos autores



Para avaliar a penetração de cloretos, os CPs foram expostos a duas situações: sem ciclo de molhagem e secagem (SC), de acordo com a norma americana T529 (AASHTO, 1980), e com ciclo de molhagem e secagem (CC), conforme a norma americana C876 (ASTM, 2015). No experimento sem ciclos, nove corpos de prova de cada traço permaneceram totalmente imersos em solução salina até a idade definida de

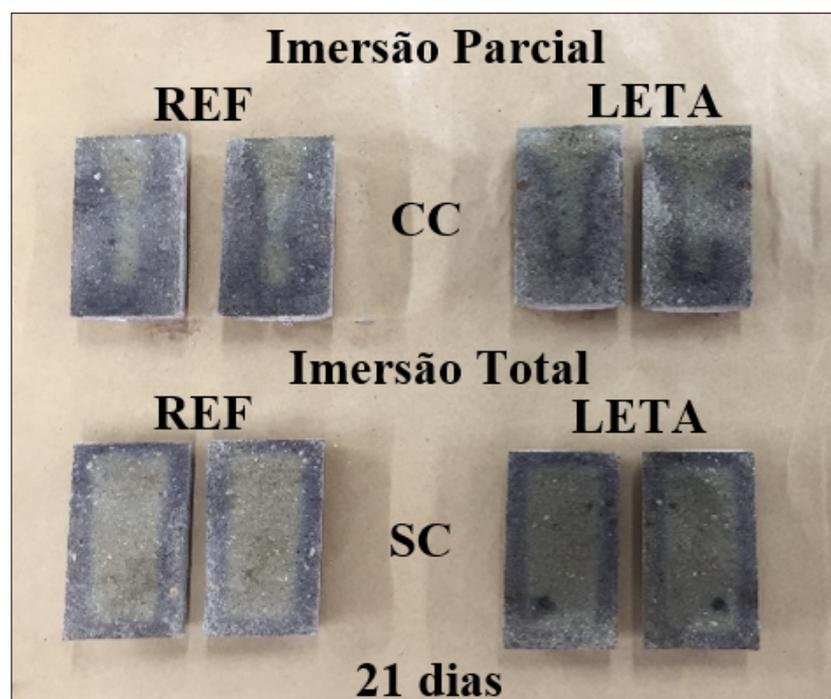
rompimento. Já no processo com ciclos, outros nove CPs de cada traço permaneceram em solução salina até a metade de sua altura (5 cm) por três dias e foram levados para estufa a 50 ± 5 °C por quatro dias, repetindo esse ciclo até a idade de rompimento estipulada.

Os corpos de prova foram rompidos nas idades de 3, 7, 14, 21, 28, 56, 112, 140 e 168 dias. Para verificar a penetração de cloretos, foi aspergida em cada face dos CPs já rompidos uma solução de nitrato de prata (AgNO_3) (Figura 7). Feita essa aplicação, o material foi colocado para secar naturalmente para que pudesse se tornar visível a região de profundidade de penetração de cloretos (HE *et al.*, 2012).

Figura 7 ►

Corpos de prova após aplicação da solução indicadora.

Fonte: arquivo dos autores



A aplicação dessa solução de nitrato de prata faz com que apareçam diferentes colorações. A coloração mais clara representa a penetração de cloretos e a região mais escura representa a região não alcançada pela solução salina (HE *et al.*, 2012). As medidas foram coletadas da mesma forma que no ensaio de carbonatação, por meio de paquímetro digital e, posteriormente, agrupadas em um banco de dados para realização da análise estatística de variância paramétrica (ANOVA), considerando a normalidade obtida pelo teste de Shapiro-Wilk e nível de significância α de 5%, para verificar se os resultados dos traços analisados possuíam diferenças significativas.

Além da penetração de cloretos, a evolução das massas dos corpos de prova ao longo do ensaio com a utilização de ciclos de molhagem e secagem também foi avaliada. As massas dos corpos de prova foram aferidas após cada semiciclo de molhagem e secagem e foram apresentadas graficamente, o que permitiu a comparação dos resultados de cada traço.

3 Resultados e discussão

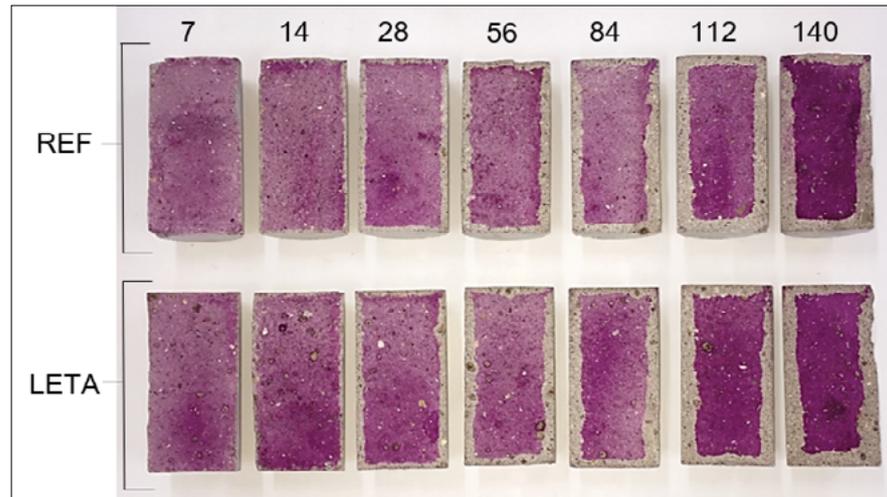
Neste item estão apresentados os resultados obtidos experimentalmente e as discussões acerca do que foi avaliado.

3.1 Profundidade de carbonatação

Foram realizados ensaios de carbonatação acelerada para averiguar a profundidade de carbonatação nos compósitos cimentícios de referência e com a incorporação de lodo de estação de tratamento de água (LETA).

A Figura 8 permite observar a evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo após a aspersão de fenolftaleína nas faces dos CPs.

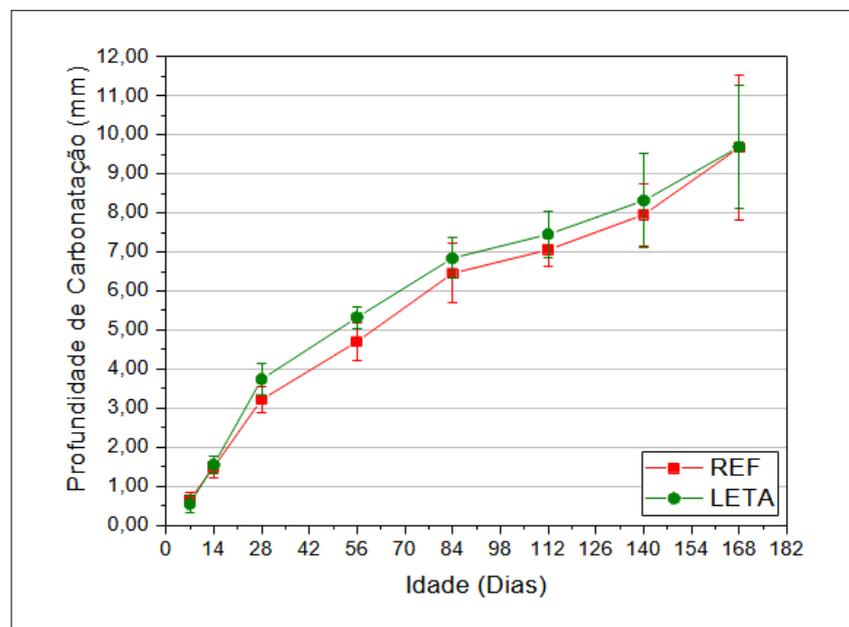
Figura 8 ►
Evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo (em dias).
Fonte: Hemkemeier (2021, p.100)



Nitidamente, observa-se que, nas idades de 7 e 14 dias, as profundidades de carbonatação aferidas foram pequenas se comparadas às idades mais avançadas, dificultando a medição com paquímetro.

As médias e os coeficientes de variação (CV) dos conjuntos das medidas de profundidades de carbonatação foram calculados para cada idade em estudo. Com isso, foi possível traçar as curvas de tendência de evolução da frente de carbonatação para ambos os traços (Figura 9).

Figura 9 ►
Curvas de tendência de evolução da carbonatação.
Fonte: dados da pesquisa



Os maiores valores de CV ocorreram nas primeiras medições, com 7 e 14 dias de ensaio, possivelmente devido à dificuldade de visualização da profundidade de carbonatação nas primeiras idades, quando as leituras variaram mais entre si. No entanto, nas idades mais avançadas, a visualização da profundidade de carbonatação ficou mais evidente, facilitando a aferição, tendo como consequência resultados de CV menores.

Também é possível observar que, até a idade de 140 dias, para ambos os traços utilizados, a profundidade de carbonatação média ficou abaixo de 10,00 mm. Assim, a profundidade de carbonatação não atingiu a totalidade do corpo de prova (25,00 mm).

É importante observar que os comportamentos dos compósitos cimentícios REF e LETA frente à carbonatação foram semelhantes ao longo do ensaio. Ademais, Moretti *et al.* (2016) utilizaram o mesmo traço REF utilizado no presente artigo, sendo que os pesquisadores observaram que a carbonatação sofrida por esse traço garante durabilidade ao concreto. Portanto, como LETA apresentou resultado similar ao REF, pode-se afirmar que LETA também é durável no que se refere à profundidade de carbonatação.

O fato se comprova por meio da análise estatística. Para verificar a semelhança entre os resultados, foi realizada a análise de variância para cada conjunto de médias em cada idade. No presente artigo, foi considerado um nível de significância α de 5%; com isso, os resultados fornecem 95% de confiança. Os resultados da ANOVA estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 ►
Resultados de p -valor, F e F crítico (carbonatação).
Fonte: dados da pesquisa

Idade (dias)	p -valor	F
7	0,037809482	4,481972624
14	0,296901774	1,104470327
28	1,5121E-07	34,07759385
56	1,12291E-08	41,90445209
84	0,014614212	6,269903058
112	0,002390015	9,932731313
140	0,145868314	2,162795044
168	0,96613886	0,001815062

Nota: o valor de F crítico foi de 3,977779393

Com os valores obtidos na análise estatística, foi possível observar que os corpos de prova avaliados aos 14, 140 e 168 dias apresentaram p -valor maior do que 5%, ou F (Fisher-Snedecor) menor do que o F crítico, demonstrando que os valores de profundidade de carbonatação aferidos nessas idades não diferiram significativamente entre si. Portanto, estatisticamente podem ser considerados semelhantes. Esse resultado corrobora os resultados apresentados na Figura 9, na qual percebe-se um distanciamento entre as duas curvas ao longo do ensaio e uma proximidade maior ao final do experimento.

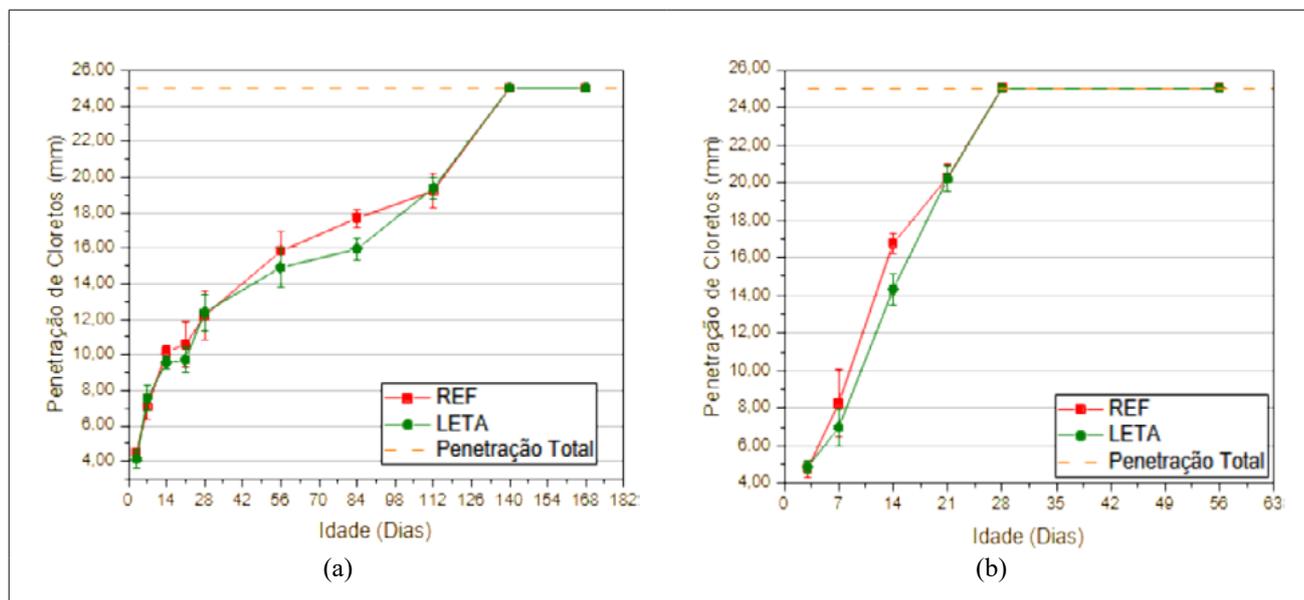
Até o momento da escrita deste trabalho, não foram encontrados trabalhos publicados de estudos com incorporação de lodo de ETA em concretos com avaliação de profundidade de carbonatação e/ou penetração de cloretos. Devido a isso, a comparação dos resultados foi realizada entre o compósito cimentício LETA e o REF como controle.

3.2 Penetração de cloretos

A penetração de cloretos nos compósitos cimentícios REF e LETA foi analisada para duas situações: uma com a imersão total dos corpos de prova em solução de NaCl, sem a realização de ciclos de molhagem e secagem; e outra com a imersão parcial dos corpos de prova em solução de NaCl, com a realização de ciclos de molhagem e secagem, conforme a Figura 7. Nessa Figura, observam-se dois corpos de prova de cada traço, um com aspersão de solução de nitrato de prata em suas faces após imersão parcial em solução de NaCl (3,5%), e um após imersão total na mesma solução. Nota-se que a frente de penetração de cloretos é diferente na imersão parcial (em formato de cone) em relação à total (uniforme em todas as faces), fato que ocorreu em função dos ciclos de molhagem e secagem.

A região destacada nas extremidades dos corpos de prova após a aspersão da solução de nitrato de prata representa a profundidade alcançada pelos cloretos durante a realização do ensaio. Percebe-se que, como os corpos de prova com imersão parcial passaram por ciclos de molhagem e secagem, apresentaram profundidade de penetração de cloretos maior do que os corpos de prova imersos totalmente em solução e que não passaram por ciclos de envelhecimento acelerado nas mesmas idades. Isso ocorre por conta dos mecanismos de penetração dos cloretos. Com a utilização dos ciclos de molhagem e secagem, os mecanismos de absorção ou sucção capilar, na superfície dos corpos de prova, e difusão iônica, no interior dos CPs, se intensificam, promovendo maior penetração dos cloretos em comparação com corpos de prova que não passaram pelos ciclos. As médias dos resultados obtidos para ambos os traços – para imersão total e sem ciclos e para imersão parcial e com ciclos – estão apresentados no gráfico das Figura 10a e 10b.

Figura 10 ▼
Tendência de evolução da penetração de cloretos dos compósitos cimentícios sem ciclos e imersão total (a) e com ciclos e imersão parcial (b).
Fonte: dados da pesquisa



Com base nos valores obtidos da penetração de cloretos sem ciclos e imersão total (Figura 10a), observou-se que, até a data de 112 dias de ensaio, as medidas médias de penetração de cloretos foram de 19,23 mm para o REF e 19,39 mm para o LETA. Já nas aferições seguintes, nas idades de 140 e 168 dias, ambos os traços apresentaram valores de penetração de cloretos compreendendo a totalidade dos corpos de prova (25,00 mm). Considerou-se o valor de 25,00 mm tendo em vista que cada corpo

de prova possui 50,00 mm de diâmetro e que as medidas são contadas a partir da lateral até o centro do corpo de prova, ou seja, compreendendo o raio de 25,00 mm.

Por outro lado, analisando os resultados provenientes do ensaio de penetração de cloretos com ciclos de molhagem e secagem e imersão parcial (Figura 10b), percebeu-se que, para ambos os traços, a penetração de cloretos atingiu os corpos de prova por inteiro aos 28 dias de ensaio. Esse resultado denota a agressividade promovida pelos de ciclos de molhagem e secagem e imersão parcial dos corpos de prova em solução de NaCl, visto que a penetração de cloretos alcançou a totalidade desses corpos de prova 112 dias antes dos corpos de prova sem a utilização de ciclos de molhagem e secagem e com imersão total dos corpos de prova em solução de NaCl. Esse efeito ocorreu devido à maior absorção na superfície dos corpos de prova e maior difusão da solução de cloreto de sódio no interior, ambos sendo mecanismos de transporte da solução para o interior dos corpos de prova. À medida que são realizados ciclos de molhagem e secagem, a tendência é que esses mecanismos se intensifiquem, promovendo um maior avanço dos cloretos no interior dos corpos de prova.

Comparando os dois ensaios, ficou evidente que a utilização ou não de ciclos de molhagem e secagem fez com que o tempo que a solução demora para atingir a totalidade dos corpos de prova fosse diferente. Com a utilização de ciclos de molhagem e secagem, a penetração ocorre de maneira mais rápida.

Analisando as curvas de tendência de cada ensaio, a fim de avaliar a evolução da penetração de cloretos ao longo do tempo, percebeu-se que os resultados de REF e LETA mantiveram o mesmo comportamento, o que denota, mais uma vez, a possibilidade de utilização de 3% desse resíduo na produção de compósitos cimentícios para fins estruturais com durabilidade similar à de concretos convencionais.

Comparando os gráficos das Figura 10a e 10b, também fica visível a diferença entre a profundidade que os cloretos alcançaram em ambos os casos, destacando a agressividade da utilização de ciclos de molhagem e secagem e imersão parcial, situação na qual a penetração total dos cloretos nos corpos de prova aconteceu em menos tempo.

Para verificar estatisticamente se os resultados foram semelhantes, foi calculada a significância entre as médias obtidas para cada idade, adotando-se $\alpha = 5\%$. Os resultados da ANOVA estão apresentados na Tabela 4 e na Tabela 5.

Tabela 4 ►

Resultados de p -valor, F e F crítico (sem ciclos e imersão total).

Fonte: dados da pesquisa

Idade (dias)	p -valor	F
3	0,060809469	3,905178083
7	0,103405985	2,886820887
14	0,000430564	17,12429914
21	0,065747438	3,750293398
28	0,726717993	0,125307513
56	0,06270369	3,844120408
84	2,87828E-07	52,62721338
112	0,656789608	0,202910533
140	-	-
168	-	-

Nota: o valor F crítico foi de 4,300949502

Tabela 5 ▶

Resultados de p -valor, F e F crítico (com ciclos e imersão parcial).

Fonte: dados da pesquisa

Idade (dias)	p -valor	F
3	0,624528623	0,246423152
7	0,045816241	4,48106568
14	5,92667E-08	63,96948793
21	0,86523733	0,029483378
28	-	-
56	-	-
84	-	-
112	-	-
140	-	-
168	-	-

Nota: o valor de F crítico foi de 4,300949502

Observando o p -valor da Tabela 5 para cada idade entre os três traços avaliados, percebeu-se que, para 3, 7, 21, 28, 56 e 112 dias esse valor apresentou-se maior do que 5%, o qual foi o nível de significância considerado nos cálculos. Esse resultado demonstra que não existe diferença significativa entre os valores de profundidade de penetração de cloretos de cada traço para a maioria das idades ensaiadas sem a utilização de ciclos e com imersão total dos corpos de prova em solução. Portanto, para essas idades, esses valores podem ser considerados estatisticamente semelhantes. Como a maioria dos valores não apresentou diferença significativa, é possível afirmar que os corpos de prova apresentaram um comportamento semelhante, independente do traço utilizado, corroborando a análise gráfica realizada.

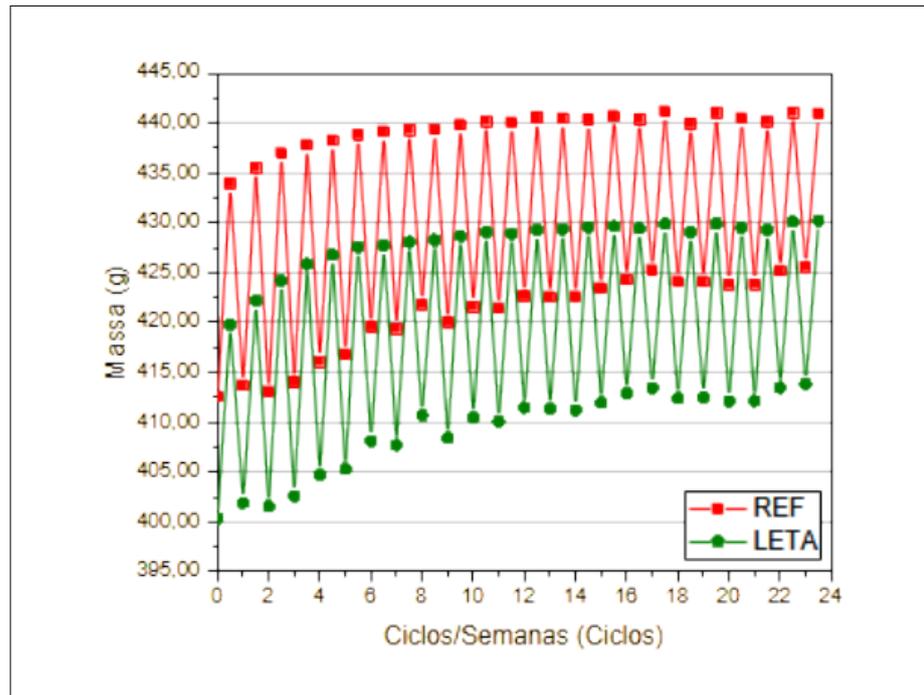
Tratando-se dos resultados do ensaio com a utilização de ciclos de molhagem e secagem e imersão parcial da amostra (Tabela 5), observou-se que, nas idades de 3 e 21 dias, o p -valor foi maior do que 5%. Ou seja, apenas para essas idades, os valores de profundidade de penetração de cloretos não possuíam diferença significativa, podendo ser considerados estatisticamente semelhantes. Para o restante das idades houve uma diferença significativa entre os valores obtidos dos traços analisados. No entanto, na idade de 7 dias o p -valor ficou muito próximo de 5%. Sendo assim, considera-se que apenas um dos valores ficou distante e abaixo de 5% (14 dias). Com isso, considerando que houve medição após os 14 dias, os valores obtidos denotam, novamente, a similaridade de comportamento entre o REF e o compósito com LETA. Desse modo, confirma-se a semelhança do comportamento dos traços estudados frente à penetração de cloretos.

A realização do ensaio de penetração de cloretos com ciclos também viabilizou a análise da evolução das massas ao longo do ensaio (Figura 11).

Figura 11 ►

Varição das massas dos corpos de prova ao longo do ensaio de penetração de cloretos com ciclos de molhagem e secagem.

Fonte: dados da pesquisa



Observou-se que ambos os traços apresentaram comportamento semelhante ao longo do ensaio de penetração de cloretos, com um aumento nas massas com o passar dos ciclos de envelhecimento acelerado, em decorrência da deposição de NaCl na microestrutura dos corpos de prova. Além disso, é notável a variação mais intensa das massas após os semiciclos de secagem. Esse comportamento associa-se à propriedade higroscópica do sal remanescente no interior dos compósitos cimentícios. Essa característica confere capacidade de absorver água, culminando no aumento do grau de umidade nesses semiciclos. Ademais, constatou-se uma diminuição da amplitude das massas entre cada semiciclo ao longo do ensaio. Isso ocorre devido ao preenchimento dos poros dos compósitos cimentícios, conferindo menor variação das massas entre os semiciclos de molhagem e secagem. A diferença de massa entre os corpos de prova REF e LETA ocorre devido ao fato de o compósito cimentício com LETA ter menor massa específica, conforme a literatura (KAISH *et al.*, 2021; RICHTER, 2001), em relação à areia fina natural caracterizada por Moretti *et al.* (2018).

De fato, considerando o estudo de Almeida *et al.* (2015) e Almeida *et al.* (2019), que utilizaram o mesmo traço de referência do presente artigo, como o compósito REF apresentou penetração de cloretos coerente com um compósito cimentício compatível para fins estruturais, infere-se que o compósito com LETA também apresenta desempenho satisfatório no que se refere à penetração de cloretos, pois, neste trabalho, apresentou comportamento semelhante ao compósito REF.

4 Conclusão

A partir das discussões realizadas é possível concluir que o novo compósito cimentício com a incorporação de 3% de LETA em substituição ao agregado miúdo natural (areia) não apresentou diferença significativa, tanto na profundidade de carbonatação acelerada quanto nos valores de penetração de cloretos, comparativamente aos valores obtidos para um compósito cimentício de referência (sem o LETA). Isso representa um avanço tecnológico com possibilidade de aplicação e utilização do LETA em compósitos

cimentícios para uso em concreto armado para fins estruturais no tocante a alguns parâmetros de durabilidade. Ademais, também contribui para a mitigação de problemas relacionados à escassez de agregados naturais. O uso do LETA pode ser uma alternativa ambientalmente amigável na destinação desse resíduo, ao mesmo tempo em que agregará valor a um lodo que atualmente representa um problema econômico e ambiental para os gestores de cerca de 7.500 estações de tratamento de água das cidades brasileiras.

Por meio do trabalho apresentado, observa-se que o LETA se apresenta como uma alternativa inteligente de utilização desse resíduo na construção civil. Entretanto, outros estudos devem ser realizados para verificar a carbonatação e a penetração de cloretos em compósitos cimentícios com incorporação de outros teores de LETA em substituição à areia fina natural.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo financiamento de bolsas de estudos (#001), ao CNPq (#303407/2020-4) e ao Programa Institucional de ICT da UFSCar.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Declaração de interesses

Os autores declaram que não estão cientes de interesses financeiros concorrentes ou relacionamentos pessoais que possam parecer influenciar o trabalho relatado neste artigo.

Referências

AASHTO – THE AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **T259** - Standard method of test for resistance of concrete to chloride ion penetration. Washington: AASHTO, 1980.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479**: Argamassa e concreto - câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 115-122, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000200003>.

ALMEIDA, F. C. R.; SALES, A.; MORETTI, J. P.; MENDES, P. C. D. Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 31-38, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.039>.

ALMEIDA, F. C. R.; SALES, A.; MORETTI, J. P.; MENDES, P. C. D. Use of sugarcane bagasse ash sand (SBAS) as corrosion retardant for reinforced Portland slag cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 72-82, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.217>.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C876-15**. Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. Philadelphia: ASTM, 2015. Disponível em: <https://www.astm.org/c0876-15.html>. Acesso em: 10 nov. 2021.

CORDEIRO, J. S. Processamento de lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: ANDREOLI, C. V. (org.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RiMA, ABES, 2001. cap. 5, p. 121-142.

CUCINA, M.; RICCI, A.; ZADRA, C.; PEZZOLLA, D.; TACCONI, C.; SORDI, S.; GIGLIOTTI, G. Benefits and risks of long-term recycling of pharmaceutical sewage sludge on agricultural soil. **Science of The Total Environment**, v. 695, 133762, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133762>.

ESHTIAGHI, N.; MARKIS, F.; YAP, S. D.; BAUDEZ, J.-C.; SLATTER, P. Rheological characterisation of municipal sludge: a review. **Water Research**, v. 47, n. 15, p. 5493-5510, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.07.001>.

FRANÇOIS, R.; LAURENS, S.; DEBY, F. Steel corrosion in reinforced concrete. In: FRANÇOIS, R.; LAURENS, S.; DEBY, F. (org.). **Corrosion and its consequences for reinforced concrete structures**. Londres: ISTE Press - Elsevier, 2018. cap. 1, p. 1-41. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-234-2.50001-9>.

GODOY, L. G. G.; ROHDEN, A. B.; GARCEZ, M. R.; COSTA, E. B.; DALT, S.; ANDRADE, J. J. O. Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 939-950, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.333>.

GODOY, L. G. G.; ROHDEN, A. B.; GARCEZ, M. R.; DALT, S.; GOMES, L. B. Production of supplementary cementitious material as a sustainable management strategy for water treatment sludge waste. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, e00329, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00329>.

GONZÁLEZ, K. B.; PACHECO, E.; GUZMÁN, A.; PEREIRA, Y. A.; CUADRO, H. C.; VALENCIA, J. A. F. Use of sludge ash from drinking water treatment plant in hydraulic mortars. **Materials Today Communications**, v. 23, 100930, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100930>.

HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. **PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica***, v. 4, n. 1, art. 4, 2001. Disponível em: https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf. Acesso em: 15 maio 2023.

HE, F.; SHI, C.; YUAN, Q.; CHEN, C.; ZHENG, K. AgNO₃-based colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete. ***Construction and Building Materials***, v. 26, n. 1, p. 1-8, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.003>.

HEMKEMEIER, T. A. **Monitoramento de corrosão por potencial de circuito aberto em armaduras embutidas em corpos de prova de argamassa**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/14290>. Acesso em: 2 nov. 2021.

KAISH, A. B. M. A.; ODIMEGWU, T. C.; ZAKARIA, I.; ABOOD, M. M.; NAHAR, L. Properties of concrete incorporating alum sludge in different conditions as partial replacement of fine aggregate. ***Construction and Building Materials***, v. 284, 122669, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122669>.

MORETTI, J. P.; SALES, A.; ALMEIDA, F. C. R.; REZENDE, M. A. M.; GROMBONI, P. P. Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) in concrete. ***Construction and Building Materials***, v. 113, p. 317-323, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.062>.

MORETTI, J. P.; SALES, A.; QUARCIONI, V. A.; SILVA, D. C. B.; OLIVEIRA, M. C. B.; PINTO, N. S.; RAMOS, L. W. S. L. Pore size distribution of mortars produced with agroindustrial waste. ***Journal of Cleaner Production***, v. 187, p. 473-484, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.219>.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. ***Ambiente Construído. Revista On-line da ANTAC***, v. 7, n. 4, p. 7-20, 2007. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/3750>. Acesso em: 2 nov. 2021.

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUSA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z.; HELENE, P. R. L. **Corrosão e degradação em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. 2. ed. São Paulo: Elsevier, 2018.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodo de estação de tratamento de água**. São Paulo: Blücher, 2001.

RILEM – INTERNATIONAL UNION OF LABORATORIES AND EXPERTS IN CONSTRUCTION MATERIALS, SYSTEMS AND STRUCTURES. CPC-18 measurement of hardened concrete carbonation depth. ***Materials and Structures***, v. 21, p. 453-455, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02472327>.

SALES, A.; SOUZA, F. R. Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble. ***Construction and Building Materials***, v. 23, n. 6, p. 2362-2370, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.11.001>.

SENGUPTA, A. K.; SHI, B. Selective alum recovery from clarifier sludge. **Journal of American Water Works Association**, v. 84, n. 1, p. 96-103, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1992.tb07290.x>.

TORRES, A.; BRANDT, J.; LEAR, K.; LIU, J. A looming tragedy of the sand commons. **Science**, v. 357, n. 6355, p. 970-971, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aao0503>.

WIZIACK, J. Ano já acabou para a construção civil. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 3 maio 2019. Pánel S.A., p. 6-8. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/colunas/painelsa/2019/05/ano-ja-acabou-para-a-construcao-civil-diz-setor.shtml>. Acesso em: 2 nov. 2021.