

ADSORÇÃO DE FÓSFORO UTILIZANDO RESÍDUO DA ARGAMASSA TRATADA TERMICAMENTE



<https://doi.org/10.22533/at.ed.569112531033>

Data de aceite: 27/05/2025

L. F. J. Nascimento

Universidade Federal do Paraná,
Departamento de Engenharias e Exatas,
Palotina, Brasil

J. G. Teleken

Universidade Federal do Paraná,
Departamento de Engenharias e Exatas,
Palotina, Brasil

F. B. Scheufele

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, Engenharia de Bioprocessos e
Biotecnologia, Toledo, Brasil

Thompson Ricardo Weiser Meier

Universidade Federal do Paraná,
Departamento de Engenharias e Exatas,
Palotina, Brasil

Paulo André Cremonez

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, Departamento de Processos
Químicos, Toledo, Brasil

RESUMO: Este trabalho avaliou o potencial da argamassa tratada termicamente na adsorção de fósforo por meio de ensaios cinéticos, além disso foi realizado o ponto de carga zero do adsorvente. A argamassa submetida ao tratamento térmico de 850° C

apresentou a melhor eficiência de remoção de fósforo com 93,5% e capacidade de adsorção de cerca de 13,87 mg g⁻¹ atingido no tempo de 4 horas, com melhor ajuste do modelo cinético de pseudo-primeira ordem. Além disso, ponto de carga zero da amostra foi de 8,66.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos da construção civil; remoção de fósforo; valoração térmica de adsorventes.

INTRODUÇÃO

O fósforo é um elemento limitante e indispensável para o crescimento das culturas agrícolas (Almeelbi e Bezbaruah, 2014). Os solos brasileiros apresentam deficiência, devido à grande reatividade e à alta taxa de retenção de seus íons (Mendes *et al.*, 2003). Desse modo, a sua aplicação na forma de fertilizante é frequente para aumentar a produtividade de cultivares. No entanto, essa prática em excesso, por meio da percolação e erosão, pode ocasionar o carregamento de nutrientes sendo uma das principais causas da eutrofização em corpos de água, causando impactos ambientais (Wang *et al.*, 2021). Em escala mundial, pode causar sérios prejuízos aos

sistemas aquáticos e colocar em risco a disponibilidade de água potável (Suresh *et al.*, 2023).

Uma das problemáticas envolvidas para solucionar isso, é o custo unitário para remoção de P em diferentes alternativas de tratamento variando de US\$ 42,22 a US\$ 60,88 por libra de redução de fósforo (Bashar *et al.*, 2018). Assim, se torna relevante o estudo de métodos econômicos e eficientes para esta redução na concentração no tratamento de águas residuárias. Dentre eles, destacam-se os processos como o de adsorção, precipitação química, troca iônica e métodos biológicos (Di Capua *et al.*, 2022). Neste contexto, a adsorção pode apresentar algumas vantagens técnico-operacionais, pois apresenta um baixo custo operacional e elevado custo-benefício (Ren *et al.*, 2023). A adsorção consiste em um processo de separação e purificação, no qual a espécie química presente numa fase líquida ou gasosa, adsorbato, é retida na superfície de um substrato sólido, conhecido como adsorvente (Skoog *et al.*, 2006). Dentre os materiais adsorventes, o carvão ativado é um dos mais utilizados dada sua competitividade e versatilidade no tratamento de águas. Entretanto, o seu processo de obtenção é relativamente oneroso, o que limita sua larga utilização. O que explica o aumento de pesquisas científicas de novos adsorventes alternativos, ou também denominados como não convencionais, com o objetivo de baixo custo e alta eficiência (Silva *et al.*, 2024).

Associado a isto, também surge a necessidade de materiais que agreguem ambientalmente na valoração de resíduos, visando o melhoramento e novas formas de destinação. Como por exemplo, no caso dos resíduos da construção civil, em que, a prática decorrente mais comum utilizada é a disposição em aterro. No entanto, em países em desenvolvimento é realizada sem grandes controles tecnológicos (Huang *et al.*, 2018).

De acordo com ABRECON (Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição), em 2022 no Brasil esse tipo de resíduo representou, aproximadamente, 120 milhões de toneladas, e que cerca de 70% ainda são descartados forma clandestina. E, quando maus destinados, como em rios, mares, lagoas, terrenos baldios ou até mesmo na rua, reduzem a qualidade e a produtividade do solo podendo liberar compostos nocivos tanto na superfície como em águas subterrâneas, assim como partículas de poeira suspensas no ar, afetando também na qualidade do mesmo (Chen *et al.*, 2021).

Também, é importante enfatizar que os resíduos da construção civil, seja por desperdícios das atividades, seja por demolição, geram grande empolamento, isto é, aumento do seu volume. Apesar de estudos da possibilidade de sua trituração e da reciclagem na substituição parcial em misturas de novas peças estruturais, ainda possuem resultados limitados de resistência a compressão axial, devido às suas propriedades heterogêneas e alta higroscopicidade (Sharma e Naushad, 2020).

Desta forma, a possibilidade de utilização destes resíduos como adsorvente no processo de adsorção vem como uma possibilidade de aplicação, devido à esses elementos

possuírem caráter mais alcalino e estrutura de poros complexa, que podem promover a adsorção de íons de metais pesados em solução na superfície dos componentes de hidratação (Ma, *et al.*, 2021).

Em outras pesquisas como a de Liu *et al.* (2020), ao realizarem tratamento térmico em resíduos de concreto observaram uma melhora significativa na adsorção de fósforo, devido à formação de microestrutura porosa e a liberação de calcário altamente solúvel. Rambaldi (2021) ao utilizar como adsorventes rejeitos de concreto aerado autoclavado, *in natura* e bloco pré-fabricado de concreto encontrou, neste último, uma redução de concentração de fósforo em cerca de 98,7% no tempo mínimo de 25 a 45 minutos. Dessa maneira, demonstrou resultados satisfatórios e promissores desse assunto.

Diante do exposto, mesmo que nas pesquisas científicas atuais já contemplem a adsorção de fósforo pelos resíduos da construção civil, ainda, carecem de estudos em relação as modificações e caracterizações destes materiais como adsorventes. Ainda mais, quando especificamente verificado o resíduo da argamassa, na perspectiva de que é a maior porcentagem desperdiçada na realização de traços em obras convencionais.

Então, pelos motivos apresentados, este estudo teve por objetivo avaliar a capacidade de adsorção de fósforo total em meio aquoso sintético por resíduo de argamassa tratada termicamente.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho empregou como material adsorvente o resíduo desperdiçado de uma obra real, majoritariamente, de argamassa. E, como adorbato utilizou efluente sintético preparado com o reagente de fosfato de potássio monobásico anidro a uma solução de 30 mg.L⁻¹ de concentração de fósforo.

Descrição do adsorvente

O resíduo de argamassa utilizado nos ensaios experimentais foi retirado da caçamba de uma obra na fase do reboco. Tal material foi triturado na Universidade Tecnológica do Paraná (UTFPR) situada na cidade de Toledo (PR), em um moinho de bola. Posteriormente, foi submetido à análise granulométrica por peneiras *Tyler* fixado na faixa de 400-250 µm. E posteriormente armazenados em recipientes herméticos.

Caracterização do adsorvente

Foram realizados experimentos (em triplicata) de argamassas submetidas a diferentes tratamentos térmicos avaliando-se o ponto de carga zero. E espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS).

Na análise do tratamento térmico versus a eficiência de remoção de adsorção de fósforo (Ma et al., 2021), as amostras de argamassa foram calcinadas utilizando uma rampa de aquecimento de 10°C/min até atingir: 100, 300, 500, 700, 850 e 1100°C.

Posteriormente, foi determinado ponto de carga zero da argamassa tratada termicamente com a pesagem de 1 g da amostra em béqueres de 100 mL, em que foram acrescentados 100 mL de solução com valores de pH variando de 1,0 a 12,0 (ajustados com soluções de HCl ou NaOH 0,1 mol.L⁻¹). Logo após, os béqueres foram colocados em uma incubadora *shaker*, sob agitação de 100 rpm, a 25°C por 24 horas. Após este tempo estipulado, com o pHmetro aferiu-se o pH final das amostras, sendo que o pH_{PCZ} correspondeu à faixa em que o pH final se manteve constante.

Paralelo a isso, foi realizada a análise de espectroscopia de raios x por dispersão em energia (EDS), que é uma técnica analítica usada para a análise elementar ou caracterização química de uma amostra.

Determinação da concentração de fósforo total

As análises de determinação de fósforo total foram realizadas no Laboratório de Produção de Biocombustíveis (LPB) da UFPR - Universidade Federal do Paraná, campus Palotina-PR.

O ortofosfato foi avaliado pelo **método colorimétrico do azul de molibdênio**. Este **método** determina, que em solução ácida, o ortofosfato reage com o molibdato de amônio e o tartarato de antimônio e potássio e, ácido ascórbico formando um ácido heteropolar-ácido fosfomolibdico (reagente misto), após reduzido pelo ácido ascórbico a um complexo azul intenso (EATON et al., 1995). Na determinação utilizou-se 10 mL da amostra filtrada em filtro de papel 1 mm de porosidade, adicionado 1,0 mL do reagente misto, depois em 10 minutos foram feitas as leituras de absorbância a 882 nm no espectrofotômetro.

Avaliação da capacidade de adsorção

Os ensaios de adsorção foram conduzidos no sistema batelada (em triplicata), com agitação por meio do banho *Dubnoff*. Os ensaios de equilíbrio foram realizados em *erlermeyers* de 250 mL, contendo 100 mL de solução com fosfato de potássio monobásico anidro, cuja concentração inicial era de 30 mg L⁻¹ de fósforo, com 0,30 g de adsorvente de argamassa tratada termicamente, agitação de 150 rpm e 25°C.

As cinéticas de adsorção foram realizadas com as leituras nos tempos de 60 até 480 minutos, com posterior leitura em espectrofotômetro.

A partir dos dados de concentração obtidos, a quantidade adsorvida e a porcentagem de remoção (%R) foram calculadas com auxílio das Equações 1 e 2, respectivamente.

$$q = \frac{V(C_0 - C)}{m} \quad (1)$$

$$\%R = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

Sendo, q a quantidade de contaminante adsorvida por grama adsorvente (mg g^{-1}), C_0 e C as concentrações das soluções aquosas inicial e final, respectivamente (mg L^{-1}), V o volume da solução (L) e m a massa de adsorvente (g).

Os dados experimentais de adsorção de fósforo total

Foram submetidos em formas não lineares de pseudo-primeira ordem (PPO) e pseudo-modelo de segunda ordem (PSO). Para isso, se utilizou das equações representas a seguir:

$$\text{PPO: } q_t = q_e \left(1 - e^{-k_1 t} \right) \quad (3)$$

$$\text{PSO: } q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{(1 + k_2 q_e t)} \quad (4)$$

Em que, q_e e q_t (mg/g) são as quantidades do soluto adsorvido pelo adsorvente no equilíbrio e no tempo (t), respectivamente. k_1 (min^{-1}) e k_2 ($\text{mg g}^{-1} \text{min}^{-1}$) são constantes para PPO e PSO, respectivamente.

Teste estatístico

Para comparar a aplicação de diferentes modelos cinéticos utilizou-se a regressão não linear com o método dos mínimos quadrados, o coeficiente de determinação (R^2) e soma dos erros ao quadrado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Efeito da temperatura dos tratamentos térmicos da argamassa tratada sobre a remoção do fósforo

Na Figura 1 são apresentados os dados do efeito da temperatura dos tratamentos térmicos sobre a eficiência de remoção, onde avaliou-se a eficiência de remoção de fósforo total no tempo de 4 horas.

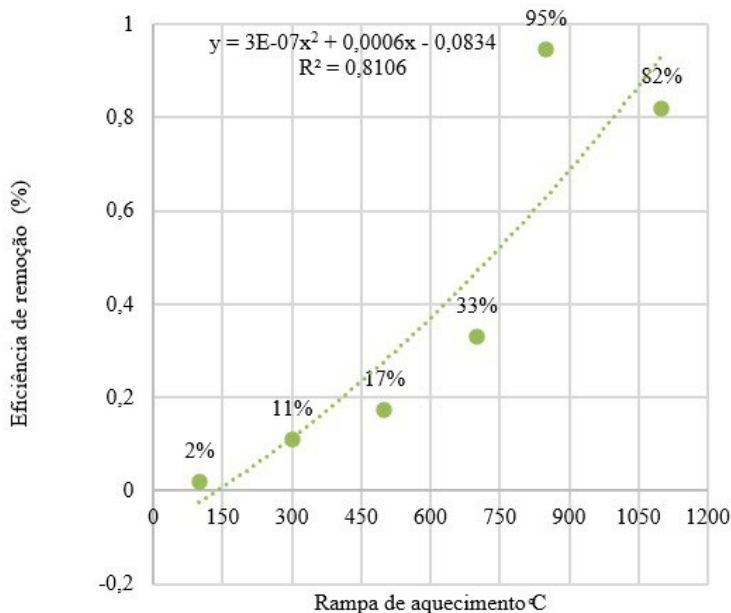


Figura 1. Comparativo entre diferentes tratamentos térmicos em relação à média da eficiência de redução de fósforo (%).

A eficiência de remoção de fósforo em relação ao tratamento térmico realizado na argamassa, resultou em um comportamento crescente, em que um ajuste polinomial de grau 2 com uma regressão de 0,81, respectivamente. Além disso, quando verificado a eficiência de redução de fósforo, observa-se a maior remoção quando a rampa de aquecimento era de 850° C. No entanto, para temperaturas maiores (1100°C) este decresceu.

Ma et al. (2021) utilizando materiais com matriz cimentícia como adsorvente, também verificaram um melhor comportamento de redução de Pb (III) na mesma temperatura deste trabalho. Ainda, também afirmaram que a liberação de íons de cálcio de suas amostras foram reduzidas com o aumento da temperatura de modificação diminuindo a adsorção, o que também **pode ser observado neste estudo com a queda de 7% na temperatura de 1100 C de calcinação.**

Ponto de carga zero da argamassa tratada termicamente a 850 C

Os ensaios para a obtenção do ponto de carga zero (pH_{PZC}) auxiliam em demonstrar o comportamento das cargas superficiais das amostras de adsorventes, sendo possível compreender os processos de dispersão e agregação na operação de adsorção (Figura 2).

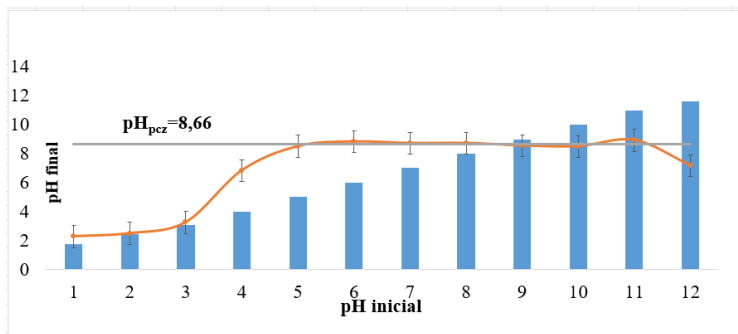


Figura 2. Ponto de carga zero do resíduo da argamassa tratada termicamente a 850°C.

O pH_{PZC} para a argamassa tratada termicamente deste estudo é de 8,66, no qual, a carga superficial é neutra nesse valor. O ponto de carga zero é o valor de pH em que a adsorção de íons determinantes de potencial (H^+ e OH^-) são iguais, no qual a carga residual superficial é nula.

Garcia e Sasaki (2019) ao investigarem comportamento da adsorção de fósforo total a partir de resíduos da cerâmica verificaram que quando *in natura* apresentava pH_{PZC} igual a 4,0 e 9,33 quando modificada quimicamente pela adição de cal dolomítica. Dessa forma, demonstrando que quanto mais alcanina a amostra maior era a capacidade de adsorção. O que pode ser explicado pelas interações eletrostáticas, como comprovado no aumento da superfície também encontrado por Cabral (2019).

A variável pH também foi estudada por Pan et al. (2024) com o adsorvente de cascas de trigo sarraceno modificadas com cloreto de cálcio, sendo que avaliando a faixa de pH 3,0–9,0 a eficiência de adsorção de fósforo total foi de 14,01% a 99,97%. No entanto, para valores superiores de pH a 9,0 até 12,0, a capacidade de adsorção diminuiu drasticamente. Este comportamento pode ser explicado pelo rápido acréscimo na concentração de OH^- , que pode competir com o fósforo nos sítios ativos durante o processo de adsorção.

Assim, diante disto, o pH_{PZC} encontrado neste estudo, quando comparado com a literatura auxilia na explicação do potencial de adsorção de fósforo total pela argamassa tratada termicamente.

Análise de EDS da argamassa tratada termicamente a 850 C

Os dados do Quadro 1 validam a presença de cálcio, proveniente da cal virgem adicionada na mistura da argamassa convencional realizada em obra. Dessa maneira, é perceptível, que o elemento oxigênio (52,92%) é o mais abundante, seguido pelo cálcio (26,19%), respectivamente.

Assim, esses dados do Quadro 1 convergem com as pesquisas de Li et al., (2019) e Zhang e Zhu, (2018) que afirmaram que a composição química principalmente de óxidos de alumínio, ferro e cálcio colabora para a adsorção de fósforo.

Avaliação da capacidade de adsorção e eficiência de remoção de fósforo total

Na Figura 3 está representada a cinética de remoção de fósforo, obtida a partir de uma solução sintética de 30 mg.L⁻¹ de adsorbato, na temperatura de 25 C a uma agitação de 150 rpm e argamassa tratada termicamente a 850 C.

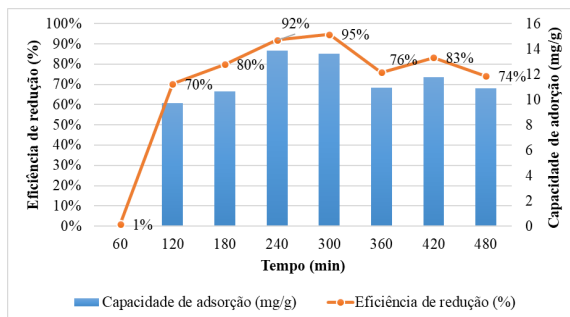


Figura 3. Cinética da capacidade de adsorção (mg/g) e eficiência de remoção de fósforo (%) da argamassa tratada termicamente a 850 C.

É possível verificar que a maior capacidade de adsorção de fósforo ocorreu para o tempo de 4 horas com 13,87 mg/g, com uma eficiência de 92 %, atingindo-se o equilíbrio de adsorção. Além disso, as porcentagens de eficiência de redução são consideráveis, mesmo em tempos inferiores, demonstrando uma afinidade entre o elemento fósforo e a matriz química da argamassa.

Estes resultados corroboram com os encontrados por Cabral et al. (2021) que apontaram como capacidade de adsorção 12,90 mg/g com a cerâmica vermelha ativada quimicamente.

Wang et al. (2014) também ao utilizarem a argamassa encontraram como eficiência de redução de fósforo adsorvido, mais de 95% de remoção na faixa de 20 e 600 mg L⁻¹ de P.

Deng e Wheatley (2018) ao utilizarem o agregado de concreto reciclado na faixa de concentração do adsorbato de 5 a 30 (mg L⁻¹) de fósforo, apontaram como resultado uma redução próxima de 90%. Assim como, Li et al. (2019) ao examinarem como adsorvente o concreto aerado autoclavado na adsorção na faixa de concentração de fósforo de 1 a 30 mg L⁻¹ apontaram uma eficiência de redução de concentração de 99%.

Sendo assim, para a faixa estudada de 30 mg L⁻¹ de concentração de adsorbato os compostos cimentícios, tanto neste estudo como de outros pesquisadores, são eficazes na eficiência de redução de fósforo.

Análise da cinética de adsorção

Na Figura 4 estão apresentados os modelos de ajustes cinéticos de pseudo-primeira e segunda ordem, respectivamente, da adsorção de fósforo (mg.g⁻¹) pela argamassa termicamente tratada sob agitação de 150 rpm, a 25°C e 0,3 gramas de adsorvente.

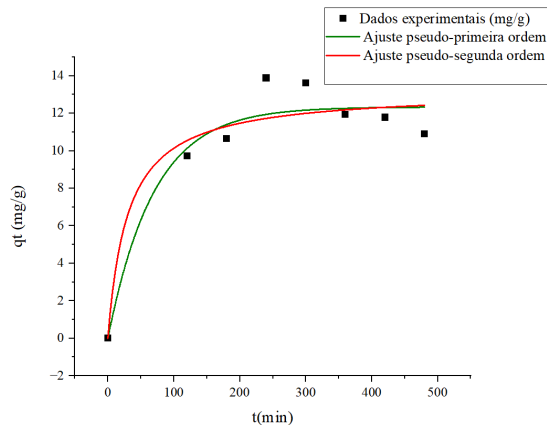


Figura 4. Cinética do processo de adsorção (mg.g⁻¹) de fósforo pela argamassa termicamente tratada e ajustes do modelo de pseudo-primeira ordem e segunda ordem.

Na Tabela 1 estão representados os parâmetros ajustados dos modelos de pseudo-primeira e segunda ordem aos dados experimentais de cinética de adsorção. A partir deles é possível observar que o modelo de pseudo-primeira ordem apresentou um melhor ajuste aos dados, com um R² superior (0,933), e ainda, com o menor erro.

| Modelo | Parâmetros | Respostas |
|--------|--|-----------------|
| PPO | k _i (min ⁻¹) | 0,0143 ±0,00492 |
| | q _e (mg g ⁻¹) | 12,336± 0,645 |
| | Erro | 7,029 |
| | R ² | 0,933 |
| | R ² adj. | 0,9223 |
| PSO | k ₂ (10 ⁻³) (g mg ⁻¹ min ⁻¹) | 0,0025±0,00272 |
| | q _e (mg g ⁻¹) | 13,208± 1,453 |
| | Erro | 7,835 |
| | R ² | 0,918 |
| | R ² .adj | 0,904 |

Tabela 1- Parâmetros cinéticos.

Esse mesmo comportamento de pseudo primeira-ordem também foi encontrado em Cabral et al. (2021) ao estudarem o comportamento da adição da cal em resíduos da cerâmica vermelha na adsorção de **fósforo**. O que indica que o processo de fisissorção permitiu que as espécies químicas do **fósforo** e o adsorvente continuassem intactas.

| Elementos | O | Ca | Mg | C | Si | Al | F | S | Fe |
|-----------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| (%) | 52,92 | 26,19 | 7,71 | 5,91 | 4,70 | 0,92 | 0,86 | 0,61 | 0,18 |

Quadro 1. Composição semi-elementar do resíduo de argamassa tratada termicamente a 850°C.

CONCLUSÃO

A argamassa tratada termicamente a 850 C apresentou a melhor eficiência de redução de fósforo com 95 %. O pH_{PZC} foi de 8,66 o que demonstra seu caráter alcalino aumentando sua afinidade com o adsorbato fósforo.

A melhor eficiência de redução de fósforo ocorreu entre 240 a 300 minutos, com 92 e 95%, respectivamente, e capacidade de adsorção de 13,87 mg g^{-1} e 13,63 mg g^{-1} . Para as limitações deste estudo o melhor comportamento cinético foi o pseudo-primeira ordem.

Por fim, a argamassa tratada termicamente possui um grande potencial de adsorção de fósforo total, sendo assim, relevante o aprofundamento futuro de novas pesquisas científicas neste tema.

REFERÊNCIAS

ABRECON - **Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição**. Disponível em: <<http://www.abrecon.org.br>>. Acesso em: 09 abril. 2024.

ALMEELBI, T; BEZBARUAH, A. Fosfato sorvido por nanopartículas: estudos de biodisponibilidade de ferro e fosfato com *Spinacia oleracea* e *Selenastrum capricornutum*. **ACS Química e Engenharia Sustentável**, v. 7, pág. 1625-1632, 2014.

BASHAR, R. et al. Custo-benefício dos processos de remoção de fósforo no tratamento de águas residuais municipais. **Chemosphere**, v. 197, pág. 280-290, 2018.

CABRAL, L. L.; PEREIRA, I. C.; PERRETTO, F.; NAGALLI, A.; RIZZODOMINGUES, R. C. P.; PASSIG, F. H.; CARVALHO, K. Q. Adsorption and desorption of phosphate onto chemically and thermochemically pre-activated red ceramic waste: Characteristics, batch studies, and mechanisms. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 6, p. 106695, 2021.

CABRAL, L. L. **Adsorção e dessorção de fósforo em solução aquosa, em cerâmica vermelha sem e com pré-ativação química e termoquímica**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

CHEN, K. et al. Critical evaluation of construction and demolition waste and associated environmental impacts: A scientometric analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 287, p. 125071, 2021.

DENG, Y.; WHEATLEY, A. Mechanisms of phosphorus removal by recycled crushed concrete. **International Journal Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 2, p. 357, 2018.

DI CAPUA, F. et al. Phosphorous removal and recovery from urban wastewater: Current practices and new directions. **Science of the Total Environment**, v. 823, p. 153750, 2022.

EATON A. D.; CLESCERI L.S.; GREENBERG A. E. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, Washington DC 1995.

GARCIA, R. D; SASSAKI, L. F. P. **Comparação da adsorção de fósforo em solução aquosa por coluna de leito fixo utilizando cerâmica vermelha in natura e pré-ativada por solução de cal.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

HUANG, B. et al. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 129, p. 36-44, 2018.

LI, W.; ZENG, L.; LIN, S.; ZENG, F.; FAN, Z.; HUANG, Z. Synthesis and behavior of a magnetic composite based on crushed autoclaved aerated concrete for low concentration phosphate removal. **Desalination and Water Treatment**, v. 140, p. 189-198, 2019.

LIU, D. et al. Evaluation of modified waste concrete powder used as a novel phosphorus remover. **Journal of cleaner production**, v. 257, p. 120646, 2020.

MA, Z. et al. Use of thermally modified waste concrete powder for removal of Pb (II) from wastewater: Effects and mechanism. **Environmental Pollution**, v. 277, p. 116776, 2021.

MENDES, I. C.; JUNIOR, F. B. R. **Microrganismos e disponibilidade de fósforo (P) nos solos: uma análise crítica.** Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2003. 26 p. (EMBRAPA - CPAC, Documentos, 85).

PAN, Feng et al. Phosphorus adsorption by calcium chloride-modified buckwheat hulls biochar and the potential application as a fertilizer. **Journal of Cleaner Production**, p. 141233, 2024.

RAMBALDI, J. G. M. M. **Adsorção de Fósforo em coluna de leito fixo utilizando como adsorvente o concreto aerado autoclavado.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

REN, S. et al. A review on current pollution and removal methods of tetracycline in soil. **Separation Science and Technology**, v. 58, n. 14, p. 2578-2602, 2023.

SHARMA, G.; NAUSHAD, M. Adsorptive removal of noxious cadmium ions from aqueous medium using activated carbon/zirconium oxide composite: Isotherm and kinetic modelling. **Journal of Molecular Liquids**, v. 310, p. 113025, 2020.

SILVA, F. A. et al. Adsorção de azul de metileno utilizando carvão ativado preparado a partir da casca do tamboril (*Enterolobium contortisiliquum*). **Química Nova**, v. 47, p. e-20230106, 2024.

SKOOG; WEST; HOLLER; CROUCH. Fundamentos de Química Analítica, Tradução da 8ª Edição norte-americana, Editora Thomson, São Paulo-SP, 2006.

SURESH, K. et al. Avanço recente nos indicadores de qualidade da água para a eutrofização em lagos globais de água doce. **Environmental Research**, 2023.

WANG, Q. et al. Phosphorus immobilization in water and sediment using iron-based materials: a review. **Science of the Total Environment**, v. 767, p. 144246, 2021.

WANG, X.; CHEN, J.; KONG, Y.; SHI, X. Sequestration of phosphorus from wastewater by cement-based or alternative cementitious materials. **Water Research**, v. 62, n. 1, p. 88-96, 2014.