

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

JOSÉ GUILHERME MARTINELLO MARÇAL RAMBALDI

**ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM COLUNA DE LEITO FIXO
UTILIZANDO COMO ADSORVENTE O CONCRETO AERADO
AUTOCLAVADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2021

JOSÉ GUILHERME MARTINELLO MARÇAL RAMBALDI

**ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM COLUNA DE LEITO FIXO UTILIZANDO COMO
ADSORVENTE O CONCRETO AERADO AUTOCLAVADO**

**Phosphorus adsorption in a fixed bed column utilizing autoclaved aerated
concrete as adsorbent**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Profa. Dra. Karina Querne de Carvalho Passig.

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JOSÉ GUILHERME MARTINELLO MARÇAL RAMBALDI

**ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM COLUNA DE LEITO FIXO UTILIZANDO COMO
ADSORVENTE O CONCRETO AERADO AUTOCLAVADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 10 de dezembro de 2021

Karina Querne de Carvalho Passig
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fernando Hermes Passig
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Daiane Cristine Kuhn
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2021

Dedico este trabalho à minha esposa e à
minha irmã, as pessoas mais importantes
da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora Profa. Dra. Karina Querne de Carvalho Passig, primeiramente por me aceitar como orientando e, principalmente, por se mostrar sempre disponível em meio à correria do dia a dia;

À doutoranda Daiane Cristine Kuhn, por me possibilitar fazer parte de seu doutorado, fornecendo os materiais e realizando os ensaios para obtenção de condições ótimas, e por sempre me ajudar no laboratório;

À doutoranda Izadora Pereira Consalter, pelos ensinamentos e disponibilidade;

Ao professor Dr. Fernando Hermes Passig, pela ajuda no laboratório e por topar fazer parte da minha banca examinadora;

À colega Isabelle Stresser, por me introduzir à coluna de leito fixo;

Aos colegas, alunos e pesquisadores do Laboratório de Saneamento (LabSan), sempre muito prestativos e dispostos a ajudar;

Aos meus colegas de curso, sem os quais com certeza não teria chegado tão longe;

À minha esposa Juliana, que esteve comigo desde o início do curso, pelo companheirismo e por nunca me abandonar, e nunca me deixar desistir;

À minha irmã Carol, minha família, por todos os ensinamentos e por nunca desistir de mim;

Aos meus pais, Wagner e Marilda. Espero que estejam orgulhosos de mim de onde quer que estejam me vendo.

Às vezes, são as pessoas que ninguém
espera que fazem as coisas que ninguém
poderia imaginar. (Alan Turing)

RESUMO

Resíduos da construção civil são subaproveitados por falta de conhecimento e interesse em seus possíveis usos, e isto leva ao descarte em lixões e aterros. Além disto, o excesso de fósforo em efluentes, aliado à falta de tratamento dos mesmos, tem aumentado o nível de eutrofização dos corpos d'água, perturbando o ecossistema. Esta pesquisa teve como objetivo o teste do concreto aerado autoclavado para adsorver fósforo proveniente de águas residuais. A alta taxa de adsorção de metais pesados realizada em outros trabalhos justifica o uso deste material considerando-o um adsorvente eficiente. Foram realizadas caracterizações físico-químicas do concreto aerado autoclavado, e elaborado um planejamento estatístico baseado nas condições ótimas ensaiadas em batelada previamente. Os testes se deram em coluna de leito fixo, devido à sua grande similaridade com efluentes reais em escala industrial, além de seu baixo custo e técnica relativamente simples. A solução a ser tratada foi preparada para conter 10mg/L de fósforo, e a quantidade de material adsorvente na coluna, bem como a vazão afluenta variaram. Os experimentos mostraram que ambos os fatores são influenciadores significativos na eficiência de adsorção. No melhor cenário analisado, o concreto aerado autoclavado foi capaz de adsorver 98,7% do fósforo durante os 45 minutos iniciais de experimento. Os modelos de Thomas e Yoon-Nelson foram utilizados para, respectivamente, prever a capacidade máxima de adsorção e o tempo de ruptura, com um R^2 variando entre 0,86 e 0,94. Os resultados obtidos neste estudo sugerem que o concreto aerado autoclavado tem grande potencial para a aplicação de remoção de fósforo de águas contaminadas.

Palavras-chave: Adsorção. Fósforo. Coluna de leito fixo. Concreto aerado autoclavado. Resíduos de construção civil.

ABSTRACT

Civil construction waste is underused due to lack of knowledge and interest in its possible uses, leading to landfill disposal. In addition, the excess of phosphorus in effluents, along with their lack of treatment, has been increasing the level of water bodies' eutrophication, disturbing the ecosystem. This research aimed to test autoclaved aerated concrete in order to adsorb phosphorus from wastewater. Other works' high rate of heavy metal adsorption justifies the use of this material considering it an efficient adsorbent. Physicochemical characterizations of the autoclaved aerated concrete were carried out and a statistical planning based on the batch optimal conditions previously tested was elaborated. The tests were carried out in a fixed bed column, due to its great similarity with real effluents on an industrial scale, in addition to its low cost and relatively simple technique. The solution to be treated was prepared to contain 10mg/L of phosphorus, and the amount of adsorbent material in the column, as well as the affluent flow rate varied. The experiments showed that both factors are significant influencers on the adsorption efficiency. In the best scenario analyzed, autoclaved aerated concrete was able to adsorb 98.7% of the phosphorus during the initial 45 minutes of the experiment. Both Thomas and Yoon-Nelson's models were respectively used to predict maximum adsorption capacity and the breakthrough time, with an R^2 varying between 0.86 and 0.94. The results obtained in this study suggest that autoclaved aerated concrete has great potential for the application of phosphorus removal from contaminated water.

Keywords: Adsorption. Phosphorus. Fixed bed column. Autoclaved aerated concrete. Civil construction waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação percentual do PIB Construção Civil x PIB Brasil.....	16
Figura 2 - Bloco comercial de Concreto Aerado Autoclavado.	19
Figura 3 - População (em %) com acesso às redes gerais de água e esgoto	21
Figura 4 - Fluxos do ciclo global de fósforo.....	25
Figura 5 - Diferenças entre a adsorção física e química.	26
Figura 6 - Superfície do CAA pré e pós adsorção.....	29
Figura 7 - Curva de ruptura em coluna de leito fixo.....	30
Figura 8 - Sistema de adsorção em coluna de leito fixo.....	31
Figura 9 - Fluxograma de ensaios.....	33
Figura 10 - Granulometria ideal do CAA	34
Figura 11 - Desenho esquemático da coluna.....	42
Figura 12 - Coluna montada em ensaio	43
Figura 13 - pH_{pcz} do CAA	46
Figura 14 - Difractometria por raio-X.....	47
Figura 15 - Concentração x Absorbância	49
Figura 16 - Curvas de ruptura experimentais	50
Figura 17 - Eficiência (em %) da remoção de fósforo	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das águas de acordo com a Resolução 357/2005.	23
Tabela 2 - Principais formas de fosfatos existentes no ecossistema.	24
Tabela 3 - Atribuições da adsorção ao Meio Ambiente.	27
Tabela 4 – Diferentes adsorventes e suas eficiências de remoção de fósforo.....	32
Tabela 5 - Planejamento estatístico	41
Tabela 6 - Composição química por porcentagem do peso	47
Tabela 7 - Absorbância por cada concentração de P.....	48
Tabela 8 - Limites ópticos e parâmetros de cálculo	49
Tabela 9 - Modelagem analítica de Thomas e Yoon-Nelson.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPM	Concreto Pré-Moldado
CAA	Concreto Aerado Autoclavado
DRX	Difratometria de Raio-X
FRX	Fluorescência de Raio-X
FTIR	Infravermelho por transformada de Fourier
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
OMS	Organização Mundial da Saúde
pH _{pcz}	pH do ponto de carga zero
RCD	Resíduos de Construção e Demolição

LISTA DE ACRÔNIMOS

CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DACOC	Departamento Acadêmico de Construção Civil
ETA	Estação de Tratamento de Água
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PIB	Produto Interno Bruto
PLANASA	Plano Nacional de Saneamento
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Geral	14
1.1.2 Específicos	14
1.2 JUSTIFICATIVA	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 CONSTRUÇÃO CIVIL	16
2.1.1 Resíduos sólidos da construção civil	17
2.1.2 Elementos Pré-Fabricados	18
2.1.2.1 Concreto Aerado Autoclavado	18
2.2 SANEAMENTO	20
2.2.1 Saneamento no Brasil	20
2.2.2 Tratamento de Efluentes	22
2.3 FÓSFORO	23
2.3.1 Eutrofização	25
2.4 ADSORÇÃO	26
2.4.1 Materiais adsorventes	27
2.4.1.1 Carvão ativado	28
2.4.1.2 Resíduos de materiais cerâmicos	28
2.4.1.3 Resíduos de concreto aerado autoclavado	28
2.4.2 Coluna de leito fixo	29
2.4.2.1 Adsorção de fósforo em coluna de leito fixo	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 CARACTERIZAÇÃO E PREPARO DO ADSORVENTE	34
3.1.1 Caracterização físico-química	35
3.1.1.1 Teor de umidade	35
3.1.1.2 Teor de material volátil	36
3.1.1.3 Teor de cinzas	37
3.1.1.4 Determinação do pH	37
3.1.1.5 Ponto de carga zero (pH_{pcz})	38
3.1.1.6 Fluorescência por raios-X (FRX)	38
3.1.1.7 Porosimetria de mercúrio	38
3.1.1.8 Difratomia por raios-X (DRX)	39
3.2 CARACTERIZAÇÃO E PREPARO DO ADSORVATO	39
3.2.1 Curva analítica do fósforo	39
3.3 ENSAIOS EM COLUNA DE LEITO FIXO	40
3.3.1 Modelagens analíticas de cinética de adsorção	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45

4.1 RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO ADSORVENTE	45
4.1.1 Teores de umidade, cinzas e materiais voláteis	45
4.1.2 pH e ponto de carga zero (pH_{pcz}).....	46
4.1.3 Fluorescência por raios-X (FRX) e difratometria por raios-X (DRX)	46
4.1.4 Densidade, volume total de poros e diâmetro médio dos poros	47
4.2 RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO ADSORVATO	48
4.2.1 Curva analítica do fósforo	48
4.3 ADSORÇÃO EM COLUNA DE LEITO FIXO.....	49
4.4 MODELAGENS ANALÍTICAS DE CINÉTICA DE ADSORÇÃO	51
5 CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS.....	55
ANEXO A - Resultados experimentais obtidos	64

1 INTRODUÇÃO

É inegável a importância econômica e social do ramo de construção civil no Brasil. De acordo com dados de 2018 do IBGE, o setor foi diretamente responsável por quase 3,5% do PIB brasileiro, além de empregar mais de 7,3% da população ativa.

Todavia, Nagalli (2014) explica que esta indústria ainda tem a maior parte de seus processos construtivos feita de forma manual e sendo executada no canteiro de obras, o que a transforma em uma grande geradora de resíduos, sendo nociva ao meio ambiente.

O uso de elementos pré-moldados de concreto foi uma saída encontrada para reduzir a quantidade de rejeitos. O concreto pré-moldado (CPM) é fabricado externamente, em condições superiores à do canteiro, e quando é entregue e aplicado, percebe-se o benefício nos quesitos tempo de execução, controle de materiais e redução do desperdício (EL DEBS, 2017). Entretanto, a geração de resíduos sólidos não é totalmente anulada, e ainda existem materiais potencialmente aproveitáveis sendo descartados em aterros.

Produzido pela primeira vez na Suécia no início dos anos 1920, o concreto aerado autoclavado é um bloco de CPM formado de água, areia, cimento, cal, gesso e um agente expander – usualmente pó de alumínio – e entre suas principais vantagens sobre o bloco de concreto convencional estão sua maior resistência, maior capacidade de isolamento térmico e acústico e um peso menor (KALPANA; MOHITH, 2019). Estas características contribuem para o aumento do uso do concreto aerado autoclavado (CAA) e, conseqüentemente, uma maior disponibilidade nas caçambas de entulho.

Com a crescente industrialização externalizada da construção civil, proporcionalmente cresce a quantidade de efluentes lançados nos rios, muitas vezes sem o tratamento adequado. Com isto, percebe-se um incremento de vários elementos que, em quantidades consideradas normais, não são perigosos para o meio ambiente. Porém, há perturbação na vida aquática devido ao excesso de alguns deles, como nitrogênio e fósforo.

O fósforo é um macronutriente muito importante para a vida, em especial para o crescimento de certos tipos de microrganismos e de algas. Encontrado em esgotos domiciliares, tem suas principais origens na matéria orgânica fecal, detergentes e alguns outros produtos químicos domésticos, e também em efluentes provenientes de

diferentes tipos de indústrias. Em demasia, pode gerar aumento desproporcional na população de algas, levando a um fenômeno chamado de eutrofização, podendo causar diversos tipos de problemas aos corpos d'água, como condições anaeróbias ao longo do curso, dificuldade no eventual tratamento desta água e toxicidade das algas (MOTA; SPERLING, 2009).

Considerando o crescimento da disponibilidade de CAA no canteiro e a necessidade cada vez maior do correto tratamento de efluentes, esta pesquisa propõe analisar a viabilidade técnica do uso de concreto aerado autoclavado para a remoção de fósforo em solução aquosa através do processo de adsorção, utilizando a coluna de leito fixo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Estimar a eficiência da adsorção do fósforo em solução aquosa em coluna de leito fixo preenchida com concreto aerado autoclavado como adsorvente, posteriormente comparando os resultados com outros estudos de adsorção.

1.1.2 Específicos

- Caracterizar físico-quimicamente os materiais adsorventes em termos de teor de umidade, teor de materiais voláteis, teor de cinzas, FRX, DRX, porosimetria de mercúrio, pH, pH do ponto de carga zero, granulometria e análises termogravimétricas;
- Otimizar as condições operacionais de massa do adsorvente e vazão afluente antes do início dos testes;
- Avaliar o material em termos de remoção de fósforo e tempo para adsorção em diferentes condições de massa de adsorvente e vazão afluente;
- Comparar os resultados obtidos com outros estudos sobre diferentes materiais usados em colunas de leito fixo para a adsorção de fósforo;
- Utilizar as modelagens analíticas de Thomas e Yoon-Nelson para previsão do comportamento de adsorção nos quesitos capacidade máxima de adsorção e tempo de ruptura, respectivamente.

1.2 JUSTIFICATIVA

Desde a revolução industrial, as consequências da falta de tratamento de resíduos e a desenfreada poluição atmosférica tem se intensificado em níveis alarmantes, forçando governos a adotarem medidas de mitigação.

De acordo com Goldemberg e Barbosa (2004), um dos primeiros países a criarem regras específicas relativas à poluição foi a Inglaterra, que decidiu criar uma lei estabelecendo limites para emissão de poluentes e níveis aceitáveis da qualidade do ar em 1956 – exemplo que logo foi seguido pela América do Norte, Europa Ocidental e Japão.

O primeiro passo conjunto dado internacionalmente foi a Conferência das Nações Unidas em Estocolmo, 1972, e tinha por objetivo conciliar o desenvolvimento econômico à prudência ecológica e à justiça social, conforme explicam Pott e Estrela (2015).

Atualmente, a consciência ambiental de grande parte da população faz com que empresas e indústrias se adaptem ao crescimento ambientalmente correto, e a construção civil não deve ficar de fora.

Com a grande importância do setor de construção civil no Brasil, também se encontra significativa degradação ambiental, e boa parte se deve ao descarte incorreto dos resíduos sólidos da construção.

Leis e políticas públicas avançam sobre a questão, porém são ineficientes para punir os responsáveis por pequenas obras e reformas, que podem representar até 75% do total de resíduos gerados na construção civil (NAGALLI, 2014).

Devido à dificuldade de fiscalização, uma alternativa seria encontrar uma nova finalidade para diferentes resíduos da construção civil, e esta pesquisa serve a este propósito.

Yuan Zhang (2017) explica que o resíduo de concreto aerado autoclavado é um adsorvente econômico e eficiente para remoção de cádmio em efluentes, o que justifica um estudo mais aprofundado sobre a potencial capacidade de adsorção de outras substâncias pelo CAA.

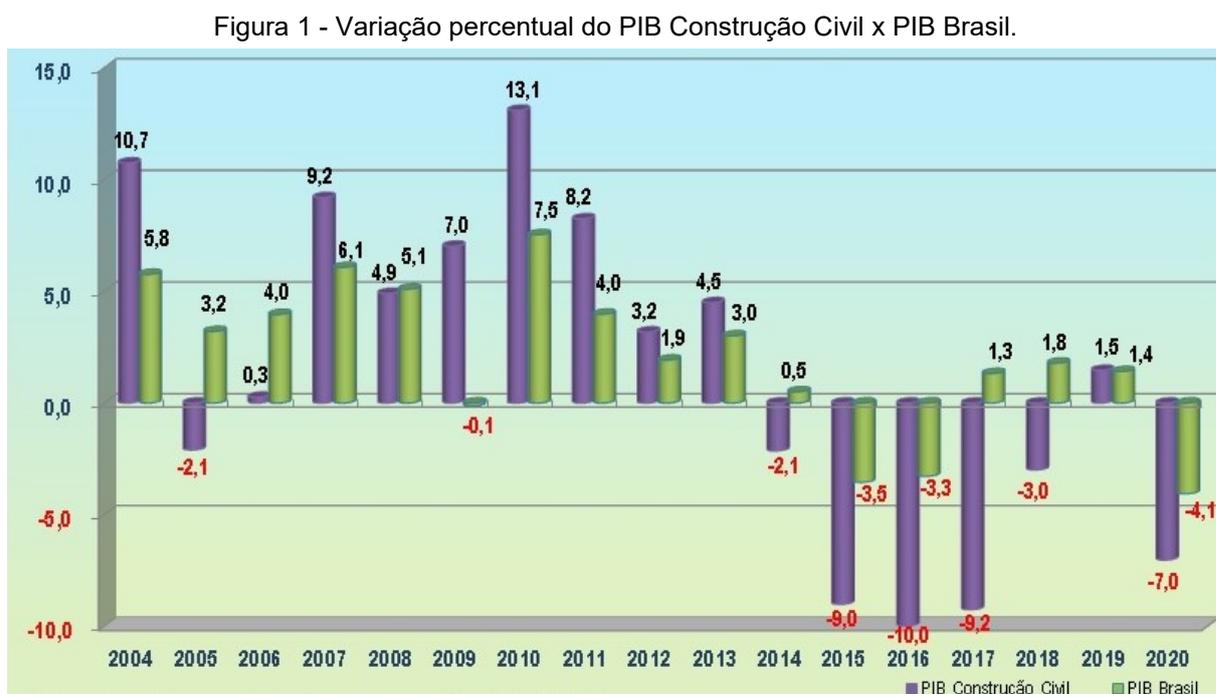
Considerando o risco de eutrofização que o excesso de fósforo em efluentes representa quando descartado nos leitos, esta pesquisa visa amenizar dois problemas com o teste de um filtro adsorvente de fósforo feito de CAA, diminuindo, também, o descarte deste em aterros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSTRUÇÃO CIVIL

O setor de construção civil está fortemente atrelado ao crescimento das nações, principalmente as em desenvolvimento, conforme explica Moavenzadeh (1978), constituindo porção significativa de seus Produtos Internos Brutos (PIB) e taxas de emprego, e com grandes investimentos vindos de seus governos.

A figura 1 mostra o crescimento do PIB do Brasil e do PIB da construção civil em relação aos seus resultados nos anos anteriores, em variação percentual, entre 2004 e 2020.



Fonte: Câmara Brasileira da Indústria da Construção (2021).

Até o final dos anos 1970, a maior parte das empresas brasileiras do campo eram financiadas pelo poder público, e isto fazia com que não se preocupassem com a atualização e o melhoramento de seus métodos. Contudo, com influência da globalização e privatização de várias empresas, este cenário começa a mudar (BORGES, 2013).

Com o distanciamento do Estado, Tomasi (2005) explica que houve evolução com melhoras nos projetos, nos sistemas de planejamento e no controle de recursos

materiais, com a intenção de redução de custos e de tornar seus produtos finais mais atrativos financeiramente.

2.1.1 Resíduos sólidos da construção civil

A indústria da construção civil é vista no geral como ineficiente e com altos níveis de desperdício, e isto está gerando engajamento das construtoras e incorporadoras para modificar esta visão do mercado (DESCHAMPS; BEUREN, 2009). Pinto (1999) estima em 150 quilos por metro quadrado construído a quantidade de entulhos a ser removida durante as construções.

Estes entulhos, tecnicamente intitulados como Resíduos de Construção e Demolição, são gerados ao longo de toda a cadeia da construção: desde a extração, durante o transporte, na sua utilização *in loco* e até mesmo quando deveriam ser reciclados, pois ao final da obra não costuma haver separação de materiais potencialmente recicláveis ou reutilizáveis, de contaminantes como tintas e outros químicos (SOARES; COELHO, 2013).

Ademais, existem os resíduos que são descartados clandestinamente em encostas de rios, vias e logradouros públicos, prejudicando a drenagem urbana e o tráfego de pessoas e veículos e aumentando os custos de remoção para os municípios (KARPINSK *et al.*, 2009).

De acordo com Pinto (1999), a falta de conhecimento dos volumes de RCD gerados, bem como seus possíveis impactos e capacidade de reaproveitamento, faz com que os gestores de resíduos só os tratem em ações corretivas, que geralmente são ineficazes.

Afim de diminuir os desperdícios de materiais através de seu monitoramento mais rigoroso, um recurso encontrado foi o de preparar os materiais fora do seu local de uso, evitando desperdícios desnecessários, com a pré-fabricação, que de acordo com a norma ABNT NBR 9062:2017, pode ser definida como “elemento pré-moldado executado industrialmente, em instalações permanentes de empresa destinada para este fim, que se enquadrem e estejam em conformidade com as especificações”.

2.1.2 Elementos Pré-Fabricados

De acordo com Vasconcelos (2002), não há uma data exata em que a pré-moldagem de elementos começou, pois ela surge juntamente com o próprio uso do concreto armado, que em seus primórdios tinha sua fabricação fora do seu local de uso, passando a ter a possibilidade de sua moldagem *in loco* apenas mais tarde.

Os pré-fabricados ganharam espaço e se tornaram essenciais na construção devido ao seu baixo nível de desperdício tanto na produção quanto na execução. Entretanto, ainda existem problemas logísticos e culturais que podem levar à inutilização de materiais (SERRA *et al.*, 2005).

Dentre os vários pré-moldados existentes, o bloco de concreto aerado autoclavado merece destaque.

2.1.2.1 Concreto Aerado Autoclavado

Também conhecido como Concreto Celular Autoclavado, o CAA foi originado na Suécia, no ano de 1924. Por ter um ótimo isolamento térmico como sua principal característica, é amplamente utilizado em países escandinavos, como a própria Suécia e a Dinamarca, por exemplo (FARIA; BARRETO, 2012).

De acordo com a ABNT NBR 13438:1995, o CAA é um concreto leve obtido através de processo industrial, e é constituído por materiais calcários e materiais ricos em sílica, granulados finamente.

Na figura 2, há um bloco de CAA comercial da empresa Celucon, de 60x30x12,5cm, onde é possível perceber a porosidade do material, que contribui para suas características termoacústicas, além do seu menor peso comparado com blocos de concreto maciços.

Figura 2 - Bloco comercial de Concreto Aerado Autoclavado.



Fonte: Leroy Merlin (2021).

Mostafa (2005) explica que uma das proporções utilizadas na fabricação do CAA é de 65% areia, 25% cal e 10% cimento, além da sua principal distinção dos tipos convencionais de concreto, o seu agente expensor, responsável por reações químicas que propiciam as bolhas de ar uniformes: 0,05% de pó de alumínio. Sua proporção água/sólidos geralmente é de 0,7.

Em um estudo conduzido por Alexanderson (1979), a densidade dos blocos produzidos ficou em torno de 500kg/m^3 , bem abaixo da massa específica normal dos concretos, que ficam em torno de 2200kg/m^3 até 2600kg/m^3 (SILVA, 2003).

Assim como todo processo industrial gera implicações ecológicas, a manufatura de CAA não é diferente. Gases como CO, CO₂ e NO_x são lançados na atmosfera durante a produção, apesar de relativamente baixos se comparados com processos de queima na indústria de tijolos, por exemplo. Além disso, os efluentes gerados no *boiler* contêm traços de óleo e outras impurezas, e deve ser tratado antes de sua devolução (RILEM, 1993).

2.2 SANEAMENTO

Enquanto nômades, não havia necessidade de preocupação dos seres humanos sobre o que fazer com seus excrementos e resíduos, já que eram organizados em apenas pequenas comunidades, e o ciclo da natureza era capaz de lidar com a decomposição natural destes rejeitos. O problema se inicia há cerca de 10 mil anos, quando a humanidade começa a se assentar com base na agricultura e, com isso, começam a surgir os primeiros impactos causados pelo homem na natureza (LOFRANO; BROWN, 2010).

2.2.1 Saneamento no Brasil

Apenas 61 anos após o descobrimento do Brasil, Estácio de Sá mandou escavar o primeiro poço para abastecimento de água de uma cidade. Já em 1880, houve a criação da primeira Estação de Tratamento de Água (ETA), precursora mundial do tipo (ROCHA, 2016).

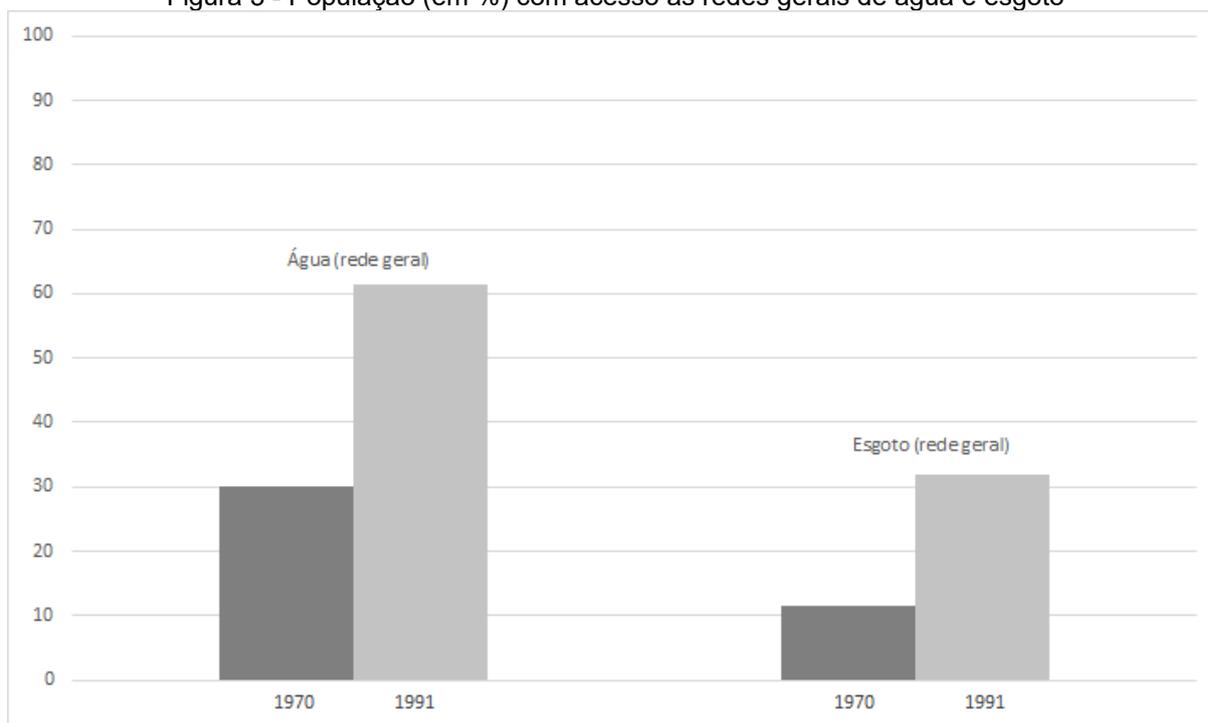
Carlos Alberto Rosito, vice presidente nacional da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, explica que até a década de 80, os investimentos brasileiros em saneamento eram apenas pontuais, sem seguir uma organização definida. Com esta falta de planejamento em mente, foi elaborado o PLANASA (Plano Nacional de Saneamento) entre os anos de 1968 e 1971 – tendo sido efetivamente formalizado neste último – cujo objetivo era a universalização do acesso à água e à coleta de esgoto.

Dados do censo de 1970 do IBGE mostram que apenas aproximadamente 30% da população de mais de 92 milhões de pessoas na época possuía acesso à água pela rede geral, e cerca de 11,5% pela rede geral de esgotamento.

Madeira (2010) explica que o encerramento do PLANASA se deu no final dos anos 1980, e foi o responsável pela criação das companhias estaduais de saneamento básico (CESBs).

O saldo do programa pode ser analisado através dos dados do IBGE de 1991, mostrando que, apesar de ainda muito longe do ideal, houve um salto expressivo tanto ao acesso de água pela rede geral, que passou de 30% para mais de 61% da população, e mais relevante ainda quanto à rede geral de esgotamento, de 11,5% para 31,9%, como mostra a figura 3.

Figura 3 - População (em %) com acesso às redes gerais de água e esgoto



Fonte: IBGE - Censos Demográficos de 1970 e 1991. Elaboração própria.

Costa *et al.* (2018) entendem que, após a extinção do PLANASA, os eventos mais importantes para o saneamento foram a própria Constituição de 1988, vigente até o momento, que foi a primeira Constituição a tratar diretamente do assunto saneamento básico; a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, considerada o marco legal do saneamento básico, que “estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico”; e o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), lançado em 2013 pelo extinto Ministério das Cidades, atual Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério do Desenvolvimento Regional, que consiste no planejamento integrado do saneamento básico e possui horizonte de 20 anos (2014 a 2033).

Além destes, a Lei nº 14.026 de 15 de julho de 2020 atualiza o marco legal do saneamento básico.

A evolução do saneamento necessita ir além de distribuição de água e coleta de esgoto, devendo ser abordado e universalizado, também, o tratamento correto destes efluentes.

2.2.2 Tratamento de Efluentes

Apesar de cerca de 70% do planeta Terra ser coberto por água, apenas 0,02% dela é apropriada para o consumo (COSTA et al., 2009). Devido à indispensabilidade da água nos setores econômicos industriais e agrícolas, bem como na própria sobrevivência do ser humano, surge o dever de não contaminar o que resta de limpo, e de limpar o que já foi antropogenicamente poluído.

A qualidade da água pode ser alterada por condições naturais, com partículas que sofrem escoamento superficial e infiltração no solo, e também por interferência do homem, com despejos domésticos e/ou industriais, e é considerada poluída caso seu uso, atribuído pelo próprio homem, seja prejudicado, conforme explica Sperling (1996).

A Organização Mundial da Saúde (OMS) relaciona água contaminada e falta de saneamento à transmissão de doenças como cólera, disenteria e até mesmo hepatite A. O investimento em saneamento tem capacidade de gerar economias significativas diretas, como no tratamento destas doenças, e também indiretas, considerando que uma população doente não é economicamente ativa. A OMS também estimou, em 2012, que para cada 1 dólar investido em serviços de saneamento básico, há uma economia de 4,3 dólares em custos de saúde pública.

A legislação brasileira prevê, através do Capítulo III da Resolução nº 410 de 17 de março de 2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que é de responsabilidade da fonte poluidora o gerenciamento dos efluentes lançados. Estes, de acordo com o Artigo 5º do Capítulo II, não podem alterar as características de qualidade da água, dadas pela Resolução nº 357 de 17 de março de 2005, conforme apontado na tabela 1.

Tabela 1 - Classificação das águas de acordo com a Resolução 357/2005.

Classe	Destinação
Especial	abastecimento para consumo humano, com desinfecção; preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
1	abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado; proteção das comunidades aquáticas; recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho; irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.
2	abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; proteção das comunidades aquáticas; recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho; irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; aquicultura e à atividade de pesca.
3	abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; pesca amadora; recreação de contato secundário; dessedentação de animais.
4	navegação; harmonia paisagística.

Fonte: Adaptado de CONAMA (2005).

No Brasil, menos da metade do esgoto gerado é tratado (SNIS, 2019), e a falta do tratamento de efluentes pode gerar um aumento de fósforo acima do permitido por lei.

2.3 FÓSFORO

Descoberto em torno do ano de 1669 pelo alquimista alemão Hennig Brandt em sua busca pela Pedra Filosofal, o fósforo é um elemento químico essencial para todo tipo de vida - animais, plantas e bactérias - e não é encontrado em sua forma pura na natureza, mas sim como fosfatos na urina e, principalmente, em minerais (ASHLEY *et al.*, 2011), como indica a tabela 2.

Tabela 2 - Principais formas de fosfatos existentes no ecossistema.

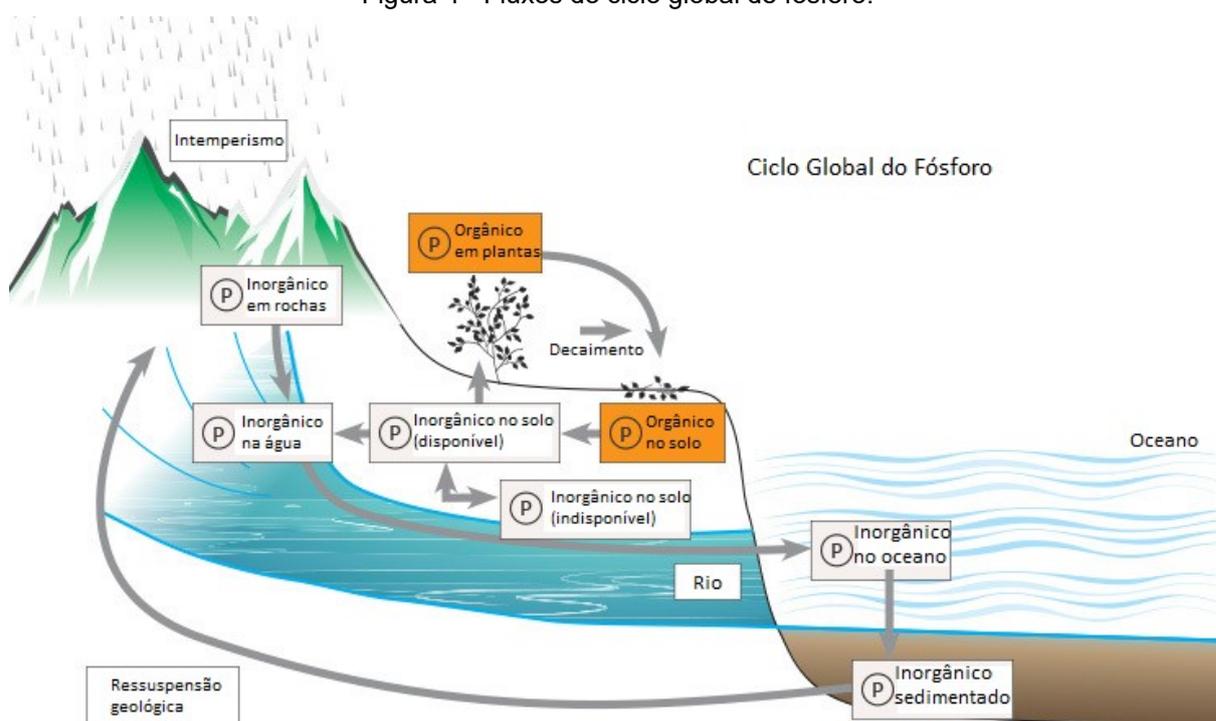
Fosfato	Formas Solúveis	Formas Insolúveis
Inorgânico	$H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Ortofosfatos	Complexo fosfato-argila
	$Fe_2(HPO_4)_3$ monohidrogênio fosfato férrico	Complexo metal-hidróxido
	$Ca(H_2PO_4)_2$ dihidrogênio fosfato de cálcio	Minerais, ex. apatita $Ca_{10}(OH)_2(PO_4)_6$
Orgânico	Compostos orgânicos dissolvidos	Fósforo complexado à matéria orgânica

Fonte: Gomes *et al.* (2008).

Praticamente 90% da demanda mundial de fósforo vem da produção de fertilizantes, enquanto que menos de 5% são destinadas (e essenciais) à certas aplicações não agrícolas, como a produção de detergentes e cremes dentais, conforme explicam Pantano *et al.* (2016).

De acordo com Aduan *et al.* (2004), o ciclo global do fósforo só se completa em escala de centenas de milhões de anos, pois não há uma ressuspensão deste elemento do oceano para o continente, como acontece com o nitrogênio, por exemplo. Ao invés disso, o fósforo sedimenta ao leito oceânico e só retorna orgânico novamente "quando os processos tectônicos da crosta terrestre ressuspendem as rochas sedimentares oceânicas para acima do nível do mar onde estas podem ser novamente intemperadas, recomeçando o ciclo", como apresentado na figura 4.

Figura 4 - Fluxos do ciclo global de fósforo.



Fonte: Adaptado da Universidade de Waikato (2013).

Apesar de sua indispensabilidade, seu excesso pode transformar o fósforo em um poluente muito perigoso para os corpos d'água devido ao enriquecimento exagerado dos mesmos, onde principalmente fósforo e nitrogênio servem de alimento para plantas e algas, que passam a consumir grande parte do oxigênio disponível, resultando na morte de animais aquáticos que ali viviam. Este fenômeno é conhecido como eutrofização (KLEIN; AGNE, 2012).

2.3.1 Eutrofização

Smith e Schindler (2010) explicam que a eutrofização pode ser denominada como cultural ou artificial, esta quando resulta da ação do homem, e já é considerada o maior problema na maioria das águas superficiais ao longo de todo o planeta, causando diversos efeitos colaterais na qualidade da água em lagos, reservatórios, rios e costas oceânicas, além de enormes prejuízos financeiros relativos ao posterior tratamento para abastecimento público.

As principais causas que levam ao excesso de nutrientes nos corpos hídricos são as águas drenadas em áreas agrícolas, que possuem altos índices de fertilizantes

ricos em fósforo e nitrogênio, além de esgotos domésticos e efluentes industriais que são despejados sem tratamento. (SMITH; SCHINDLER, 2010)

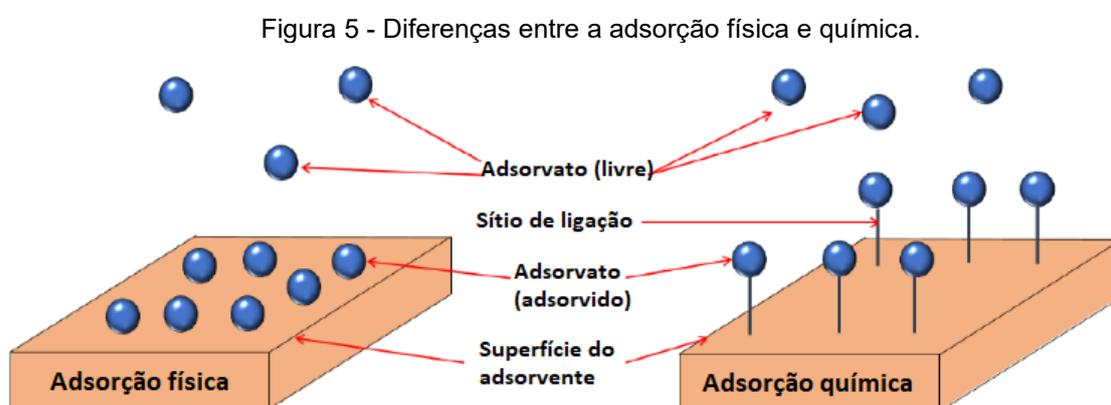
Levando em consideração o prazo extremamente longo do ciclo do fósforo, e também o problema que ele representa quando em excesso, realizar o processo de adsorção antes de despejá-lo aliviaria o processo de eutrofização.

2.4 ADSORÇÃO

Os primeiros experimentos registrados de adsorção datam ainda do século XVIII, mas as aplicações em larga escala para a separação e purificação de efluentes industriais são mais recentes, tendo seu início nos anos 1950. O processo de adsorção é uma transferência de massa caracterizada pela retenção do adsorvato, que é uma substância geralmente poluente, na superfície de um material sólido, conhecido como adsorvente (RUTHVEN, 1984).

A adsorção pode ser dividida entre física e química. A fisissorção é causada principalmente por forças eletrostáticas e interações de van der Waals entre as moléculas do adsorvato e os átomos que compõe a superfície do adsorvente. Quanto maior a área específica da superfície, maior a capacidade de adsorção, conforme explica Suzuki (1990). Já a quimissorção ocorre muito mais especificamente, pois depende de sítios ativos no adsorvente, mas em compensação apresenta ligações químicas muito mais fortes, devido ao compartilhamento ou troca de elétrons (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

A figura 5 ilustra a diferença entre a adsorção física e química.



Fonte: Adaptado de Nandiyanto *et al.* (2013).

Os fatores que podem influenciar o processo de adsorção são muitos, sendo os principais descritos por Nascimento *et al.* (2020) como a natureza do solvente; a temperatura do sistema; o pH do meio e as características do adsorvente e adsorvato, sendo que as do primeiro incluem a área superficial, o tamanho dos poros, a densidade, a hidrofobicidade e os grupos funcionais presentes na superfície do material; enquanto que as do segundo incluem o tamanho das moléculas, a solubilidade, a polaridade e o pH.

Dabrowski (2001) divide as principais aplicações práticas da adsorção entre as industriais, que incluem a remoção de impurezas dos líquidos e gases efluentes em seus vários processos, e as de Meio Ambiente, sendo subdivididas entre problemas locais e problemas globais. O autor destaca a remoção de fósforo através do tratamento de efluentes como uma das principais aplicabilidades do processo de adsorção, segundo a tabela 3.

Tabela 3 - Atribuições da adsorção ao Meio Ambiente.

Problemas ambientais locais	
Tratamento de gases de chaminés	Remoção da emissão de mercúrio, óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio
Recuperação de solventes e fracionamento por vapor de solventes	Prevenção da emissão de compostos orgânicos voláteis na atmosfera
Tratamento de efluentes	Remoção de nitrogênio, fósforo e orgânicos dos efluentes
Produção de água potável	Tratamento avançado de efluentes
Tecnologia de desumidificação dessecante	Melhoria da qualidade do ar através da remoção de poluentes e microrganismos
Problemas ambientais globais	
Controle do aquecimento global	Controle da emissão de gases de efeito estufa
Controle da destruição da camada de ozônio	Retenção de clorofluorcarbonetos que seriam lançados na atmosfera
Aplicações de defesa	Remoção de contaminantes usados em tarefas de defesa que apresentam agentes químicos extremamente tóxicos

Fonte: Adaptado de Dabrowski (2001).

2.4.1 Materiais adsorventes

Desde a descoberta do processo adsorptivo, diversos materiais são testados com diferentes tipos de adsorvatos. É necessário entender e avaliar quais são utilizados e quais as suas eficácias no processo, visto que suas particularidades podem influenciar muito na sua capacidade de adsorção.

2.4.1.1 Carvão ativado

Entre todos os materiais adsorventes, o carvão ativado comercial é o mais popular para a remoção de poluentes de efluentes. Devido à sua grande capacidade de adsorver tintas, é considerado como o adsorvente mais efetivo. Seu alto rendimento pode ser atribuído às suas características químicas simples, que possibilitam modificação através de tratamento químico para melhorar ainda mais suas propriedades, e também à sua forma estrutural, que o confere com uma textura porosa e grande superfície de contato (KYZAS *et al.*, 2013).

2.4.1.2 Resíduos de materiais cerâmicos

Existem vários materiais potencialmente aproveitáveis de resíduos da construção civil, estando os cerâmicos entre os mais notáveis, incluindo pisos, azulejos e tijolos, por exemplo.

Em ensaios realizados com estes materiais para a remoção de corante azul metileno, Dominguni *et al.* (2014) constatam que “materiais cerâmicos com menor grau de vitrificação e maior absorção de água incrementaram a adsorção do corante azul de metileno”. Além disso, verificou-se que o resíduo de tijolo com granulometria fina tem alta capacidade de adsorção de corantes, tornando-o viável para o tratamento de efluentes de indústrias têxteis.

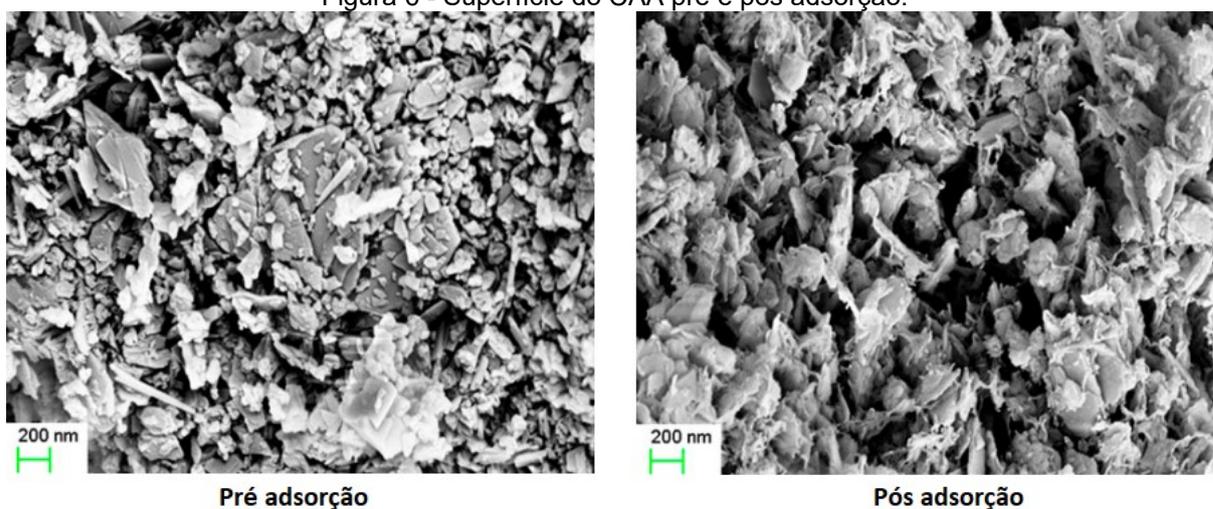
2.4.1.3 Resíduos de concreto aerado autoclavado

Uma variedade de estudos vem sendo feita sobre as propriedades de filtragem do concreto aerado autoclavado, mas poucas o usam como adsorvente na coluna de leito fixo e, quando isto acontece, geralmente tem o objetivo de adsorver metais pesados, ao invés do fósforo.

Kumara *et al.* (2019) explicam que a adsorção de metais por CAA se dá principalmente por troca de íons, complexação de superfície e precipitação de superfície, e testaram a remoção de íons de dois metais pesados, Cádmio (Cd^{2+}) e Chumbo (Pb^{2+}), verificando o CAA com uma alta capacidade de adsorção, considerando-o efetivo para o serviço. Um adendo mostra que, exclusivamente para

o Cd^{2+} , a adsorção variou de acordo com o pH inicial, e foi drasticamente reduzida quando era ácido. Os bons resultados que apareceram eram esperados, considerando que Zhang *et al.* (2017) removeram com sucesso 97% dos íons de Cádmiio (Cd^{2+}) de um efluente com baixas concentrações do mesmo, em ensaios realizados dois anos antes. A figura 6 mostra a superfície do CAA antes e depois da adsorção do fósforo, feita através de um microscópio eletrônico de varredura (SEM).

Figura 6 - Superfície do CAA pré e pós adsorção.

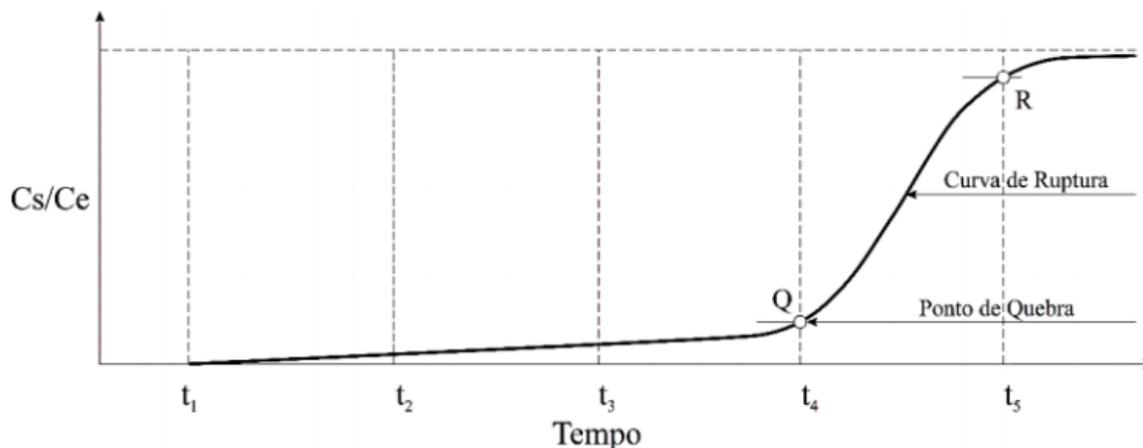


Fonte: Li *et al.* (2016).

2.4.2 Coluna de leito fixo

Patel (2019) introduz a coluna de leito fixo como sendo um sistema relativamente recente, em que o adsorvente em leito sofre um fluxo contínuo de adsorvato, com taxa constante. Lista suas vantagens em seu preço baixo e técnica simples, e o fato do adsorvato estar sempre em contato com uma quantidade de adsorvente novo; e cita sua principal desvantagem quando o fluxo de efluente é não uniforme. O autor também explica que, dentre os diversos tipos de técnicas de adsorção existentes, cada uma delas com seus méritos e deméritos, a mais optada e viável industrialmente para a remoção de contaminantes de líquidos preparados e efluentes reais é a própria coluna de leito fixo, cujo rendimento pode ser medido através da curva de ruptura que, de acordo com Werner (1988), é o curso da concentração de adsorção de efluentes na saída da coluna de leito fixo, e é melhor ilustrado pela figura 7, Onde C_s é a concentração de saída e C_e a concentração de entrada.

Figura 7 - Curva de ruptura em coluna de leito fixo.

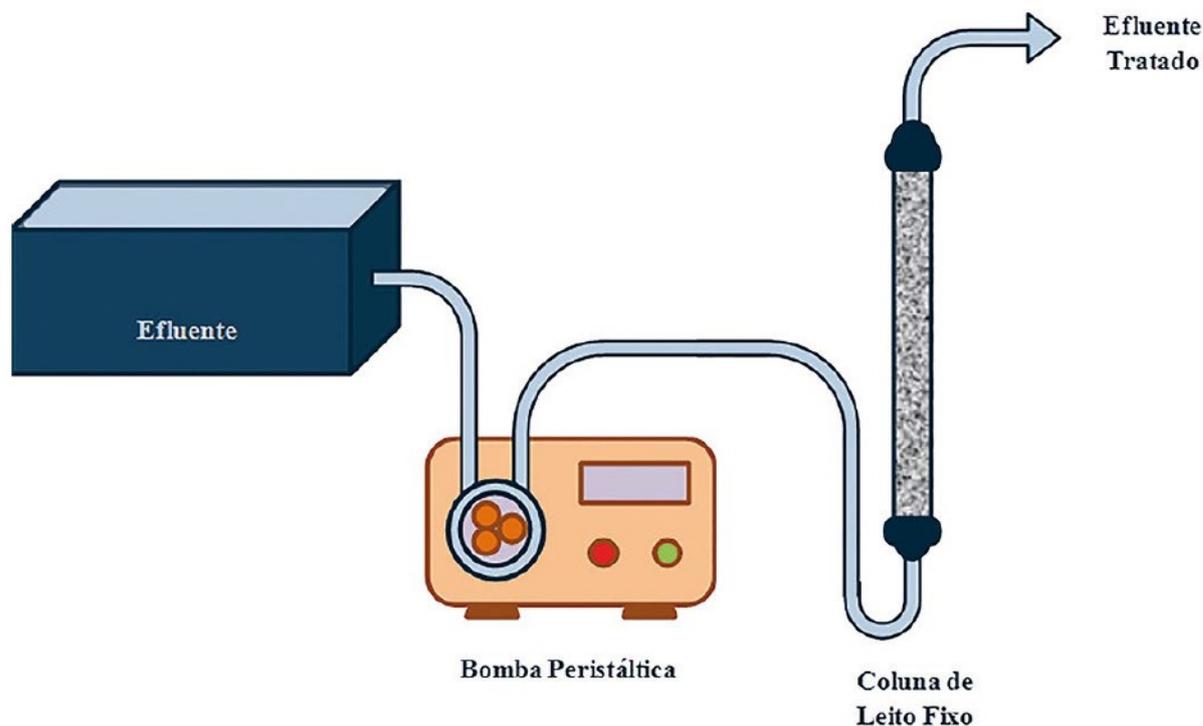


Fonte: Neto *et al.* (2018).

O sistema de coluna de leito fixo é composto por uma coluna em que partículas do adsorvente entram em contato com a solução a ser tratada. Uma bomba peristáltica é utilizada para o bombeamento, em fluxo ascendente ou descendente, através da coluna onde está o material adsorvente. Após a saturação deste, pode passar por um processo de dessorção para o aproveitamento dos elementos adsorvidos, além da reutilização do próprio material adsorvente na mesma coluna (GASPAR, 2003).

A figura 8 exemplifica o esquema da coluna de leito fixo.

Figura 8 - Sistema de adsorção em coluna de leito fixo.



Fonte: Nascimento *et al.* (2020).

2.4.2.1 Adsorção de fósforo em coluna de leito fixo

Apesar da abrangência de estudos, não há um sobre o concreto aerado autoclavado sendo utilizado em coluna de leito fixo como adsorvente para a remoção de fósforo. Li *et al.* (2016) realizaram ensaios em batelada com 50ml de uma solução de 1mg/l de KH_2PO_4 (como fósforo) a 200 rpm com 0,5g de concreto aerado autoclavado durante 2 horas. Os resultados obtidos mostram que, quanto maior o pH do adsorvente, maior é a eficiência de remoção de fósforo, chegando a 98,67% quando o CAA foi modificado com NaOH. Zhang e Zhu (2018) testaram a remoção de fósforo utilizando blocos de CAA em *wetlands* para escoamento inicial de água da chuva, como uma alternativa aos *wetlands* de cascalho, e chegaram à conclusão que os de CAA são superiores.

Outros fatores como a concentração inicial de fósforo no efluente, altura do adsorvente na coluna, vazão afluyente e a granulometria do adsorvente foram testados tendo resíduo de soja (okara) modificado com zircônio como adsorvente e fósforo como adsorvato, e considerados como grandes influenciadores na capacidade de adsorção em coluna de leito fixo (NGUYEN *et al.*, 2015).

Um aumento tanto na altura do adsorvente na coluna, representando uma quantidade maior do mesmo, quanto na concentração inicial do adsorvato aumentam a capacidade de adsorção. A diminuição da vazão afluyente tem o mesmo efeito. (SUN *et al.*, 2014).

Os principais intervenientes para a adsorção de fósforo, bem como a eficiência de remoção em porcentagem, observados em diversos artigos, são exemplificados na tabela 4.

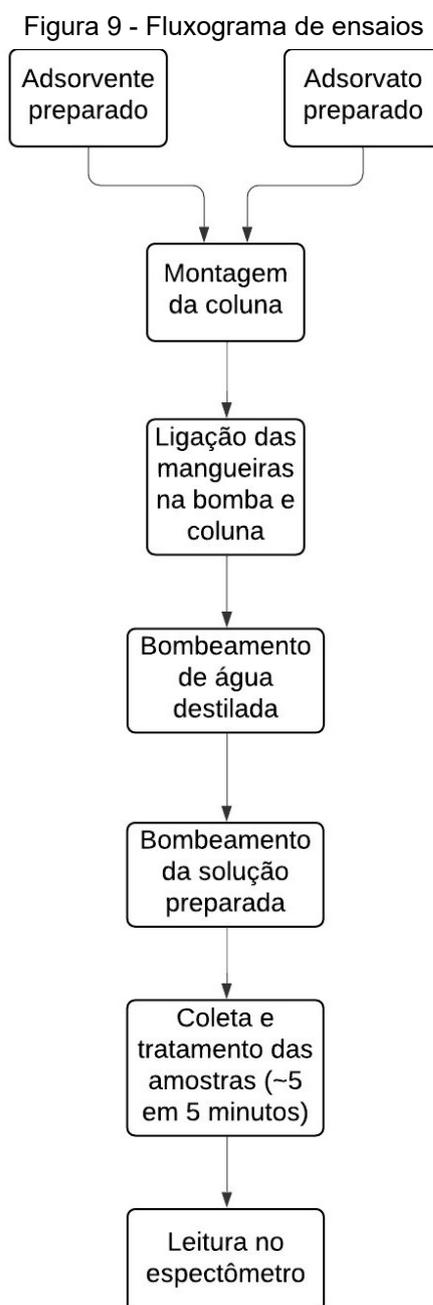
Tabela 4 – Diferentes adsorventes e suas eficiências de remoção de fósforo

Referência	Adsorvente	Adsorvato	Método utilizado	Principais intervenientes	Eficiência na remoção
LI <i>et al.</i> (2015)	CAA modificado com NaOH	KH ₂ PO ₄ (P)	Adsorção em batelada	pH	98,67%
RENMAN; RENMAN (2012)	CAA	K ₂ HPO ₄ (P)	Filtro de leito reativo	Concentração inicial de fósforo	92,40%
SASSAKI; GARCIA (2019)	Tijolo quimicamente ativado com cal dolomítica	KH ₂ PO ₄ (P)	Coluna de leito fixo	Sítios ativos, superfície de contato, ligações (proporcionados pela ativação com cal)	100,00%
NGUYEN <i>et al.</i> (2015)	Resíduo de soja (okara) modificado com zircônio	Na ₂ HPO ₄ (P)	Coluna de leito fixo	pH, Concentração inicial de fósforo, quantidade de adsorvente, vazão afluyente, granulometria do adsorvente	98,24%
JUNG <i>et al.</i> (2018)	Andosol com bagaço da cana de açúcar	KH ₂ PO ₄ (P)	Coluna de leito fixo	Quantidade de adsorvente, vazão afluyente	87,00%
BEJI <i>et al.</i> (2018)	Solo alcalino da Tunísia	KH ₂ PO ₄ (P)	Coluna de leito fixo	Vazão afluyente, concentração inicial de fósforo e quantidade de adsorvente	66,80%
NUNES; COSTANZI (2020)	Bloco cerâmico	Na ₂ HPO ₄ (P)	Adsorção em batelada	Área superficial, porosidade do material, concentração inicial de fósforo	88,83%
SELLNER <i>et al.</i> (2019)	Subprodutos de aço	KH ₂ PO ₄ (P)	Coluna de leito fixo	Vazão afluyente, pH	90,00%
CABRAL (2019)	Tijolo quimicamente ativado com cal dolomítica	KH ₂ PO ₄ (P)	Adsorção em batelada	pH, porosidade, temperatura	85,00%

Fonte: Autoria própria.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados em uma coluna de leito fixo, utilizando camadas de algodão para impedir o movimento das amostras do material adsorvente, bem como pérolas de vidro como material inerte afim de garantir vazão constante. O preparo do adsorvente e do adsorvato são vistos neste capítulo. O fluxograma apresentado na figura 9 exemplifica todo o processo para a realização dos ensaios.



Fonte: Elaboração própria.

Os resíduos de CAA utilizados como adsorventes foram disponibilizados pelo Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACOC) da UTFPR, campus Curitiba.

3.1 CARACTERIZAÇÃO E PREPARO DO ADSORVENTE

Um bloco de concreto aerado autoclavado de aproximadamente 8 kg foi quebrado utilizando prensa hidráulica universal (EMIC, DL30000), triturado e peneirado com peneira mecânica Solatest durante 5 min, afim de obter partículas de diferentes granulometrias (em mm): 0,075, 0,15, 0,3, 0,6, 1,18, 2,36, 4,7, 6,3, 12,7 e fundo, de acordo com a NBR NM 248 (2003).

Figura 10 - Granulometria ideal do CAA



Fonte: Acervo próprio (2021).

3.1.1 Caracterização físico-química

Os resultados dos ensaios de caracterização físico-química adotados e realizados neste trabalho foram a análise do material em se tratando de seus teores de umidade, materiais voláteis, cinzas, granulometria e análises termogravimétricas, além de fluorescência de raios X (FRX), difratometria de raios X (DRX), porosimetria, ensaio de pH e ensaio de pH de ponto de carga zero (pH_{pcz}).

3.1.1.1 Teor de umidade

Para determinação do teor de umidade do material adsorvente, foi realizada secagem em estufa segundo a norma ASTM D 2867 (2004), em triplicata, da seguinte forma:

Foram pesadas 2 amostras de 0,1 g de concreto aerado autoclavado em cápsulas de porcelana, que foram colocadas em mufla Zezimaq, modelo 2000G, a 950 (25) °C por 30 minutos para calcinação. Após este tempo, as cápsulas de porcelana foram colocadas em dessecador até atingir a temperatura ambiente. Depois, foram pesadas em balança analítica Shimadzu, modelo AUY220. O material foi disposto em cápsulas previamente taradas em balança analítica e registradas as massas das cápsulas, das amostras e dos conjuntos. Posteriormente, as cápsulas com as amostras foram levadas à estufa a 150 (5) °C por 3 horas e, ao final deste tempo, foram colocadas em dessecador até atingir temperatura ambiente para serem pesadas na balança analítica. O teor de umidade foi calculado de acordo com a Equação 1.

$$TU (\%) = \frac{(C - D)}{(C - B)} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

TU = Teor de umidade (%);

B = Massa do recipiente (g);

C = Massa do recipiente com a amostra original (g);

D = Massa do recipiente com a amostra seca (g).

3.1.1.2 Teor de material volátil

Para determinação do teor de material volátil do adsorvente, foi realizada secagem em estufa segundo a norma ASTM D 5832-98 (2003), em triplicata, da seguinte forma:

Determinou-se o teor de umidade com as cápsulas de porcelana calcinadas na mufla Zezimaq, modelo 2000G a temperatura de 950 (25) °C durante 30 minutos e resfriadas em dessecador, e depois pesadas na balança analítica Shimadzu, modelo AUY220.

Em seguida, foram inseridas duas amostras de cerca de 0,1 g cada do material adsorvente em cada cápsula. A cápsula com o material adsorvente foi mantida em mufla a 950 (25) °C por 7 minutos. Ao término desse tempo, as cápsulas foram retiradas da mufla e resfriadas em dessecador para determinação das massas.

O teor de material volátil foi determinado de acordo com as Equações 2 e 3.

Cálculo da porcentagem de perda de peso:

$$\text{Perda de Peso (\%)} = \frac{(C - D)}{(C - B)} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

B = Massa do recipiente (g);

C = Massa do recipiente com a amostra do adsorvente (g);

D = Massa do recipiente com a amostra sem materiais voláteis (g).

Cálculo do teor de material volátil:

$$MV (\%) = E - F \quad (3)$$

Em que:

MV = Material volátil contido na amostra (%);

E = Perda de peso (%);

F = Umidade (%).

3.1.1.3 Teor de cinzas

Para determinação do teor de cinzas do material adsorvente, foi realizada secagem em estufa segundo a norma ASTM D 2866-94 (1998), em triplicata, da seguinte forma:

Foram colocadas cápsulas de porcelana na mufla a 620 (15) °C durante uma hora. Em seguida, as cápsulas foram mantidas no dessecador para atingir temperatura ambiente. Após o resfriamento, foram pesadas em balança analítica Shimadzu, modelo AUY220.

Aproximadamente 3 g do material adsorvente foi seco em estufa a 150 (5) °C durante 3 horas e, em seguida, transferido para o dessecador.

Após o resfriamento das amostras, uma amostra de 0,1 g do material adsorvente foi pesada na cápsula. A cápsula foi levada para mufla a 650 (20) °C durante 8 horas para carbonização das amostras. Ao término do tempo, a cápsula foi colocada em dessecador até resfriamento para posterior determinação da massa.

O teor de cinzas foi determinado de acordo com a Equação 4.

$$\text{Teor de cinzas (\%)} = \frac{\text{massa de sólidos restantes}}{\text{massa inicial da amostra}} \times 100 \quad (4)$$

3.1.1.4 Determinação do pH

Para determinação do pH do material adsorvente, foram realizados ensaios em triplicata no Laboratório de Saneamento do Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACOC) da UTFPR, campus Curitiba, sede Ecoville, de acordo com a metodologia descrita na norma ASTM D 3838-80 (1999).

Soluções tampão de pH 4,0 e 7,0 foram utilizadas para calibração do equipamento pHmetro de marca EVEN, modelo PHS-3E. Em seguida, 10 g de cada material adsorvente foram colocados, individualmente, em 100 ml de água deionizada. As soluções foram aquecidas a aproximadamente 90 °C e agitadas em agitador magnético por 15 minutos. A solução foi filtrada em papel qualitativo de faixa azul (gramatura de 80 g m⁻²) e, após resfriamento, foi determinado o pH.

3.1.1.5 Ponto de carga zero (pH_{pcz})

O conhecimento do ponto de carga zero é de suma importância, providenciando informações sobre a possível atração e repulsão entre adsorventes e adsorvatos, e pode ser definido como o pH no qual a carga da superfície do adsorvente tem valor de zero (FIOL; VILLAESCUSA, 2008).

Para determinação do pH_{pcz} , foram realizados ensaios em triplicata no Laboratório de Saneamento do Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACOC) da UTFPR, campus Curitiba, sede Ecoville, utilizando o método do “experimento dos 11 pontos”, adaptado de Regalbuto e Robles (2004).

Soluções de hidróxido de sódio (NaOH) e ácido clorídrico (HCl) na concentração de $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ foram preparadas para ajustar o pH da solução de cloreto de sódio (NaCl) $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, já previamente preparada. O pH foi variado em 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12. Após os ajustes de pH, 1 g de material adsorvente foi distribuído em cada frasco dos 25 mL de solução de NaCl. Os frascos foram colocados na mesa de agitação orbital SOLAB modelo SL222, com rotação de 150 rpm e temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 h.

3.1.1.6 Fluorescência por raios-X (FRX)

Para determinação de fluorescência de raio-X, foi realizada análise em fluorímetro Shimadzu, modelo EDX-720/800HS, com tubos de Ródio de 500 kV e $100 \mu\text{A}$, sob condição de vácuo, não sendo utilizados padrões, visto que a composição do material é obtida com base no método de parâmetros fundamentais (varredura química) (MACIOSKI, 2017).

3.1.1.7 Porosimetria de mercúrio

Esta análise teve por objetivo a determinação da densidade aparente, distribuição de tamanho e volume total de poros e área específica do adsorvente. Foi realizada em porosímetro da marca QUANTACHROME, modelo Poremaster® Automated Mercury Porosimeters 8.01, no Laboratório de Caracterização do Núcleo de Pesquisa Tecnológica (NPT) do Departamento Acadêmico de Construção Civil

(DACOC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Curitiba, sede Ecoville.

Os dados para a realização desta análise são tensão superficial de mercúrio de 0,480 N/m, densidade de 13,5 g/cm³ e ângulo de contato mercúrio/adsorvente de 140°.

3.1.1.8 Difratometria por raios-X (DRX)

Esta análise teve por objetivo determinar quais as fases cristalinas estão presentes no material adsorvente. Este foi analisado em um difratômetro de raios-X Shimadzu Co., modelo XRD-7000, operando a 30 kV, 30 mA e a temperatura ambiente. Os parâmetros dos ensaios foram: 2θ variando de 5° a 75°, passo angular de 0,02° e velocidade de varredura de 2° min⁻¹. A análise dos resultados foi realizada com auxílio do software X'Pert Highscore Plus (durante o período de licença gratuita).

Este ensaio foi realizado no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) do Departamento Acadêmico de Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Curitiba, sede Centro.

3.2 CARACTERIZAÇÃO E PREPARO DO ADSORVATO

O tipo de fosfato utilizado para o preparo da solução a ser adsorvida foi o KH₂PO₄, que é o fosfato de potássio monobásico anidro. 0,0439g deste foi pesado e diluído em 1 litro de água destilada. Após isto, 300ml desta primeira solução mãe foram colocados em um balão volumétrico de 1 litro e completado com água destilada (mais 700ml). Com isto, foi alcançada a solução de 10mg de fosfato por litro.

3.2.1 Curva analítica do fósforo

Através do método descrito por Pompêo e Moschini-Carlos (2003), foram preparadas diferentes concentrações de fosfato (0,07, 0,15, 0,31, 0,61, 1,23, 2,46, 4,92, 7,38, 9,84 e 12,3 mg/L) a partir de uma solução mãe de 40 mg/L, elaborada uma curva padrão e, através dela, obtida uma equação de reta mostrando a relação matemática entre absorvância e concentração.

O limite óptico de detecção (LOD) e o limite óptico de quantificação (LOQ) são calculados através das seguintes equações:

$$LOD = 3,3 \times \frac{DPbco}{b} \quad (5)$$

Em que:

LOD = Limite óptico de detecção (mg/L);

DPbco = Desvio padrão do branco;

b = Coeficiente angular da curva. E

$$LOQ = 10 \times \frac{DPbco}{b} \quad (6)$$

Em que:

LOQ = Limite óptico de quantificação (mg/L);

DPbco = Desvio padrão do branco;

b = Coeficiente angular da curva.

3.3 ENSAIOS EM COLUNA DE LEITO FIXO

A coluna utilizada tem comprimento de 40,16cm e diâmetro interno de 0,86cm. Os ensaios envolveram variação de massa de adsorvente e de vazão afluyente, mantendo a granulometria do adsorvente fixa e a concentração inicial de fósforo na solução preparada em 10mg/L para todos os ensaios, com pH fixo em torno de 6,5.

A tabela 5 mostra o planejamento estatístico, elaborado em fatorial 2², utilizado para a realização dos testes.

Tabela 5 - Planejamento estatístico

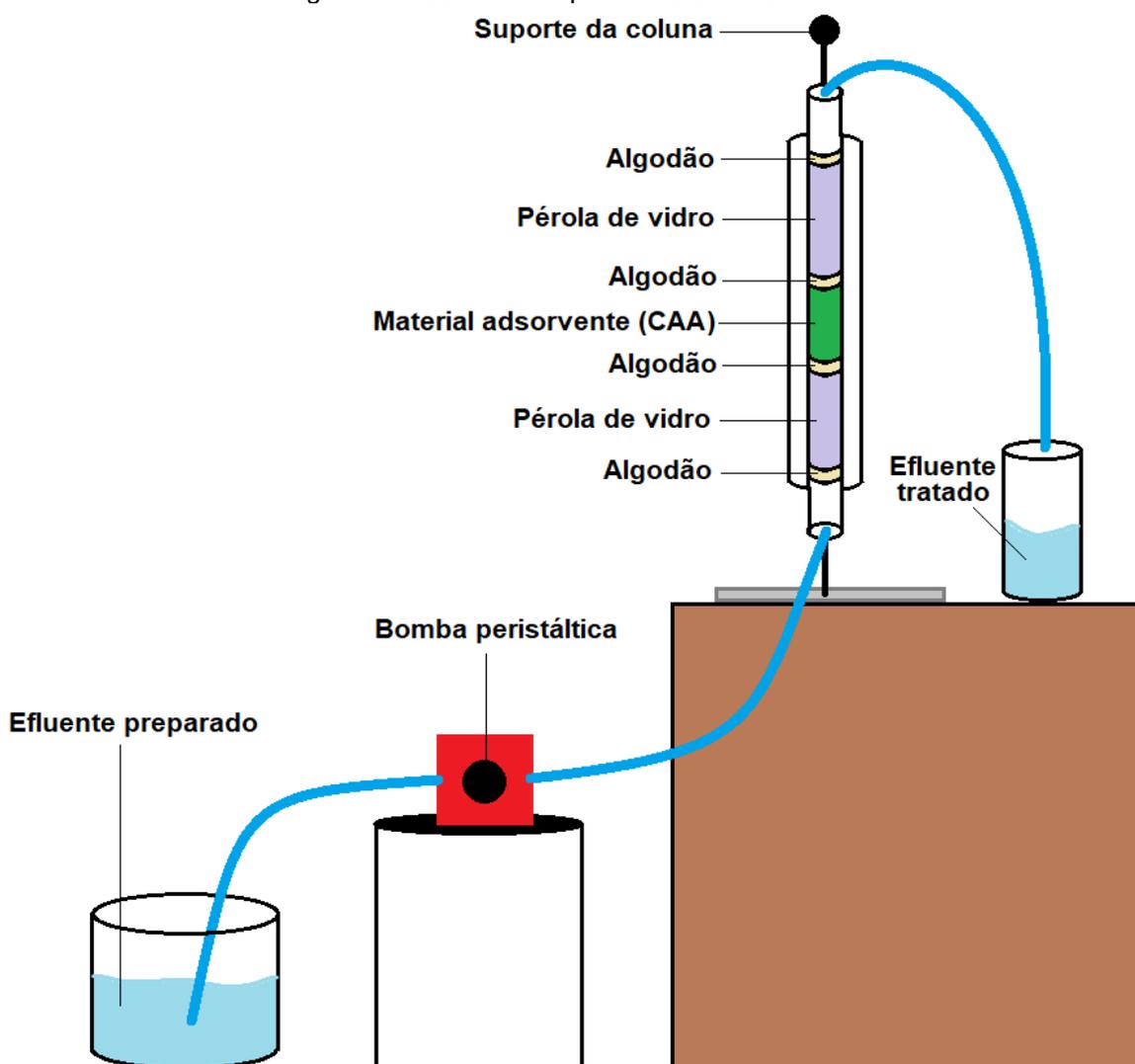
Ensaio	Variáveis codificadas		Variáveis decodificadas	
	Vazão (ml/min)	Massa (g)	Vazão (ml/min)	Massa (g)
1	-	-	1,7	6,8
2	+	-	3,6	6,8
3	-	+	1,7	8,2
4	+	+	3,6	8,2
5	-1,414	0	1,3	7,5
6	1,414	0	4,0	7,5
7	0	-1,414	2,7	6,5
8	0	1,414	2,7	8,5
9	0	0	2,7	7,5
10	0	0	2,7	7,5
11	0	0	2,7	7,5

Fonte: Elaboração própria.

Cinco valores para cada uma das variáveis foram utilizados. A massa de adsorvente variou de 6,5g à 8,5g, enquanto que a vazão afluente variou de 1,3ml/min à 4,0ml/min.

Após a preparação do adsorvente e adsorvato, realizou-se a montagem da coluna. A diferença de altura entre o efluente preparado, a bomba peristáltica e a coluna de leito fixo foram assim decididas afim de evitar que bolhas de ar se mantivessem no sistema, conforme esquematizado na figura 11.

Figura 11 - Desenho esquemático da coluna



Fonte: Elaboração própria.

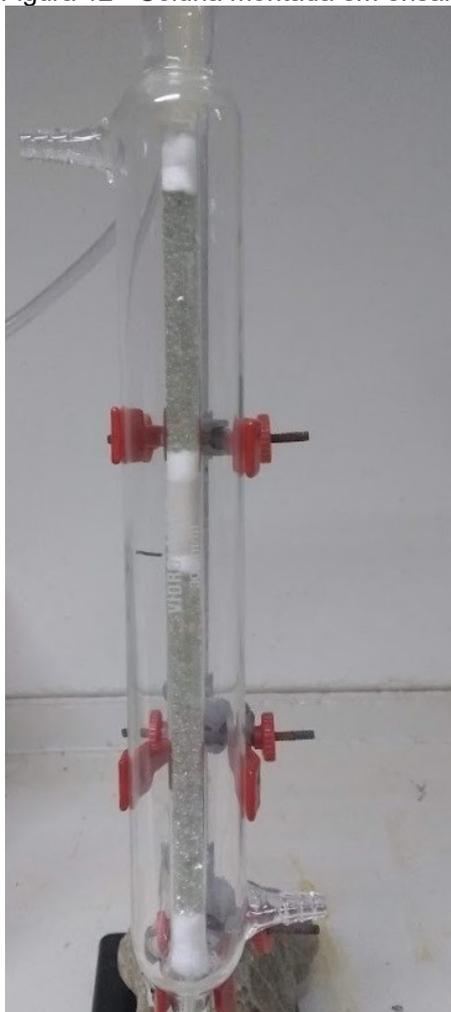
A altura das pérolas de vidro e do material adsorvente dentro da coluna variaram de acordo com cada um dos pesos definidos no planejamento estatístico.

Água destilada foi bombeada pelo sistema até que todas as bolhas de ar pudessem ser removidas. Após isto, passou-se a bombear a solução. Baseado no comprimento das mangueiras e vazão afluyente, foi calculado um tempo aproximado para que a solução de fósforo preparada entrasse em contato com o CAA. Quando este tempo era alcançado, amostras eram coletadas de aproximadamente 5 em 5 minutos, e posteriormente preparadas para a leitura no espectrofotômetro da marca HACH, modelo DR 5000. Este preparo foi baseado no método do ácido ascórbico (EPA, 1978), e se dava com 5ml de cada coleta tratada com 0,35ml de reagente misto e 0,15ml de ácido ascórbico, colocando-os em um tubo de ensaio com tampa, agitado

duas vezes e aguardado 15 minutos para que ela pudesse ser lida no espectrofotômetro através da análise do comprimento de onda.

A figura 12 mostra a coluna montada e a granulometria de concreto aerado autoclavado utilizado em todos os ensaios.

Figura 12 - Coluna montada em ensaio



Fonte: Autoria própria.

3.3.1 Modelagens analíticas de cinética de adsorção

Os dois modelos a serem utilizados neste trabalho são o Modelo de Thomas e o Modelo de Yoon-Nelson. Ambos já são amplamente utilizados em estudos de adsorção em coluna de leito fixo. O modelo de Thomas, que prevê o desempenho de adsorção em uma coluna, exige que não haja difusão axial (WANG *et al.*, 2016). A fórmula se dá da seguinte forma:

$$\ln \left(\frac{C_t}{C_0} - 1 \right) = \frac{K_{th} q_0 M}{Q} - K_{th} C_0 t \quad (7)$$

Em que:

C_t: concentração em um tempo analisado (mg/L);

C₀: concentração inicial (mg/L);

K_{th}: constante de Thomas (mL/min mg);

q₀: adsorção de equilíbrio de fósforo por grama de adsorvente (mg/g);

M: massa de adsorvente na coluna (g);

Q: vazão afluyente (mL/min);

t: tempo analisado (min).

Os valores de K_{th} e q₀ poderão ser obtidos através de análise de regressão linear, plotando o gráfico de Ln pelo tempo.

Já o modelo de Yoon-Nelson é utilizado para prever o tempo de saturação e o desempenho do processo de adsorção através de uma massa de adsorvente já conhecida. O modelo Yoon-Nelson é menos complicado do que outros modelos e não necessita de dados detalhados sobre as propriedades físico-químicas do adsorvato e adsorvente (BEJI *et al.*, 2018). A equação é:

$$\ln \left(\frac{C_t}{C_0 - C_t} \right) = K_{yn} t - \tau K_{yn} \quad (8)$$

Em que:

C_t: concentração em um tempo analisado (mg/L);

C₀: concentração inicial (mg/L);

K_{yn}: constante de Yoon-Nelson (min⁻¹);

t: tempo analisado (min);

τ: tempo para o alcance de 50% de saturação (min).

Os valores de K_{yn} e τ poderão ser obtidos através de análise de regressão linear, plotando o gráfico de Ln pelo tempo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados encontrados nos ensaios na coluna de leito fixo foram analisados em termos de concentração de saída por concentração de entrada (C_s/C_e) para obter a eficiência de remoção de fósforo pelo CAA, em porcentagem, e dois modelos de modelagem analítica foram selecionados para a análise da curva de ruptura: os modelos de Thomas e Yoon-Nelson.

O planejamento estatístico para os ensaios foi inicialmente baseado nas condições ótimas encontradas nos ensaios em batelada do CAA. Porém, a granulometria foi um impeditivo para a realização dos ensaios na coluna de leito fixo, visto que a ideal era de 0,74cm, ou seja, quase do tamanho do diâmetro interno da coluna. Isto fez com que muitos espaços vazios ficassem entre os pedaços do CAA, permitindo passagem de adsorvato com pouco contato com o adsorvente. Com isso, decidiu-se por mudar a granulometria de 0,74cm, ou 7,4mm, para 0,075mm, condição ótima encontrada por Liu (2020), e que também foi previamente testada. A partir da nova granulometria, ajustes de massa e vazão também foram feitos, e poderão ser vistos na tabela de planejamento estatístico.

4.1 RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO ADSORVENTE

Todos os resultados de caracterização físico-químicas do concreto aerado autoclavado seguiram os métodos descritos em 3.1.1 para a sua obtenção, e são mostrados a seguir.

4.1.1 Teores de umidade, cinzas e materiais voláteis

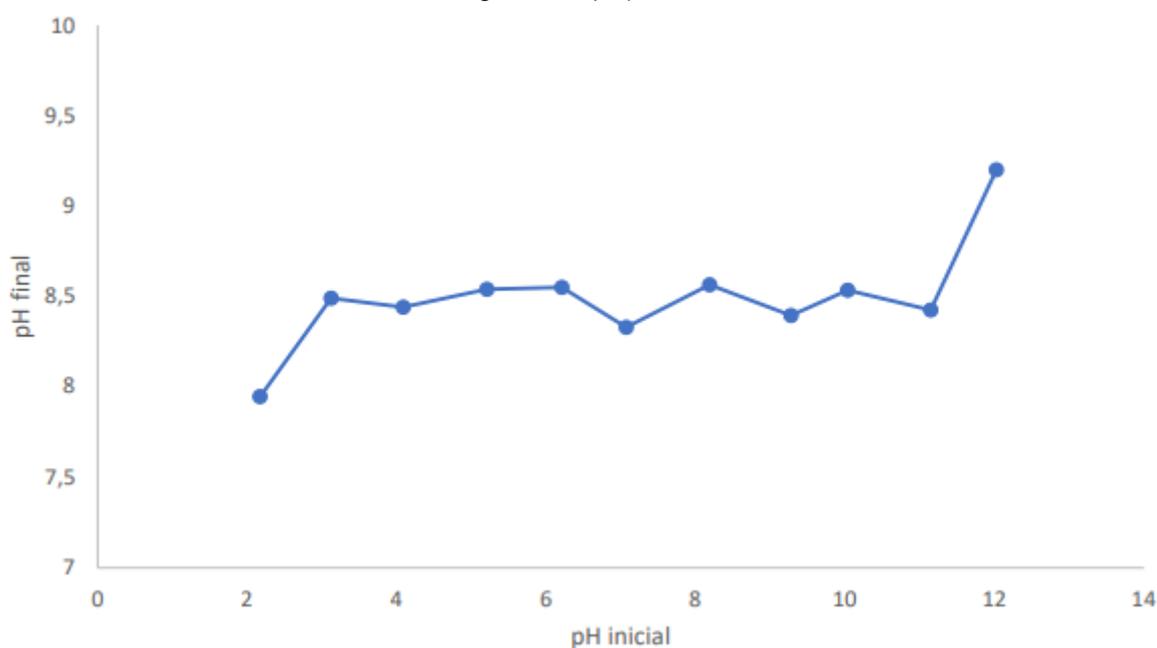
O teor de umidade encontrado foi realizado em triplicata, após secagem em estufa, e teve uma média de 1,83%, com desvio padrão de 0,34%. Já o teor de material volátil teve um desvio padrão muito menor, de apenas 0,09%, enquanto que sua média foi de 14,12%. Seu teor de cinzas foi de 14,64%, com desvio padrão de 0,29%, e o teor de carbono fixo foi de 30,59%, com desvio padrão de 0,43%.

4.1.2 pH e ponto de carga zero (pH_{pcz})

Li *et al.* (2016) explica que o pH é de suma importância para a capacidade de adsorção do CAA. O ensaio em triplicata resultou em um pH de 7,23, levemente básico. Valores mais básicos de pH (10-12) resultaram em uma maior eficiência na remoção do fósforo, observados nos ensaios do referido autor.

O ponto de carga zero é demonstrado na figura 13.

Figura 13 - pH_{pcz} do CAA



Fonte: Elaboração própria.

Segundo Sonai *et al.* (2016), quando o valor do pH da solução é maior que o pH_{pcz} , a carga superficial do adsorvente é negativa. Quando o valor de pH da solução é menor que o pH_{pcz} , a carga superficial do adsorvente é positiva.

Relacionando as cargas superficiais do adsorvente com as do adsorvato, pode-se entender se ocorre atração ou repulsão entre eles, favorecendo ou não a adsorção.

4.1.3 Fluorescência por raios-X (FRX) e difratometria por raios-X (DRX)

A tabela 6 mostra a composição química do concreto aerado autoclavado, por porcentagem de peso, realizado por fluorescência por raios-X (FRX).

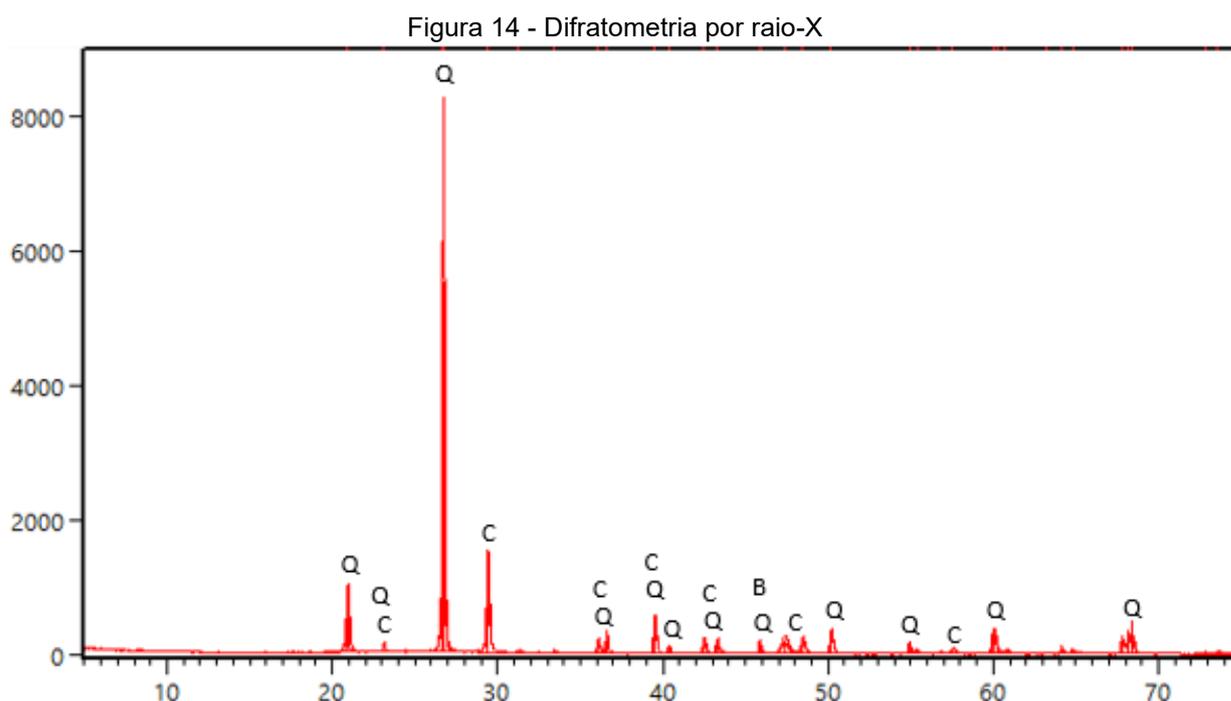
Tabela 6 - Composição química por porcentagem do peso

SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Outros
58,88	9,91	6,76	5,87	3,76	2,94	1,87	0,33	9,68

Fonte: Elaboração própria.

Há uma grande diferença entre o concreto aerado autoclavado analisado por Kumara *et al.* (2019), onde a porcentagem de CaO é de quase 35%. Nos outros componentes, as porcentagens se assemelham.

Na figura 14, a difratometria por raios-X indica a intensidade por contagem no eixo y e a angulação 2θ no eixo x. Q representa SiO₂ (quartzo), C representa CaCO₃ (calcita) e B representa Cu₅FeS₄ (bornita), tendo um resultado similar ao encontrado no estudo de Li *et al.* (2016), com um pico de quartzo, e muitas incidências de quartzo e elementos calcinados.



Fonte: Difratômetro Shimatzu XRD-7000 (2021).

4.1.4 Densidade, volume total de poros e diâmetro médio dos poros

A densidade do adsorvente analisada teve resultado médio de 2,55g/cm³, com desvio padrão de 0,02g/cm³. O volume total de poros foi de 0,013g/cm³, enquanto que o diâmetro médio destes poros foi de 12nm. BARRETO (2012) encontrou uma densidade de 4,00 à 6,50g/cm³ nos blocos de CAA analisados por ele. Esta diferença

pode se dar devido à quantidade de agente expensor incluído na mistura da produção do material.

4.2 RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DO ADSORVATO

O preparo das soluções de fosfato para os ensaios de caracterização seguiu os passos descritos no subcapítulo 3.2, com o preparo de uma solução mãe de fosfato de 40 mg/L, e em seguida, preparadas diferentes concentrações de fosfato de 0,07 até 12,3 mg/L, que foram lidas em espectrofotômetro.

4.2.1 Curva analítica do fósforo

A tabela 7 mostra os pontos de concentração utilizados para a elaboração da curva analítica do fósforo e a absorvância obtida na leitura de cada ponto.

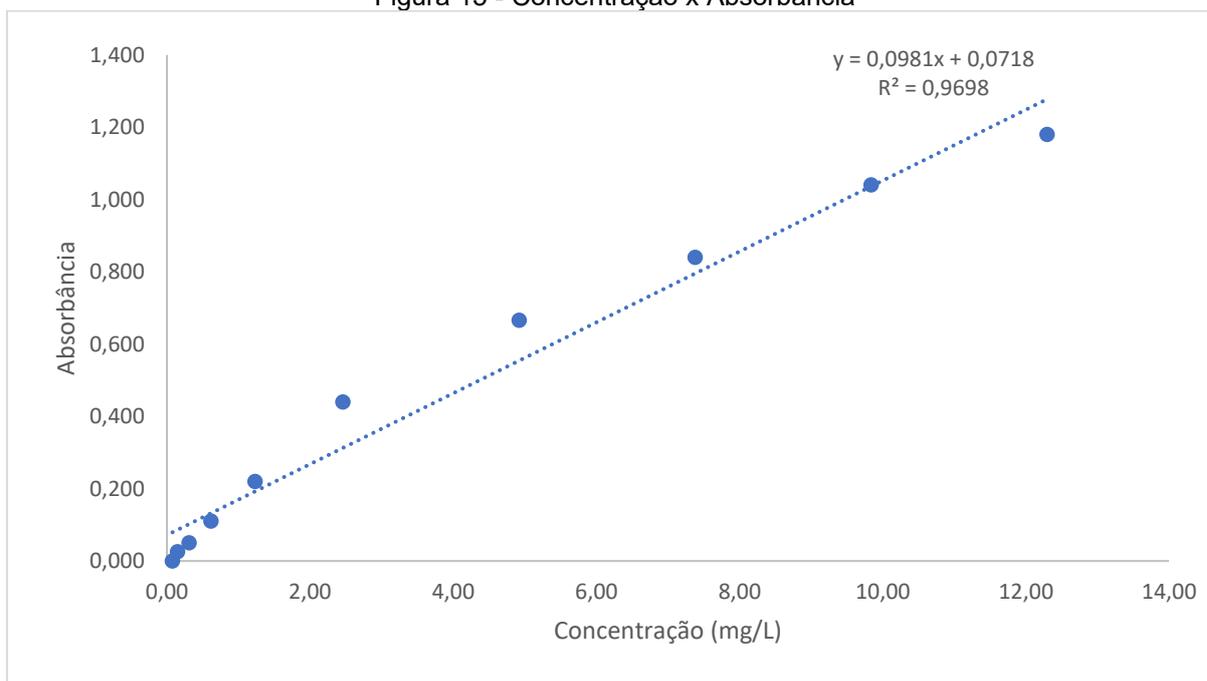
Tabela 7 - Absorbância por cada concentração de P

Concentração (mg/L)	Absorbância
0,08	0,000
0,15	0,025
0,31	0,050
0,62	0,110
1,23	0,220
2,46	0,440
4,92	0,665
7,38	0,839
9,84	1,040
12,30	1,180

Fonte: Elaboração própria.

Após as leituras de absorvância em cada um dos pontos de concentração, foi possível elaborar um gráfico para a obtenção da curva analítica, conforme mostra a figura 15.

Figura 15 - Concentração x Absorbância



Fonte: Elaboração própria.

O branco foi medido em triplicata afim de obter o desvio padrão. Os dados do branco foram 0 no primeiro ensaio, 0,007 no segundo ensaio e 0,001 no terceiro ensaio. Com isto, o desvio padrão calculado foi de aproximadamente 0,003786. Com este desvio padrão agora calculado e o coeficiente angular da curva analítica de 0,0981, foi possível realizar o cálculo dos limites de detecção e quantificação, observados na tabela 8.

Tabela 8 - Limites ópticos e parâmetros de cálculo

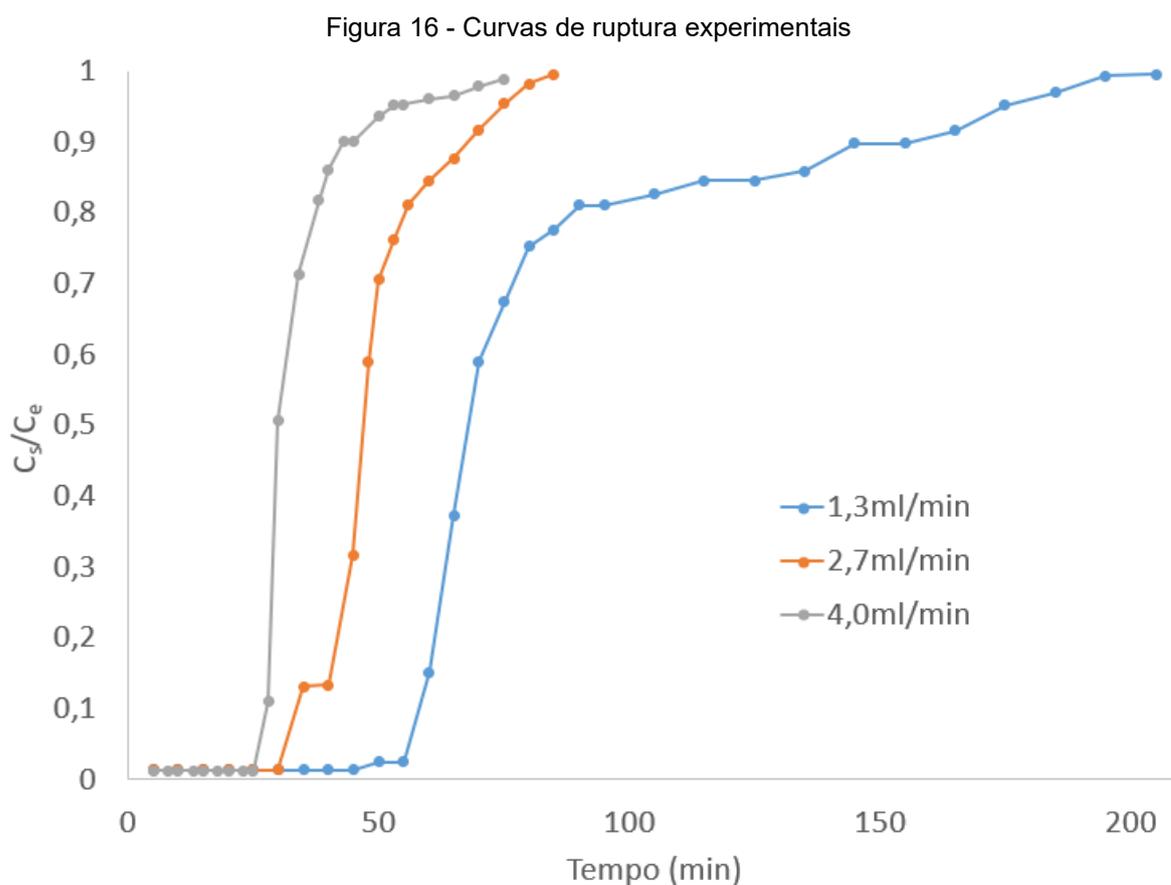
LOD (mg/L)	LOQ (mg/L)	Desvio padrão do branco	Coefficiente angular	R ²
0,127	0,386	0,003786	0,0981	0,9698

Fonte: Elaboração própria.

4.3 ADSORÇÃO EM COLUNA DE LEITO FIXO

Para verificar o desempenho da coluna de leito fixo, são estruturadas as curvas de ruptura a partir dos dados experimentais. A vazão afluyente, medida na saída da coluna, bem como a quantidade de material adsorvente na coluna possuem grande influência na adsorção, conforme explica Nguyen *et al.* (2015), e foram variados durante os ensaios.

Na figura 16, estão representados os ensaios com o tempo mais curto para início da curva de ruptura (ensaio 6), um intermediário (ensaio 10) e o com tempo mais longo para início da curva de ruptura (ensaio 5). O eixo x representa o tempo, em minutos, e o eixo y representa a relação entre a concentração de saída e a concentração de entrada (C_s/C_e). Todos possuem a mesma massa de 7,5g, alterando apenas a vazão afluyente, descrita na figura.



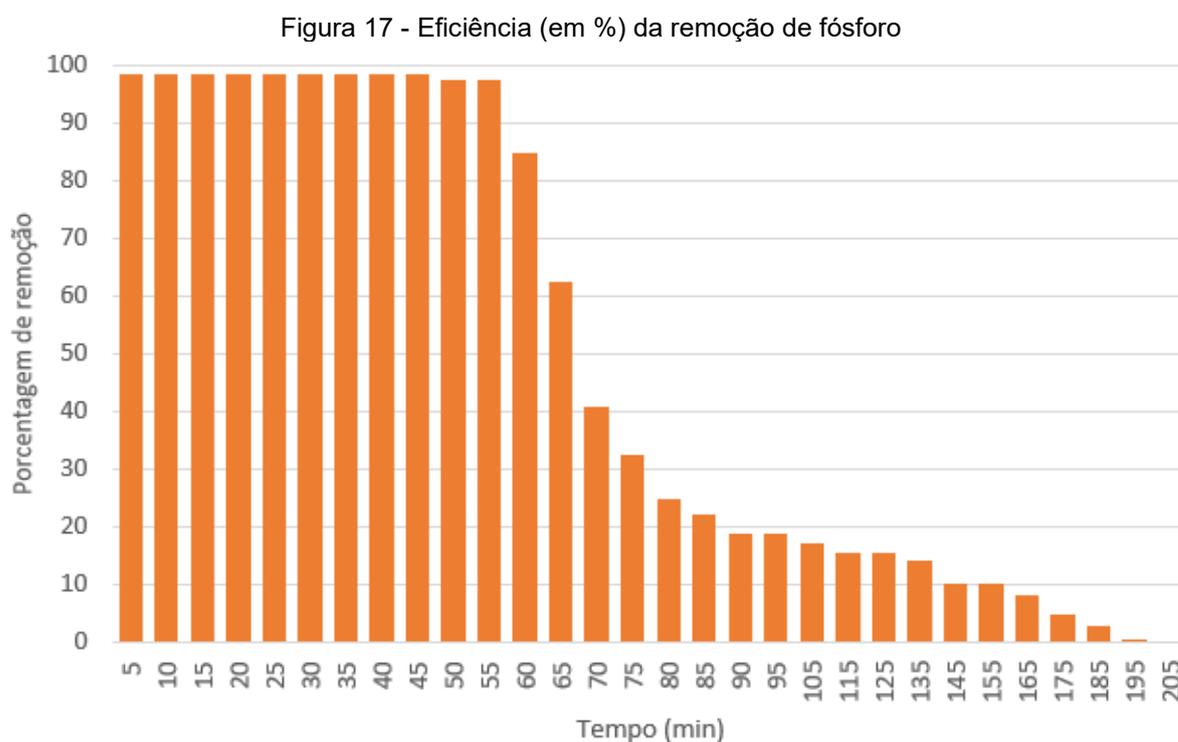
Fonte: Elaboração própria.

Estes resultados, bem como os resultados de todos os ensaios realizados, podem ser aferidos no Anexo A.

Estes ensaios demonstram que a vazão é um fator determinante na capacidade de adsorção, como já era esperado. A maior vazão faz com que a curva de ruptura se inicie mais cedo, devido ao fato de mais adsorvato estar em contato com o adsorvente em um menor período de tempo.

Elaborou-se, também, um gráfico para a eficiência da remoção de fósforo, em porcentagem, com os dados do ensaio em que o tempo para o início da curva de

ruptura era o mais longo (ensaio 5). Foi constatada uma remoção máxima de aproximadamente 98,7% do fósforo, durante os primeiros 45 minutos, até que, com 60 minutos, teve início a curva de ruptura, e a saturação do adsorvente começa a se dar com 80 minutos. Estes dados podem ser analisados na figura 17.



Fonte: Elaboração própria.

A eficiência do CAA na remoção de fósforo com ensaios em batelada de Li *et al.* (2016), bem como deste mesmo adsorvente para a remoção de íons de cádmio em coluna de leito fixo de Zhang *et al.* (2017), já vistas na tabela 4, são condizentes com os resultados obtidos experimentalmente neste estudo.

4.4 MODELAGENS ANALÍTICAS DE CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Jung *et al.* (2017) realizaram as modelagens analíticas, seguindo os modelos de Thomas e Yoon-Nelson, além do modelo de Adams-Bohart. Explicam que este é mais útil para descrever a região inicial da curva (concentração de saída por concentração de entrada, C_s/C_e , menor do que 0,15), e que os outros dois modelos podem mitigar as limitações deste nas regiões mais à frente da curva. A tabela 9

mostra os parâmetros encontrados em todos os ensaios, dentro dos modelos de Thomas e Yoon-Nelson.

Tabela 9 - Modelagem analítica de Thomas e Yoon-Nelson

Ensaio	Parâmetros			Modelo de Thomas			Exp	Modelo de Yoon-Nelson			Exp
	Conc. inicial (mg/L)	Vazão (ml/min)	M. (g)	kTh (L/mg min)	q0 (mg/g)	R ²	q0 (mg/g)	Kyn (ml/mg min)	τ (min)	R ²	τ (min)
1	10,13	1,7	6,8	0,009	166,25	0,9	76,33	0,092	66	0,9	53
2	10,28	3,6	6,8	0,016	221,20	0,91	86,70	0,166	41	0,91	34
3	10,07	1,7	8,2	0,009	137,12	0,9	47,34	0,086	66	0,9	48
4	9,81	3,6	8,2	0,019	174,25	0,87	59,79	0,185	40	0,87	38
5	9,74	1,3	7,5	0,005	162,38	0,87	85,98	0,051	96	0,87	69
6	10,38	4	7,5	0,015	212,34	0,88	138,07	0,159	38	0,88	29
7	10,28	2,7	6,5	0,014	214,84	0,87	145,62	0,139	50	0,87	42
8	10,12	2,7	8,5	0,012	192,25	0,86	130,40	0,121	60	0,86	53
9	9,92	2,7	7,5	0,013	177,20	0,94	130,94	0,131	50	0,94	47
10	9,86	2,7	7,5	0,014	171,27	0,93	108,02	0,137	48	0,93	47
11	10,48	2,7	7,5	0,014	173,38	0,91	93,21	0,146	46	0,91	42

Fonte: Elaboração própria.

Analisando o ensaio 9, que teve o maior R², ou seja, maior confiabilidade, é possível perceber que o tempo de 50% de ruptura, que corresponde à quando a amostra coletada está com 5mg/L de fósforo, foi de aproximadamente 47 minutos, próximo do tempo obtido no modelo de Yoon-Nelson. Já a capacidade máxima de adsorção, que corresponde à capacidade de adsorção no início da ruptura, descrita por q0, teve resultado de aproximadamente 177mg/g no modelo de Thomas, enquanto que, experimentalmente, esta alcançou cerca de 131mg/g. Esta discrepância pode ser explicada pelo fato de que a capacidade máxima de adsorção se dá no ponto de ruptura, em um momento exato (concentração de saída por concentração de entrada, C_s/C_e, entre 0,10 e 0,15), e as amostras coletadas no referido ensaio vão de concentração de saída por concentração de entrada (C_s/C_e) igual a 0,083 com 40 minutos para concentração de saída por concentração de entrada igual (C_s/C_e) a 0,296 com 45 minutos, deixando o espaço entre 0,10 e 0,15 entre os minutos 40 e 45, sem conseguir dados exatos entre eles.

Os R² obtidos na faixa de 0,86 até 0,94 são aceitáveis, estando próximos aos valores de 0,88 à 0,98 de Ramirez *et al.* (2018), que utilizou um material híbrido

(HFeO), e 0,91 à 0,97 de Jung *et al.* (2017), que utilizou esferas eletroquimicamente modificadas de biocarbono cálcio-agnato para remoção de fosfatos.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi avaliada a remoção de fósforo em coluna de leito fixo através de uma solução aquosa preparada para conter 10 mg de P por litro, utilizando rejeitos de concreto aerado autoclavado *in natura*, um bloco pré-fabricado de concreto, como adsorvente. Os efeitos de vazão e massa na coluna também foram analisados através das curvas de ruptura, e os resultados dos ensaios foram inseridos nas modelagens matemáticas de Thomas e Yoon-Nelson.

Os ensaios na coluna confirmam que o CAA é um adsorvente de fósforo muito eficiente, removendo aproximadamente 98,7% do fósforo por no mínimo 25 e no máximo 45 minutos, de acordo com as variações de massa e vazão, sendo que a primeira tem influência positiva moderada no processo adsorptivo na coluna de leito fixo devido à maior superfície de contato do adsorvente, enquanto que a segunda possui alta influência negativa por conta do tempo de contato reduzido entre adsorvato e adsorvente.

As modelagens matemáticas analisadas neste estudo possuem ajuste de moderado à bom, com R^2 de 0,86 à 0,94, sendo que o modelo de Yoon-Nelson se ajustou melhor aos dados experimentais que o modelo de Thomas os resultados obtidos experimentalmente.

Como sugestão para trabalhos futuros, são propostos:

- Realizar ensaios na coluna de leito fixo variando, também, a concentração de fósforo na solução;
- Ativar quimicamente o CAA com material que aumente seu pH para uma faixa de 10 a 12;
- Utilizar os modelos não-lineares de Thomas e Yoon-Nelson para verificar se há aumento no R^2 ;
- Analisar os resultados pelo método de Adams-Bohart;
- Rodar ciclos de dessorção para possível reuso do fósforo adsorvido.

REFERÊNCIAS

ADUAN, Roberto E.; et al. **Os Grandes Ciclos Biogeoquímicos do Planeta**. 1. ed. rev. Embrapa. Planaltina (DF), 2004. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/569371/1/doc119.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2021.

ALEXANDERSON, J. Relations between structure and mechanical properties of autoclaved aerated concrete. **Cement and Concrete Research**, online, v. 9, p. 507-514, 1979. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0008884679900498>>. Acesso em: 05 ago. 2021.

ASHLEY, K.; et al. A brief history of phosphorus: From the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse. **Chemosphere**, online, v. 84, p. 737-746, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653511002499>>. Acesso em: 19 jul. 2021.

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

ASTM – AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS **D 2866-1994**: Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon. ASTM Internacional, 1998.

ASTM – AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS **D 2867**: Standard Test Method for Moisture in Activated Carbon. ASTM Internacional, 2004.

ASTM – AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS **D 3838-1980**: Standard Test Method for pH of Activated Carbon. ASTM Internacional, 1999.

ASTM – AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS **D 5832-1998**: Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon. ASTM Internacional, 2003.

BARRETO, Luciano V.; et al. Eutrofização em rios brasileiros. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 16, p. 2165-2179, 2013. Disponível em: <<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2013a/biologicas/EUTROFIZACAO.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2021.

BARRETO, M. F. O. Análise microestrutural de blocos de concreto celular autoclavado (BCCA) com o auxílio de métodos instrumentais. **Conexão ciência**, online, v. 7, n. 2, p. 38-63, 2012. Disponível em: <<https://periodicos.uniformg.edu.br:21011/ojs/index.php/conexaociencia/article/view/156/176>>. Acesso em: 03 jul. 2021.

BEJI, R.; et al. Adsorption of phosphorus by alkaline Tunisian soil in a fixed bed column. **Water Science and Technology**, v. 78, n. 4, p. 751–763, 2018. Disponível

em: < <https://iwaponline.com/wst/article/78/4/751/62880/Adsorption-of-phosphorus-by-alkaline-Tunisian-soil>>. Acesso em: 06 dez. 2021.

BORGES, C. A. M. **O conceito de desempenho de edificações e a sua importância para o setor da construção civil no Brasil**. 2008. 263 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

BORGES, J. F. B. Gestão de projetos na construção civil. **Revista Especialize IPOG**, online, v. 1, n. 5, 2013. Disponível em: < <https://silo.tips/download/gestao-de-projetos-na-construcao-civil>>. Acesso em: 04 ago. 2021.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007**. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS: **25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos** – 2019. Brasília: 2020. Disponível em: < http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2019/Diagn%C3%B3stico_SNIS_AE_2019_Republicacao_31032021.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2021.

CABRAL, L. L. **Adsorção e dessorção de fósforo em solução aquosa, em cerâmica vermelha sem e com pré-ativação química e termoquímica**. 2019. 114 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

CBIC. **PIB Brasil X PIB Construção Civil (Gráfico)**. Banco de dados da Câmara Brasileira da Indústria da Construção, 2021. Disponível em: < <http://www.cbicdados.com.br/home/>>. Acesso em: 04 ago. 2021.

CONAMA. **Resolução nº 357**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. 2005.

CONAMA. **Resolução nº 410**. Prorroga o prazo para complementação das condições e padrões de lançamento de efluentes, previsto no art. 44 da Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, e no art. 3º da Resolução nº 397, de 3 de abril de 2008. 2009.

DABROWSKI, A. Adsorption – from theory to practice. **Advances in Colloid and Interface Science**, online, v. 93, p. 135-224, 2001. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001868600000828>>. Acesso em: 06 ago. 2021.

DESCHAMPS, Marcelo; BEUREN, Ilse M. Desperdício de materiais diretos na construção civil. **Revista Ciências Administrativas**, online, v. 15, n. 1, p. 156-179, 2009. Disponível em: < <https://www.redalyc.org/pdf/4756/475649213007.pdf>>. Acesso em: 04 ago. 2021.

DOMINGUINI, L.; et al. Utilização de resíduos de materiais cerâmicos na adsorção de corante azul de metileno. **Cerâmica**, online, v. 60 n. 354, p. 218-222, 2014. Disponível

em: < <https://www.scielo.br/j/ce/a/5L9HPXTbcqpGVcfzggjVTqm/?lang=pt#>>. Acesso em: 06 ago. 2021.

EL DEBS, Mounir K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY **METHOD 365.3**: Phosphorous, All Forms (Colorimetric, Ascorbic Acid, Two Reagent). EUA, 1978.

FAN, Zixi; et al. Removal of hexavalent chromium by biochar supported nZVI composite: Batch and fixed-bed column evaluations, mechanisms, and secondary contamination prevention. **Chemosphere**, online, v. 217, p. 85-94, 2019. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653518321064>>. Acesso em: 03 jul. 2021.

FANGMEIER, M.; et al. Tratamento de fósforo em efluente final com uso de filtro de carvão ativado, areia e brita. **Revista Destaques Acadêmicos da CETEC/Univates**, online, v. 7, n. 4, p. 102-108, 2015. Disponível em: < <http://www.univates.br/revistas/index.php/destaques/article/viewFile/502/494>>. Acesso em: 01 jul. 2021.

FIOL, N.; VILLAESCUSA, I. Determination of sorbent point zero charge: usefulness in sorption studies. **Environmental Chemistry Letters**, online, v. 7, p. 79-84, 2009. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/226422361_Determination_of_Sorbent_Point_Zero_Charge_Usefulness_in_Sorption_Studies>. Acesso em: 23 ago. 2021.

FUGITA, Sandra R. **Fundamentos do Controle de Poluição das Águas**. 1. ed. São Paulo: CETESB, 2018.

GASPAR, A. T. F. S. **Bioadsorção de cromo em algas marinhas utilizando coluna extratora**. 2003. 145 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.

GASPARIM, José C. **Viabilidade de aproveitamento de resíduos de tratamento de esgotos na construção civil**. 2013. 129 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP. Campinas, 2013.

GOLDEMBERG, José; BARBOSA, Luiz M. **A legislação ambiental no Brasil e em São Paulo**. 96. ed. rev. Eco 21. Rio de Janeiro (RJ), 2004. Disponível em: < <http://www.eco21.com.br/textos/textos.asp?ID=954>>. Acesso em: 03 jul. 2021.

GOMES, Marco A. F.; et al. **Nutrientes Vegetais no Meio Ambiente: ciclos bioquímicos, fertilizantes e corretivos**. 2. ed. rev. Embrapa. Jaguariúna (SP), 2008. Disponível em: < https://www.cnpma.embrapa.br/download/documentos_66.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2021.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico de 1970**. Rio de Janeiro, 1973.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico de 1991**. Rio de Janeiro, 1991.

JARVIE, Helen P.; et al. Sewage-effluent phosphorus: A greater risk to river eutrophication than agricultural phosphorus? **Science of The Total Environment**. v. 360, n. 1, p. 246-253, 2006. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969705006066>>. Acesso em: 01 jul. 2021.

JUNG, K.; et al. Adsorption of phosphate from aqueous solution using electrochemically modified biochar calcium-alginate beads: Batch and fixed-bed column performance. **Bioresource Technology**. v. 244, n. 1, p. 23-32, 2017. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085241731249X>>. Acesso em: 01 jul. 2021.

KALPANA, M.; MOHITH, S. Study on autoclaved aerated concrete: review. **Materials Today: Proceedings**. v. 22, n. 3, p. 894-896, 2020. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319337824>>. Acesso em: 02 jul. 2021.

KARPINSK, Luisete A.; et al. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: uma abordagem ambiental**. Porto Alegre: Edipucrs, 2009.

KAST, W. **Adsorption aus der Gasphase: ingenieurwissenschaftliche Grundlagen und technische Verfahren**. 1. ed. Weinheim: VCH, 1988.

KLEIN, C.; AGNE, S. A. A. FÓSFORO: DE NUTRIENTE À POLUENTE! **REGET – Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental da UFSM**, online, v. 8, n. 8, p. 1713-1721, 2012. Disponível em: < <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/6430>>. Acesso em: 02 jul. 2021.

KUMARA, G. M. P.; et al. Evaluation of Autoclaved Aerated Concrete Fines for Removal of Cd(II) and Pb(II) from Wastewater. **Journal of Environmental Engineering**. v. 145, n. 11, 2019. Disponível em: < <https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29EE.1943-7870.0001597>>. Acesso em: 06 ago. 2021.

KYZAS, George Z.; et al. The Change from Past to Future for Adsorbent Materials in Treatment of Dyeing Wastewaters. **Materials**. v. 6, n. 11, p. 5131-5158, 2013. Disponível em: < <https://www.mdpi.com/1996-1944/6/11/5131>>. Acesso em: 06 ago. 2021.

LI, W.; et al. A solid waste, crashed autoclaved aerated concrete, as a crystalline nucleus for the removal of low concentration of phosphate. **Desalination and Water Treatment**. v. 57, p. 14169-14177, 2016. Disponível em: < <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19443994.2015.1062432>>. Acesso em: 06 ago. 2021.

LIU, Xiao; et al. Phosphorus removal from wastewater by waste concrete: influence of P concentration and temperature on the product. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 10766-10777, 2020. Disponível em: <

<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11356-019-07577-7>>. Acesso em: 06 dez. 2021.

LOFRANO, Giusy; BROWN, Jeanette. Wastewater management through the ages: A history of mankind. **Science of the Total Environment**, online, v. 408, p. 5254-5264, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969710007564>>. Acesso em: 21 jul. 2021.

LOURES, Ana P. S.; et al. Remoção de fósforo em sistema de tratamento de esgoto doméstico, por escoamento superficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, online, v. 10, n. 3, p. 706-714, 2006. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/zPQTBv3h6tkKxg4SJbTnVpR/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 02 jul. 2021.

MACIOSKI, G. **Estudo da álcali-ativação de pó de blocos cerâmicos com cal hidratada**. 2017. 172 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

MADEIRA, Rodrigo F. O setor de saneamento básico no Brasil e as implicações do marco regulatório para a universalização do acesso. **Revista do BNDES**, online, v. 33, p. 123-154, 2010. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4782/1/RB%2033%20O%20setor%20de%20saneamento%20b%20c%20a%20sico%20no%20Brasil_P.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2021.

MARCELINO, Gabriela R.; et al. Construction waste as substrate in vertical subsuperficial constructed wetlands treating organic matter, ibuprofenhene, acetaminophen and ethinylestradiol from low-strength synthetic wastewater **Science of The Total Environment**. v. 728, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720322889>>. Acesso em: 02 jul. 2021.

MOAVENZADEH, F. Construction Industry in Developing Countries. **World Development**. v. 6, n. 1, p. 97-116, 1978. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0305750X7890027X>>. Acesso em: 04 ago. 2021.

MOTA, F. S. B.; VON SPERLING, M. **Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

NAGALLI, André **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

NANDIYANTO, A. B. D.; et al. Isotherm adsorption characteristics of carbon microparticles prepared from pineapple peel waste. **Communications in Science and Technology**. v. 5, n. 1, p. 31-39, 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/342646964_Isotherm_adsorption_characteristics_of_carbon_microparticles_prepared_from_pineapple_peel_waste>. Acesso em: 06 ago. 2021.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do **ADSORÇÃO**: aspectos teóricos e aplicações ambientais. 2. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2020.

NETO, H. A. S.; et al. Adsorção em coluna de leito fixo aplicada para a pré-concentração de cádmio em amostras de água. **Scientia Plena**, online, v. 14, n. 6, 2018. Disponível em: < <https://www.scientiaplina.org.br/sp/article/view/3840>>. Acesso em: 06 ago. 2021.

NGUYEN, T. A. H.; et al. Adsorption of phosphate from aqueous solutions and sewage using zirconium loaded okara (ZLO): Fixed-bed column study. **Science of The Total Environment**, v. 523, p. 40–49, 2015. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969715004106>>. Acesso em: 06 dez. 2021.

NUNES, Amanda S.; COSTANZI, Ricardo N. Avaliação da eficiência de adsorção de fósforo em solução por resíduos sólidos de diferentes procedências. In: TERCEIRO CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE. **IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais**, Gramado, 2020. Disponível em: < <http://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2020/I-019.pdf>>. Acesso em: 14 dez. 2021.

OMS. Organização Mundial da Saúde. Drinking-water. OMS, 2019. Disponível em: < <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>>. Acesso em: 21 jul. 2021.

OMS. Organização Mundial da Saúde. Global costs and benefits of drinking-water supply and sanitation interventions to reach the MDG target and universal coverage. OMS, Genebra: 2012. Disponível em: < https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2012/globalcosts.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2012.

PANTANO, Glaucia; et al. Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar. **Química Nova**, v. 39, n. 6, p. 732-740, 2016. Disponível em: < <https://www.scielo.br/j/qn/a/YLbww37mZWK7qJLr4SxGnFP/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 19 jul. 2021.

PATEL, H. Fixed-bed column adsorption study: a comprehensive review **Applied Water Science**. v. 9, n. 45, 2019. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs13201-019-0927-7>>. Acesso em: 07 ago. 2021.

PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

POMPÊO, Marcelo L. M.; MOSCHINI-CARLOS, Viviane. **Macrófitas aquáticas e perifiton**: aspectos ecológicos e metodológicos. São Carlos: RiMa, 2003.

POTT, Crisla M.; ESTRELA, Carina C. Histórico ambiental: desastres ambientais e o despertar de um novo pensamento. **Estudos Avançados**, v. 31, n. 89, p. 271-283, 2017. Disponível em: <

<https://www.scielo.br/j/ea/a/pL9zbDbZCwW68Z7PMF5fCdp/?lang=pt>>. Acesso em: 03 jul. 2021.

QIN, Bo-Qiang Lake Eutrophication: Control Countermeasures and Recycling Exploitation **Ecological Engineering**. v. 35, n. 11, p. 1569-1573, 2009. Disponível em:

< https://www.researchgate.net/publication/257368672_Lake_Eutrophication_Control_Countermeasures_and_Recycling_Exploitation>. Acesso em: 02 jul. 2021.

RAMIREZ, A.; et al. Phosphate removal from water using a hybrid material in a fixed-bed column. **Journal of Water Process Engineering**, v. 26, p. 131–137, 2018. Disponível em:

< https://www.researchgate.net/publication/329343926_Phosphate_removal_from_water_using_a_hybrid_material_in_a_fixed-bed_column>. Acesso em: 06 dez. 2021.

RILEM. **Autoclaved Aerated Concrete: Properties, Testing and Design**. 1. ed. Suffolk: Taylor & Francis, 1993.

REGALBUTO, J. R.; ROBLES, J. The engineering of Pt/Carbon Catalyst Preparation. Chicago, 2004. Disponível em: < https://amrel.bioe.uic.edu/NSFREU2004/Reports2004/Jaime%20Robles_Final%20Report.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2021.

RENMAN, G; RENMAN, A. **Sustainable use of crushed autoclaved aerated concrete (CAAC) as a filter medium in wastewater purification**. WASCON Conference proceedings, 2012. Disponível em: < <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:560089/FULLTEXT01.pdf>>. Acesso em: 06 dez. 2021.

ROCHA, Aristides A. **Histórias do saneamento**. 1. ed. digital: Editora Edgard Blücher Ltda., 2018.

ROSITO, Carlos A. **Do PLANASA ao PLANSAB – Os últimos 50 anos da água e do esgoto no Brasil**. Artigos Saint-Gobain Canalização. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: < <https://www.sgpam.com.br/artigos/do-planasa-ao-plansab-os-ultimos-50-anos-da-agua-e-do-esgoto-no-brasil>>. Acesso em: 02 ago. 2021.

ROTH, Caroline das G.; GARCIAS, Carlos M. Construção Civil e a Degradação Ambiental. **Desenvolvimento Em Questão**, online, v. 7, n. 13, p. 111-128, 2013. Disponível em: < <https://www.revistas.unijui.edu.br/index.php/desenvolvimentoemquestao/article/view/169>>. Acesso em: 21 jul. 2021.

RUTHVEN, Douglas M. **Principles of Adsorption and Adsorption Processes**. v. 1. Fredericton: Wiley-Interscience, 1984.

SANTOS MARTINS, Reinaldo dos; et al. Um estudo sobre estações de tratamento de efluentes industriais e sanitários da empresa Dori Alimentos LTDA. **REGRAD – Revista Eletrônica de Graduação do UNIVEM**, online, v. 2, n. 1, p. 6-22, 2009. Disponível em: < <https://revista.univem.edu.br/REGRAD/article/view/165>>. Acesso em: 21 jul. 2021.

SASSAKI, Luis. F. P.; GARCIA, Rafael D. **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. 51 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

SELLNER, Bjorn M.; et al. Fixed bed column evaluation of phosphate adsorption and recovery from aqueous solutions using recycled steel byproducts. **Journal of Environmental Management**. v. 233, n. 1, p. 595-602, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479718314920>>. Acesso em: 01 jul. 2021.

SILVA, Dario da **Estudo comparativo entre a utilização dos concretos convencional e leve nos elementos horizontais das estruturas de edifícios.** 2003. 165 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2003.

SMITH, Val H.; SCHINDLER, David W. Eutrophication science: where do we go from here? **Trends in Ecology & Evolution**. v. 24, n. 4, p. 201-207, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016953470900041X>>. Acesso em: 20 jul. 2021.

SOARES, Natália dos R.; COELHO, Tuanny A., **Gerenciamento de resíduos na construção civil.** 2017. 172 p. Monografia (Bacharel) – Faculdade de Engenharia Civil, Faculdades Integradas de Caratinga. Caratinga, 2013.

SONAI, Gabriela G.; et al. The application of textile sludge adsorbents for the removal of Reactive Red 2 dye. **Journal of Environmental Management**, v. 168, p. 149-156, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479715304187>>. Acesso em: 14 dez. 2021.

SUN, XiaoFeng; et al. Adsorption of phosphate using calcined Mg₃-Fe layered double hydroxides in a fixed-bed column study. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 20, n. 5, p. 3623-3630, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/273423830_Adsorption_of_phosphate_using_calcined_Mg3-Fe_layered_double_hydroxides_in_a_fixed-bed_column_study>. Acesso em: 06 dez. 2021.

TOMASI, Antônio P. N. A modernização da Construção Civil e os impactos sobre a formação do engenheiro no contexto atual de mudanças. **Educação & Tecnologia**, online, v. 10, n. 2, p. 39-45, 2005. Disponível em: <<https://www.periodicos.cefetmg.br/index.php/revista-et/article/viewFile/78/80>>. Acesso em: 04 ago. 2021.

VASCONCELOS, Augusto Carlos de **O Concreto no Brasil: Pré-fabricação, monumentos, fundações.** v. 3. São Paulo: Studio Nobel, 2002.

VITAL, S. M. PLANASA: aspectos básicos. **Revista Conjuntura Econômica**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 3, p. 90-94, 1974. Disponível em: <<http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/rce/issue/view/3910>>. Acesso em: 02 jul. 2021.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1996.

WANG, Di; et al. Investigation on the adsorption of phosphorus by Fe-loaded ceramic adsorbent. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 464, p. 277-284, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021979715303490>>. Acesso em: 07 dez. 2021.

ZHANG, Yuan; et al. Sustainable use of autoclaved aerated concrete waste to remove low concentration of Cd (II) ions in wastewater. **Desalination and Water Treatment**, v. 82, p. 170-178, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Lixuan-Zeng/publication/320010243_Sustainable_use_of_autoclaved_aerated_concrete_waste_to_remove_low_concentration_of_Cd_II_ions_in_wastewater/links/59dd81f1aca272b698e1d9db/Sustainable-use-of-autoclaved-aerated-concrete-waste-to-remove-low-concentration-of-Cd-II-ions-in-wastewater.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2021.

ZHANG Xiaoling, ZHU Guangcan. Effect and mechanism of phosphorus adsorption in initial rainfall runoff by autoclaved aerated concrete block. **Chinese Journal of Environmental Engineering**, 2018, v. 12, n. 8, p. 2202-2209. Disponível em: <<http://www.cjee.ac.cn/en/article/doi/10.12030/j.cjee.201801134>>. Acesso em: 05 dez. 2021.

ANEXO A - Resultados experimentais obtidos

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 8	Ensaio 9	Ensaio 10	Ensaio 11
Vazão (mL/min)	1,7	3,6	1,7	3,6	1,3	4,0	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Massa (g)	6,8	6,8	8,2	8,2	7,5	7,5	6,5	8,5	7,5	7,5	7,5
C _e (mg P/L)	10,135	10,277	10,073	9,808	9,737	10,379	10,277	10,124	9,920	9,859	10,841
Tempo (min)	C _s (mg P/L)										
5	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127
8						0,127					
10	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127
13						0,127					
15	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127
18						0,127					
20	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127
23						0,127					
25	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127
28						1,134	0,127				
30	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	5,252	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127
33							0,127				
34						7,403					
35	0,127	5,598	0,127	0,127	0,127		0,127	0,127	0,716	1,286	0,298
38						8,483	1,052	0,127			
40	0,127	7,749	0,127	6,404	0,127	8,932	2,234	0,127	0,828	1,317	4,008
43						9,339	5,761	0,127			
45	0,226	8,555	0,695	7,973	0,127	9,339	5,904	0,127	2,938	3,121	6,995
48								1,572	5,976	5,802	
50	4,029	9,176	5,507	8,656	0,236	9,717	7,331	3,641	6,811	6,954	8,626
53						9,880			7,454	7,515	
54								5,802			
55	6,139	9,207	6,852	9,339	0,236	9,890	8,422				9,696
56								6,709	8,024	8,004	
60	6,822	9,829	7,525	9,757	1,470	9,971	8,820	7,229	8,442	8,330	9,829
65	7,749	10,022	7,872	9,747	3,631	10,022	9,339	7,708	8,962	8,646	9,971
70	7,943	10,165	7,872	9,757	5,741	10,155	9,554	8,249	9,238	9,044	10,094
75	8,320	10,257	8,055		6,567	10,267	9,819	8,646	9,472	9,401	10,298
80	8,799		8,860		7,321		10,165	9,166	9,645	9,676	10,379
85	8,972		9,023		7,556			9,472	9,859	9,849	
90	9,023		9,023		7,892			9,666			
95	9,248		9,136		7,892			10,043			
100	9,452		9,187					10,114			
105	9,676				8,045						
110	9,757		9,411								
115	10,053				8,228						
120			9,859								
125			9,961		8,228						
130			10,053								
135					8,361						
145					8,748						
155					8,748						
165					8,922						
175					9,268						
185					9,441						
195					9,666						
205					9,696						