

Uso de concreto permeável com aditivos no tratamento de águas residuárias, com enfoque no biocarvão: uma revisão

Use of permeable concrete with additives in wastewater treatment, focusing on biochar: a review

Uso de hormigón permeable con aditivos en el tratamiento de aguas residuales, centrándose en el biocarbón: una revisión

Recebido: 05/08/2021 | Revisado: 10/08/2021 | Aceito: 16/08/2021 | Publicado: 19/08/2021

Fabio de Souza Clementino

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2138-3701>
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Brasil
E-mail: fabio.clementino@hotmail.com

Jéssica Machado Santiago

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2668-0289>
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Brasil
E-mail: jessicamachadosantiago@gmail.com

Heitor Fernandes de Sousa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7617-4117>
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Brasil
E-mail: heitorfcivil@gmail.com

Italo Gutierrez Carneiro da Conceição

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4282-2929>
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Brasil
E-mail: enggutierrezcarneiro@gmail.com

Hudson Chagas dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5249-520X>
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Brasil
E-mail: HUDSON@ifpi.edu.br

Resumo

Nos grandes centros urbanos, a constante impermeabilização das vias intensifica alagamentos e enchentes, gerando inúmeros transtornos à população. O uso do concreto permeável como mecanismo de drenagem de águas pluviais e residuárias tem sido uma solução parcial para esse tipo de problema de drenagem, inclusive com a adição em sua composição de materiais com propriedades adsorventes que visem a melhoria de parâmetros físico-químicos e biológicos da água. Portanto, este artigo tem como objetivo geral trazer importantes resultados de diversos estudos utilizando concreto permeável com adições minerais e mostrar os benefícios nas propriedades mecânicas e adsorventes desse tipo de concreto, com ênfase na utilização do biocarvão. Para isso, optou-se como metodologia, fazer uma breve revisão da literatura, no qual foram analisadas pesquisas concluídas disponíveis em base de dados online como Scopus, Science Direct a partir do ano de 2015 utilizando como descritores em inglês: “Concrete” AND “Biochar”, “Concrete porous” AND “Biochar”, “Pervious concrete” AND “Biochar”, “Treatment of water” AND “Concrete porous”, “Cementitious materials” AND “Biochar”. Foram selecionadas 51 referências sendo assim especificados: 48 artigos científicos, 1 norma e 2 capítulos de livros. Constatou-se que a adição de minerais adsorventes e biocarvão no concreto podem promover melhoria de parâmetros de qualidade da água como diminuição de turbidez, nitrogênio totais (NT), Fósforo Totais (PT), DQO, DBO, entre outros, e promoverem, em alguns casos, ganho de resistência mecânica dos concretos produzidos.

Palavras-chave: Concreto poroso; Biocarvão; Permeabilidade; Porosidade; Propriedades adsorventes.

Abstract

In large urban centers, the constant waterproofing of roads intensifies flooding and flooding, causing countless inconveniences to the population. The use of permeable concrete as a rainwater and wastewater drainage mechanism has been a partial solution to this type of drainage problem, including the addition in its composition of materials with adsorbent properties aimed at improving physical-chemical and biological parameters from water. Therefore, this article aims to bring important results from several studies using permeable concrete with mineral additions and show the benefits in mechanical and adsorbent properties of this type of concrete, with emphasis on the use of biochar. For this, the methodology chosen was to do a brief literature review, in which completed researches available in online databases such as Scopus, Science Direct from the year 2015 were analyzed using as descriptors in English: “Concrete” AND “Biochar”, “Concrete porous” AND “Biochar”, “Pervious concrete” AND “Biochar”, “Treatment of water” AND “Concrete porous”, “Cementitious materials” AND “Biochar”. 51 references were selected and

specified as follows: 48 scientific articles, 1 standard and 2 book chapters. It was found that the addition of adsorbent minerals and biochar in concrete can improve water quality parameters such as decreased turbidity, total nitrogen (NT), Total Phosphorus (PT), COD, BOD, among others, and promote, in in some cases, mechanical strength gain of the concrete produced.

Keywords: Porous concrete; Biochar; Permeability; Porosity; Adsorbent properties.

Resumen

En los grandes centros urbanos, la constante impermeabilización de carreteras intensifica las inundaciones e inundaciones, provocando innumerables molestias a la población. El uso de hormigón permeable como mecanismo de drenaje de aguas pluviales y residuales ha sido una solución parcial a este tipo de problemas de drenaje, incluyendo la incorporación en su composición de materiales con propiedades adsorbentes dirigidas a mejorar los parámetros físico-químicos y biológicos del agua. Por lo tanto, este artículo tiene como objetivo traer resultados importantes de varios estudios utilizando concreto permeable con adiciones minerales y mostrar los beneficios en las propiedades mecánicas y adsorbentes de este tipo de concreto, con énfasis en el uso de biocarbón. Para ello, la metodología elegida fue realizar una breve revisión bibliográfica, en la que se analizaron las investigaciones completadas disponibles en bases de datos online como Scopus, Science Direct del año 2015 utilizando como descriptores en inglés: “Concrete” Y “Biochar”, “Concrete poroso ”Y“ Biocarbón ”,“ Concreto permeable ”Y“ Biocarbón ”,“ Tratamiento de agua ”Y“ Concreto poroso ”,“ Materiales cementosos ”Y“ Biocarbón ”. Se seleccionaron y especificaron 51 referencias de la siguiente manera: 48 artículos científicos, 1 estándar y 2 capítulos de libro. Se encontró que la adición de minerales adsorbentes y biocarbón en el concreto puede mejorar parámetros de calidad del agua como disminución de turbidez, nitrógeno total (NT), fósforo total (PT), DQO, DBO, entre otros, y promover, en algunos casos, ganancia de resistencia mecánica del hormigón producido.

Palabras clave: Hormigón poroso; Biochar; Permeabilidad; Porosidad; Propiedades adsorbentes.

1. Introdução

Nos grandes centros urbanos, a constante impermeabilização das vias intensifica alagamentos, enchentes e a poluição dos mananciais, gerando inúmeros transtornos à população. O uso do concreto permeável, com ou sem aditivos, como um mecanismo de drenagem de águas pluviais e residuais, pode ser uma solução parcial para problemas de drenagem e filtragem de resíduos urbanos. A adição de materiais no concreto com propriedades adsorbentes, que visem a melhoria de parâmetros físico-químicos e biológicos de qualidade da água, tem sido objeto de estudo de diversas pesquisas, como Teymouri et al. (2020), e no caso do biocarvão por Xie et al. (2021).

Segundo Teymouri et al. (2020), o concreto permeável tem apresentado um resultado satisfatório na redução da contaminação do sistema de escoamento urbano, bem como na prevenção do fluxo de enchentes em áreas metropolitanas, e na remoção de contaminantes de águas residuais. O autor reforça ainda ser promissor, o uso do concreto poroso como forma de diminuir o impacto do escoamento urbano poluído e das águas residuais, e o reuso destas em outras finalidades.

Nejad et al. (2017) destacam que devido aos níveis excessivos desses parâmetros (citando, dentre outros: DQO, turbidez, chumbo e sólidos suspensos totais - SST) encontrados nas águas, impactos negativos podem ser gerados nos ecossistemas aquáticos e humanos saúde, e essas cargas de poluentes podem levar à criação de enormes florações de algas nos lagos receptores e rios, além de subsequente criação de aspecto visual desagradável e condições eutróficas nesses ambientes.

A utilização do biocarvão hoje é bem diversificada, seja no sequestro de carbono da atmosfera, filtragem de água ou como adsorvente de poluentes em águas residuais, dentre outras aplicações, Gupta & Kua (2017), Gwenzi et al. (2017), Ahmed et al (2016). O uso do biocarvão como aditivo ao concreto permeável tem o potencial de aumentar a capacidade do concreto permeável de absorver poluentes e melhorar a eficiência do tratamento de poluentes (Xie et al., 2021). De acordo com Kamali et al. (2021), a capacidade de adsorção do biocarvão é altamente dependente de sua química de superfície, área de superfície específica, porosidade e forma.

Neste contexto, este artigo tem como objetivo trazer importantes resultados de diversos estudos utilizando concreto permeável com adições minerais e mostrar os benefícios nas propriedades mecânicas e adsorbentes desse tipo de concreto, com ênfase na utilização do biocarvão.

2. Metodologia

Este artigo trata-se de uma breve revisão da literatura sobre estudos já realizados sobre o uso do concreto permeável com adições minerais, que demonstremos benefícios nas propriedades mecânicas e adsorventes desse tipo de concreto com adições minerais, com ênfase na utilização do biocarvão. Para desenvolvimento desse trabalho, foram analisadas pesquisas concluídas disponíveis em base de dados online como google Acadêmico, Scopus, Science Direct, e também em livros.

Foram utilizados os seguintes descritores em inglês: “Concrete” AND “Biochar”, “Concrete porous” AND “Biochar”, “Pervious concrete” AND “Biochar”, “Treatment of water” AND “Concrete porous”, “Cementitious materials” AND “Biochar”. Os trabalhos utilizados como referência foram selecionados de acordo com a temática a partir de 2015 e com maior relação com aos objetivos desta revisão, não descartando referências primárias de anos anteriores.

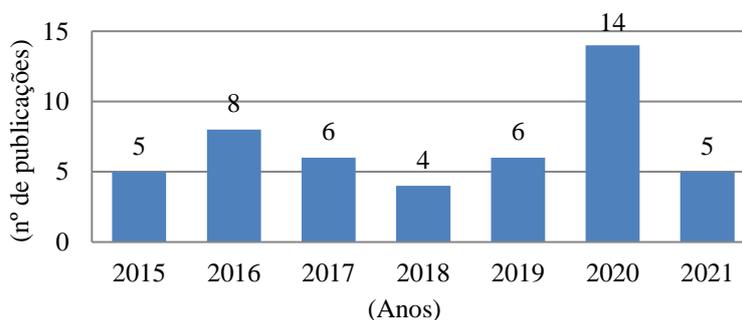
Para compor esta revisão de literatura foram selecionadas 50 referências sendo assim especificados: 48 artigos científicos, 1 norma e 2 capítulos de livros. Os descritores foram escolhidos de forma a abranger trabalhos relacionados ao concreto poroso/permeável para que se obtenha um quantitativo das aplicações desses artigos dando ênfase no tratamento de águas utilizando biocarvão ou aditivos minerais.

Os artigos foram selecionados de acordo com sua relevância, através da leitura dos títulos e uma análise detalhada dos resumos dos mesmos, de acordo com os critérios de inclusão e exclusão escolhidos. Os critérios de inclusão foram os trabalhos completos com disponibilidade na íntegra, escritos em inglês e com limite de temporalidade entre o período compreendido entre o ano de 2015 ao mês de julho de 2021. Em contrapartida, os critérios de exclusão foram: (1) estudos que não se referiam estritamente ao tema, (2) artigos duplicados e (3) trabalhos que sejam resumos expandidos.

3. Resultados e Discussões

Durante a fase inicial de busca dos artigos, foram encontrados com os descritores “concrete” AND “biochar” um total de 1.150 resultados e “concrete porous” AND “biochar” um total de 582 resultados, em relação aos estudos publicados no período escolhido. Respeitando os critérios de inclusão e exclusão, apenas 48 artigos foram selecionados. A Figura 1 (construída com o auxílio do pacote Microsoft Excel e Word) mostra a composição dos artigos selecionados por ano.

Figura 1: Relação da quantidade de artigos encontrados pelo intervalo de tempo.



Fonte: Autores (2021).

Conforme mostrado a Figura 1, a maior parte dos trabalhos selecionados foi referente ao ano de 2020, e o ano em que se obteve um número menor de publicações selecionadas foi o ano de 2018.

3.1 Concreto permeável

O concreto permeável tem se mostrado uma alternativa de drenagem eficiente em locais nos centros urbanos onde os alagamentos são frequentes. Esse tipo de concreto também pode ser entendido como um material de gradiente aberto quase

zero que consiste em cimento Portland, agregado grosso, pouco ou nenhum agregado fino, aditivos e água, essa combinação de ingredientes produzirá um material endurecido com poros conectados, variando em tamanho de 2 a 8 mm, que permitem que a água passe facilmente. O conteúdo de vazio pode variar de 15 a 35%, com resistências à compressão típicas de 2,8 a 28 Mpa (NRMCA, 2010).

Chandrappa e Biligiri (2016) apontam que a propriedade de destaque do concreto permeável é a permeabilidade representada pela facilidade com que a água pode fluir no material, e segundo os autores suas aplicações são justificadas em situações em que a água proveniente de precipitação ou outras fontes precisa ser drenada, reduzindo assim o escoamento de um local e recarregando os níveis das águas subterrâneas.

Tendo vista as características do concreto permeável, diversos estudos tem avançado no emprego deste como um mecanismo de melhoria dos parâmetros de qualidade da água. Zhang et al. (2015) desenvolveram um estudo com duração aproximada de 300 dias, utilizando-se de pré-moldado com concreto poroso com a finalidade de melhoria da qualidade das águas de um rio (tempo de passagem do efluente pelos corpos de prova foi 2-3 horas), constataram que os produtos pré-moldados de concretos porosos usados neste ensaio foram mais eficazes na purificação da demanda química de oxigênio (DQO) do que a demanda biológica de oxigênio (DBO). Estes autores ressaltam ainda que a diminuição da concentração de fósforo total (PT) pode ocorrer em razão do concreto poroso colocado no rio fornecer uma base para as plantas que, durante o processo de crescimento das mesmas, absorvem o fósforo.

Visando a clarificação de águas residuárias com o uso de pavimento de concreto permeável (PCP), Faisal et.al. (2020) prepararam amostras com duas classes de granulometrias diferentes G1(4,75 - 9.0 mm) e G2 (9.0 - 19.0 mm). Os pesquisadores constaram que a amostra G2 apresentou a melhor remoção, de aproximadamente 54%, para DQO e remoção, de aproximadamente 79%, para DBO, comparadas com a amostra G1. Usando o tamanho do agregado G2, relação água/cimento de 0,32 e espessura do pavimento de 20 cm, a remoção máxima para DQO e DBO foi de 54% e 68%, respectivamente, apontando que aspectos da remoção estão ligados uma estrutura porosa e maior espessura, como observado em G2.

Jael & Faisal (2018) analisaram a capacidade de redução de DQO em águas residuárias com o uso concreto permeável, para tanto se utilizaram de duas faixas granulométricas de brita (5.0-10.0 mm e 10.0 -20.0 mm) e de três espessuras do pavimento de concreto (10mm, 15mm e 20mm), com os resultados, os autores destacam que a redução de DQO acontece nos vazios no concreto permeável por vários processos e citam a filtração, absorção e biodegradação. A faixa (10-20 mm) com espessura de 20 cm promoveu maior remoção de DQO, atribuindo-se este efeito à permeabilidade do concreto, pois com o aumento do tamanho do agregado (brita), há o aumento de vazios e escoamento de água residual através do concreto poroso, assim, maior absorção e remoção de DQO.

Dentre os pontos discutidos anteriormente para que o concreto permeável cumpra sua função drenante e removedora de partículas deve-se ter atenção a periodicidade de limpeza para desobstrução dos poros, neste aspecto Sandoval et al. (2020) explica que por possui uma ampla área exposta, no concreto permeável o intemperismo naturalmente provoca seu entupimento, prejudicando a capacidade de infiltração da água no solo e a capacidade hidráulica de armazenamento do material, destacando ainda a limpeza com água e o ar como formas de desobstrução de acordo com a natureza do sedimento.

3.2 Aditivos minerais em concreto permeável

Diversas pesquisas apontam como promissor a utilização de aditivos ao concreto permeável visando à remoção de poluentes e melhoria dos parâmetros de qualidade da água como DBO, DQO, turbidez, dentre outros. Neste panorama, Teymouri et al. (2020^a) adicionaram ao concreto os minerais zeólita (Z), perlita (Pe), pedra-pomes (Pu) e Leca (L) em diferentes teores e os seus testes (escoamento de aproximadamente 30 min) mostraram que as amostras L15-0, Z15-10 e L15-20 apresentaram os melhores resultados, reduzindo os sólidos suspensos totais (SST) em Z15-10 (79,1%) e L15-20 (84,6%), a

DQO em L15-0 (87,1%) e L15-20 (89,3%) e a DBO em L15-0 (88,1%) e L15-20 (90,7%), o que mostra-se ser promissor o uso destes minerais como material adsorvente para remoção de poluentes.

Nejad et al. (2017) analisaram a retenção sustentável e tratamento de águas pluviais urbanas com auxílio de um sistema em colunas de vidro e estrutura metálica com dimensões de 152 x 152 x 700 mm, composta por camada de bloco de concreto permeável com dimensões de 150 x 150 x 150 mm e ao fundo uma camada filtrante de areia de espessura de 150 mm. Os autores destacaram neste estudo que o sistema construído (concreto poroso, zeólita e camada de areia) alcançou eficiência de 74% na remoção do oxigênio dissolvido (OD) e remoção superior a 90% da turbidez.

Em busca de melhoria de desempenho na purificação dos parâmetros de NT, PT, DQO, OD e pH da água através do concreto permeável, Xie et al. (2021) utilizaram-se de diversos teores de biocarvão no concreto (0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 kg/m³), obtendo assim, com o concreto permeável com teor 20 kg/m³ de biocarvão (amostra G5), taxa de remoção de 89,4% de NT, e com o concreto permeável com 15 kg/m³ de biocarvão (amostra G4) taxa de remoção de 82,0% de PT.

Semelhantemente, os pesquisadores Teymouri et al. (2020a) e Teymouri et al. (2020b) utilizaram concreto poroso contendo adsorventes minerais como um novo método de tratamento de águas residuais. Os resultados mostraram que as amostras que causaram a maior remoção de Sólidos Suspensos Totais (SST) foram as amostras Z5 – 0 (41,06%) e L15 – 20 (44%) e as amostras Z15 – 10 (49,34%) e L15 – 20 (52,19%) contribuíram para a maior redução de DBO. Em relação a turbidez, não houve efeito significativo a adição de adsorventes minerais no concreto poroso. Em busca de diminuir a poluição das águas superficiais e subterrâneas nas áreas metropolitanas, Koupai et al. (2015) utilizaram-se de um sistema de filtragem em coluna, seus estudos em escala de bancada apresentaram remoção de 44% de DQO, podendo remover até 91% da turbidez, usando concreto poroso contendo escória de ferro e filtro de areia.

Com objetivo de examinar a eficácia da granulometria dos agregados grossos normais em comparação com o agregado grosso reciclado como meio de filtração, Cahya et al. (2020) constataram o efeito significativo da melhoria de parâmetros importantes na qualidade da água, como demanda biológica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e sólidos suspensos totais (SST), apresentando melhores resultados com tamanhos dos agregados entre 0,5-2 cm. Além disso, sugerem para melhoria do sistema de filtração a adição de mais camadas ou a combinação do sistema com aditivos.

No tocante ao efeito de purificação de águas pluviais infiltradas Chandrappa e Biligiri (2016), destacam três mecanismos atuantes: o mecanismo da purificação física, onde os caminhos sinuosos /curvos na estrutura interna do concreto permeável adsorvem os materiais suspensos, removem a maioria das partículas sólidas suspensas das águas pluviais. O mecanismo da purificação química, no qual o concreto permeável de natureza alcalina, durante o contato com a água poluída, libera íons hidróxido (OH⁻) e íons carbonato (CO₃²⁻), que reagem com os poluentes e os precipitam. Além disso, o pH da água poluída também é aumentado, convertendo-a em mais neutra em vez de ácida. E por fim a purificação biológica, onde os poros do concreto permeável fornecem morada para uma série de atividades microbianas, que consomem os materiais em suspensão e os dissolvem. Para Xie et al. (2021, p.6), “o mecanismo de purificação de água do concreto permeável é principalmente a adsorção de retenção mecânica e a degradação microbiana”.

Considerando-se o panorama de adição e tratamento do concreto poroso com outros materiais com função de purificação promissora da poluição da água de escoamento superficial destacado por Liang et al. (2019) utilizaram-se de nTiO₂ como método fotocatalítico, as amostras não apresentaram toxicidade biológica, não sendo agressiva ao meio ambiente, com o tempo apresentam redução no efeito de purificação da água após o intemperismo, problema este que pode ser corrigido com lavagem.

Utilizando de concreto permeável fabricado com cimento sulfo-aluminato de cálcio e agregado de cinza de carvão, Kim et. Al (2017) investigaram a purificação de água e as propriedades mecânicas do concreto, nos ensaios houve uma melhoria do parâmetro físico turbidez da água, e essa tendência foi observada em todas as amostras de água purificada por

concretos permeáveis, os autores apontam que as partículas sólidas suspensas na água padrão foram efetivamente removidas pela filtração física do concreto permeável. Neste caso específico, nota-se que a redução dos valores de turbidez pode estar relacionada ao arranjo granulométrico dos agregados e não adição de minerais adsorventes.

Com uma grande área de superfície, destaca Qin et al. (2021), para purificação de água e degradação microbiana, o concreto permeável com biocarvão torna-se mais vantajoso do que o concreto permeável convencional em se tratando de questões ambientais, os autores destacam que, para valores inferiores a 6,5% de biocarvão, a resistência à tração e a resistência à compressão do concreto apresentam um aumento em seus valores. Discutem ainda que esses aumentos de resistência, por um lado, são atribuídos à alta retenção de água e ao efeito de preenchimento do biocarvão, e por outro, uma pequena quantidade de biocarvão reduz a relação água-cimento local do concreto, parâmetro que contribui para o desenvolvimento da resistência do concreto.

Em seus estudos Huggins et al. (2016) compararam-se os resultados obtidos com a utilização de biocarvão granular e carvão ativado para tratamento de águas residuais e recuperação de recursos e, em um ambiente de águas residuais complexo, observaram que os microporos podem ser bloqueados por matéria orgânica ou biofilme maior, perdendo rapidamente sua vantagem se os contaminantes não puderem atingir a estrutura interna dos poros.

3.3 Propriedades e aplicação do biocarvão

“Biocarvões são materiais altamente heterogêneos formados através da pirólise de alta temperatura da biomassa sob condições de baixo/nenhum oxigênio”, conceitua Gwenzi et al. (2017, p.735), explicando ainda que apesar de muitas variações, as principais propriedades genéricas que definem suas aplicações na remoção de contaminantes são a alta porosidade microestrutural, alta área de superfície específica (SSA), alta capacidade de troca catiônica, pH variando de quase neutro a alcalino e alta quantidade de carbono fixo em relação à matéria-prima. De acordo com Mrad e Chehab (2019), o biocarvão consiste em fibras interconectadas, formando uma estrutura celular microporosa que pode absorver e manter uma quantidade substancial de água a ser usada para a cura interna. Para estes autores, a substituição da areia por biocarvão deve ser limitada a 15% e totalmente saturada antes da inclusão na argamassa.

De acordo com o tipo de aplicação específica do biocarvão, como forma de nortear a seleção de biocarvão, ressalta Banik et al. (2018) que os biocarvões produzidos em altas temperaturas de pirólise ($>700^{\circ}\text{C}$) ou aqueles que recebem tratamentos de pré-pirólise com AlCl_3 são otimizados para adsorção de contaminante aniônico, enquanto biocarvões produzidos em baixas temperaturas de pirólise (400°C) são otimizados para adsorção de contaminantes catiônicos. O biocarvão produzido em temperaturas de pirólise mais baixas ($< 400^{\circ}\text{C}$) pode não ter área de superfície específica adequada para a adsorção física, mas aquele produzido sob temperaturas mais altas ($> 500^{\circ}\text{C}$) pode ter perdido alguns grupos funcionais de superfície para troca catiônica (Li et al., 2018). O tamanho e o padrão dos poros no biocarvão dependem da composição dos materiais da matéria-prima e a temperatura adotada durante a formação do biocarvão (Qambrani et al., 2017).

Tan et al. (2015) e Inyang e Dickenson (2015) ressaltam que o processo de produção do biocarvão interfere nas suas propriedades e Yin et al. (2017) destacam que as propriedades físico-químicas dos biocarvões são afetadas por temperatura pirolítica, tempo de residência, matéria-prima e tecnologia de pirólise. O biocarvão pode ser usado como um adsorvente promissor conforme análise dos resultados de caracterização e adsorção experimento. As características do biocarvão são influenciadas pela matéria-prima de biomassa e o processo usado para produzi-lo, bem como os parâmetros do processo como mostra Cha et al. (2016), e estas características apontadas, segundo Tsang et al. (2019) são críticas para a eficiência da remoção de contaminantes. A adsorção física está relacionada à estrutura e área de superfície do biocarvão, e a adsorção química está relacionada às espécies de biocarvão, a quantidade e tipos de grupos funcionais, e as composições de biocarvão (Yin et al., 2017).

Revisitando alguns princípios e conceitos envolvidos na produção do biocarvão, Qambrani et al. (2017) destaca que o biocarvão pode atuar como um sorvente para contaminantes orgânicos e inorgânicos, pode ainda remover com eficiência esses materiais das águas afetadas, essa remoção de contaminantes, citada pelos autores baseia-se principalmente na presença de grupos funcionais e cargas na superfície do biocarvão. A estrutura porosa do biocarvão é composta de numerosos compostos aromáticos e outros grupos funcionais que são produzidos a partir de biomassas à base de lignina, destaca Qambrani et al. (2017).

A modificação da superfície do biocarvão visa melhoria de funcionalidade, da capacidade de sorção aprimorada para contaminantes. Antes de modificar os biocarvões, é essencial avaliar os principais fatores de controle, incluindo a escolha da técnica de preparação e modificação do biocarvão, temperatura de pirólise, escolha do reagente químico, propriedades do contaminante e condições operacionais, como o pH e a composição da água residual, que influenciam o potencial de sorção de biocarvões modificados (Ahmed et al., 2016). A quantidade e as propriedades dos produtos obtidos após a pirólise da biomassa, em diferentes fases dependem das condições de pirólise e das características da biomassa de entrada (Tripathi et al., 2016). Dada a importância das características físicas dos materiais de carbono, tanto o material precursor quanto os métodos de fabricação devem ser levados em consideração a fim de se adequar "forma para função" em termos de tratamento de águas residuais (Huggins et al., 2016).

Zhao et al. (2013) estudaram como as propriedades da matéria-prima e as condições de produção influenciam no rendimento e nas propriedades do biocarvão, para tanto produziram biocarvão dos seguintes materiais: esterco de animais, resíduos de madeira, resíduos de colheitas, resíduos de alimentos, dentre outros, constatando que o rendimento do biocarvão, pH, recalcitrância e matéria volátil são influenciados pela temperatura, enquanto o conteúdo de carbono (C) no biocarvão, capacidade de troca catiônica (CEC), carbono fixo, capacidade de sequestro de carbono, concentrações de minerais e conteúdo de cinzas dependem da matéria prima escolhida.

A temperatura consiste em fator importante na produção do biocarvão, a temperatura de pirólise e a matéria-prima afetam o rendimento e as propriedades do biocarvão para Wei et al.(2019), Tripathi et al. (2016) e Suliman et al. (2016). Ressaltam Yin et al. (2017) que dentro de uma faixa de temperatura adequada, a alta temperatura de pirólise indica uma grande área de superfície de biocarvão porque numerosas substâncias voláteis são rapidamente liberadas da estrutura da biomassa, o que resulta em numerosas formações de poros, porém, em temperaturas extremamente altas, parte da estrutura porosa poderá entrar em colapso, os poros serão bloqueados, reduzindo as áreas ativas para adsorção. A pirólise acima de 900°C causa deformação que resulta no alargamento dos microporos devido à destruição das paredes entre os poros adjacentes que aumentam na área de superfície (Qambrani et al. 2017).

Além do rendimento do biocarvão e do teor de carbono fixo, os recursos de textura (por exemplo, área de superfície e distribuição de tamanho de poro) de biocarvão são influenciados pela temperatura de pirólise (Lee, Sarmah & Kwon, 2019). Outro ponto importante a ser observado é aquele vinculado à toxicidade do biocarvão em relação à temperatura de pirólise no processo de produção, para caracterizar a toxicidade e os efeitos gerais, mediados pelo receptor de aril-hidrocarboneto (AhR) Lyu et al. (2016) utilizam-se de biocarvões produzidos de serragens preparados em temperaturas variando de 250 a 700°C e foi observado que, em geral, o biocarvão produzido em temperaturas de pirólise mais baixas neste estudo foram mais tóxicos apresentando maiores potências de efeitos mediados por AhR.

Qin et al. (2021) utilizaram-se de placas de compensado de eucalipto sintético para a produção do biocarvão por pirólise (50 a 500°C com taxa de aquecimento de 10°C/min), e, constataram que o conteúdo de biocarvão no concreto tem pouco ou nenhum impacto na porosidade e permeabilidade à água, estes exibem maior resistência à compressão e melhor resistência à tração do que os convencionais sem biocarvão quando o conteúdo de biocarvão é inferior a 6,5%.

Em relação a água disponível para hidratação do cimento, Gupta et al. (2020) explicam que a absorção de água pelo biocarvão poroso, em seu estudo, levou à densificação da matriz de cimento, reduzindo a água livre nos poros do concreto durante o endurecimento inicial, e essa água absorvida nos poros do biocarvão foi posteriormente fornecida internamente para auxiliar a hidratação do cimento por meio de cura interna, contribuindo para o desenvolvimento da resistência da matriz cimentícia. Dixit et al. (2019) corroboram com esse efeito ao apontar que o biocarvão pode ser estendido a materiais de construção à base de cimento para melhorar a resistência e permeabilidade através da ação de cura interna de biocarvão.

O biocarvão representa um adsorvente promissor e escalável para aplicações industriais e remediação ambiental, porque é mais barato e fácil de fazer quando comparado ao carvão ativado. Uma aplicação típica em larga escala pode incluir o desenvolvimento de barreiras reativas permeáveis à base de biocarvão para o tratamento de águas superficiais e subterrâneas contaminadas (GWENZI et al. 2015).

3.4 Biocarvão em compostos cimentícios

Em busca de uma porcentagem ideal de adição biocarvão para garantir a melhoria das propriedades mecânicas, Restuccia et al. (2020) ensaiaram diferentes amostras de argamassas e observaram que a adição de biocarvão pode aumentar a resistência à flexão e energia de fratura de compósitos cimentícios. A porcentagem utilizada (2% em peso e 2,5% em peso para pastas de cimento e argamassas, respectivamente) difere de outros resultados na literatura, fato este que pode ser decorrente da forma de produção e material precursor.

No estudo de Zeidabadi et al. (2018) o cimento (em massa) foi substituído por biocarvão em 0, 5 e 10%. As amostras com a adição de 5% de biocarvão de casca de arroz e 5% de biocarvão de bagaço apresentaram maiores resistências à compressão quando comparadas com outras misturas de concreto e o concreto de controle. Os principais impactos dos biocarvões nas propriedades mecânicas das amostras de concreto podem ser devido à sua alta superfície específica, e aos níveis de sílica amorfa (Zeidabadi et al., 2018).

Algumas pesquisas evidenciam um teor limite para a adição de biocarvão no concreto, Wang et al. (2020) apontam como alta dosagem o teor de 5% em peso de biocarvão, pois essa dosagem pode causar um efeito adverso na resistência mecânica, devido, provavelmente, à estrutura porosa e fragilidade do biocarvão. Destaca-se que a adição de 1% em peso de biocarvão aumentou a resistência à compressão dos compósitos em 8,9%, podendo ser utilizado como um aditivo verde para melhorar a extensão da hidratação do cimento sem acelerar ou atrasar o processo de hidratação. De maneira semelhante Dixit, Gupta et al. (2020) ensaiaram misturas com biocarvão pré-embebido substituindo o cimento em concreto de ultra alto desempenho (UHPC) nos teores 2%, 5% e 8% em peso, observando-se queda na resistência à compressão (10% em relação ao concreto de referência) em UHPC com biocarvão nas misturas, e a resistência a compressão foi comparável na substituição de 5%.

O efeito do uso de biocarvão pré-embebido foi destacado por Gupta e Kua (2020), no estudo da cura interna em argamassa por incorporação de água em poros de biocarvão. A água absorvida na superfície do biocarvão e mantida nos espaços interpartículas, pode estar disponível como umidade livre durante o endurecimento inicial da argamassa, enquanto a água dentro dos poros do biocarvão seria gradualmente liberada dependendo da distribuição do tamanho dos poros (Gupta & Kua, 2020). A capacidade de retenção de água do biocarvão promove a cura interna da argamassa e a hidratação precoce (Maljaee et al., 2021).

Visando investigar a adição de biocarvão em materiais a base de cimento, Sirico et al. (2020) observaram nas misturas testadas um aumento na energia de fratura em amostras com adição de 1% de biocarvão em peso de cimento e como as propriedades mecânicas não foram afetadas negativamente por esta adição, verificou-se a viabilidade desta mistura sustentável. Observa-se que tanto Sirico et al. (2020) e Dixit et al. (2020) corroboram com o limite discutido por Wang et al. (2020).

O emprego de biocarvão em espumas de concreto foi estudado Falliano et al. (2020) utilizando-se dos teores 2% e 4% do peso do cimento, e duas diferentes condições de cura (ao ar e água) com temperatura controlada, houve a diminuição da resistência à compressão (foi superior a 25 Mpa, sendo viável para aplicações estruturais), mas destaca a compensação pelo aumento da força de flexão e energia de fratura com conteúdos de biocarvão de 2%. Observação semelhante foi destacada por Praneeth et al. (2021) quando destacam que as partículas do biocarvão permitiram o desvio da propagação da trinca, resultando na necessidade de maior energia de fratura para quebrar o biocarvão.

Por meio de suas pesquisas, Akhtar e Sarmah (2018) demonstraram que apesar de reduzir a resistência à compressão, o biocarvão produzido a partir de biomassa residual pode ser usado como melhoria de resistência à flexão e a resistência à tração na divisão do concreto convencional em certos projetos de mistura. Esses autores complementam que o biocarvão pode ser um material potencialmente adequado onde o desenvolvimento precoce da resistência à idade é necessário para aplicações convencionais de concreto, em vez da resistência final do projeto.

Tendo em vista a aplicabilidade do biocarvão em materiais cimentícios, Cosentino et al. (2019) frisam que para se produzir um biocarvão com as propriedades desejadas, é importante o conhecimento das dependências e dos fatores de influência como o tipo de material carbonáceo e os parâmetros de produção (parâmetros de pirólise usados na produção de biocarvão: temperatura, taxa de aquecimento ou pressão). Neste contexto Akinyemi e Adesina (2020) destacam a importância em se considerar, antes de o biocarvão ser usado em compósitos cimentícios, fatores como a fonte, método de produção e dosagem de biocarvão usado, e explicam ainda que existe uma grande variação na influência do biocarvão no desempenho dos compósitos.

Visando avaliar, dentre outros fatores, as propriedades mecânicas e absorção de água, Tan et al. (2020) substituíram o cimento em peso por biocarvão pulverizado, pirolisado a 400°C, 500°C, 600°C e 700°C, nas proporções 0%, 1%, 3%, 5% e 10%. As argamassas contendo biocarvão pirolisado em temperatura relativamente mais baixa apresentaram melhor resistência à compressão, 1% de BC400 e BC500 apresentam resistências à compressão sugerindo a substituição de 1 a 3%. A adição de 1% de biocarvão à mistura reduziu a absorção capilar de água da argamassa, devido ao maior efeito de densificação da pasta de argamassa (Tan et al., 2020).

4. Considerações Finais

Diante da literatura abordada sobre o concreto permeável, com e sem aditivos, especialmente em relação ao biocarvão na melhoria de parâmetros de qualidade de águas residuárias destaca-se que a adição de minerais adsorventes e biocarvão no concreto podem promover a redução de poluentes e em muitos casos promover a melhoria da resistência mecânica dos concretos produzidos. Observou-se que existe um limite referente ao teor de aditivos no concreto, e em se tratando de concreto permeável o cuidado deve ser redobrado visto que o conteúdo de pasta é menor se comparado ao concreto convencional.

Em relação ao uso do biocarvão, vale frisar que a escolha do material precursor e a faixa de temperatura de produção exercerão influência nas propriedades finais do biocarvão, desta forma a produção deve ser aliada a finalidade específica do emprego biocarvão. Outro ponto que se deve levar em consideração durante o processo de dosagem na adição do biocarvão em compostos cimentícios, é o fator água/cimento, visto que o biocarvão absorve parte da água de mistura, reduzindo a trabalhabilidade da mistura, a literatura sugere que se realize a técnica de pré-embecer o material.

No concreto permeável a capacidade de retenção de poluentes é finita, devido ao entupimento dos poros pelos sólidos presentes no efluente, a retenção acontece pelo mecanismo físico, a filtração mecânica, então em casos de locais de drenagem constante é importante a limpeza periódica. Sabe-se que a capacidade de adsorção dos minerais, assim como retenção com concreto é limitada, então, mais estudos são necessários focados na possibilidade de reuso ou reativação desta capacidade.

Em muitos casos o emprego do biocarvão em concreto apresentou ganho de resistência mecânica, então, por ser considerado um material promissor adsorvente no tratamento de águas, novos estudos devem ser conduzidos para nortear uma granulometria ótima que proporcione resistência mecânica adequada a pavimentos e boa capacidade adsorptiva.

Referências

- Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., Guo, W., & Chen, M (2016). Progress in the preparation and application of modified biochar for improved contaminant removal from water and wastewater. *Bioresource Technology*. 836-851. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.057>
- Akhtar, A., & Sarmah, A. K. (2018). Novel biochar-concrete composites: Manufacturing, characterization and evaluation of the mechanical properties. *Science of The Total Environment*. 616-617. 408-416. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.319>
- Akinyemi, B. A., & Adesina, A (2020). Recent advancements in the use of biochar for cementitious applications: A review. *Journal of Building Engineering*. 32, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101705>
- Banik, C., Lawrinenko, M. Bakshi, S. & Laird, D. A (2018). Impact of Pyrolysis Temperature and Feedstock on Surface Charge and Functional Group Chemistry of Biochars. *Journal of Environmental Quality*. 47, 452-461. [10.1016/j.jeq.2017.11.0432](https://doi.org/10.1016/j.jeq.2017.11.0432)
- Cahya, E. N., Arifi, E., & Haribowo, R (2020). Recycled porous concrete effectiveness for filtration material on wastewater treatment. *International Journal of GEOMATE. Geotechnique, Construction Materials and Environment*. 18(70), 209 – 214. <https://doi.org/10.21660/2020.70.9266>
- Cha, J. S., et al. (2016). Production and Utilization of Biochar: A Review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 1-65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002>
- Chandrappa, A. K., & Biligiri, K. (2016). Pervious concrete as a sustainable pavement material—Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*. 111. 262-274. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054>
- Chandrappa, A. K. & Biligiri, K. P (2016). Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach. *Construction and Building Materials*. 123. 627-637. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.035>
- Cosentino, I. Restuccia, L. Ferro, G. A. & Tulliani, J. M (2019). Type of materials, pyrolysis conditions, carbon content and size dimensions: The parameters that influence the mechanical properties of biochar cement based composites. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 103. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102261>
- Dixit, A. Gupta, S. Pang, S. D. Kua, & H. W (2019). Waste Valorisation using biochar for cement replacement and internal curing in ultra-high performance concrete. *Journal of Cleaner Production*. 238. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117876>
- Dixit, A. Gupta, S. Pang, S. D. & Kua, H. W (2020). Cement Replacement and Improved Hydration in Ultra-High Performance Concrete Using Biochar. 3rd International Conference on the Application of Superabsorbent Polymers (SAP) and Other New Admixtures Towards Smart Concrete. *RILEM*. 24. 222-229. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33342-3_24
- Faisal, G. H., Thaar, A. J. J., & Gasham, S. A. (2020). BOD and COD reduction using porous concrete pavements. *Case Studies in Construction Materials*. 13. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00396>
- Falliano, D. Domenico, D. De. Sciarrone, A. Ricciardi, G. Restuccia, L. Ferro, G. Tulliani, J. M. & Gugliandolo, E (2020). Influence of biochar additions on the fracture behavior of foamed concrete. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 51, 189-198. [10.3221/IGF-ESIS.51.15](https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.51.15)
- Gupta, S., & Kua, H. W. (2020a). Effect of water entrainment by pre-soaked biochar particles on strength and permeability of cement mortar. *Construction Building Materials*. 159. 107-125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.095>
- Gupta, S., Kua, H. W., & Dai, S (2020b). Effect of biochar on mechanical and permeability properties of concrete exposed to elevated temperature. *Construction Building Materials*. 234. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117338>
- Gupta, S., & Kua, H. W. (2017). Biochar as a carbon sequestering construction material in cementitious mortar. *Academic Journal of Civil Engineering*, 35(2), 563-568. <https://doi.org/10.26168/icbbm2017.85>
- Gwenzi, W., Chaukura, N., Mukome, F. N. D., Machado, S., & Nyamasoka B. (2015). Biochar production and applications in sub-Saharan Africa: Opportunities, constraints, risks and uncertainties. *Journal of Environmental Management*. 150. 250-261. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.11.027>
- Gwenzi, W., Chaukura, N., Noubactep, C., & Mukome, F. N. D. (2017). Biochar-based water treatment systems as a potential low-cost and sustainable technology for clean water provision. *Journal of Environmental Management*. 197, 732-749. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.087>
- Huggins, T. M., Haeger, A., Biffinger, J. C., & Ren, Z. J (2016). Granular biochar compared with activated carbon for wastewater treatment and resource recovery. *Water Research*. 94. 225-232. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.02.059>
- Inyang, M. & Dickenson, E (2015). The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: A review. *Chemosphere*. 134. 232-240. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.072>
- Jaeel, A. J., & Faisal, G. H. (2018). COD Removal from Synthetic Wastewater Using Pervious Concrete. *International Conference on Advances in Sustainable Engineering and Applications (ICASEA)*. 10.1109 / ICASEA.2018.8370978
- Kamali, M., Appels L., Kwon, E. E., Aminabhavi, T. M., & Dewil, R (2021). Biochar in water and wastewater treatment – a sustainability assessment. *Chemical Engineering Journal*. 420. 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129946>

- Kim, G. M., Jang, J. G., Khalid, H. R., & Lee, H. K. (2017). Water purification characteristics of pervious concrete fabricated with CSA cement and bottom ash aggregates. *Construction and Building Materials*. 136. 1-8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.020>
- Koupai, J. A., Nejad, S. S., Fard, S. M., & Behfarnia, K. (2015). Reduction of Urban Storm-Runoff Pollution Using Porous Concrete Containing Iron Slag Adsorbent. *Journal of Environmental Engineering*. 04015072. 1-7. [10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001025](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001025).
- Lee, J. Sarmah, A. K., & Kwon, E. E (2019). Chapter 1 - Production and Formation of Biochar. *Biochar from Biomass and Waste. I Biochar Production*. p.1-16. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00001-7>
- Li, S. Harris, S.Anandhi, A. & Chen, G (2019). Predicting biochar properties and functions based on feedstock and pyrolysis temperature: A review and data syntheses. *Journal of Cleaner Production*. 215. 890-902. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.106>
- Liang, X. Cui, S. Li, H. Abdelhady, A. Wang, H. & Zhou, H (2019). Removal effect on stormwater runoff pollution of porous concrete treated with nanometer titanium dioxide. *Transportation Research Part D*. 73. 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.06.001>
- Lyu, H. He, Y. Tang, J. Hecker, M. Liu, Q. Jones, D. Codling, G., & Giesy, J. P (2016). Effect of pyrolysis temperature on potential toxicity of biochar if applied to the environment. *Environmental Pollution*. 218. 1-7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.014>
- Maljaee, H., Madadi, R., Paiva, H., Tarello, L., & Ferreira, M (2021). Incorporation of biochar in cementitious materials: A roadmap of biochar selection. *Construction and Building Materials*. 283. 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122757>
- Mrad, R. & Chehab, G (2019). Mechanical and Microstructure Properties of Biochar-Based Mortar: An Internal Curing Agent for PCC. *Journal Sustainability*. 2491. 1-15. [10.3390/su11092491](https://doi.org/10.3390/su11092491)
- Nejad, S. S. Koupai, J. A. Fard, S. M. & Behfarnia, K (2017). Treatment of urban storm water using adsorbent porous concrete. *Water Management*. 1-7. <http://dx.doi.org/10.1680/jwama.15.00127>
- NRMCA-Concrete in Practice-38 (CIP-38), National Ready Mix Concrete Association (NRMCA). 2010.
- Praneeth, S. Saavedra, L. Zenga, M. Dubey, B. K. & Sarmah, A. K (2021). Biochar admixed lightweight, porous and tougher cement mortars: Mechanical, durability and micro computed tomography analysis. *Science of The Total Environment*. 750. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142327>
- Qambrani, N. A., Rahman, M. M., Won, S., Shim, S. & Ra, C (2017). Biochar properties and eco-friendly applications for climate change mitigation, waste management, and wastewater treatment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 79. 255-273. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.057>
- Qin, Y., Pang, X., Tan, K., & Bao, T (2021). Evaluation of pervious concrete performance with pulverized biochar as cement replacement. *Cement and Concrete Composites*. 119. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104022>
- Restuccia, L. et al (2020). Mechanical characterization of different biochar-based cement composites. 1st Virtual Conference on Structural Integrity - VCSII. *Procedia Structural Integrity*. 25. 226-233.
- Sandoval, G. F.B. et al. (2020). Proposal of maintenance methodology for pervious concrete (PC) after the phenomenon of clogging. 248. p.1-12. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118672>
- Sirico, A. et al. (2020). Mechanical characterization of cement-based materials containing biochar from gasification. *Construction and Building Materials*. 246. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118490>
- Suliman, W. Harsh, JB. Lail, NIA. Fortuna, AM. Dallmeyer, I. Perez, MG (2016). Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on biochar bulk and surface properties. *Biomass and Bioenergy*. 84. 37-48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.010>
- Tan, K., Pang, X., Qin, Y. & Wang, J (2020). Properties of cement mortar containing pulverized biochar pyrolyzed at different temperatures. *Construction and Building Materials*. 263. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120616>
- Tan, X. Liu, Y. Zeng, G. Wang, X. Hu, X. Gu, Y. & Yang, Z (2015). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere*. 125. 70-85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.058>
- Teymouri, E. Mousavi, S. F. Karami, H. Farzin, S. & Kheirabad, M. H. (2020a). Reducing Urban Runoff Pollution Using Porous Concrete Containing Mineral Adsorbents. *Journal Environmental Treatment Techniques*. 8, Issue 1, 429-436. <http://www.jett.dormaj.com>
- Teymouri, E. Mousavi, S. F. Karami, H. Farzin, S. & Kheirabad, M. H (2020b). Municipal Wastewater pretreatment using porous concrete containing fine-grained mineral adsorbents. *Journal of Water Process Engineering*. 36. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101346>
- Tripathi, M.Sahu, J. N. & Ganesan, P (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 55. 467-481. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>
- Tsang, D. C. W., Yu, I. K. M., & Xiong, X (2019). Chapter 18 - Novel Application of Biochar in Stormwater Harvesting. *Biochar from Biomass and Waste. III Applications*. 1-29. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00018-2>
- Wang, L. Chen, L. Tsang, D. C. W. Guo, B. Yang, J. Shen, Z. Hou, D. Ok, Y. S. & Poon, C. S (2020). Biochar as green additives in cement-based composites with carbon dioxide curing. *Journal of Cleaner Production*. 258. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120678>
- Wei, S. Zhu, M. Fan, X. Song, J. Li, K., Jia, W. & Song, H (2019). Influence of pyrolysis temperature and feedstock on carbon fractions of biochar produced from pyrolysis of rice straw, pine wood, pig manure and sewage sludge. *Chemosphere*. 218. 624-631. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.177>
- Xie, C. Yuan, L. Tan. H. Zhang, Y. Zhao, M. & Jia, Y (2021). Experimental study on the water purification performance of biochar-modified pervious concrete. *Construction and Building Materials*. 285. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122767>

Yin, Q. Zhang, B. Wang, R. & Zhao, Z (2017). Biochar as an adsorbent for inorganic nitrogen and phosphorus removal from water: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 1-13. 10.1007/s11356-017-0338-y

Zeidabadi, ZA. Bakhtiari, S. Abbaslou, H. & Ghanizadeh, A. R (2018). Synthesis, characterization and evaluation of biochar from agricultural waste biomass for use in building materials. *Construction and Building Materials*. 181. 301-308. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.271>

Zhang, R. Kanemaru, K. & Nakazawa, T (2015). Purification of River Water Quality Using Precast Porous Concrete Products. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 13. 163-168. 10.3151/jact.13.163