TICYANE PEREIRA FREIRE SABINO

UTILIZAÇÃO DE CINZAS INDUSTRIAIS E CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇO DE PETRÓLEO NA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO

LAVRAS – MG

2025

TICYANE PEREIRA FREIRE SABINO

UTILIZAÇÃO DE CINZAS INDUSTRIAIS E CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇO DE PETRÓLEO NA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos Lignocelulósicos para a obtenção do título de Doutor.

ORIENTADOR

PROF. DR. RAFAEL FARINASSI MENDES

COORIENTADOR

PROF. DR. IRINEU PETRI JUNIOR

LAVRAS – MG

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo(a) autor(a) através do Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA.

Pereira Freire Sabino, Ticyane.
Utilização de cinzas industriais e cascalho de perfuração de poço de petróleo na produção de blocos de concreto para pavimentação / Ticyane Pereira Freire Sabino. 2024.
129 p. : il.

Orientador: Rafael Farinassi Mendes
Coorientador: Irineu Petri Junior

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2024.
Bibliografia.

1. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). 2. Materiais Sustentáveis. 3. Pavers. 4. Agregados. 5. Compósitos Cimentícios. I. Farinassi Mendes, Rafael. II. Petri Junior, Irineu. III. Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

TICYANE PEREIRA FREIRE SABINO

UTILIZAÇÃO DE CINZAS INDUSTRIAIS E CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇO DE PETRÓLEO NA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO

USE OF INDUSTRIAL ASH AND OIL WELL DRILLING GRAVEL IN THE PRODUCTION OF CONCRETE BLOCKS FOR PAVING

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos Lignocelulósicos para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 27 de fevereiro de 2024
Dr. Rafael Farinassi Mendes – UFLA
Dr. Eduardo Souza Candido – UFLA
Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro – UFLA
Dra. Priscilla Abreu Pereira Ribeiro – UFLA
Dra. Stefânia Lima Oliveira Metzker – UEMG

ORIENTADOR
PROF. DR. RAFAEL FARINASSI MENDES

COORIENTADOR
PROF. DR. IRINEU PETRI JUNIOR

LAVRAS – MG
2025

À Deus, às minhas filhas Melissa, Maitê e Mariah, ao meu marido e aos meus pais, por serem essenciais em minha vida.
Dedico

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por guiar meus passos, conceder-me força nos momentos desafiadores e inspirar meu caminho ao longo desta jornada acadêmica.

À minha amada família, que tem sido meu porto seguro e fonte constante de amor e apoio. Em especial, às minhas filhas, Melissa, Maitê e Mariah e meu marido Paulo Henrique, cuja presença, paciência, amor e compreensão foram fundamentais. Cada conquista alcançada neste doutorado é também de vocês, e agradeço por serem minha inspiração diária. Aos meus pais, por todo apoio e incentivo e por cuidar sempre das minhas filhas nos momentos de minha ausência para realização desse doutorado. Agradeço ainda ao meu pai que me ajudou diversas vezes na realização da parte experimental desse trabalho.

Ao meu orientador, professor Dr. Rafael Farinassi Mendes minha gratidão pela paciência e orientação ao longo de todo o processo. Seus insights e conselhos foram inestimáveis, moldando não apenas meu trabalho acadêmico, mas também meu crescimento como pesquisadora.

Agradeço também ao meu coorientador, professor Dr. Irineu Petri Junior, por todo apoio e contribuição na realização dessa pesquisa.

À Universidade Federal de Lavras, pela excelência acadêmica, infraestrutura e ambiente propício à pesquisa. Agradeço também às instituições de fomento, CAPES, FAPEMIG e CNPq, pelo suporte oferecido. Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, pela dedicação em proporcionar uma formação de qualidade.

Agradeço em especial aos meus amigos de pós-graduação Alan, Arimatéia, Bruna, Carol, Nayra, Queilla, Tony e demais colegas, professores e a todos os envolvidos na minha formação acadêmica. Cada interação contribuiu para a minha jornada e enriqueceu a experiência de aprendizado.

Aos amigos que estiveram ao meu lado, compartilhando alegrias e desafios, seu apoio foi essencial para manter meu ânimo e foco.

À banca, que forneceu uma base de conhecimento valiosa e que reconhece a importância da pesquisa e inovação.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para o sucesso deste trabalho, meu mais profundo agradecimento. Este é um marco significativo em minha jornada acadêmica, e cada um de vocês desempenhou um papel essencial.

RESUMO

A destinação dos resíduos sólidos gerados pelas indústrias está entre os problemas mais difíceis à ser resolvido. Boa parte desses resíduos não recebem o tratamento e outra a destinação adequada, portanto acabam poluindo o meio ambiente e causando transtorno à sociedade. O cascalho de perfuração, gerado durante a extração do petróleo em alto mar, e as cinzas de eucalipto e bagaço de cana geradas nas indústrias cerâmicas e de produção de álcool e açúcar, são exemplos de resíduos que necessitam de estudos para seus aproveitamentos. O setor da construção civil, responsável por uma elevada extração de matéria prima, apresenta grande potencial para inserir resíduos na fabricação de seus materiais, desenvolvendo novos produtos que visem contribuir com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela AGENDA 2030. Tal como na produção de blocos de concreto para pavimentação, que podem ganhar novas propriedades com a introdução de cascalho de perfuração e cinzas agroindustriais em sua fabricação. Portanto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar as propriedades físico-mecânicas, microestruturais e durabilidade de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduo de cascalho de perfuração e cinzas de eucalipto e bagaço de cana, que são resíduos destinados a aterros sanitários ou descartados de forma inadequada e apresentam potencial para utilização na produção de materiais de construção. O cascalho foi caracterizado quanto a granulometria, pozolanicidade, inibição de cura, composição química, teor de óleo, água, sólidos e densidade, já as cinzas foram caracterizadas quanto à granulometria, pozolanicidade e inibição de cura. Foram avaliados blocos produzidos com cascalho de perfuração nas porcentagens de 25, 50, 75 e 100% em substituição ao pó de pedra, além de um tratamento controle sem utilização de resíduo. Foram avaliados ainda blocos produzidos com cascalho de perfuração e cinzas de eucalipto e bagaço de cana, em duas diferentes porcentagens para cada resíduo, sendo avaliado 10 e 20% em substituição ao cimento, além do tratamento controle. Os blocos foram confeccionados em uma vibro prensa, por vibrocompressão, para adquirir o tamanho e forma desejado e foram caracterizados quanto à resistência à compressão, absorção de água, densidade aparente, porosidade aparente, caracterização microestrutural e durabilidade. Observou-se um aumento na densidade dos blocos com a inclusão do cascalho de perfuração devido a sua maior densidade real comparado ao pó de pedra e uma maior absorção de água e formação dos poros nos pisos com resíduo. O envelhecimento acelerado intensificou a formação de poros e trincas, afetando negativamente as propriedades físicas dos blocos de concreto, no entanto após o envelhecimento a resistência à compressão aumentou para o tratamento controle e se manteve para os blocos com cascalho de perfuração. A substituição do cimento pelos resíduos industriais (cinzas e cascalho de perfuração) afetou negativamente as propriedades físicas e mecânicas dos blocos de concreto devido à maior inibição das reações de hidratação e o menor recobrimento das partículas, devido ao grau de finura apresentado pelos resíduos. O envelhecimento acelerado gerou perda de aderência e formação de poros e fissuras, no entanto proporcionou através dos ciclos de molhagem uma hidratação continuada, melhorando a resistência à compressão dos blocos.

Palavras-chave: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS); Materiais Sustentáveis; *Pavers*; Agregados; Compósitos Cimentícios.

ABSTRACT

The disposal of solid waste generated by industries is among the most difficult problems to be resolved. Much of this waste does not receive treatment or adequate disposal, therefore it ends up polluting the environment and causing disruption to society. Drilling gravel, generated during offshore oil extraction, and eucalyptus ash and sugarcane bagasse generated in the ceramics and alcohol and sugar production industries, are examples of waste that require studies for their use. The civil construction sector, responsible for a high extraction of raw materials, has great potential to insert waste in the manufacture of its materials, developing new products that aim to contribute to the Sustainable Development Goals (SDGs) established by AGENDA 2030. As in production of concrete paving blocks, which can gain new properties with the introduction of drilling gravel and agro-industrial ash in their manufacture. Therefore, the objective of this research was to evaluate the physical-mechanical, microstructural properties and durability of concrete paving blocks produced with drilling gravel waste and eucalyptus ash and sugarcane bagasse, which are waste destined for landfills or disposed of in a inadequate and have potential for use in the production of construction materials. The gravel was characterized in terms of particle size, pozzolanicity, curing inhibition, chemical composition, oil, water, solids content and density, while the ash was characterized in terms of granulometry, pozzolanicity and curing inhibition. Blocks produced with drilling gravel in percentages of 25, 50, 75 and 100% were evaluated as a replacement for stone dust, in addition to a control treatment without the use of waste. Blocks produced with drilling gravel and eucalyptus ash and sugarcane bagasse were also evaluated, in two different percentages for each residue, with 10 and 20% being evaluated as a replacement for cement, in addition to the control treatment. The blocks were made in a vibropress, by vibrocompression, to acquire the desired size and shape and were characterized in terms of compressive strength, water absorption, apparent density, apparent porosity, microstructural characterization and durability. An increase in the density of the blocks was observed with the inclusion of drilling gravel due to its greater real density compared to stone dust and a greater absorption of water and formation of pores in floors with residue. Accelerated aging intensified the formation of pores and cracks, negatively affecting the physical properties of the concrete blocks. However, after aging, the compressive strength increased for the control treatment and was maintained for the blocks with drilling gravel. The replacement of cement with industrial waste (ash and drilling gravel) negatively affected the physical and mechanical properties of concrete blocks due to greater inhibition of hydration reactions and less coverage of particles, due to the fineness level presented by the waste. Accelerated aging generated loss of adhesion and formation of pores and cracks, however it provided continued hydration through wetting cycles, improving the compressive resistance of the blocks.

Keywords: Sustainable Development Goals (SDG); Sustainable Materials; Pavers; Aggregates; Cementitious Composites.

INDICADORES DE IMPACTO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar pisos de concreto sustentáveis, produzidos com cinzas industriais e cascalho de perfuração visando minimizar os impactos ambientais e econômicos associados à produção convencional e o descarte de materiais. Os impactos tecnológicos dessa abordagem estão relacionados principalmente ao avanço na formulação de concretos mais sustentáveis, com a utilização de resíduos da indústria. O uso de cascalho de perfuração na produção de novos materiais, por exemplo, permite a redução da extração de recursos naturais, um dos processos mais prejudiciais ao meio ambiente e evita o descarte inadequado do resíduo. Já as cinzas industriais, que geralmente são subprodutos da queima de carvão em usinas termoelétricas, são ricas em sílica e podem ser incorporadas ao concreto para a produção de materiais cimentícios, melhorando suas propriedades mecânicas e diminuindo a necessidade de grandes quantidades de cimento. Essa substituição não apenas gera uma economia de recursos, mas também pode resultar em um concreto mais resistente e durável, com menores custos de manutenção a longo prazo. No âmbito econômico, a utilização de resíduos industriais como matéria-prima tem o potencial de reduzir os custos de produção do compósito, além de criar novas oportunidades de negócios e geração de emprego nas indústrias de reaproveitamento de materiais. As populações que vivem em regiões próximas as indústrias geradoras dos resíduos, por exemplo, podem ser diretamente beneficiadas pela criação de cadeias produtivas locais baseadas no uso desses resíduos. Além disso, a redução da necessidade de materiais virgens pode contribuir para o fortalecimento de economias circulares, onde o reaproveitamento de recursos se torna uma prática comum, resultando em menor dependência de fontes externas e maior sustentabilidade econômica. Esse tipo de iniciativa também pode ter efeitos positivos sobre a saúde pública, ao reduzir os impactos ambientais associados à mineração, como a poluição do ar e da água. Em conclusão, a utilização de cascalho de perfuração e cinzas industriais na produção de pisos de concreto oferece uma alternativa promissora do ponto de vista tecnológico e econômico, com potenciais impactos positivos significativos para o meio ambiente e para a sociedade. No entanto, é essencial considerar que a implementação dessa tecnologia exigi mais investimentos em pesquisa e adaptação das tecnologias produtivas, para chegar na formulação ideal para a produção de pisos de concreto sustentáveis.

IMPACT INDICATORS

This study aimed to develop and evaluate sustainable concrete floors produced with industrial ash and drill cuttings, aiming to minimize the environmental and economic impacts associated with conventional production and disposal of materials. The technological impacts of this approach are mainly related to the advancement in the formulation of more sustainable concretes, with the use of industrial waste. The use of drill cuttings in the production of new materials, for example, allows the reduction of the extraction of natural resources, one of the most harmful processes to the environment, and avoids the inappropriate disposal of waste. Industrial ash, which is usually a byproduct of coal burning in thermoelectric plants, is rich in silica and can be incorporated into concrete for the production of cementitious materials, improving its mechanical properties and reducing the need for large quantities of cement. This substitution not only generates resource savings, but can also result in stronger and more durable concrete, with lower maintenance costs in the long term. From an economic perspective, the use of industrial waste as raw material has the potential to reduce composite production costs, as well as create new business opportunities and job creation in material reuse industries. Populations living in regions close to waste-generating industries, for example, can directly benefit from the creation of local production chains based on the use of this waste. Furthermore, reducing the need for virgin materials can contribute to strengthening circular economies, where the reuse of resources becomes a common practice, resulting in less dependence on external sources and greater economic sustainability. This type of initiative can also have positive effects on public health by reducing the environmental impacts associated with mining, such as air and water pollution. In conclusion, the use of drill cuttings and industrial ash in the production of concrete flooring offers a promising alternative from a technological and economic point of view, with significant potential positive impacts for the environment and society. However, it is essential to consider that the implementation of this technology requires more investment in research and adaptation of production technologies, to arrive at the ideal formulation for the production of sustainable concrete floors.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE 13

1 INTRODUÇÃO 13

2 REFERENCIAL TEÓRICO 16

2.1 Pavimentação e blocos de concreto 16

2.2 Exploração de petróleo 23

2.2.1 Cascalho de perfuração *offshore* 27

2.2.1.1 Cascalho de perfuração em materiais cimentícios 32

2.3 Materiais Pozolânicos 35

2.3.1 A utilização de cinzas vegetais na produção de materiais de construção 37

2.3.1.1 Cinza de Bagaço de cana de açúcar 37

2.3.1.2 Cinza de Eucalipto 40

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 43

REFERÊNCIAS 45

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS 55

ARTIGO 1 - EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE CASCALHO *OFFSHORE* SOBRE AS PROPRIEDADES DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO 55

1 INTRODUÇÃO 57

2 MATERIAL E MÉTODOS 60

2.1 Caracterização do cascalho de perfuração 60

2.1.1 Análise granulométrica 60

2.1.2 Teste de inibição 60

2.1.3 Teor de óleo, água, sólidos e densidade 61

2.1.4 Composição química do cascalho 62

2.2 Produção dos blocos de concreto para pavimetação 62

2.3 Envelhecimento acelerado 63

2.4 Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos blocos 63

2.5 Caracterização microestrural 64

2.6 Análise estatística 64
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 65
3.1 Caracterização do resíduo 65
3.1.1 Análise granulométrica 65
3.1.2 Análise de aptidão 66
3.1.3 Análise de teores óleo, água, sólidos e densidades 68
3.1.4 Análise dos teores dos elementos químicos do cascalho de perfuração 69
3.2 Análises físicas dos blocos de concreto para pavimentação 70
3.3 Análise mecânica dos blocos de concreto para pavimentação 76
4 CONCLUSÃO 81
REFERÊNCIAS 82
ARTIGO 2 - EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR RESÍDUOS INDUSTRIAIS POZOLÂNICOS SOBRE AS PROPRIEDADES DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO 89
1 INTRODUÇÃO 91
2 MATERIAIS E MÉTODOS 93
2.1 Caracterização do cascalho de perfuração e das cinzas 93
2.1.1 Análise granulométrica 93
2.1.2 Ensaio de pozolanicidade 93
2.1.3 Teste de inibição 94
2.1.4 Teor de óleo, água, sólidos e densidade 94
2.2 Produção dos blocos de concreto para pavimentação 95
2.3 Envelhecimento acelerado 95
2.4 Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos blocos de concreto para pavimentação 96
2.5 Caracterização microestrural 96
2.6 Análise estatística 96
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 98

3.1 Caracterização dos resíduos 98
3.1.1 Análise de pozolanicidade dos resíduos 98
3.1.2 Análise granulométrica 100
3.1.3 Análise de aptidão 101
3.2 Análise física dos blocos de concreto para pavimentação 103
3.3 Análise mecânica dos blocos de concreto para pavimentação 113
4 CONCLUSÃO 120
REFERÊNCIAS 122

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

As indústrias contribuem significativamente para o desenvolvimento socioeconômico do planeta, no entanto apesar dos inúmeros benefícios entregues à sociedade, apresenta algumas desvantagens como a elevada extração de recursos naturais e geração de resíduos (LI et al., 2022).

A crescente exploração de petróleo tem gerado preocupação com o gerenciamento dos resíduos produzidos pela perfuração, especialmente no que diz respeito ao cascalho de perfuração, que são fragmentos de rochas que apresentam um fluido impregnado utilizado no processo de extração do petróleo (PETRI JÚNIOR et al., 2020; ROMUALDO; GAUDÊNCIO, 2019).

Existem diferentes tipos de fluidos utilizados na extração do petróleo, como fluidos a base de água, fluidos à base de óleo e fluidos à base de ar ou de gases. Consequentemente, o resíduo é classificado como heterogêneo e apresenta uma composição química variada, que dependerá do fluido utilizado na perfuração, bem como da formação rochosa essencialmente perfurada (ALANSARY; AL-TABBAA, 2007; FIALHO, 2012; MEDHI et al., 2020).

O seu descarte no meio ambiente é autorizado apenas quando apresenta concentração de base orgânica aderida abaixo de 6,9%, caso contrário é preciso dar uma outra destinação que não impacte o meio ambiente (IBAMA, 2018).

Alguns estudos estão sendo realizados para a utilização do cascalho de perfuração na fabricação de cerâmica (RYKUSOVA, et al., 2020), como agregados leves (AYATI et al., 2019), na produção de concreto (FOROUTAN et al., 2018) e mistura asfáltica à quente (KHODADADI et al., 2020) apresentando bons resultados.

Outro tipo de resíduo industrial encontrado em grande escala são as cinzas produzidas pelo processo de combustão de diversos materiais lignocelulósicos, como bagaço de cana, eucalipto, pinus, casca de café, dentre outros, que são geradas em diversos segmentos de industrias, como de álcool e açúcar, indústrias cerâmicas e de beneficiamento de café, com a função de geração de energia/calor para os processos industriais (MUNAWAR et al., 2021).

Esse material tem sido foco de vários estudos, devido a sua disponibilidade, propriedades e necessidade de reaproveitamento. A principal base para a valorização das cinzas de biomassa está no fato de grande parte possuírem características pozolânicas, com grandes

quantidades de sílica amorfa, o que as tornam adequadas para substituição do cimento em compósitos cimentícios (ACAA, 2003; PACÍFICO et al., 2021; ŠUPIĆ et al., 2021).

Os materiais pozolânicos possuem estrutura pouco cristalina ou mesmo não cristalina (amorfa), com pouca ou nenhuma atividade ligante, mas que, estando finamente dividida e na presença de água, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio [$Ca(OH)_2$] ou soluções alcalinas contendo Ca^{2+}, em temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades ligantes, geralmente silicatos e aluminatos de cálcio (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2005).

A caracterização de materiais com potencial para substituição do cimento representa um grande avanço no que diz respeito a mitigação de impactos ambientais provocados pela indústria da construção civil. Além disso, os materiais pozolânicos podem melhorar as propriedades dos concretos no estado endurecido, devido as reações pozolânicas que formam materiais cimentícios secundários, como hidratos de silicato de cálcio e hidratos de aluminato de cálcio, que contribuem para a resistência e durabilidade do concreto (HAMADA et al., 2023; SILVA et al., 2020). As pesquisas direcionadas ao aproveitamento desses resíduos resultaram, principalmente, no emprego em materiais de construção civil.

Reig et al. (2022) avaliando a atividade pozolânica de resíduos de louças sanitárias na produção de pasta e argamassa, observaram que ao substituir o cimento em peso, com diferentes porcentagens (0-50%), provou que os resíduos de louças sanitárias podem ser usados com sucesso como aditivo pozolânico em sistemas misturados de cimento Portland, levando a materiais de construção mais sustentáveis com benefícios ambientais.

Dharek et al. (2021) avaliando tijolos produzidos a partir de resíduos de demolição, misturados com cal (L), cinza volante (FA), escória de alto forno (BS) em proporções variadas, concluíram que os tijolos com resíduos de demolição misturado com materiais pozolânicos apresentou melhor desempenho do que os tijolos convencionais.

Madhu e Abhiram (2023) analisando 25 amostras de cinzas de casca de arroz para produção de blocos de concreto para pavimentação, observaram que a reatividade da sílica na cinza de casca de arroz é afetada por diversas variáveis interligadas, como o tempo de incineração e a temperatura. Os autores observaram que o aumento de resíduos na concentração levam a melhorias notáveis nos parâmetros de desempenho das misturas de cinzas de casca de arroz e concreto. O cimento foi parcialmente substituído por seis porcentagens de resíduos (0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10% e 12%, em peso) e concluiu-se que com 10% de resíduos de cinzas há um ganho na resistência à compressão de 9,6% aos 28 dias, obtendo uma estrutura mais densa que o bloco convencional.

Os blocos de concreto para pavimentação, exemplo de materiais cimentícios, são muito utilizados em estacionamento, calçadas e ruas, por apresentar um menor custo, boa resistência, durabilidade, ser esteticamente agradável e necessitar de uma menor manutenção. O material é formado por cimento Portland, água, agregados miúdos e graúdos em proporções adequadas, sendo permitido o uso de aditivos e pigmentos e são submetidos a vibração e pressão para adquirirem formato e resistência desejada (NBR 9781, ABNT 2013; GHORBANI et al., 2018; SOUTSOS et al., 2011). Seu processo de produção facilita a inclusão de resíduos em sua matriz e pode trazer benefícios em relação a suas propriedades.

Apesar de existir alguns estudos incluindo resíduo na sua produção, informações mais detalhadas ainda são necessárias para compreender melhor sobre a interação desses materiais com a matriz. Uma vez que, esses subprodutos das indústrias apresentam características variáveis, alterando as propriedades finais obtidas para o compósito.

Portanto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar as características dos resíduos industriais de cascalho de perfuração, cinzas de eucalipto e cinzas de bagaço de cana e as propriedades físico-mecânicas, microestruturais e de durabilidade de blocos de concreto para pavimentação produzidos com os resíduos, em substituição aos agregados e ao cimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Pavimentação e blocos de concreto

Os pavimentos são formados por estruturas de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície devidamente preparada por terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços mecânicos oriundos do tráfego de veículos e do desgaste dos intemperismos, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI et al., 2010; YOU; YAN; LIU, 2020).

De acordo com Merighi (2004), os pavimentos são basicamente formados pelas seguintes camadas (Figura 1):

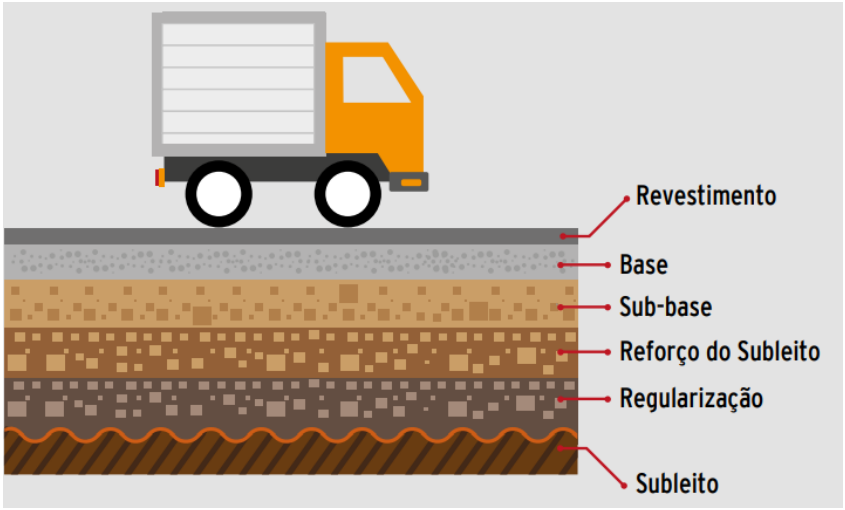
Subleito: é o terreno de fundação do pavimento, que sofreu o processo de terraplenagem ou regularização. Quando necessário recebe reforço através de uma camada com material de resistência superior;

Sub-base: camada complementar à base, quando por circunstâncias técnico-econômicas não for aconselhável construir a base sobre a regularização;

Base: é a camada destinada a receber e distribuir uniformemente os esforços oriundos do tráfego sobre o qual se constrói o revestimento. Sob o ponto de vista estrutural a camada mais importante é a base;

Revestimento: é a última camada, recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada a melhorá-la, quanto à comodidade e segurança e resistência ao desgaste.

Figura 1 - Sessão típica de pavimento.



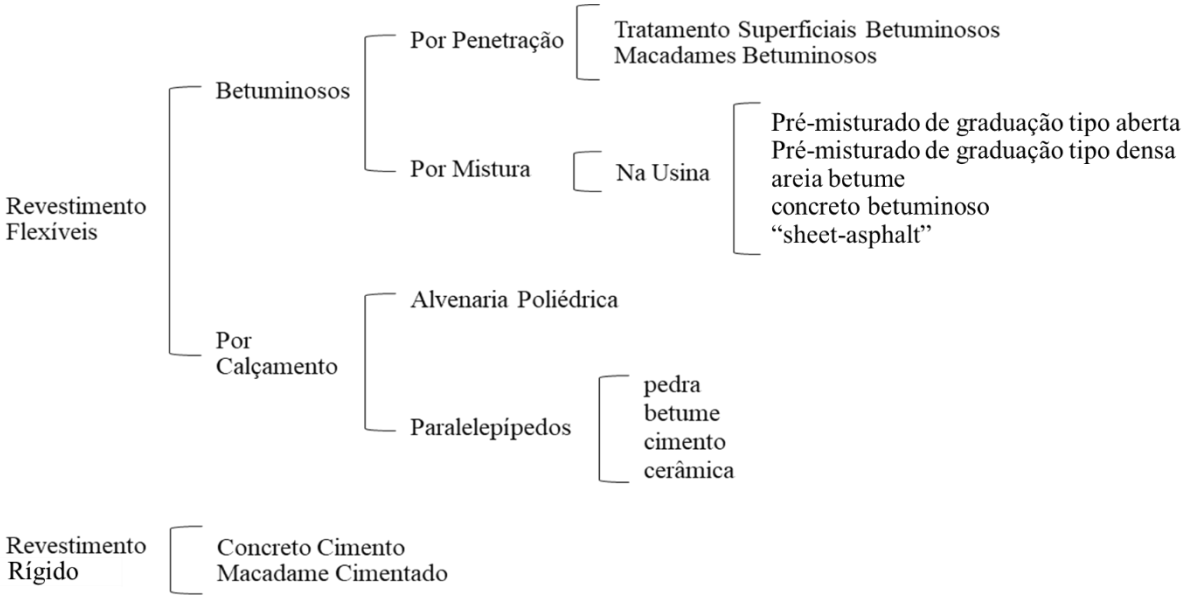
Fonte: Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017).

De acordo com Santana (1993) as múltiplas camadas constituintes da estrutura do pavimento possuem a função de absorver parte das tensões verticais dinâmicas aplicadas na superfície, para que o subleito receba uma parcela muito inferior desta tensão vertical. Já a tensão horizontal aplicada na superfície do pavimento apresenta uma exigência maior sobre o revestimento, exigindo que o mesmo possua uma coesão mínima para suportar a parcela do esforço de cisalhamento, sem que ocorra a degradação do revestimento.

De uma forma geral, os pavimentos são classificados em flexíveis, semirrígidos e rígidos. Sob o aspecto estrutural, a principal diferença entre os tipos de pavimento está na forma como as tensões são distribuídas nas camadas subjacentes ao revestimento (CUNHA, 2013).

O revestimento do pavimento, ou seja, a última camada, pode caracterizar o tipo de pavimento de uma via. De acordo com o DNIT (2006) os revestimentos podem ser agrupados de acordo com o esquema da Figura 2:

Figura 2 – Classificação dos revestimentos.



Fonte: DNIT (2006).

Dentre os revestimentos flexíveis, os pavimentos intertravados merecem destaque por estarem cada vez mais presentes nos pavimentos urbanos mediante as vantagens técnicas que o sistema oferece (JAMSHIDI et al., 2019). Os pavimentos intertravados têm sua origem nos pavimentos revestidos com pedras, executados na Mesopotâmia há quase 5.000 anos a.C. e muito utilizados pelos romanos desde 2.000 a.C (Figura 3). Este tipo de pavimento evoluiu

inicialmente para o uso de pedras talhadas, resultando em pavimentos conhecidos como paralelepípedos.

Figura 3 – Calçada romana na freguesia portuguesa Moncarapacho.

Fonte: Rodrigues (2004).

As dificuldades da produção artesanal dessas pedras e a falta de conforto de rolamento impulsionaram o desenvolvimento das peças de concreto pré-fabricadas. As primeiras peças pré-moldadas de concreto foram fabricadas no final do século XIX, e algumas patentes foram registradas antes da Primeira Guerra Mundial. Após a Segunda Guerra Mundial, os blocos passaram a ser produzidos em fábricas maiores e com grande produção na Alemanha, tomando grande impulso na década de 70, quando chegaram ao Brasil. Esse tipo de pavimento é bastante utilizado em ciclovias, vias urbanas, pátios de manobras, entre outros (MÜLLER, 2005).

Observa-se que esses blocos de concreto foram reconhecidos pela melhor uniformidade na aplicação, visto que os elementos aparados (devido seu controle de produção e simetria), não necessitam de reaparelhamento antes do assentamento final como acontecia com as pedras naturais (MÜLLER, 2005). Além disso, a camada de revestimento composta pelo bloco intertravado apresenta uma superfície bastante resistente ao desgaste, cumprindo assim uma importante função estrutural.

Os principais benefícios da aplicação do pavimento intertravado com blocos de concreto tanto para o tráfego de pessoas como para veículos pesados são: permeabilidade e conforto térmico; utilização imediata com liberação do tráfego logo após sua aplicação; facilidade de manutenção, remoção e reutilização; segurança, uma vez que sua superfície é antiderrapante; versatilidade arquitetônica, apresentando vários tipos, cores e combinações; fácil assentamento e alta durabilidade (ABCP, 2010).

A Figura 4 mostra aspectos de um revestimento com blocos intertravados já assentados em uma via pública. A morfologia dos blocos e o preparo correto das fundações devem ser projetados no sentido de otimizar a transmissão de tensão e deformação. Portanto, a performance das estruturas dependerá essencialmente das propriedades físico-mecânicas dos blocos e do formato, arranjo e espessura deste revestimento sob as fundações.

Figura 4 - Aspectos de um revestimento flexível com blocos intertravados – aplicados na Universidade Federal de Lavras.

Fonte: Da autora (2024).

Em consonância com a NBR 7207 (ABNT, 2014) diversos formatos prismáticos são comercializados. As formas dos blocos são projetadas para permitir elevada transferência de carga entre o que estiver sendo carregado e os adjacentes, por meio do contato entre as faces (intertravamento), onde se processa o alívio de tensões transmitidas ao subleito e camadas do pavimento.

Conforme JAMSHIDI et al. (2019), a vida útil do pavimento pré-moldado de concreto é bastante elevada. Considerando projetos apropriados para sub-base, elementos de boa qualidade e adequado assentamento, pode-se ter uma pavimentação com vida útil de pelo menos 40 anos. Os blocos para pavimentos (também chamados de *pavers* ou pisos intertravados de

concreto ou "blockrets") apresentam deformação vertical inferior aos pavimentos flexíveis (asfálticos) de mesma espessura.

A norma brasileira básica para os blocos de concreto destinados à pavimentação, a NBR 9781 (ABNT, 2013), apresenta uma variação entre as dimensões fornecidas pelo fabricante e as reais das peças, não devendo os produtos comerciais ultrapassar os limites toleráveis:

1º) Variações dimensionais no comprimento/largura máximo ± 3 mm, na espessura máximo ± 5 mm;

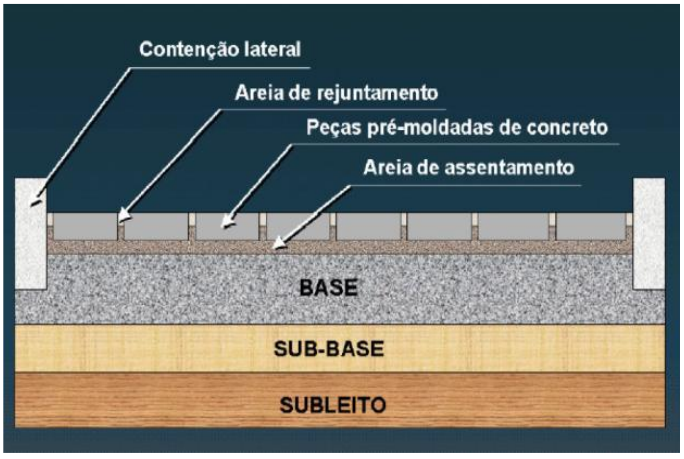
2º) Os cantos vivos (bordas, quinas e chanfros) não devem apresentar defeitos, escamações ou perdas de material, e nem tão pouco rebarbas acentuadas;

3º) As peças não devem apresentar trincas ou fraturas em excesso, bem como outros defeitos (segregações ou heterogeneidade) que possam interferir em seu assentamento e funcionamento.

Os blocos de concreto são produzidos em vibroprensas que proporcionam elevada compactação às peças, o que promove maior resistência mecânica e durabilidade.Após a moldagem nas vibroprensas, as peças são curadas em câmaras, com umidade relativa acima de 95%, garantindo a hidratação do cimento e proporcionando menos absorção de água da peça que deve ser menor ou igual a 6%. O período de cura na câmara gira em torno de 24 horas e a cura final no pátio depende de algumas condições industriais, ficando entre 7 e 28 dias (ABCP, 2010).

O pavimento intertravado é composto por peças de concreto, assentadas sobre camada de areia e travadas entre si por contenção lateral, conforme a Figura 5.

Figura 5 - Estrutura típica de um pavimento intertravado.



Fonte: Muller (2005).

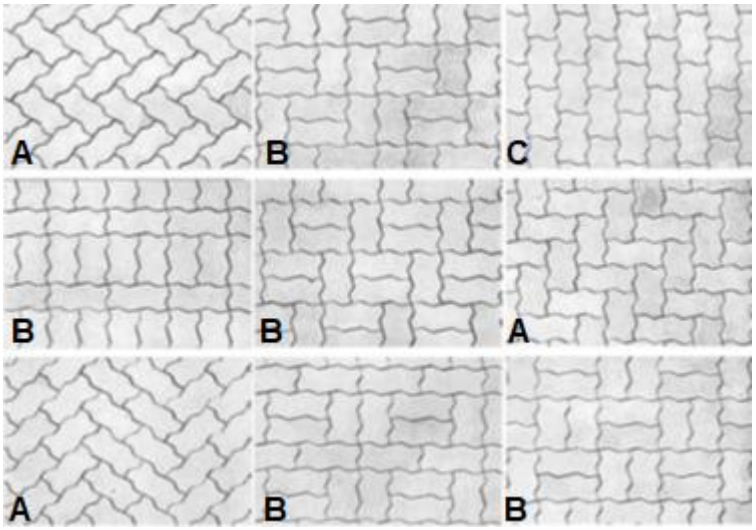
O intertravamento possibilita aos blocos maior resistência a movimentos de deslocamento individual, seja ele, vertical, horizontal ou de rotação em relação a seus vizinhos. Ele é fundamental para o desempenho e a durabilidade do pavimento.

Duas condições são necessárias e indispensáveis para se obter o intertravamento: contenção lateral e junta preenchida com areia. A primeira impede o deslocamento lateral dos blocos da camada de rolamento, promovendo o intertravamento. A segunda, proporciona a transferência de esforços entre os blocos de concreto, permitindo que eles trabalhem juntos, uns com os outros, e suportem as cargas solicitantes (ABCP, 2010).

O tipo de arranjo do pavimento intertravado tem influência tanto na aparência estética quanto no desempenho do pavimento, pois ambos são afetados significativamente conforme a escolha do tipo de assentamento. Porém não existe um consenso entre os pesquisadores sobre a interferência do tipo de arranjo em sua durabilidade (MACIEL, 2007).

Na Figura 6 estão alguns dos principais tipos de arranjos utilizados.

Figura 6 - Principais tipos de arranjos.



A) Espinha de peixe; B) Trama; C) Fileira

Fonte: Muller (2005).

O arranjo "espinha-de-peixe" é considerado o mais adequado devido a sua boa resposta frente ao fenômeno de "escorregamento" analisado em relação ao travamento horizontal (NI, 2022). De acordo com ABCP (2010), o funcionamento do intertravamento funciona conforme a Figura 7.

Figura 7 - Funcionamento do intertravamento.

Deslocamento vertical *Movimentação de rotação* *Deslocamento horizontal*

Fonte: ABCP (2010).

Se um conjunto de blocos de um piso recebe uma carga bem no centro de um dos blocos, a tendência dele é afundar, ter um deslocamento vertical. Se a carga for aplicada na extremidade do bloco, a tendência é a rotação. Mas, se o esforço for horizontal, como por exemplo a freada de um veículo, os blocos tendem a se deslocar lateralmente (ABCP, 2010).

A selagem das juntas (seu preenchimento com areia) é necessária para o bom funcionamento do pavimento. Se as juntas estiverem mal seladas, os blocos de concreto ficarão soltos, o pavimento perderá intertravamento e se deteriorará rapidamente. Isso se aplica tanto a pavimentos recém-construídos quanto a antigos (ABCP, 2010)

Atualmente, há uma tendência mundial da utilização de métodos mecanizados (ou automatizados) de produção ou instalação dos blocos (Figura 8), o que admite arranjos que se ajustem aos modelos de comportamento mecânico, incrementando ainda mais o uso de pavimento flexível em substituição aos pavimentos rígidos (FILHO, 2013; ORHORHORO; OYEJIDE; ATADIOUS, 2018).

Figura 8 –Mecanização na aplicação dos blocos intertravados.

Fonte: CIA. World Fact Book, (2013).

Além disso, há uma diversidade de formatos de blocos de concreto assim como coloração das peças, o que permite vários arranjos. Os modelos apresentados na Figura 9 possuem formas retangulares, o que facilita seu assentamento. As suas dimensões usualmente são 20 cm de comprimento por 10 cm de largura e as suas bases laterais podem ser retas, curvilíneas ou poliédricas.

Figura 9 - Formatos de blocos de concreto.

Fonte: ABCP (2010).

2.2 Exploração de petróleo

No decorrer do século XX, a industrialização mundial foi marcada pela consolidação do petróleo como principal fonte de energia primária. Com o desenvolvimento da indústria automobilística e da aviação, sobretudo a partir da 1ª Guerra Mundial e, mais enfaticamente, a partir da 2ª Guerra Mundial, o petróleo tornou-se o paradigma energético mundial (BORBA; OLIVEIRA; SILVA NETO, 2007).

Composto pela junção de moléculas de carbono e hidrogênio é encontrado em zonas de bacias sedimentares, em camadas abaixo da superfície. O petróleo é extraído por meio de plataformas petrolíferas continentais ou marítimas.

O petróleo desempenha um papel importante na economia mundial, pois é considerado como recurso natural estratégico. Isto significa que aqueles países que o possuem, além de garantir uma fonte de renda, também conseguem representar certo domínio de poder, pois a maioria das nações deseja adquirir esse recurso para o interno abastecimento.

Segundo o boletim[1] divulgado em abril de 2023 pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a produção de Petróleo no Brasil cresceu 4,7% de abril de 2022 à abril de 2023. Desde 2016, a alta acumulada chega a 17,1%. Ainda segundo os dados do último mês do ano de 2020, a produção brasileira veio principalmente dos campos marítimos, responsáveis por 97,7% do petróleo e 84,6% do gás natural produzidos no país (ANP, 2023).

[1] Boletim Mensal disponível em https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletim-mensal-da-producao-de-petroleo-e-gas-natural#

Em cenários de crescimento da quantidade de reservas petrolíferas, número de poços perfurados e incremento na produção de petróleo, há um aumento na demanda por processos tecnológicos e matérias-primas necessárias à execução destas atividades. Associado a este crescimento, está o aumento na geração de efluentes provenientes das operações de perfuração de poços. As técnicas ambientais corretas, retratadas na legislação ambiental, exigem que o gerenciamento dos efluentes tenha como meta, não somente a redução na produção, mas também o seu reaproveitamento, ao invés de descarte no meio ambiente (SILVA et al., 2019).

A perfuração de poços tanto pode ser *onshore* (em terra) quanto *offshore* (no mar). Os poços podem ser classificados em verticais, direcionais, horizontais e multilaterais, quando a classificação diz respeito à sua trajetória. Os custos com a perfuração de poços são significativos, sendo mais elevados em se tratando de poços *offshore* (CARDOSO, 2012; TAN et al., 2021).

A Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) descreve a cadeia produtiva do petróleo e gás em três seguimentos segundo a classe das operações efetuadas: *Upstream*, que faz parte da exploração e produção; *Midstream*, refino e transporte de derivados; *Downstream*, distribuição e revenda (ANP, 2015). A operação *Upstream* de extração e processamento de óleo e gás na fase inicial é um dos principais segmentos deste setor no território brasileiro e acontecem principalmente em águas profundas e ultra profundas (SILVA et al., 2019).

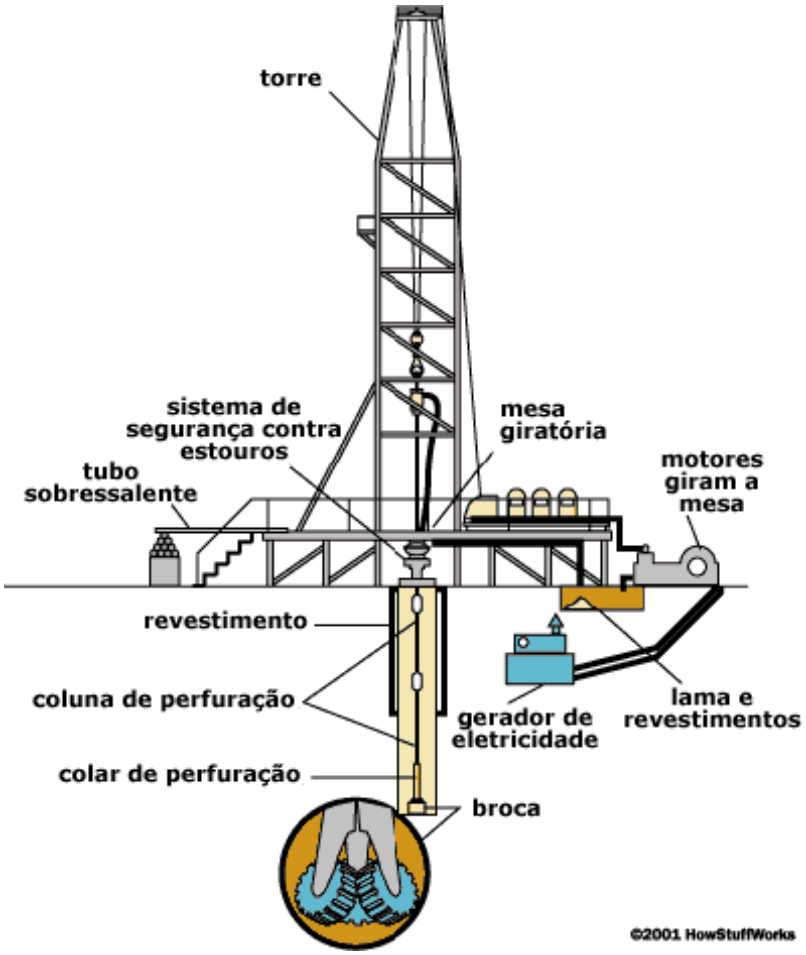
Gomes e Alves (2011) afirmam que as operações desenvolvidas na construção de um poço constituem um conjunto de processos com a utilização de recursos, equipamentos, dispositivos e diversos procedimentos específicos. Esses processos são empregados para atingir o interior do reservatório de hidrocarbonetos, ainda na fase exploratória ou de desenvolvimento da produção. As atividades de exploração com acesso a uma jazida por meio de um poço de petróleo são feitas por sondas de perfuração.

A perfuração mais comum é a rotativa, realizada por meio de uma sonda de perfuração, constituída por uma estrutura metálica, a torre com mais de 40 metros de altura, e de equipamentos denominados sistemas, conforme a Figura 10. Os sistemas de uma sonda são: sistema de sustentação de cargas, sistema de geração e transmissão de energia, sistema de movimentação de carga, sistema de rotação, sistema de circulação, sistema de segurança do poço e sistema de monitoração (MARSHALL, 2001).

A torre tem a função de suportar o conjunto, em sua extremidade inferior localiza-se a broca destinada a perfurar as camadas da terra. Na perfuração rotativa as rochas são perfuradas

pela rotação e peso aplicados na broca existente na extremidade da coluna de perfuração, a qual consiste de tubos de paredes espessas e finas.

Figura 10 – Sistemas da sonda de perfuração.



Fonte: Marshall (2001).

Thomas (2004) descreve como se dá a perfuração do poço de petróleo, durante o processo de perfuração, os fragmentos de rocha são removidos continuamente através de um fluido denominado fluido de perfuração (ou lama), que é injetado por bombas para o interior da coluna e retorna à superfície. Ao atingir certa profundidade, a coluna é removida do poço e uma coluna de revestimentos, de menor diâmetro, é inserida. O anular entre o tubo do revestimento e as paredes do poço é cimentada, a fim de que sejam isoladas as rochas perfuradas, permitindo o avanço da perfuração com segurança. Após a operação de cimentação, a coluna de perfuração é novamente descida no poço com uma nova broca em sua extremidade, de diâmetro menor que

o revestimento, para prosseguimento da perfuração. Dessa forma, observa-se que o poço é perfurado em diversas fases, de acordo com o diâmetro das brocas.

O fluido de perfuração desempenha importante papel no processo de perfuração. De acordo com Thomas (2004) os fluidos de perfuração são misturas de sólidos, líquidos, produtos químicos e por vezes até gases. Podem assumir aspectos de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão, dependendo do estado físico dos componentes (MORAIS, 2009)

Os fluidos têm como função limpar o fundo do poço dos cascalhos gerados e transportá-los até a superfície, exercer pressão hidrostática sobre as formações, resfriar e lubrificar a coluna de perfuração e a broca. Segundo Morais (2009) os fluidos devem apresentar as seguintes características: ser estável quimicamente; estabilizar as paredes do poço, mecânica e quimicamente; facilitar a separação dos cascalhos na superfície; manter os sólidos em suspensão quando estiverem em repouso; serem inertes a danos em relação as rochas produtoras; aceitarem quaisquer tratamentos físicos ou químicos; serem bombeáveis; apresentarem baixo grau de corrosão e de abrasão em relação a coluna de perfuração e demais equipamentos do sistema de circulação; facilitarem as interpretações geológicas do material retirado do poço; apresentarem custo compatível com a perfuração.

Segundo Thomas (2004) os fluidos são classificados em função de sua composição, se baseando na sua principal fase constituinte, sendo classificados como: 1) fluidos a base de água; 2) fluidos à base de óleo e; 3) fluidos à base de ar ou de gases. Apesar da alta toxicidade do fluido à base de óleo, ele é usado na perfuração de poços profundos devido ao seu alto desempenho e alta estabilidade térmica do que o fluido à base de água e também é mais barato que o fluido à base de ar ou de gases (MADKOUR et al., 2016).

O fluido de perfuração à base de óleo (OBF) consiste em óleo na fase contínua com uma porcentagem de água na fase dispersa (ARBAD; TEODORIU, 2020; PEREIRA et al., 2022). Ainda segundo os autores, aditivos poliméricos, minerais, salinos ou surfactantes são adicionados para alcançar as propriedades desejadas do fluido de perfuração. A base do OBF é geralmente diesel ou óleo mineral, sendo o primeiro mais tóxico do que os sistemas de óleo mineral (ARBAD; TEODORIU, 2020).

Vários estudos indicaram que os fluidos de perfuração não aquosos foram superiores aos fluidos à base de água, e isso é atribuído principalmente ao menor teor de água no traço e, assim, interações químicas menos significativas entre o fluido de perfuração e a rocha (ABDUO et al., 2016; ARAMENDIZ, IMQAM, 2019; ABDULLAH et al., 2022). Fluidos de perfuração à base de água foram inicialmente desenvolvidos e amplamente utilizados devido ao baixo custo (MENG et al., 2012; ZHUANG et al., 2019). Porém, os fluidos de perfuração à base de água

são limitados em operações de perfuração difíceis, como poços *offshore*, de alta temperatura e de alto ângulo, devido à sensibilidade a sais e à fraca habitação de xisto (ZHUANG et al., 2019).

O fluido à base de ar ou gás é usado de forma limitada na prática, utilizados em perfurações onde existem zonas com perdas de circulação severas, formações produtoras com pressões muito baixas ou com grande susceptibilidade a danos e em rochas muito duras como basalto ou diabásio (ABDULLAH et al., 2022; THOMAS, 2004).

Como dito anteriormente, os equipamentos presentes na sonda são responsáveis por determinada função e são divididos em "sistemas" de uma sonda. O sistema de circulação é composto por equipamentos que permitem a circulação e o tratamento do fluido de perfuração.

O fluido de perfuração é bombeado por meio da coluna de perfuração até a broca, retornando pelo espaço anular até a superfície, trazendo consigo cascalhos cortados pela broca. Na superfície ele recebe tratamento adequado e é armazenado dentro de tanques (FIJAL; GONET; JAMROZIK, 2015; NJUGUNA et al., 2022). O resíduo resultante possui diversos compostos contendo potenciais poluentes, que se descartados incorretamente podem trazer diversos riscos aos ambientes terrestres, aquáticos e aéreos, inclusive reduzindo a fertilidade do solo, afetando de forma negativa a flora e a fauna, além de causar problemas de saúde devido à volatilização de componentes perigosos do óleo como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno na atmosfera (PEREIRA et al., 2022; KARAKOSTA et al., 2021). Fialho (2012) salienta que os resíduos gerados durante as operações de perfuração de poços de petróleo, quando dispostos inadequadamente, poluem o solo, constituem um passivo ambiental, caso seja descartado em aterros sem tratamento prévio.

A perfuração de petróleo gera diversos resíduos, dentre esses os fluidos e cascalhos de perfuração. Gerenciar esses resíduos tem sido a grande problemática para as indústrias petroquímicas, não só pelo volume gerado, mas também pelos contaminantes, que a depender da rocha local e do fluido utilizado, pode conter compostos orgânicos e inorgânicos (SANTOS et al., 2018)

De acordo com Silva et al. (2019) o cascalho de perfuração obtido em plataformas marítimas possui elevado potencial de reaproveitamento, devido ao grande volume gerado durante a extração do petróleo e por formar propriedades adequadas à materiais de construção, como tijolo cimentício. Uma solução para o reaproveitamento desse material, amenizando o consumo de recursos naturais e ainda com um custo adequado.

2.2.1 Cascalho de perfuração *offshore*

O termo cascalho é utilizado na indústria do petróleo para qualquer sedimento retirado do poço, seja de granulometria fina ou grossa (Figura 11) (MENESES; PAULA, 2014). Thomas (2004) salienta que o cascalho de perfuração é a designação que geralmente se dá aos fragmentos de rochas do perfil litológico da bacia sedimentar (lateritos, conglomerados, calcários, arenito, calcarenitos, quartzitos, silte, areia, entre outros), material granular, descartado nas sondas. Os cascalhos são misturas de pequenos fragmentos de rochas saturadas com o fluido de perfuração utilizado para lubrificar e resfriar a broca, assim como manter os sólidos em suspensão durante a perfuração (LEONARD; STEGEMANN, 2012).

Figura 11 – Cascalho de perfuração estocado após processo de perfuração.

Fonte: Araruna Júnior (2009).

De acordo com Schaffel (2002) o volume de cascalho produzido na perfuração de um poço de petróleo é igual ao seu volume geométrico perfurado (chamado volume nominal do poço), porém para o cálculo de resíduo gerado, utiliza-se um coeficiente de segurança em torno de 20% em função de eventuais desabamentos das formações, o que é comum na perfuração de poços. Ademais, o volume produzido também depende das características geológicos da rocha sedimentar perfurada e do tipo de fluido de perfuração utilizado.

Fialho (2012) aponta que, teoricamente, para cada 100 metros perfurados, são produzidos cerca de 13 metros cúbicos de cascalho. De acordo com o autor a composição química do cascalho é muito variada devido à heterogeneidade das formações atravessadas pela broca, assim como pela presença de contaminantes. Devido a não remoção total do fluido de perfuração impregnado nos cascalhos, geralmente estes contêm contaminantes que dependem da composição química utilizada no fluido de perfuração e da composição da formação rochosa essencialmente perfurada.

A Tabela 1 revela os principais componentes químicos dos cascalhos, em percentagem.

Tabela 1 – Composição dos cascalhos de perfuração.

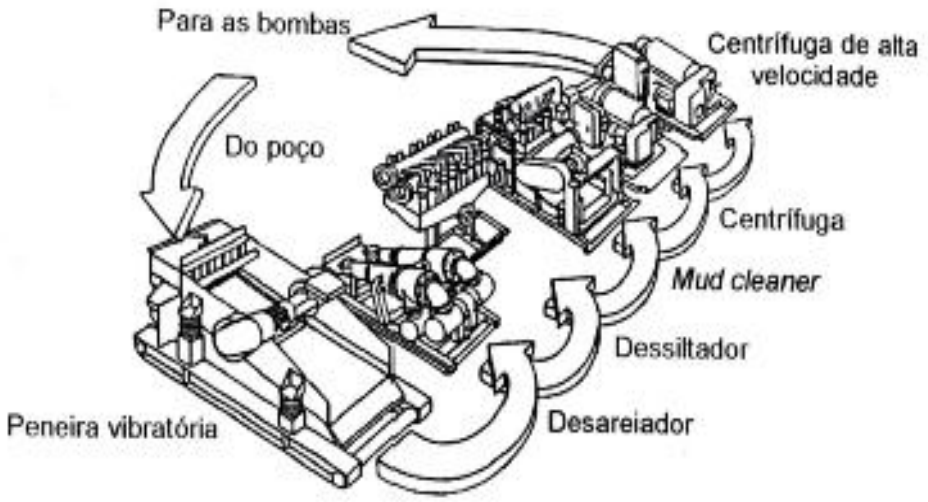
Determinações (%)	Abbe et al. (2009)	Pires (2009)	Medeiros (2010)	Leonard e Stegeman (2010)	Valores médios
SiO_2	47,60	43,96	36,50	60,40	47,12
AlO_3	13,54	21,48	11,50	10,40	14,23
Fe_2O_3	6,34	5,40	4,50	4,90	5,29
BaO	11,39	2,38	ND	ND	3,44
CaO	2,78	18,12	35,30	2,50	14,68
MnO	0,17	ND	0,09	0,06	0,08
MgO	2,31	ND	ND	2,00	1,08
K_2O	2,33	4,51	2,70	1,70	2,81
Na_2O	1,17	ND	ND	2,40	0,89
TiO_2	0,65	ND	0,81	0,60	0,52
P_2O_5	0,10	ND	ND	0,10	0,05

Fonte: Fialho (2012).

As atividades de perfuração em ambiente *offshore* realizadas por sondas de perfuração seguem a estrutura de projeto do poço de petróleo dividida em fases, sendo cada uma delas separada por diâmetros e para cada diferente profundidade, conforme as características presentes da formação geológica (FIALHO, 2012).

A cada fase, um volume de cascalho é gerado e o mesmo é conduzido à superfície da sonda por arraste devido a injeção contínua do fluido. A separação entre o fluido e o cascalho é realizada por uma série de equipamentos. O processo é realizado pelo Sistema de Controle de Sólidos (SCS) que contempla o conjunto de peneiras vibratórias, desareiador; dessiltador, *mud cleaner*, centrífuga decantadora e desgaseificador como apresenta a Figura 12.

Figura 12 – Sistema de tratamento de resíduo.



Fonte: Thomas (2004).

Embora o processo apresente relativa eficiência, uma parte do fluido de perfuração continua aderido ao cascalho, podendo contaminá-lo com metais pesados, alta salinidade, óleos e graxas (GOMES; ALVES, 2011). Para Schaffel (2002) a presença de fluidos não aquosos aderidos ao cascalho após sua separação, faz com que o mesmo se aglomere no assoalho marinho formando pilhas submarinas. Essa condição é um dos indicadores de impacto ambiental no processo de descarte, assim como a formação de pluma de sólidos finos dispersos e arrastados no mar.

Para dar uma destinação final correta a um resíduo, de forma a obedecer às exigências ambientais, inicialmente faz-se necessário classificá-lo conforme a legislação pertinente, para situá-lo ou não entre os resíduos potencialmente mais perigosos (MENESES; PAULA, 2014).

Os resíduos sólidos são classificados de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004) quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que se possa dar a esses resíduos um gerenciamento adequado. A norma classifica os resíduos, conforme segue:

a) Resíduo Classe I – Perigosos: são aqueles que representam riscos à saúde pública provocando ou contribuindo para incidência de morte ou de doenças, apresentando também riscos ao meio ambiente, quando não gerenciados adequadamente. Esses resíduos podem apresentar propriedades tais como: corrosividade, toxicidade, inflamabilidade, reatividade ou patogenicidade;

b) Resíduos Classe II – Não perigosos: são aqueles que não se enquadram na Classe I – Perigosos, podendo se dividir em:

1. Resíduos Classe II – A: Não Inertes: podem apresentar propriedades como biodegrabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

2. Resíduos Classe II – B: Inertes: não devem apresentar solubilidade acima dos padrões de potabilidade da água em nenhum de seus constituintes, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Segundo NBR 10.004 (ABNT, 2004) que determina os riscos potenciais de danos ao meio ambiente e a saúde humana, o cascalho de perfuração é considerado um resíduo de classe II A - Não inertes, podendo ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Essa classificação se dá devido ao fluido a base de água não apresentar componentes tóxicos, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Exemplo de composição de fluidos à base de água

Fluido à base de água lignosulfonado		**Fluido à base de água polimérico**	
Componente	**Peso (%)**	**Componente**	**Peso (%)**
Água	76%	Água	80%
Barita	15%	Barita	17%
Bentonita	7%	Bentonita	2%
Lignosulfonado	1%	PHPA	0,2%
Lignita	1%	Polímero	0,2%
Amido	~ 0,2%	Amido	0,6%

Fonte: Patin (1999).

Segundo a nota técnica do CGPEG/DILIC/IBAMA[2] Nº 01/18 (2018), órgão de fiscalização e regulação ambiental federal das atividades de petróleo, o cascalho de rochas só pode ser descartado no ambiente se atender especificações em norma. A principal diretriz compreende que o teor de fluido aderido ao cascalho deve ser menor que 6,9% (em peso úmido de cascalho) de base orgânica (n-parafinas e fluidos à base de óleo mineral tratados), caso a mesma não seja atendida, o mesmo deve ser levado à solo firme e ser tratado, para ser descartado ou armazenado.

[2] Instrução Normativa nº 1 - Diretrizes que estabelecem as condições ambientais para o uso e descarte de fluidos, cascalhos e pastas de cimento nas atividades de perfuração marítima de poços e produção de Petróleo e Gás. Disponivel em: < https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/1738771/do1-2018-01-11-instrucao-normativa-n-1-de-2-de-janeiro-de-2018-1738767>.

Ainda de acordo com o órgão de fiscalização e regulação ambiental federal das atividades de petróleo, as orientações técnicas apresentadas nas notas também são expressas em relação ao descarte de resíduos sólidos no mar que deve ser lançado em lâminas d'água profundas acima de 1.000 metros (IBAMA, 2018). O lançamento dos sólidos de perfuração de maneira inadequada pode ocasionar alterações no ecossistema marinho. A extração de material sólido inerte de um ecossistema estabilizado e o transporte para outro local requer ações específicas para não provocar perdas tanto ambientais quanto econômicas e sociais.

Este resíduo possui um grande potencial para ser reutilizado como matéria prima; principalmente porque quando autoclavado ocorre a indução da reação entre o $Ca(OH)_2$ e SiO_2 gerando silicatos de cálcio hidratados estáveis (SANTOS et al., 2018). Tem-se assim, possibilidades significativas de produção e substituição de produtos de matrizes cimentícias como: blocos de vedação, elementos de meio fio, entre outros, trazendo ao mercado uma nova linha de material de construção, como uma nova oportunidade de matérias primas sustentáveis.

2.2.1.1 Cascalho de perfuração em materiais cimentícios

De acordo com John (2000) para se elaborar uma pesquisa que visa o aproveitamento de resíduos em materiais de construção civil é necessário entender o processo de geração do resíduo e suas variáveis como a possibilidade de mudanças no processo e sazonalidade. A estimativa do volume gerado também é peça fundamental, pois pouca quantidade e alta variabilidade podem tornar o reuso inviável. Outros critérios observados nessa análise de viabilidade do resíduo são: o interesse da empresa geradora do resíduo, o elevado custo de disposição, oportunidade de reciclagem e risco de contaminação ambiental.

Estudos sobre o uso de resíduos de perfuração de poços de petróleo em materiais de construção são escassos, se comparado aos demais resíduos como escória, cinza do bagaço da cana de açúcar, cinza das cascas de arroz, resíduos de demolição, por exemplo.

Al-Ansary e Al-Tabbaa (2007) realizaram um estudo com diferentes aglomerantes e resíduos e compararam os resultados dos produtos com cascalhos *in natura* e tratados termicamente. Nesse estudo foram utilizados cascalhos sintéticos, com características dos cascalhos do Mar do Norte e do Mar Vermelho, associados ao cimento Portland e combinações de cimento como zeolitas, fibras de cascas de coco, cinzas volantes e pó de forno de cimento. O teor de ligante seco em peso utilizado pelos pesquisadores foi de 10%, 20% e 30%. Os cascalhos brutos de perfuração de uma das plataformas offshore do Mar do Norte foram

estabilizados/solidificados usando 30% de Cimento Portand. Os resultados de resistência à compressão demonstraram potencialidade no reuso dos cascalhos de perfuração em materiais de construção. Foram sugeridos sua utilização na produção de blocos de pavimentação e tijolos desde que a resistência à compressão alcançasse os limites normatizados.

Chen et al. (2007) estudaram a utilização de cascalhos de perfuração como substituto parcial do cimento em concretos, nas porcentagens de 10 e 20%, na produção de blocos permeáveis e tijolos. A partir de materiais provenientes de três poços diferentes de Taiwan concluíram que os blocos e tijolos atenderam as especificações técnicas, contudo, os autores recomendam mais avaliações da substituição do cimento por cascalho. Outra conclusão importante, se refere a variabilidade das características dos cascalhos de perfuração, nesse sentido é necessário identificar seus componentes para sua utilização posterior. A pesquisa demonstrou que o melhor desempenho foi dos blocos permeáveis.

Pires (2009) avaliou a incorporação do cascalho de perfuração na massa argilosa para a produção de cerâmica vermelha, nas proporções de 5, 10, 20 e 30%, em massa. O método avaliado consiste no processamento industrial realizado a elevadas temperaturas, a fim de se obter um material sólido, resistente e inerte. A pesquisa concluiu que a incorporação de até 30% de cascalho de perfuração na produção de cerâmica vermelha é uma alternativa economicamente viável e tecnicamente segura para o tratamento e destinação final do resíduo. Uma vez que o processo de queima, inerente a produção de peças cerâmicas, encapsulou e reduziu a baixos teores os constituintes perigosos do cascalho de perfuração. Os resultados desse estudo serviram de subsídios para a concessão de licença ambiental para a utilização da técnica desenvolvida na remediação de cascalho de perfuração no estado da Bahia.

Medeiros (2010) realizou a caracterização de cascalhos através de técnicas de Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), análise granulométrica por difração a laser, TG e DTA, e assim incorporou o cascalho de perfuração em matrizes argilosas, visando avaliar a influência de suas concentrações e temperaturas de queima nas propriedades tecnológicas dos corpos de prova, confeccionados para uso em materiais cerâmicos. As amostras foram formuladas com percentuais que variaram de 0 a 100% em peso de cascalho de perfuração, e foram realizados os ensaios de absorção, retração linear de queima, tensão de ruptura à flexão, porosidade aparente, massa específica aparente, DRX e de cor. Com os resultados obtidos concluíram que é possível a incorporação de 15 à 50% de cascalho de perfuração para a produção de tijolos maciços para alvenaria, nas temperaturas de 850, 950 e 1050ºC. A concentração de 75% de cascalho de perfuração viabiliza a produção de tijolos

maciços na temperatura de 850º, com redução do custo em matéria-prima para a fabricação dos mesmos.

El-Mahllawy e Osman (2010) pesquisaram a incorporação de resíduo de perfuração de poço de petróleo à base de óleo, no Egito, na fabricação de tijolos. Foram incorporados nos percentuais de 10, 20 e 30 % à massa cerâmica. Os resultados mostraram que as propriedades finais do material com a incorporação do resíduo cumpriram os limites aceitáveis na norma egípcia, para as diferentes concentrações avaliadas. O estudo demostrou que a reutilização desse resíduo na indústria de construção irá contribuir para a proteção do meio ambiente.

Fialho (2012) avaliou o comportamento de dois tipos de cascalhos em substituição e adição em concretos não armados. Na primeira fase o autor avaliou a substituição de areia fina por cascalho de perfuração que apresentava característica granulométrica semelhantes a uma areia, nas proporções de 0, 20, 50 e 100%, em massa. Já para a segunda fase da pesquisa foi avaliado a adição de cascalho de perfuração, que apresentava granulometria mais fina, semelhante à silte e/ou argila, em diferentes percentuais (0, 5, 10 e 15%) em relação à massa de cimento do concreto. Os resultados apontaram uma queda na resistência à compressão do concreto produzido na primeira fase, porém o autor destaca que o trabalho não restringe o uso do cascalho de perfuração em concretos não armados, que são necessárias mais avaliações do material, principalmente por não ter sido observado a presença de cloretos livres no material. Na segunda etapa o autor concluiu que a adição de até 5% do cascalho de perfuração em concretos apresenta melhores resultados.

O estudo desenvolvido por Barros (2015) sobre a incorporação de resíduos de cascalho de perfuração de petróleo à massa cerâmica demonstrou que utilizando traços com 40% (em massa) de resíduo na fabricação de tijolo maciço e tijolo furados, a uma temperatura de sinterização de 900° C e queima de 30 minutos obtém-se um resultado atendendo à norma vigente. Para a fabricação de telhas, é possível incorporar cerca de 35% (em massa) de resíduo em temperaturas em torno de 1050° C e patamar de queima de 30 minutos, sem prejuízo às propriedades do produto final. Resultado que demonstra o grande potencial de aplicação do resíduo de perfuração na produção de cerâmica vermelha.

Silva et al. (2019) comprovaram que o cascalho de perfuração quando caracterizado como Classe II pode ser utilizado na fabricação de tijolo ecológicos. Para os materiais utilizados na fabricação dos tijolos, a proporção adequada de solo-cimento deve ser mantida com 14% de cimento, quando o solo é substituído por cascalho ou quando este é incorporado ao solo. A pesquisa apontou que o volume de cascalho gerado em um único poço perfurado,

aproximadamente de 782 m³, é capaz de produzir 800 mil tijolos e pode ser integrado ao sistema produtivo.

Pode-se afirmar que, os estudos para a utilização do cascalho de perfuração na produção de materiais de construção, especialmente os materiais cimentícios ainda são escassos e necessitam de novos estudos para entender o comportamento do material junto às matrizes, em busca de materiais com boas propriedades, garantindo sua aplicabilidade e a sustentabilidade.

2.3 Materiais Pozolânicos

Pozolana é um material inorgânico, natural ou artificial, silicoso ou alumino-silicoso, que pode apresentar propriedades aglomerantes quando finamente moído e em presença de água e hidróxido de cálcio. O emprego de pozolana como material cimentício remonta à antiguidade. Registros históricos indicam que, há cerca de 2000 anos, os romanos já utilizavam em suas construções uma cinza de origem vulcânica proveniente da localidade de Pozzuoli (antiga Puteoli do Império Romano), Itália, o que conferiu a denominação "pozolana" ao material (MASSAZZA, 1988)

Como exemplos, destacam-se o Coliseu (80 a 70 a.C.) e o Pantheon (118 a 126 d.C.), ambos em Roma. Na atualidade, as maiores e mais importantes construções civis no mundo utilizam em sua constituição a pozolana. Um importante exemplo de construção, a Usina Hidrelétrica de Itaipu, onde a cinza volante foi utilizada.

As reações de hidratação do cimento Portland, que são reações químicas entre os silicatos e aluminatos com água, ocorrem quase que instantaneamente à medida que se adiciona água ao cimento (NEVILLE, 1997). Os principais constituintes do cimento são: silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). O C_3S, responsável pela resistência inicial e pelo aumento da resistência final da pasta, apresenta uma rápida hidratação e desprende uma quantidade média de calor, comparado as outras fases.

O C_2S, por sua vez, é responsável pelo aumento da resistência nas idades avançadas, apresenta uma lenta hidratação e desprende uma quantidade pequena de calor. A hidratação dos dois compostos produz silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH). As reações e os valores de entalpia estão descritos nas Equações 1 e 2.

$$2\,C3S + 6H \rightarrow C3S2H3 + 3CH \quad \Delta H = -500\,J/g \tag{1}$$

$$2\,C2S + 4H \rightarrow C3S2H3 + CH \quad \Delta H = -250\,J/g \tag{2}$$

Quando materiais pozolânicos são acrescentados à mistura, durante a hidratação do cimento, a sílica (SiO2) e/ou alumina (Al2O3) amorfas, presentes nestes materiais, reagem com o hidróxido de cálcio (CH), liberado na hidratação do cimento, formando C-S-H e C-A-H, de acordo com a Equação 3.

$$\text{Pozolana} + \text{CH} + \text{H2O} \rightarrow \text{C} - \text{S} - \text{H} \quad (3)$$

De forma simplificada, a reação do hidróxido de cálcio com a pozolana pode variar segundo fatores como: conteúdo da pozolana, teor de SiO_2 ativa na mistura, natureza das fases ativas da pozolana, taxa de reação, área superficial da pozolana, relação de sólidos por água e temperatura da mistura (CORDEIRO, 2006).

As pozolanas são materiais constituídos basicamente por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), em estado seco, geralmente não possuem propriedades ligantes, mas em contato com água reage quimicamente com o hidróxido de cálcio [Ca $(OH)_2$] ou soluções alcalinas contendo Ca^{2+} e tendem a adquirir características aglomerantes (MELO NETO, 2007).

A Tabela 2 apresenta a composição química principal das pozolanas, de acordo com TAYLOR (1997).

Tabela 2 - Composição química de materiais pozolânicos

Óxido de silício, de alumínio, de ferro e de cálcio, e anidrido sulfúrico	**≤ 5%**
Teor de carbono	**≤ 5%**
MgO	**< 4%**
Na2O	**< 4%**
[SiO2 + Fe2O3 +Al2O3]	**≥ 70%**
Neste composto a sílica predomina sobre os demais.	

Fonte: Taylor (1997).

De acordo com Taylor (1997) as principais vantagens ao utilizar a pozolona como adição ou substituição parcial ao cimento pode se dar em decorrência de alguns fatores: 1) elas afetam os produtos de hidratação, tornando mais lenta e, consequentemente, diminuindo a liberação de calor e a formação de fissuras no concreto; 2) benefícios ambientais, como redução de CO_2 e a diminuição da sua deposição em aterros; 3) a sua resistência à compressão aumentada a longo prazo.

2.3.1 A utilização de cinzas vegetais na produção de materiais de construção

De acordo com o ACI (American Concrete Institute, 2001), diversos materiais pozolânicos, como cinza volante, sílica ativa, metacaulim e cinza da casca de arroz, são utilizados em substituição parcial ao cimento Portland em pastas, argamassas e concretos. O emprego de pozolanas possibilita a redução de problemas ambientais relacionados ao uso de cimento Portland em concreto, como grande quantidade requerida de matéria-prima natural (argila e calcário) e elevado montante de gases intensificadores do efeito estufa, sobretudo dióxido de carbono, emitidos para a atmosfera durante sua produção.

Outra vantagem relacionada a substituição do cimento Portland por materiais pozolânicos é com relação ao custo. Alguns materiais pozolânicos, como as cinzas, são descartadas pelas indústrias, sem aproveitamento e muitas vezes sem destinação e tratamento adequado. O seu uso como substituto do cimento, traria vantagens econômicas, uma vez que reduziria o custo das matérias primas para produção de concreto e compósitos cimentícios (NAYAK et al., 2022).

2.3.1.1 Cinza de Bagaço de cana de açúcar

De acordo com a União Nacional da Bioenergia (UDOP, 2020), o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo e ocupa o segundo lugar na geração global de etanol, com 35,58 bilhões de litros, atrás apenas dos Estados Unidos. Além disso, é líder em produção e em exportação de açúcar. Em 2019/2020, 29,6 milhões de toneladas do produto foram produzidos pelas indústrias nacionais, das quais 18,9 milhões seguiram para o exterior.

A participação da cana no setor energético leva em consideração não somente o álcool consumido pelos veículos automotores, mas também a utilização do bagaço nas usinas. Durante a moagem da cana-de-açúcar para a extração do caldo, há geração de bagaço. Esse subproduto é normalmente queimado como combustível em caldeiras que geram o vapor d'água utilizado na produção de açúcar e álcool e em processos de cogeração de energia. A cinza do bagaço é gerada como subproduto. De acordo com Gao et al. (2013) e Rocha et al. (2015) a composição química do bagaço varia conforme a espécie cultivada, os fertilizantes utilizados durante o desenvolvimento da planta, e ainda, os fatores naturais como solo, clima e água.

Os principais resíduos sólidos do setor sucro-alcooleiro são a palha da cana, o bagaço da cana, a cinza do bagaço da cana, sendo classificados quanto à natureza como classe II A –

não inerte, que possuem propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (NBR10004, 2004; FIESP/CIESP, 2001).

De acordo com Mezaroba, Meneguetti e Groff (2010) praticamente todos os resíduos da produção podem ser reaproveitados de maneira a aumentar os lucros da própria indústria e diminuir os custos de produção e consequentemente os impactos ambientais. Esses resíduos quando não utilizados no próprio processo da empresa pode ser utilizado em outro tipo de processo.

A utilização de cinzas como adição pozolônica exige o emprego de alguns procedimentos específicos de moagem e queima. No caso da utilização do bagaço de cana de açúcar, a cinza deve ser queimada a temperatura abaixo de 700ºC, durante uma hora, conforme sinaliza Macedo et al. (2009). Cordeiro et al. (2009) identificaram que a temperatura de 600ºC é a mais apropriada para produzir uma cinza de bagaço de cana predominantemente pozolônica.

A cinza proveniente da queima do bagaço de cana-de-açúcar apresenta como principal composto químico a sílica, normalmente em quantidade acima de 60% em massa. De acordo com as condições de queima adotadas, é possível manter a sílica contida no bagaço em estado amorfo (ANDREÃO et al., 2019). Essa característica pode possibilitar o emprego desse resíduo como pozolana e, por conseguinte, reduzir as despesas e o impacto ambiental relativos à sua disposição no meio ambiente. Além disso, a incorporação da cinza pode agregar valor econômico ao resíduo agroindustrial e proporcionar vantagens técnicas e ambientais com a substituição parcial de cimento Portland.

Segundo Cordeiro (2006), normalmente essas cinzas são usadas como fertilizantes (adubo orgânico) nas próprias lavouras de cana, em paralelo com as palhas e tortas de filtro. No entanto, devido à carência de nutrientes minerais para seu uso como adubo, muitas vezes essas cinzas são descartadas na natureza sem nenhuma destinação adequada, muito embora seja um material de difícil degradação (FIESP/CIESP, 2001).

Vários pesquisadores têm buscado desenvolver alternativas para uma destinação sustentável do material e também uma forma de agregar valor ao subproduto da indústria açucareira. A indústria da construção civil se apresenta como forte candidato para destinação desses resíduos, mediante a incorporação destes em matrizes cimentícias (JITTIN et al., 2021; KOLAWOLE et al., 2021; THOMAS, et al., 2021).

Wu et al. (2022) analisaram a viabilidade do uso da cinza de bagaço de cana em concreto de alto desempenho e os resultados indicam que a aplicação de cinzas de bagaço de cana em concretos de alto desempenho como substituto do cimento não apenas mantém a resistência à compressão, mas também melhora a trabalhabilidade e diminui a retração da pasta. Comparado

ao grupo controle, o concreto preparado com taxa de substituição de 40% obteve um bom desempenho. A retração diminuiu 24,48% e a resistência à compressão foi quase igual à do grupo controle. A cinza foi classificada de acordo com as especificações da ASTM C618-08A, como material pozolânico classe F, que são cinzas volantes com propriedades pozolânicas.

Paula et al. (2009) avaliaram o potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) como material de substituição parcial do cimento Portland em argamassa. As argamassas produzidas seguiram o traço de 1:3 de Cimento Portland V e areia; e cada parte de cimento foi substituído em 0, 10, 20 e 30% em massa de CBC. O ensaio de composição química apresentou uma presença considerável de sílica (83,7%) na fase amorfa e na fase cristalina de cristobalita e quartzo. Após 28 dias de cura, o ensaio de resistência à compressão apresentou valores positivos para a substituição de até 20% de cimento por cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Foi concluído que a substituição do cimento Porland por cinza de bagaço de cana-de-açúcar é uma opção viável para a destinação desse resíduo.

Fernandes et al. (2015) utilizaram a cinza de bagaço da cana (CBC) como adição mineral em concretos, substituindo o agregado miúdo em 5, 10, 15 e 20% (em massa), constataram que a substituição de até 20% no concreto experimental é indicado para ser aplicado na fabricação de produtos para infraestrutura urbana. O traço de referência apenas apresentou um melhor desempenho comparado ao traço com 20% de CBC nos ensaios de absorção por capilaridade. A cinza de bagaço de cana utilizada apresentou baixa atividade pozolânica, entretanto, os resultados indicaram ser possível utilizar a CBC como substituição parcial do agregado miúdo na produção de concretos, pois seus resultados são similares ao concreto sem adição da cinza.

Channa et al. (2022) avaliaram as propriedades frescas e endurecidas de concreto sustentável produzidos com a substituição do cimento Portland comum por cinzas de bagaço de cana de açúcar e cinzas de casca de arroz individualmente nas proporções de 0, 5, 10 e 15% (em massa) e a combinação das cinzas com substituição de 10, 20 e 30% (em massa) do cimento para produção de concreto sustentável. O tempo de pega inicial e final da mistura aumentou e a trabalhabilidade diminuiu com a elevação da porcentagem de substituição das cinzas, tanto individualmente como combinadas. Os valores de resistência à compressão foram observados como 17,2 MPa, 22,6 MPa, 25,4 MPa e 28,6 MPa com 5% de cinzas de bagaço de cana aos 7 dias, 28 dias, 56 dias e 90 dias, respectivamente. Uma vez que da mistura controle foram observados como 19,10 MPa, 25,20 MPa, 28,2 MPa e 30,4 MPa aos 7 dias, 28 dias, 56 dias e 90 dias, respectivamente. O menor valor de resistência foi registrado como 12,4 MPa, 15,2 MPa, 16,4 MPa e 18,2 MPa a 15% de cinza de casca de arroz e 15% de cinza de bagaço de cana combinados na mistura aos 7 dias, 28 dias, 56 dias e 90 dias. Observou-se que a resistência à

compressão é reduzida quando a porcentagem de substituição aumenta, tanto para as cinzas separadas, quanto combinadas. Os autores concluíram que o uso de 5% de cinzas de bagaço de cana e 5% de cinzas de casca de arroz como material de substituição do cimento, individualmente ou combinados no concreto, poderia fornecer resultados adequados para aplicações estruturais em concreto.

Murugesan, Vidjeapriya e Bahurudeen (2021) avaliaram blocos de concreto para pavimentação, produzidos com cinza de bagaço de cana de açúcar em substituição a 10, 20 e 30% do cimento e resíduo de mármore em substituição à 25% da areia (agregado miúdo). A incorporação de resíduos de mármore como material alternativo ao agregado fino levou a uma melhoria significativa na resistência à abrasão e a uma melhoria na resistência à compressão. Os resultados do estudo experimental mostraram que houve uma melhoria significativa na resistência e durabilidade das amostras produzidas com a combinação de resíduo de mármore (25%) misturadas com cinza de bagaço até o nível de substituição de 20% quando comparadas aos blocos de concreto para pavimentação convencionais.

2.3.1.2 Cinza de Eucalipto

Segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2012) o eucalipto tem como seus principais usos: celulose, carvão vegetal para siderurgia, painéis de aglomerados de madeira e compensados, madeira serrada, lenha e biomassa como fontes de energia, óleos essenciais, postes e mourões. O eucalipto é o gênero mais plantado devido ao seu ciclo de cultivo ser menor que o do pinus, o primeiro apresenta duração aproximada de 7 anos, enquanto o segundo média de 14 anos.

Segundo Foelkel (2011) a cinza é classificada como um resíduo sólido mineral que sobra da queima de biomassa. A cinza de madeira de eucalipto é “um material residual e muito variável em qualidade, recolhido tanto do fundo como do precipitador de coleta de particulados dos gases de exaustão da caldeira de força alimentada em base de biomassa energética (madeira e/ou casca de árvores)”.

A madeira e a casca dos eucaliptos que são queimadas possuem certo teor de minerais em sua composição. O teor de cinzas da madeira é baixo (entre 0,3 a 0,6% base seu peso seco). Por outro lado, os teores de cinzas da casca das árvores dos eucaliptos já são bem mais altos (entre 3 a 8% base peso seco). Além desses minerais da constituição, também possui contaminações de terra/areia e pedras. Isso acaba por elevar seu teor de cinzas de forma

variável, muito em função dessas contaminações e das proporções de casca e madeira sendo queimadas (FOELKEL, 2011).

Em geral, as cinzas das caldeiras de biomassa consistem em uma mistura de elementos minerais oxidados, areia e carbono orgânico não totalmente queimado. A composição das cinzas é muito variada, pois depende desde a qualidade da madeira até as condições operacionais da caldeira (TUTIKIAN; MOLIN, 2011).

Quando casca e madeira são queimadas nas caldeiras alimentadas por biomassa energética, elas têm seu carbono oxidado para a geração de energia. Cinzas e contaminantes minerais sobram como resíduos. Esses resíduos são denominados de cinzas. Parte dessas cinzas tendem a acompanhar os gases de exaustão, pois são muito finas. Essas cinzas leves ("fly ashes") são capturadas pelos filtros e ciclones lavadores de gases ou pelos precipitadores eletrostáticos. Outra parte das cinzas, contendo pedras, materiais vitrificados e mesmo pedaços de madeira ou casca não queimados, saem pela parte de baixo da caldeira, pela limpeza das fornalhas. Essas cinzas são denominadas cinzas pesadas, cinzas de fundo, ou "*bottom ashes*". São bem mais grosseiras, irregulares e contaminadas que as cinzas leves, também chamadas de cinzas volantes.

Algumas pesquisas estão sendo realizadas para o aproveitamento dessas cinzas na produção de novos materiais, Couto et al (2019) avaliaram a adição de cinza de eucalipto, proveniente de fornos de aviários, nas proporções de 5, 10, 15 e 20% da massa do cimento, para produção de concreto. Os autores observaram que a inclusão da cinza comprometeu os resultados de resistência à compressão. A principal justificativa para a queda na resistência mecânica, está relacionada ao fato da cinza de eucalipto utilizada não ter potencial pozolânico, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014). A sua finura e composição química afetou sua atividade pozolânica.

Harsha, Radhakrishna e Sachin (2022) avaliaram a substituição do cimento por cinza de eucalipto em 20, 40, 60 e 80%. A trabalhabilidade e a resistência foram satisfatórias apenas até a reposição de 20%. Além de 20% de substituição, a resistência e a densidade diminuíram gradualmente. Os autores indicam que para tornar o concreto sustentável, o cimento pode ser substituído pela cinza de eucalipto em 20%.

Teixeira et al. (2020) investigaram a produção de concreto de baixo carbono para produção de blocos de concreto para pavimentação. Foi utilizado cinza de biomassa de eucalipto e sílica ativa em substituição total ao cimento. Os autores observaram bons resultados de resistência à compressão, identificando a capacidade cimentícia e adesiva do sistema de resíduos cinza de eucalipto e sílica ativa. Dentre os traços avaliados, os blocos de pavimentação

produzidos com a dosagem de 9,1% de cinza de eucalipto, 9,1% de sílica ativa, 18,1% de areia, 18,1% de pó de pedra, 18,1% de agregado graúdo (4,8 - 9,5mm), 18,1% de agregado graúdo (9,5 - 19,5mm), 0,36% de superplastificante, com relação água/aglutinante de 0,5, apresentaram os requisitos mínimos exigidos pelas normas para blocos de pavimentação produzidos a partir de concreto de cimento Portland.

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Diversos resíduos industriais com grande potencial de aproveitamento são descartados e geram custos com destinação e tratamento às empresas. Esses resíduos podem ser utilizados na fabricação de novos produtos de construção, mas necessitam de pesquisas e avaliações para sua aplicação.

A indústria petrolífera é uma das propulsoras da economia no mundo todo, sendo o petróleo uma das mais importantes fontes de energia. Porém apesar dos inúmeros benefícios da atividade, um grande volume de resíduos são gerados no processo de perfuração dos poços petrolíferos.

O cascalho de perfuração, um dos subprodutos, é contaminado por um fluido utilizado durante a extração, que impede o seu descarte no meio ambiente, quando as concentrações de base orgânicas estão acima de 6,9%. Com normativas ambientais cada vez mais exigentes e com a maior preocupação das indústrias e da sociedade com danos ambientais causados pelas atividades industriais, há uma necessidade de intensificar as pesquisas para propor soluções adequadas para correta destinação e tratamento desses subprodutos, em especial o cascalho de perfuração por não haver muitos estudos relacionados.

Outro resíduo que tem gerado preocupações quanto a sua destinação são as cinza de biomassa, geradas em grande quantidade em caldeiras para produção de energia e calor. A cinza de eucalipto gerada, por exemplo, na queima de blocos cerâmicos e cinzas de bagaço de cana, geradas na produção do álcool e do açúcar, podem apresentar atividades pozolânicas mais ou menos intensas, a depender da temperatura e tempo de queima. Os materiais pozolânicos aplicados à materiais cimentícios, tem a capacidade de reagir e se combinar com o hidróxido de cálcio, formando compostos estáveis de poder aglomerante, tais como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, elevando a durabilidade do concreto.

Devido a variação das propriedades obtidas nas pesquisas já existentes para os materiais de construção e as diferentes características dos subprodutos industriais, ainda é necessário informações mais aprofundadas sobre os resíduos e suas interações com as diversas matrizes, para então definir os melhores materiais para sua aplicação e melhores porcentagens à ser utilizadas, sendo o principal foco desse estudo para os materiais citados.

Esse trabalho visou contribuir com a avaliação das características físico-mecânicas de blocos de concreto para pavimentação produzidos com cascalho *offshore* em substituição ao pó de pedra e blocos de concreto para pavimentação produzidos com cascalho *offshore* e cinzas de

eucalipto e bagaço de cana em substituição ao cimento, buscando o desenvolvimento de produtos sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ABDUO, M. I. et al. Comparative study of using water-based mud containing multiwall carbon nanotubes versus oil-based mud in HPHT fields. Egyptian Journal of Petroleum, v. 25, n. 4, p. 459-464, 2016.

ACI American Concrete Institute;(2001) **Cementitious Materials for Concrete** - ACI Education Bulletin E3-01.

AKHMEDOV, I.; KHAMIDOV, A.; SHAVKAT, Y.; JALALOV, Z.; UMAROV, I.; KAZADAYEV, A. Research of ash-slag mixtures for production of construction materials. **Spectrum Journal of Innovation, Reforms and Development,** v. 10, 2022.

AL-ANSARY, M. S.; AL-TABBAA, A. Comparison of Stabilized/Solidified Mixed of Model Drill Cuttings Based on the North Sea and Red Sea Areas. Texas: SPE Publication 106799. **SPE E&P Environmental and Safety Conference held in Galvesion**, 2007.

ARAMENDIZ, Jose; IMQAM, Abdulmohsin. Water-based drilling fluid formulation using silica and graphene nanoparticles for unconventional shale applications. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 179, p. 742-749, 2019.

ARARUNA JÚNIOR, J. T. (2009). **Utilização de cascalho de perfuração de poços de petróleo para produção de cerâmica vermelha**. Tese de doutorado em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio. Rio de Janeiro- RJ.

ARBAD, Nachiket; TEODORIU, Catalin. A review of recent research on contamination of oil well cement with oil-based drilling fluid and the need of new and accurate correlations. **ChemEngineering,** v. 4, n. 2, p. 28, 2020.

GOMES, J. S.; ALVES, F. B. (2011): **O universo da indústria petrolífera: da pesquisa à refinação**. 2ª Ed. Calouste; Lisboa.

AMADEI; D. I. B.; PEREIRA, J. A.; SOUZA, R. A.; MENEGUETTI, K.S. (2011): A questão dos resíduos de construção civil: um breve estado da arte. **Revista NUPEM**. Campo Mourão, v.3. n.5. Ago./Dez.

AMARAL, M. C. (2014). **Avaliação da incorporação de resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em tijolo solo-cimento**. Dissertação de mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF. Campos dos Goytacazes-RJ.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 948**: Standard Test Method for Dry and Wet Bulk Density, Water Absorption, and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete. West Conshohocken, PA,2001.

AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION - ACAA. **Fly Ash Facts for Highway Engineers**. Washington, 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 116R-00**: Cement and Concrete Terminology, reaprovado em 2005. Michigan, EUA, 2005.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API RP 13B-2**: Recommended Practice for Field Testing Oil-based Drilling Fluids. 5 ed. [s.i]: American Petroleum Institute (api), 2014. 156 p.

ANDREÃO, P. et al. Sustainable Use of Sugarcane Bagasse Ash in Cement Based Materials. **Green Materials**, v. 164, n. 4, p. 199-204, 2019.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2015): **Boletim da produção de Petróleo e Gás Natural.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 1007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. 21p. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13554**: Solo-cimento - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. Rio de Janeiro. 3p. 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7207** - Terminologia e classificação de pavimentação, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004** - Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR 12653** – Materiais Pozolônicos, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12042:** Materiais inorgânicos — Determinação do desgaste por abrasão. Rio de janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9781:** Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 26p. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752:** Índice de atividade pozolânica. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** Solo - Análise granulométrica. Rio de janeiro, 21p., 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Por dentro do Eucalipto**: Aspectos sociais, ambientais e econômicos do seu cultivo. Brasília: ABRAF, 2012. Disponível em: < http://www.abraflor.org.br> Acesso em maio de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO - ABCP. **Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público**, São Paulo, 2010.

AYATI, B. et al. Manufacture and performance of lightweight aggregate from waste drill cuttings. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 252-260, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.134

BARROS, R. M. M. (2015) **Incorporação do resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo em formulações cerâmicas**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do rio Grande do Norte. Pós-graduação em Engenharia Civil.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1ª Ed (3ª reimpressão). Rio de Janeiro: Petrobras, ABEDA, 2010. 504p.

BIANCHI, F.R.; BRITO, I. R T.; CASTRO, V. A. B.; (2008): **Estudo Comparativo entre Pavimento Rígido e Flexível**. In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto. Salvador. Anais dos 50º Congresso Brasileiro do Concreto, 2008.

BORBA, Rafael Corrêa. OLIVEIRA, Vinicius de Moura. SILVA NETO, Romeu. **A influência do petróleo na dinâmica econômica das cidades: um estudo comparativo entre Macaé (Brasil) e Aberdeen (Reino Unido). II Jornada Nacional da Produção Científica em Educação Profissional e Tecnológica.** São Luís/MA – 2007. Disponível em: https://royaltiesdopetroleo.ucam-campos.br/wp-content/uploads/2017/05/A-influ%C3%AAncia-do-petr%C3%B3leo-na-din%C3%A2mica-econ%C3%B4mica-das-cidades-um-estudo-comparativo-entre-Maca%C3%A9-Brasil-e-Aberdeen-Reino-Unido.pdf

BRASIL. (2006) Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte - DNIT. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Pavimentação**. 3.ed. – Rio de Janeiro, 2006.

BRUM, A. **Plataforma semissubmersível P-55 operando no campo de Roncador, Bacia de Campos. Com 52 mil toneladas e 10 mil m² de área, a P-55 é a maior semissubmersível construída no Brasil e uma das maiores do mundo**. 2014. 1 fotografia. Disponível em: https://petrobras.com.br/infograficos/tipos-de-plataformas/desktop/index.html

CARDOSO, L. C. **Petróleo do Poço ao Posto**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2012.

CHANNA, S. H. Short-term analysis on the combined use of sugarcane bagasse ash and rice husk ash as supplementary cementitious material in concrete production. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 3555-3564, 2022.

CHEN, T.; KUNG, U.N.C.; LINS, S. (2007): **An innovative Utilization of Drilling Wastes as Building Materials**. SPE Publication 106923. PRE E&P Environmental and Safety Conference held in Galvesion, Texas. U.S.A.

CORDEIRO, G. C.; (2006) **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço da cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais**. Tese (doutorado) em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E. M. R. (2009): **Caracterização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como Pozolona em materiais cimentícios**. Revista Química Nova, Vol. 32, nº1.

CUNHA, P. F.da. (2013) **Dimensionamento e análise numérica de pisos industriais de concreto**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia Civil.

COUTO, A. F. do et al. Initial study of Eucalyptus Wood Ash (EWA) as a mineral admixture in concrete. **Dyna**, v. 86, n. 208, 2019. https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.74580

DHAREK, M. S. et al. Experimental Investigations on Strength Performance of the Brick Produced by Blending Demolished Waste with Pozzolanic Materials. **Advances in Sustainable Construction Materials**. 2021.

EL-MAHLLAWY, M.S.; OSMAN, T. A. (2010): **Influence of Oil Well Drilling Waste on the Engineering Characteristics of Clay Bricks**. Raw Building Materials Technology and Processing Research Institute. Housing and Building National Research Center, Egypt. Journal of American Science.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Sistema de Produção EMBRAPA. Cultivo do Eucalipto. Manual de métodos de análise de solo 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p. (Documentos, 1).

FERNANDES, S. E.; TASHIMA, M. M.; MORAES, J. C. B.; ISTUQUE, D. B.; FIORITI, C. F.; MELGES, J. L. P.; AKASAKI, J. L.: (2015) Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade. **Revista Matéria**. v.20, n.4, p. 909 – 923, 2015.

FIALHO, P.F. (2012): **Cascalho de perfuração de poços de petróleo e gás. Estudo potencial de aplicação cem concreto**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.

FIESP/CIESP. **Ampliação da oferta de energia através da biomassa**. 2001. Relatório. Disponível em: < https://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/ampliacao-da-oferta-de-energia-atraves-de-biomassa/> Acesso em abril de 2021.

FIJAL, J.; GONET, A.; JAMROZIK, A. Characterization, properties and microstructure of spent drilling mud from the point of view of environmental protection. **AGH Drilling Oil Gas**, v.32, n. 3, 2015. DOI: 10.7494/drill.2015.32.3.483

FOELKEL, C. (2011): Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose Kraft de Eucalipto: Resíduos Minerais. Eucalyptus Online Book. São Paulo, v. 25, n. 5, out. 2011. Disponível em: < http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT25_ResiduosMinerais.pdf>. Acesso em maio de 2021.

FOROUTAN, M. et al. Evaluation of the reuse and recycling of drill cuttings in concrete applications. **Construction and Building Materials**, v. 164, p. 400-409, 2018. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.180

GAO, Y. et al. Effects of different pretreatment methods on chemical composition of sugarcane bagasse and enzymatic hydrolysis. **Bioresource Technology**, v. 144, p. 396-400, 2013. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.036

GAUTO, M. A. (2011): **Petróleo S. A**.: Exploração, Produção, Refino e Derivados. Rio de Janeiro: Ciência Moderna.

GHORBANI, S.; GHOLIZADEH, M.; BRITO, J. DE. Effect of Magnetized Water on the Mechanical and Durability Properties of Concrete Block Pavers. **Materials**, v.11, n.9, p.1647, 2018.

HARSHA, H. N.; RADHAKRISHNA; SACHIN, K. C. Studies on Partial Replacement of Cement by Eucalyptus Ash in Concrete. **ECS Transactions**, v.107, n.1, 2022.

HOFSTRAND, A. D.; MOLESMI, A. A.; GARCIA, J. F. Curing characteristics of particles from nine northern Rocky Mountain species mixed with portland cement. **Forest Products Journal**, Madison, v. 34, n. 2, p. 57-61, Feb. 1984.

HWANG, C. L.; HUYNH, T. P. (2015). **Investigation into the use of unground rice husk ash to produce eco-friendly construction bricks**. Construction and Building Materials, v 93, p. 335-341.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA (2018). COORDENAÇÃO DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS. Parecer Técnico nº 215/2018-COEXP/CGMAC/DILIC. Atividade de Perfuração Marítima nos Bloco FZA-M-57, FZA-M-86, FZA-M-125, FZA-M-127, Bacia da Foz do Amazonas. Acesso em 21 de julho de 2023. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/component/phocadownload/file/5804-parecer-tecnico-n-215-2018-coexp-cgmac-dilic.

JAMSHIDI, A. et al. State-of-the-art of interlocking concrete block pavement technology in Japan as a post-modern pavement. **Construction and Building Materials**, v. 200, p. 713-755, 2019. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.286

JITTIN, V.; MINNU, S. N.; BAHURUDEEN, A. Potential of sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material and comparison with currently used rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 273, 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121679

JOHN, V.M. (2000): **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

KARAKOSTA, K.; MITROPOULOS, A. C.; KYZAS, G. Z. A review in nanopolymers for drilling fluids applications. **Journal of Molecular Structure**, v. 1227, p. 129702, 2021.

KHODADADI, M. et al. Reuse of drill cuttings in hot mix asphalt mixture: A study on the environmental and structure performance. **Construction and Building Materials**, v. 256, 2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119453

KOLAWOLE, J. T.; BABAFEMI, A. J.; FANIJO, E.; PAUL, S. C., COMBRINCK, R. State-of-the-art review on the use of sugarcane bagasse ash in cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 118, 2021. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103975

LEONARD, S. A.; STEGEMANN, J.A. (2012) **Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings. Journal of Hazardous Materials.** v.174. p.463-472.

LI, X. et al. A systematic review of waste materials in cement-based composites for construction applications. **Journal of Building Engineering**, v. 45, 2022.

LIMA, S. A. (2008): **Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias: Estudo de caso da cinza da casca da castanha de caju.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

LISBOA, V. Produção de petróleo no Brasil cresceu 5,5% em 2020. **Agência Brasil.** Rio de Janeiro. Publicado em 02/02/2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-02/producao-de-petroleo-no-brasil-cresceu-55-em-2020> Acesso em julho de 2021.

LOPES, Y. L. V. **Utilização da madeira e cascas de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden na produção de painéis cimento-madeira.** 2004. 60f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

MACEDO, P. C.; CASTALDELLI, V.N.; AKASAKI, J.L.; MELGES, J.L.P.; FIORITI, C.F.; TASHIMA, M.M.; BERNABEU; J,J,P. (2009) **Revisão bibliográfica sobre o uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar na construção civil.** Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON.

MACIEL, A. B. (2007) **Dossiê Técnico – Pavimentos Intertravados** – Senai – RS.

MADHU, E.; ABHIRAM, K. Potential Use of Waste Rice Husk Ash for Concrete Paving Blocks: Strength, Durability, and Run- Strength, Durability, and Run-off Properties off Properties off Properties. **International Journal of Scientific Research & Engineering Trends**, v. 9, n. 4, 2023.

MADKOUR, Tarek M. et al. High performance nature of biodegradable polymeric nanocomposites for oil-well drilling fluids. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 25, n. 2, p. 281-291, 2016.

MARQUES, G. L. O. (2002) **Terminologia e Classificação dos Pavimentos**. Curso Básico Intensivo de Pavimentação Urbana – Módulo I. Juiz de Fora.

MARSHALL, B. How Stuff Works. (2001) Grupo Convex.

MASSAZZA, F. (1988): **Em Lea's Chemistry of Cement and Concrete**; Hewlett, P. C., ed.; 4. ed., J. Wiley: New York, 1988, cap. 10.

MEDEIROS, L. C. (2010): **Adição de cascalho de perfuração da bacia de potiguar em argilas para uso em materiais cerâmicos: influência da concentração e temperatura de queima.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Rio Grande do Norte.

MEDHI, S. et al. An investigation on the efects of silica and copper oxide nanoparticles on rheological and fuid loss property of drilling fuids. **Journal of Petroleum Exploration and Production Technology**, v.10, p.91-101, 2020. https://doi.org/10.1007/s13202-019-0721-y

MEDINA, J., (1997): **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro-RJ, Editora UFRJ.

MELO NETO, A. A.(2007): **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MENESES, C.G.; PAULA, G.A. (2014): **Avaliação do resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo da bacia potiguar e alternativas para sua destinação e reaproveitamento.** RUnPetro. Ano 3, n.1, p.29-38, out.2014/mar.2015 ISSN 2316-668.

MENG, Xianghai et al. Effects of carbon ash on rheological properties of water-based drilling fluids. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 100, p. 1-8, 2012.

MERIGHI, J. V.; (2004): Curso de Estradas II – **Estruturas de Pavimentos**,2004.

MEZAROBA, S.; MENEGUETTI, C. C.; GROFF, A. M. (2010): **Processos de produção do açúcar de cana e os possíveis reaproveitamentos dos subprodutos e resíduos resultantes do sistema.** IV EEPA – Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial. FECILCAMP – Campo Mourão. 2010.

MORAIS, A, J, P. (2009) **Análise Comparativa das Propriedades dos Fluidos de Perfuração para Poços de Água e Petróleo**. São Cristóvão, 2009, 55 f. Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, 2009

MÜLLER, R. M.; (2005) **Avaliação de transmissão de esforços em pavimentos intertravados de blocos de concreto**. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

MUNAWAR, M. A. et al. Challenges and opportunities in biomass ash management and its utilization in novel applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, 2021.

MURUGESAN, T.; VIDJEAPRIYA, R; BAHURUDEEN, A. Sustainable use of sugarcane bagasse ash and marble slurry dust in crusher sand based concrete. **Technical Paper**, v.22, n.1, p.E183-E192, 2021.

NAYAK, D. K. et al. Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies. **Cleaner Materials**, v.6, 2022. https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100143

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997.

NJUGUNA, J. The fate of waste drilling fluids from oil & gas industry activities in the exploration and production operations. **Waste Management**, v. 139, p. 362-380, 2022. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.025

OKINO, E. Y. A. et al. Chapa Aglomerada de Cimento-Madeira de Hevea brasiliensis Müll. Arg. **Revista Árvore**, v. 28, n. 3, p 451-457, 2004.

ORHORHORO, E. K.; OYEJIDE, J. O.; ATADIOUS, D. Performance Evaluation of a Designed Simple Interlocking Tile Blocks Machine. **Innovative Systems Design and Engineering**, v.9, n.2, 2018.

PACÍFICO, F. F. M.; MELO, A. C. P; MORAES, K. A. M.; LINS, E. A. M.; SOUSA, W. S. Cinzas de casca de coco e de bagaço de cana como adição mineral em misturas contendo cimento Portaland. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12 n. 3, 2021.

PATIN, S., 1999, **Environmental Impact of the Offshore Oil and Gas Industry**. 1ª ed., New York, EcoMonitor.

PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. (2009). Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.13, nº 3, p-353-357. Campina Grande-PB.

PEREIRA, Laine B. et al. Environmental impacts related to drilling fluid waste and treatment methods: A critical review. Fuel, v. 310, p. 122301, 2022.

PETRI JÚNIOR, I.; DOS SANTOS, J. M.; ATAÍDE, C. H.; DUARTE, C. R. A novel method to determine total petroleum hydrocarbon (TPH) and water contents in reservoir drill cuttings. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 195, p. 107760, 2020.

PIOROTTI, J. L.: (1985). **Pavimentação intertravada**. Rio de Janeiro: Montana S.A. Indústria e Comércio. 64p.

PIRES, P. J. M. (2009): **Utilização de Cascalho de Perfuração de Poços de Petroleo para a Produção de cerâmica vermelha**. Tese (Doutorado) Pontifícia Universidade Católica do rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

REIG, L. et al. Potential use of ceramic sanitary ware waste as pozzolanic materialUso potencial de residuos de cerámica sanitaria como material puzolánico. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, v.61, n.6, p.611-621, 2022.

ROCHA, G. J. de M. Influence of mixed sugarcane bagasse samples evaluated by elemental and physical–chemical composition. **Industrial Crops and Products**, v. 64, p. 52-58, 2015.

RODRIGUES, Sandra. **As vias romanas do Algarve**. Algarve: Centro de Estudos do Patrimônio da Universidade de Algarve, 2004.

ROMUALDO, B. de C. D. e GAUDÊNCIO, L. M. de A. L. Gestão dos resíduos sólidos da perfuração *offshore*. Ponta Grossa: **Atena Editora**, 2019. Ebook. (1 recurso online). ISBN 978-85-7247-159-6. Disponível em: https://www.atenaeditora.com.br/post-artigo/9014. Acesso em: 3 ago. 2021.

RYKUSOVA, N. et al. Study of the properties of drill cuttings at their use as technogenic raw materials for the production of building ceramics. **Science Rise**, v. 66, n.1, 2020.

SANTANA, H. (1993): **Manual de Pré-Misturados a Frio**. IBP/ Comissão de Asfalto. Rio de Janeiro, RJ, 1993.

SANTOS, V. A.; MAGALHÃES, I. A.; DIAS, C.MA.R; (2018) **Cascalhos de Perfuração ricos em sílica como matéria prima para componentes auto clavados para a construção**. II Congresso Nacional de engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (CONEPTRO).

SCHAFFEL, S. B.(2002): **A questão ambiental na etapa de perfuração de poços marítimos de óleo e gás no Brasil.** 2002. Dissertação (Mestrado em ciências em planejamento energético). Programas de Pós-Graduação de engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de janeiro, 2002.

SCHMIDT, W. et al. Sustainable circular value chains: From rural waste to feasible urban construction materials solutions. **Developments in the Built Environment**, v. 6, 2021. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100047

SILVA, L. H. P.; TAMASHIRO, J. R.; ANTUNES, P. A.; PEREIRA, D. R. Caracterização da cinza de forno de olaria para aplicação em cimento pozolânico. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n.1, 2020. https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0892

SILVA, N.C; GONÇALVES, H.C.; CHAVES, L.A.O.; MACHADO, F.S.; AMARAL, M.C.; **O conceito *lean green* utilizado na proposta de reciclagem de cascalho de perfuração de poços de petróleo e gás.** Brasilian Journal of animal and Environmental Research. Curitiba, v. 2, n. 4, p. 1389-1401, jul./set. 2019.

SONG, Q.; GUO, M.; WANG, L.; LING, T. Use of steel slag as sustainable construction materials: A review of accelerated carbonation treatment. **Conservation and Recycling**, v. 173, 2021. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105740

SOUTSOS, M. N.; TANG, K.; KHALID, H. A.; MILLARD, S. G. The effect of construction pattern and unit interlock on the structural behaviour of block pavements. **Construction and Building Materials**, v. 25, 3832–3840, 2011.

SOUZA, M. L. de.; (1980): **Pavimentação rodoviária**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.

ŠUPIĆ, S.; MALEŠEV, M.; RADONJANIN, V.; BULATOVIĆ, V.; MILOVIĆ, T. Reactivity and Pozzolanic Properties of Biomass Ashes Generated by Wheat and Soybean Straw Combustion. **Materials** v.14, n.4, p.1004, 2021.

TAN, Y. Cost and environmental impact estimation methodology and potential impact factors in offshore oil and gas platform decommissioning: A review. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 87, 2021.

TAYLOR, H.F.W. **Cement chemistry**, London: Thomas Telford, 2ed, 1997.

TEIXEIRA, A. H. C. et al. Low-Carbon Concrete Based on Binary Biomass Ash–Silica Fume Binder to Produce Eco-Friendly Paving Blocks. **Materials**, v.13, n.7, 2020. https://doi.org/10.3390/ma13071534

THOMAS, B. S.; YANG, J.; BAHURUDEEN, A.; ABDALLA, A.; HAWILEH, R. A.; HAMADA, H. M.; NAZAR, A.; JITTIN, V.; ASHISH, D. K. Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in concrete – a review. **Materials Today Sustainability**, v. 15, 2021. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2021.100086

THOMAS, J. E.; (2004): **Fundamentos de engenharia de petróleo**. Editora Interciência. Rio de Janeiro, RJ.

TUTIKIAN, B. F.; MOLIN; D. D. Comparativo das propriedades do concreto auto adensável (CAA) utilizando areia fina e cinza volante. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v.4, n.2, p.247-276, 2011.

UDOP (2020): Do etanol ao açúcar. Disponível em: < https://www.udop.com.br/noticia/2020/6/9/do-etanol-ao-acucar.html> Acesso junho de 2021.

WU, N. et al. Use of sugar cane bagasse ash in ultra-high performance concrete (UHPC) as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 317, 2022. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125881

NI, B. E. X.. **EVALUATION OF INTERLOCKING CONCRETE BLOCK PAVEMENT WITH RECYCLED MATERIALS BASED ON EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT ANALYSIS**. 2022. Tese de Doutorado.

YOU, L.; YAN, K.; LIU, N. Assessing artificial neural network performance for predicting interlayer conditions and layer modulus of multi-layered flexible pavement. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v.14, p.487-500, 2020.

ZHUANG, G.; ZHANG, Z.; JABER, M.. Organoclays used as colloidal and rheological additives in oil-based drilling fluids: An overview. **Applied Clay Science**, v. 177, p. 63-81, 2019.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

ARTIGO 1 - EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE CASCALHO *OFFSHORE* SOBRE AS PROPRIEDADES DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO

Artigo redigido conforme a NBR 6022 (ABNT, 2018) e formatado de acordo com o Manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.

RESUMO

A destinação do cascalho gerado durante a extração do petróleo em alto mar tem se tornado um grande desafio. Uma vez que grande parte desse cascalho apresentam concentrações de base orgânica aderida acima do permitido para seu descarte no meio ambiente. O setor da construção civil, responsável por uma elevada extração de matéria prima, apresenta grande potencial para inserir resíduos na fabricação de seus materiais. Dentre esses materiais podemos destacar os blocos de concreto utilizados em pavimentações, que podem ganhar novas propriedades com a introdução de cascalho de perfuração contribuindo para as construções sustentáveis e destinação correta do resíduo. Desta forma, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da utilização de resíduos de cascalho de perfuração sobre as propriedades físico-mecânicas, microestruturais e durabilidade de blocos de concreto para pavimentação. O cascalho foi caracterizado quanto aos teores de óxidos metálicos, teor de óleo, teor de água, teor de sólidos, densidade, granulometria, pozolanicidade e inibição de cura. Foram avaliados blocos produzidos com cascalho de perfuração nas porcentagens de 25, 50, 75 e 100% (massa/massa) em substituição ao pó de pedra, além de um tratamento controle sem utilização de resíduo. Os blocos foram confeccionados por vibrocompressão, sendo posteriormente caracterizados quanto à resistência à compressão, absorção de água, densidade aparente, porosidade aparente, caracterização microestrutural e durabilidade. Observou-se um aumento na densidade com a inclusão do cascalho de perfuração devido a sua maior densidade real comparado ao pó de pedra. Apesar do aumento da densidade houve uma maior absorção de água e formação dos poros nos pisos com resíduo, devido à presença de argilas hidrofílicas no cascalho, sua granulometria e a maior inibição gerada no processo de cura do cimento. O envelhecimento acelerado intensificou a formação de poros e trincas, afetando negativamente as propriedades físicas dos blocos de concreto, no entanto após o envelhecimento a resistência à compressão aumentou para o tratamento controle e manteve para os blocos com cascalho de perfuração. Sugere-se a avaliação da produção de blocos de concreto de pavimentação com substituições do pó de pedra menores que 25% pelo cascalho de perfuração.

Palavras-chave: Pavimento Intertravado. Materiais Sustentáveis. *Pavers*. Resíduos de Poços de Petróleo. Pisos de concreto. Compósitos Cimentícios.

1 INTRODUÇÃO

A exploração do petróleo desempenha um papel importante na economia global. Muitos países que possuem reservas petrolíferas continuam a depender desta exploração, para obter crescimento econômico e desenvolvimento, uma vez que a humanidade, em sua maior parte, dependente do uso de seus derivados, principalmente como fonte de energia (GRAHAM; OVADIA, 2019; GUPTA; NIGAM, 2020; GUO; ZHANG; IGBAL, 2024).

Contudo, existe uma preocupação mundial com os impactos ambientais das atividades de exploração do petróleo. Uma vez que durante a extração do petróleo utiliza-se um fluido de perfuração que recircula entre o poço e a plataforma diversas vezes durante a exploração e contamina o cascalho gerado na perfuração (PEREIRA et al., 2022).

O cascalho de poço de petróleo é um dos subprodutos da indústria do petróleo que é descartado na natureza como resíduo. Dependendo de sua composição química que é bastante heterogênea e do fluido utilizado na perfuração, pode ser considerado como resíduo perigoso, impossibilitando o seu descarte no mar (ALANSARY; AL-TABBAA, 2007; BILSTAD et al., 2013; FIALHO, 2012).

A gestão inadequada dos resíduos de perfuração pode causar contaminação no local de perfuração e nas áreas adjacentes e terá efeitos adversos a longo prazo no ecossistema (CARVALHO et al., 2023; KHODADADI et al., 2020). Portanto, para que seja descartado no meio ambiente deve apresentar concentração de base orgânica aderida abaixo de 6,9%, caso contrário é preciso dar uma outra destinação que não impacte o meio ambiente (IBAMA, 2018).

Lebedev e Cherepovitsyn (2024) avaliando a viabilidade de quatro opções de gestão de resíduos de perfuração, sendo: 1) reciclagem de resíduos para produção de materiais de construção; 2) eliminação *in-situ* de resíduos e sua utilização como material de base para enchimento de estradas e poços; 3) eliminação no local de resíduos de perfuração em fossas funerárias e 4) contratar uma empresa de reciclagem, observaram através das avaliações quantitativas de risco, realizadas através de análise de sensibilidade, que a opção que envolve a conversão de resíduos de perfuração em materiais de construção, surge como a mais viável economicamente.

Klimova et al. (2022) avaliando as propriedades do cascalho de perfuração para possível aplicação na produção de tijolos cerâmicos, concluiu que o cascalho tem uma composição química muito variada, apresentando em sua composição quartzo, caulinita e sodalita. Os resultados obtidos durante a análise mineralógica, granulométrica, química, de fases, bem como

os resultados de plasticidade, constataram que o resíduo de perfuração avaliado é satisfatório em composição e qualidade e pode ser utilizado para posterior processamento e preparação para a produção de produtos cerâmicos de construção, em especial tijolos.

Rykusova et al. (2020) também avaliando a possibilidade da utilização de cascalho de perfuração para produção de cerâmicas, observou com base na composição química e mineral e suas propriedades, que nenhum dos cascalhos de perfuração avaliados pode ser utilizado em sua forma pura como matéria-prima para a produção de cerâmicas de parede. No entanto, uma das amostras apresenta potencial para ser aplicada como um substituto para matérias-primas argilosas, já a outra amostra como aditivo opacificante para argilas plásticas com boa capacidade de ligação ou, possivelmente, como aditivo de colagem para argila vermelha sinterizada.

Vlasov, Pugin e Surkov (2020) avaliando o aproveitamento de resíduos de perfuração na composição de concreto asfáltico, mostraram que o aumento do teor de cascalho de perfuração na mistura aumenta a densidade média e diminui a absorção de água e destacam que uma quantidade excessiva de cascalhos de perfuração leva a uma diminuição na resistência do revestimento. Isso se deve à heterogeneidade da composição dos cascalhos de perfuração, devido aos cloretos, reagentes de fluidos de perfuração e derivados de petróleo que fazem parte dos cascalhos de perfuração, que contribuem para a deterioração das propriedades físicas e mecânicas do concreto asfáltico. Foi estabelecido que o teor ideal de cascalhos de perfuração na composição do concreto asfáltico pode chegar a 7% em peso.

Maciel et al. (2023) avaliaram a reatividade dos cascalhos de perfuração moído, com diferentes granulometrias (8; 11; 13; 19 e 28 μm), como material cimentício suplementar em cimentos ternários e observaram que a incorporação do cascalho moído melhorou a cinética de hidratação do cimento ternário em comparação à pasta de referência produzida com cimento Portland comum e que após 28 dias, as pastas de cimento ternário com diâmetro menor que 11 μm atingiram pelo menos 70% da resistência à resistência da pasta de cimento Portland. O cascalho de perfuração moído contribui para o efeito físico e de nucleação das pastas cimento ternário estudadas e pode ser utilizado como materiais cimentícios suplementares.

Segundo Bernardo et al. (2007) a presença de cálcio reativo, silício, alumínio e óxidos de ferro na composição composição química do cascalho de perfuração atribui ao resíduo um potencial para sua utilização como agregado fino natural na indústria de cimento, substituindo o calcário e a argila.

Chen, Lin e Lin (2007) avaliaram a utilização de resíduos de perfuração como materiais de construção na produção de diferentes materiais de construção e concluiu que o cascalhos de

perfuração pré-tratados termicamente e cascalhos peneirados ou filtrados com menos lama líquida apresentam potencial para serem utilizados como agregados ou materiais de enchimentos na produção de concreto, tijolo ou bloco.

Asim et al. (2021) abordando sobre os estudos da utilização dos resíduos das indústrias petrolíferas como materiais de recursos sustentáveis nos setores da construção, destaca que embora os resíduos de petróleo demonstrem potencial para ser utilizados como materiais de construção alternativos e ecológicos, a tendência da investigação neste campo não é significativa, poucas pesquisas foram realizadas, necessitando de novos estudos para melhor caracterização dos resíduos e aplicabilidade nos materiais de construção.

Portanto, observa-se a necessidade do entendimento da utilização do cascalho de perfuração sobre as propriedades das matrizes cimentícias, no processo de produção e qualidade final para cada tipo de produto como, por exemplo, na produção de blocos de concreto para pavimentação.

O bloco de concreto é um material de pavimentação amplamente utilizado devido à sua longa vida útil, facilidade de produção e facilidade de substituição para fins de manutenção do pavimento (YEO et al, 2021). O grande volume de produção de bloco de pavimentação consome grande quantidade de agregados naturais e com o aumento do custo e o acesso limitado aos recursos naturais, os resíduos industriais disponíveis podem ser explorados para a produção de novos materiais, contribuindo para o desenvolvimento sustentável e para a economia circular (APRIANTI et al., 2015; LI; LING; MO, 2020; SHEHATA et al., 2022; YANG et al., 2019).

Nesse contexto, há a necessidade de rever a utilização de materiais alternativos como substitutos dos agregados para diminuir tanto o consumo de recursos naturais quanto o descarte de resíduos diversos. Portanto, o objetivo desse estudo foi avaliar as propriedades físico-mecânicas, microestruturais e de durabilidade dos blocos de concreto para pavimentação produzidos com substituição do pó de pedra por cascalho de perfuração *offshore*.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para a confecção dos blocos de pavimentação foram utilizados os resíduos de cascalho de perfuração *offshore* de poço de petróleo, o qual foi doado pela empresa Petrobras S.A, localizada na Bacia de Santos, Brasil. O cascalho de perfuração utilizado não passou por nenhum tratamento para diminuir a concentração de base orgânica. Na extração do petróleo foi utilizado um fluido à base de olefina interna. Para a produção dos blocos foram também utilizados agregados graúdos (brita 0), agregados miúdos (areia fina e pó de pedra) e cimento CPII-F adquiridos na região da cidade de Lavras–MG.

2.1 Caracterização do cascalho de perfuração

2.1.1 Análise granulométrica

Para caracterização física do cascalho de perfuração, do pó de pedra e suas combinações propostas para produção dos blocos foi realizado o ensaio de granulometria para determinação das proporções relativas em massa (%) dos tamanhos dos grãos que constituem os materiais. Realizou-se o peneiramento (fração grossa) e sedimentação (fração fina) seguindo as instruções da Norma NBR 7181 (ABNT, 2018).

2.1.2 Teste de inibição

Foi avaliada a aptidão do cascalho de perfuração com a matriz de compósitos cimentícios, através do método proposto por Hofstrand et al. (1984). A evolução da temperatura de reação foi utilizada como parâmetro para determinação do índice de inibição do endurecimento do concreto. Cabos termopares do tipo K foram acoplados em um coletor de dados, realizando leituras de temperaturas em intervalos de um minuto, durante 24 horas.

Cada tratamento (mistura proposta para a produção dos blocos) recebeu um cabo termopar e foi inserido à um sistema hermético. Foram adaptadas cinco caixas de isopor no interior da caixa térmica, onde foram depositados as misturas, completamente isolada por lã de vidro. Foram realizadas cinco repetições por tratamento.

Para a preparação das misturas, foi utilizado um becker, onde os agregados, o cimento e a água, todos em suas devidas proporções (as mesmas que foram utilizadas para a produção dos blocos), foram misturados por período inferior a 5 minutos. Posteriormente, a mistura foi

repassada para caixas de isopor, os cabos termopares foram introduzidos na mistura e as caixas foram lacradas. Em seguida os conjuntos foram colocados dentro da caixa térmica vedada e iniciou-se a coleta de dados.

Utilizando a Equação 1, proposta por Hostrand et al. (1984), foi possível calcular o índice de inibição.

$$l = 100 * t^2 - \left(\frac{t'^2 * T'^2}{t'^2}\right) - \left(\frac{T^2 * S'^2}{T'^2}\right) - \left(\frac{S^2}{S'^2}\right) \quad (1)$$

$$S'^2 = \frac{\Delta T'^2}{\Delta t'^2}$$

$$S^2 = \frac{\Delta T^2}{\Delta t^2}$$

Em que:

t^2 = tempo para se atingir a temperatura máxima de hidratação da mistura água-cimento;

t'^2 = tempo para se atingir a temperatura máxima de hidratação da mistura água-cimento-adição de material;

T^2 = Temperatura máxima atingida pela mistura cimento-água;

T'^2 = Temperatura máxima atingida pela mistura cimento-adição de material;

S^2 = Variação máxima de temperatura por hora para mistura cimento-água;

S'^2 = Variação máxima de temperatura por hora para mistura cimento-adição de material.

Para classificação da compatibilidade do material adicionado ao cimento foi utilizada a classificação proposta por Okino et al. (2004), sendo o índice de inibição (I) classificado em baixo ($I < 10$), intermediário ($10 \leq I < 50$), alto ($50 \leq I \leq 100$) e muito alto ($I > 100$).

2.1.3 Teor de óleo, água, sólidos e densidade

Para determinação dos teores de óleo, água e sólidos e da densidade do cascalho de perfuração foi utilizada o método da *American Petroleum Institute* API-RP-13B-2 (API, 2014), que recomenda a prática para teste de amostras à base de fluido oleoso de perfuração. Um volume conhecido de resíduo foi aquecido em instrumento adequado para vaporização de cada

tipo de componente líquido (água e óleo), em seguida as porcentagens de cada componente (óleo, água e sólidos) foi determinada através da subtração do volume perdido de material, pelo volume inicial da amostra.

Para determinação da densidade bulk do cascalho utilizou-se uma proveta graduada de 50 mL e uma balança analítica. Foram realizadas 10 repetições para para obter o resultado médio. Para determinação da densidade real, as amostras de cascalho foram submetidas à extração Sohxlet por 48h com álcool isopropílico, posteriormente foram secas em estufa por 24h a 105ºC. A densidade real do cascalho foi determinada pela técnica de picnometria.

2.1.4 Composição química do cascalho

A composição química do cascalho de perfuração foi determinada por meio da técnica de fluorescência de raio X (X-Ray Fluorescence - XRF). Para preparação das pastilhas foram utilizados 1 grama de cascalho e 8 gramas de fundente tetraborato de lítio anidro ($Li_2B_4O_7$), os quais foram homogeneizados e fundidos. Foi utilizado o equipamento de XRF modelo S8 Tiger da Brucker e o método foi semi-quantitativo (QUANT-EXPRESS).

2.2 Produção dos blocos de concreto para pavimetação

O traço controle para a produção dos *pavers* foi definido diante de traços comerciais fornecidos por indústrias produtoras de *pavers* localizadas na região do sul do estado de Minas Gerais - Brasil, objetivando atender a resistência característica aos 28 dias acima de 35 MPa para os blocos de concreto, conforme exigido para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha. Portanto foi adotado o traço em massa de 54,9% de pó de pedra, 16,5% de areia fina, 16,5% de brita 0 e 12,1% de cimento, com relação A/C (água/cimento) de 0,30, empregando cimento CP II - F.

Os blocos foram produzidos a fim de avaliar a substituição do agregado (pó de pedra) por 25, 50, 75 e 100% (massa/massa) de cascalho de perfuração na produção de blocos de concreto, além de um tratamento controle, sem substituição. Foram produzidos 24 corpos de prova para cada tratamento, com dimensões aproximadas de 10x20x8 cm (largura x comprimento x espessura, respectivamente), sendo confeccionados 12 blocos por vez, quantidade de corpos de prova que a máquina vibro prensa produz.

O traço de cada tratamento foi misturado em uma betoneira com capacidade de 400 litros. Primeiramente foram adicionados o pó de pedra, brita 0, areia fina, cimento e resíduo

para serem misturados, para posteriormente acrescentar a água, com o objetivo de obter uma mistura mais homogênea. O material foi homogeneizado na betoneira por 3 minutos aproximadamente, e transferido para a vibro prensa, onde foi distribuído uniformemente pelas formas e realizou o processo de vibrocompressão.

Após produção, os blocos foram mantidos em câmara úmida por 7 dias e depois em temperatura ambiente por 21 dias para realização da cura. Posteriormente os blocos foram submetidos a caracterização das propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e de durabilidade.

2.3 Envelhecimento acelerado

Os blocos de concreto para pavimentação passaram por ciclos de molhagem e secagem, seguindo os procedimentos descritos pela norma NBR 13554 (ABNT, 2012), que simulam à exposição do compósito à ação do tempo. Em cada ciclo os blocos ficaram por 5 horas imersos em água e posteriormente foram secos em temperatura de 71±2°C por período de 42h. Os blocos passaram por seis ciclos de envelhecimento acelerado. Posteriormente foram avaliados quanto as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais.

2.4 Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos blocos

Os blocos foram ensaiados aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado, para determinação de suas propriedades físicas e mecânicas. A Tabela 1 apresenta os testes e normas utilizadas para avaliação dessas propriedades. Seguindo os requisitos estipulados pela NBR 9781 (ABNT, 2013), para o teste de compressão foram utilizados seis corpos de prova para cada tratamento, já para os testes físicos foram utilizados três corpos de prova para cada tratamento.

Tabela 1 - Ensaios e normas de execução.

Ensaio	Norma
Resistência à compressão	NBR 9781 (2013)
Absorção de água	ASTM C948-81 (2023)
Densidade aparente	ASTM C948-81 (2023)
Porosidade Aparente	ASTM C948-81 (2023)

Fonte: Da autora (2024).

2.5 Caracterização microestrural

A caracterização microestrutural dos blocos de concreto para pavimentação confeccionados com cascalho de perfuração foi realizada por meio de ensaios de microscopia digital utilizando um equipamento da marca CoolingTech, modelo U500X. Os ensaios foram produzidos em amostras retiradas de parte do corpo de prova após 28 dias e envelhecidas, com dimensões de aproximadamente 5 cm x 5 cm, retirados dos corpos de prova rompidos pelo ensaio de resistência à compressão, sem a necessidade de preparo.

2.6 Análise estatística

Para a análise das propriedades dos blocos de concreto para pavimentação foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado com cinco tratamentos: 25, 50, 75 e 100% de cascalho de perfuração e um tratamento controle sem resíduo. Na avaliação de cada porcentagem foi realizada a análise de variância e de regressão. Posteriormente os dados foram confrontados com as normas de comercialização para compressão simples (NBR 9781, 2013) e absorção de água (NBR 9781, 2013).

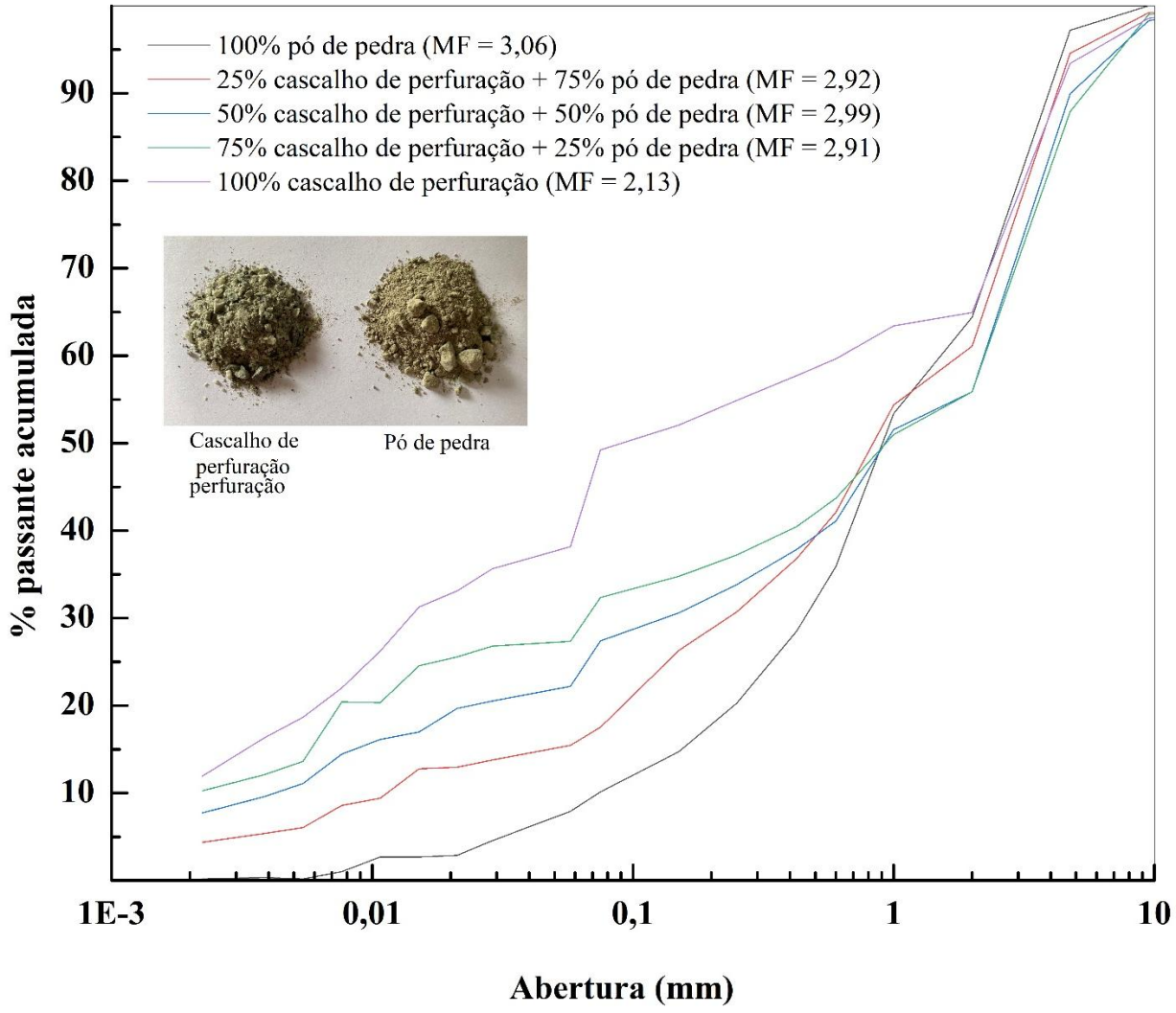
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do resíduo

3.1.1 Análise granulométrica

Os resultados de granulometria e sedimentação dos tratamentos avaliados estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Curva granulométrica dos diferentes traços utilizados na fabricação dos blocos de concreto para pavimentação.



Os valores de módulo de finura (Mf) encontra-se entre parênteses para cada tratamento

Fonte: Da autora (2024).

Para os tratamentos 100% pó de pedra; 25% de cascalho de perfuração + 75% pó de pedra e 50% de cascalho de perfuração + 50% de pó de pedra, observou-se que a maior porcentagem de partículas apresentam granulometria entre 2,0 e 4,8 mm, já para os demais tratamentos a maior porcentagem de partículas apresentam granulometria menor que 0,075 mm. Nota-se que o cascalho de perfuração apresenta maior quantidade de partículas finas e por tanto menor módulo de finura. Já a dimensão máxima característica (DMC) do tratamento com 100% de pó de pedra foi de 4,8 mm, dos demais tratamentos foi de 9,5 mm.

Foroutan et al. (2018) encontraram para duas amostras de cascalho de perfuração do Texas um módulo de finura de 4,13 e 2,69, enquanto para as duas amostras coletadas em Louisiana encontraram um valor de 4,18 e 3,65.

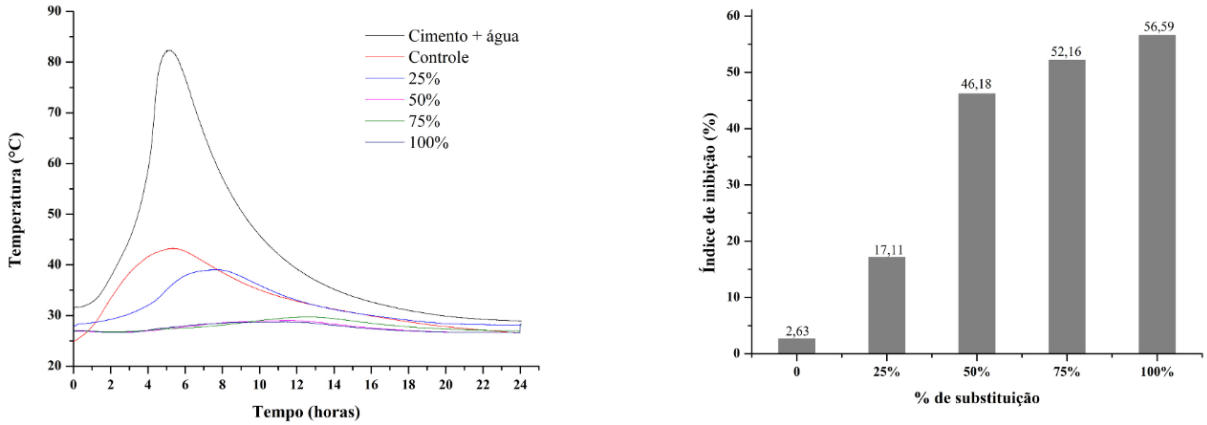
O tamanho das partículas dos cascalhos de perfuração variam com a broca, o comprimento do poço e as formações rochosas, compreendendo tamanhos entre 10 μm e 20 mm (BILSTAD et al., 2013), condizente com os resultados encontrados nessa pesquisa.

3.1.2 Análise de aptidão

Na Figura 2-A estão apresentadas as curvas obtidas pelo ensaio de inibição da cura do cimento do tratamento referência constituído por cimento + água, do traço controle dos blocos de concreto e dos traços com substituição do pó de pedra pelo cascalho de perfuração offshore nas porcentagens de 25, 50, 75 e 100%. As curvas de hidratação da pasta de cimento foram convertidas em índices de inibição de acordo com a metodologia de Hofstrand et al. (1984) e os valores obtidos para cada tratamento dos blocos de concreto estão apresentados na Figura 2-B.

Figura 2 – Análise de aptidão da cura do cimento com cascalho de perfuração de poços de petróleo.

A) B)



A) Curva de inibição do cimento + água e dos tratamentos utilizados na produção dos blocos de concreto para pavimentação. B) Índice de Inibição dos tratamentos utilizados para produção dos blocos de concreto para pavimentação.

Fonte: Da autora (2024).

Observa-se que a pasta de cimento (cimento + água) (Figura 2), utilizada como parâmetro de comparação, apresentou uma temperatura máxima de hidratação inicial de 82,31ºC, a qual ocorreu em um tempo de 5,00 horas de ensaio. Observa-se ainda que houve uma redução de 39,02ºC na temperatura do traço controle utilizado na produção dos blocos de concreto comparado à pasta de cimento e um aumento do tempo de cura para 5,35 horas (índice de inibição baixo), devido a incorporação dos agregados miúdos (areia e pó de pedra) e graúdos (brita), que diminuem a concentração de cimento e consequentemente as reações exotérmicas (SHU et al., 2023).

Houve uma redução na temperatura hidratação e um aumento no tempo de cura à medida em que a porcentagem de substituição do pó de pedra pelo resíduo aumentava. De acordo com a classificação de Okino et al. (2014), os blocos com 25 e 50% de substituição tiveram um índice de inibição intermediário, enquanto os demais tratamentos tiveram um índice de inibição alto.

Essa maior inibição está relacionada com a maior absorção de água pelo cascalho de perfuração, devido suas características físico-químicas, assim como sua menor geometria, o que promove maior área superficial para interação da água com o resíduo de cascalho. Os fluidos de perfuração à base de água possuem a presença de argilas altamente hidrofílicas em sua composição. Essas argilas, do tipo bentonita-montmorilonita sódica ou atapulgita, são

adicionadas propositalmente ou ocorrem naturalmente a partir de sólidos perfurados, encontrados em localidades offshore ou bacias sedimentares mais jovens, caracterizando formações de materiais muito sensíveis à água (KHONDAKER, 2000).

Assim, uma maior quantidade de água absorvida pelos agregados de cascalho de perfuração durante a mistura afeta os valores da relação água/cimento, influenciando o processo de hidratação, pois gera uma quantidade de calor inferior quando comparada a pasta de cimento e maior tempo para a ocorrência das reações exotérmicas (NASSER et al., 2016; ISMAIL et al., 2017; HU et al., 2022), afetando as propriedades mecânicas finais dos compósitos cimentícios (KOENDERS; PEPÊ; MARTINELLI, 2014; BAHRANIFARD et al., 2022; LIANG et al., 2024).

3.1.3 Análise de teores óleo, água, sólidos e densidades

Os resultados dos teores de óleo, água e sólidos e de densidade do cascalho de perfuração estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Teores de água, óleo, sólidos e densidade do cascalho de perfuração.

Propriedade	Cascalho de perfuração
Teor de Óleo (%)	14,60 (2,58)
Teor de Água (%)	3,43 (0,02)
Teor de Sólidos (%)	81,97 (2,59)
Densidade Real (kg.m^{-3})	2520,75 (12,30)
Densidade de Bulk (kg.m^{-3})	1305,28 (13,26)

Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Fonte: Da autora (2024).

O cascalho de perfuração apresentou um teor de óleo médio de 14,60%, um teor acima do permitido para o descarte em ambiente *offshore*, segundo a legislação ambiental brasileira (IBAMA, 2018) e a Agência de Proteção Ambiental Americana (US EPA, 2000), que regulamenta um teor máximo de 6,9%.

Os resíduos de perfuração podem conter diferentes constituintes e composições orgânicas dependendo das características específicas do poço, do fluido utilizado ou do estágio de perfuração do poço (ALBERT E PROSSER, 2023; COSTA et al. 2023). Petri Júnior et al. (2017) observaram uma densidade real de 2572,6 kg.m^{-3}, um teor de óleo de 6,78% e 25,21% de água para o cascalho coletado na perfuração de poço no Brasil. Santos et al. (2018) obtiveram para o cascalho de perfuração uma densidade de 2.668 kg. m^{-3}, 10,5% de óleo e 9,5% de água.

Os valores de densidade encontrados foram próximos ao encontrado para o cascalho utilizado nessa pesquisa, no entanto observa-se uma maior contaminação do cascalho utilizado, com 14,6% de base orgânica.

O fluido de perfuração e os cascalhos de perfuração juntos formam o segundo maior volume de resíduos gerados pela indústria de Exploração e Produção de petróleo do mundo (E&P), atrás apenas da água e possui diversos compostos contendo potenciais poluentes, que se descartados incorretamente podem trazer diversos riscos aos ambientes terrestres, aquáticos e aéreos, inclusive reduzindo a fertilidade do solo, afetando negativamente a flora e a fauna e causando problemas de saúde (ISMAIL et al., 2017; PEREIRA et al., 2022).

3.1.4 Análise dos teores dos elementos químicos do cascalho de perfuração

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados da análise química do cascalho de perfuração utilizado neste trabalho, obtidos por meio de análises de fluorescência de raio X.

Tabela 3 – Composição química do cascalho de perfuração.

Elementos químicos (%)	Valores obtidos	Petri Junior et al. (2019)	Ayati et al. (2019)
Si	34,8	18,1	41,18
Ca	27,2	8,5	14,95
Al	8,7	10	12,75
Cl	7,8	-	-
Ba	6,7	11,7	-
Fe	4,9	36	3,29
S	3,1	-	-
K	3,1	3,8	2,53
Mg	2,7	2,4	7,34
Sr	0,1	3,7	-
Na	-	-	17,32
Outros	0,9	5,8	0,64

Fonte: Da autora (2024).

Comparando os resultados obtidos nessa pesquisa com os resultados apresentados pelos demais trabalhos citados na Tabela 3, observa-se uma variação na composição química do resíduo, sendo por tanto uma comparação complexa, uma vez que depende da rocha perfurada e do fluido utilizado.

Observa-se que o cascalho de perfuração é formado em sua maior parte por silício (Si), cálcio (Ca) e alumínio (Al), devido as rochas sedimentares presentes nas perfurações de poços e reservatórios de petróleo (PETRI JUNIOR et al., 2017). O alto percentual de silício é favorável a produção de compósitos cimentícios, uma vez que o silício pode vir a possuir qualidades pozolânicas que facilitam a geração de suas reações benéficas com os hidratos de cimento (TERRONES et al., 2022).

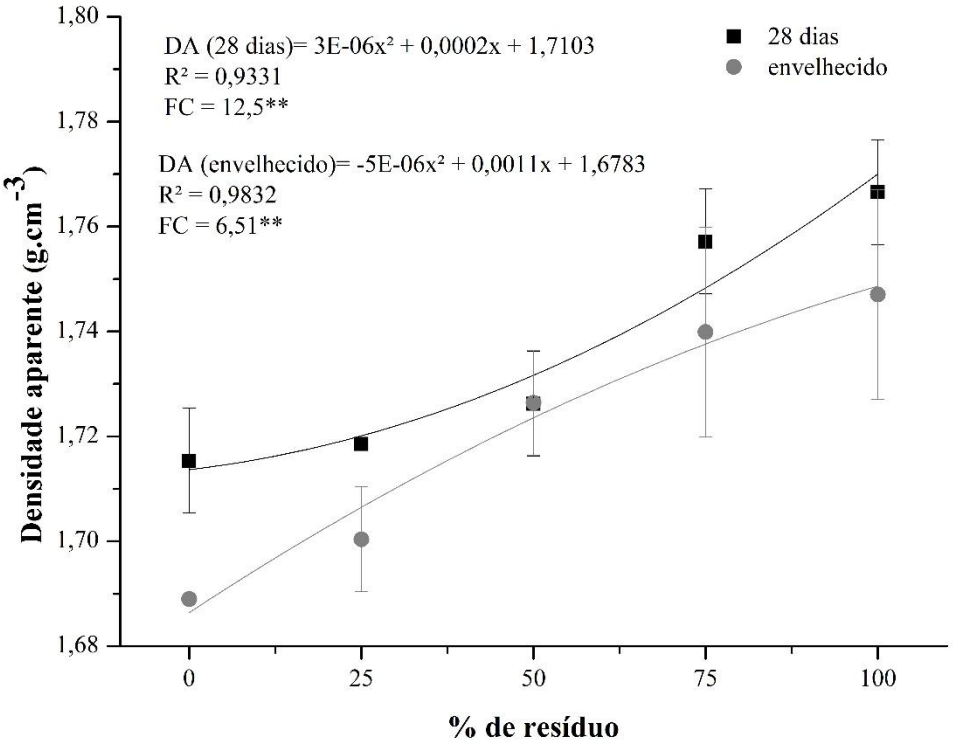
Os elevados teores de Si e Al no cascalho de perfuração também podem contribuir para a formação de compostos hidratados do cimento e ganho de resistência (ROMANO et al., 2016; EUGÊNIO et al., 2023). Além disso, o elevado teor de cálcio faz com que haja uma diminuição na concentração de álcalis, e com isso, inibição da formação do gel expansivo, que causa fissuras no concreto (CARDOSO et al., 2015).

A presença de Ba e S em níveis consideráveis é devido a baritina presente no fluido de perfuração que é usada como adensante (para aumentar densidade do fluido). O teor relevante de Cl está relacionado à utilização de cloretos na formulação do petróleo. O Fe também tem origem da formulação do petróleo, no entanto a maioria dos componentes de Fe é devido à formação geológica (PETRI JUNIOR et al., 2017).

3.2 Análises físicas dos blocos de concreto para pavimentação

Os valores médios obtidos para a densidade aparente dos blocos de concreto aos 28 dias e após envelhecidos acelerado estão apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Densidade aparente dos blocos de concreto para pavimentação produzidos com cascalho de perfuração.



** Significativo ao nível de 1% de significância

Fonte: Da autora (2024).

Observa-se que houve efeito significativo da substituição do pó de pedra por cascalho de perfuração sobre a densidade aparente dos blocos de concreto aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado. A densidade aparente aumentou à medida que houve o aumento da porcentagem de substituição do pó de pedra. Esse aumento da densidade dos pisos de concreto pode estar relacionado com a diferença de densidade dos materiais avaliados, sendo a densidade do cascalho de perfuração de 2520,75 $kg.m^{-3}$ e a do pó de pedra de 1517,4 $kg.m^{-3}$, o que afeta a compactação dos materiais e suas interações na matriz, contribuindo para uma maior densidade aparente dos compósitos (TOKACH et al., 2021).

Mohammed e Cheeseman (2011) avaliaram a substituição da areia (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100%) na produção de blocos de concreto arenoso por cascalho de perfuração tratado termicamente e observaram efeito do material sobre a densidade do compósito. A medida que aumentava a porcentagem de substituição aumentava também a densidade do material, em até 70% de substituição. Os autores associaram os resultados a granulometria do

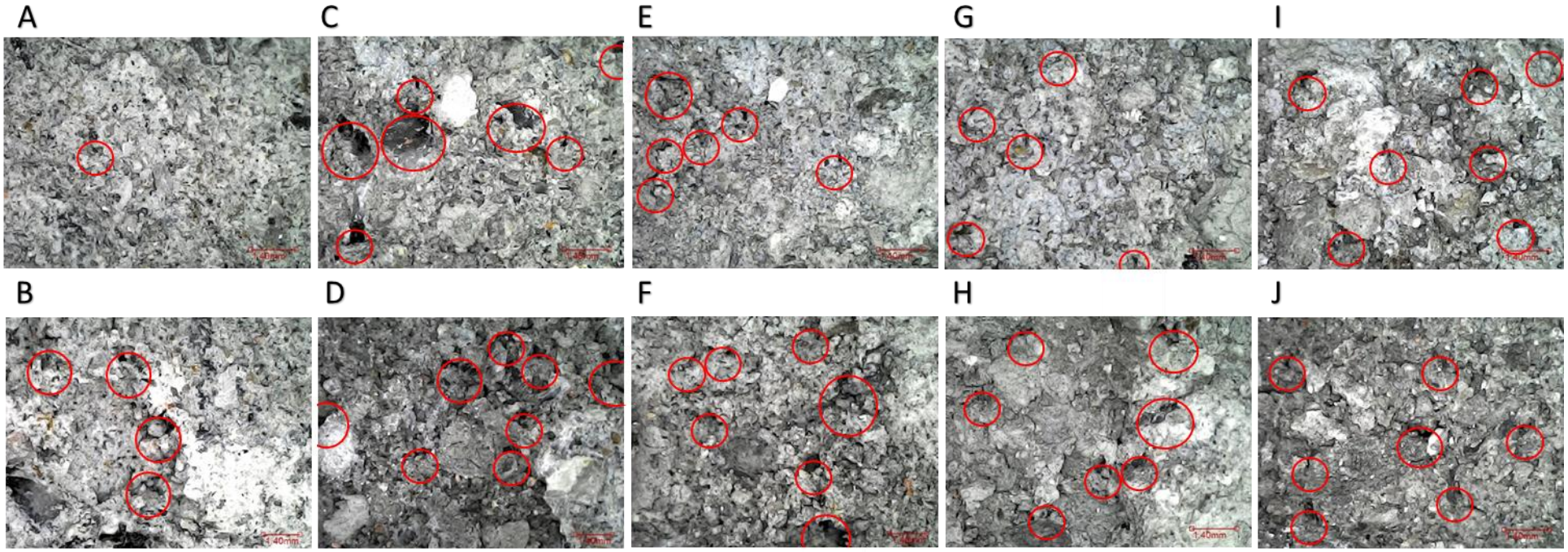
cascalho, que apresenta um tamanho de partícula muito mais fino que a areia, tendo maior empacotamento, resultando em amostras mais densas. No entanto, Anghelescu; Cruceru e Diaconu (2019) observaram a redução da densidade e da resistência à compressão de materiais de construção ao substituir parcialmente as argilas por resíduo de perfuração (50 e 80%; massa/massa), resultado associado ao aumento da densidade de poros. O que demonstra que a densidade dos compósitos é afetada pela granulometria do cascalho, pela sua concentração, composição química, efeito na cura, método de produção e a interação dos materiais com a matriz.

Observa-se que após o envelhecimento acelerado a densidade dos blocos diminuíram e consequentemente houve um aumento na porosidade e absorção de água (Figura 5 e 6). Segundo Sabino et al. (2021) os ciclos de envelhecimento acelerados causam perda de aderência das partículas devido à degradação e movimentação dimensional do compósito, o que gera maior formação de porosidade e consequentemente a redução da densidade.

A capacidade de retenção de água pelos agregados também pode influenciar nas propriedades físicas após os ciclos de envelhecimento. À medida que o líquido evapora ao longo do tempo, ocorre a incorporação de ar, diminuindo a massa específica do produto e aumentando a porosidade do material (VIANA et al., 2022).

Na Figura 4 é possível verificar o comparativo das amostras antes e após o envelhecimento acelerado, sendo possível verificar o aumento de poros. Sendo essas mais evidentes quanto maior a porcentagem de substituição de pó de pedra por cascalho de perfuração.

Figura 4 - Micrografias dos blocos de concreto para pavimentação antes e após o envelhecido acelerado.



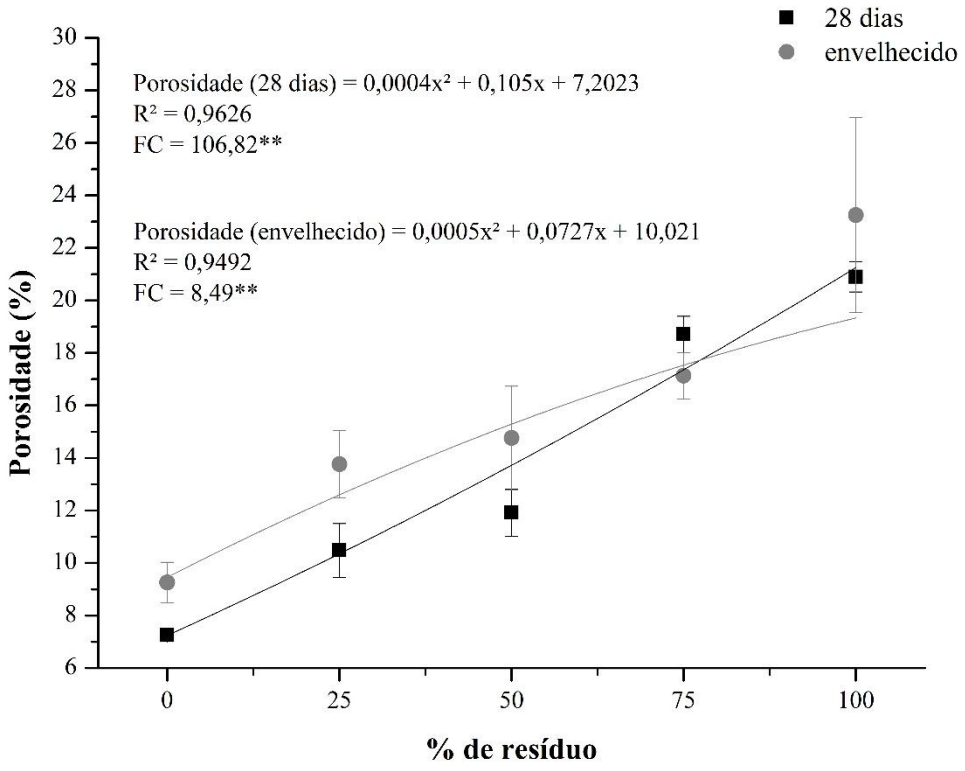
A) Controle aos 28 dias; B) Controle envelhecido; C) 25% de cascalho aos 28 dias; D) 25% de cascalho e envelhecido; E) 50% de cascalho aos 28 dias; F) 50% de cascalho envelhecido; G) 75% de cascalho aos 28 dias; H) 75% de cascalho envelhecido; I) 100% de cascalho aos 28 dias; J) 100% de cascalho envelhecido.

Fonte: Da autora (2024).

Nas Figuras 5 e 6 observou-se um aumento dos valores de porosidade e de absorção de água à medida que se aumentou a concentração do resíduo, aos 28 dias cura e envelhecidos. Este aumento dos valores se deve ao fato do cascalho de perfuração apresentar argilas altamente hidrofílicas. As argilas do tipo bentonita em altas concentrações no concreto resulta em maiores valores de absorção de água e formação de poros na matriz (AHMAD et al., 2022).

Tais resultados também estão associados ao tamanho das partículas de cascalho (Figura 1) que apresentam dimensões inferiores ao pó de pedra, o que promove maior área superficial para o recobrimento do cimento. Dessa forma, apesar de resultar em reduções dos poros maiores, devido a um maior grau de empacotamento dos materiais, o menor recobrimento promove a redução da interação físico-química dos materiais (NARCISO, et al., 2023), gerando microporos/trincas entre eles, o que foi mais evidenciado após o envelhecimento acelerado (Figura 4), afetando assim a porosidade e absorção de água dos materiais.

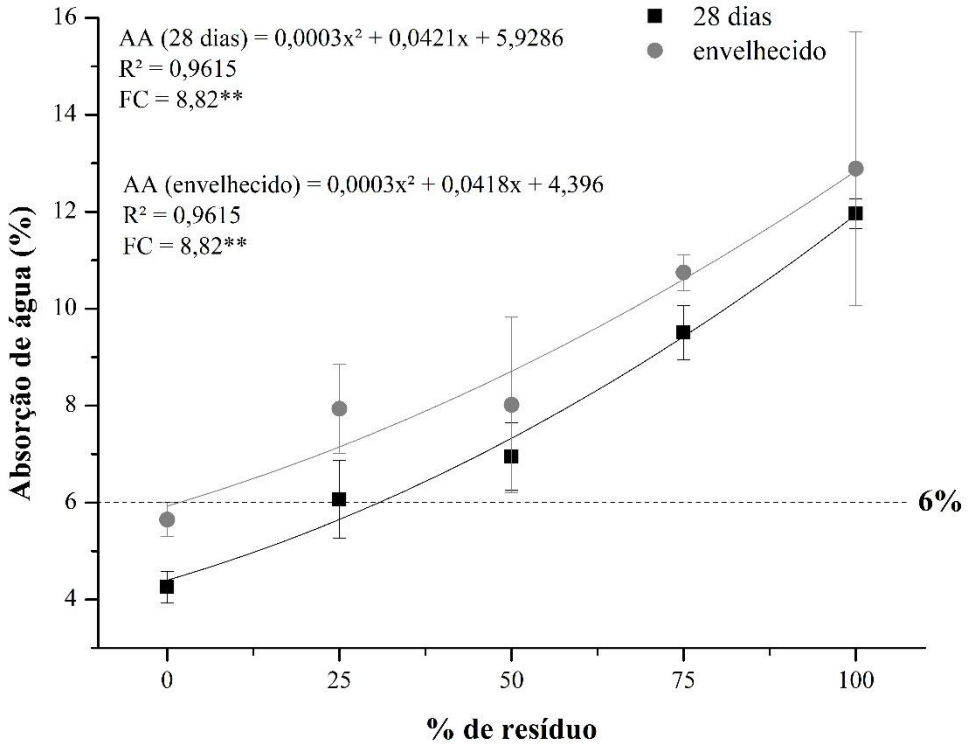
Figura 5– Porosidade aparente dos blocos de concreto para pavimentação aos 28 dias e envelhecido produzidos com cascalho de perfuração.



** Significativo ao nível de 1% de significância

Fonte: Da autora (2024).

Figura 6 – Absorção de água dos blocos de concreto para pavimentação produzidos com cascalho de perfuração.



** Significativo ao nível de 1% de significância

Fonte: Da autora (2024).

Jain; Gupta e Chaudhary (2019) avaliando o desempenho de concreto autoadensável composto por resíduo de corte de granito (RCG) como agregado miúdo, observaram que a absorção de água diminuiu inicialmente para a incorporação de 20% de resíduo de granito, em substituição ao agregado fino, e posteriormente aumentou com o aumento do teor de RCG. Este aumento na absorção de água após certo nível de substituição de agregado miúdo por RCG está relacionado à formação de um grande número de vazios na matriz do concreto. Segundo os autores à escassez de conteúdo de pasta de cimento relacionada ao aumento da área superficial da fase agregada, devido a menor granulometria do resíduo de granito, levou ao desenvolvimento de microestrutura pobre e vazios dentro da matriz de concreto, o que resultou em maior absorção de água.

Liu et al. (2018) avaliando a substituição do agregado leve (30, 40, 50 e 60%) pelo cascalho de perfuração na produção de tijolos não cozidos, observou que o valor de absorção

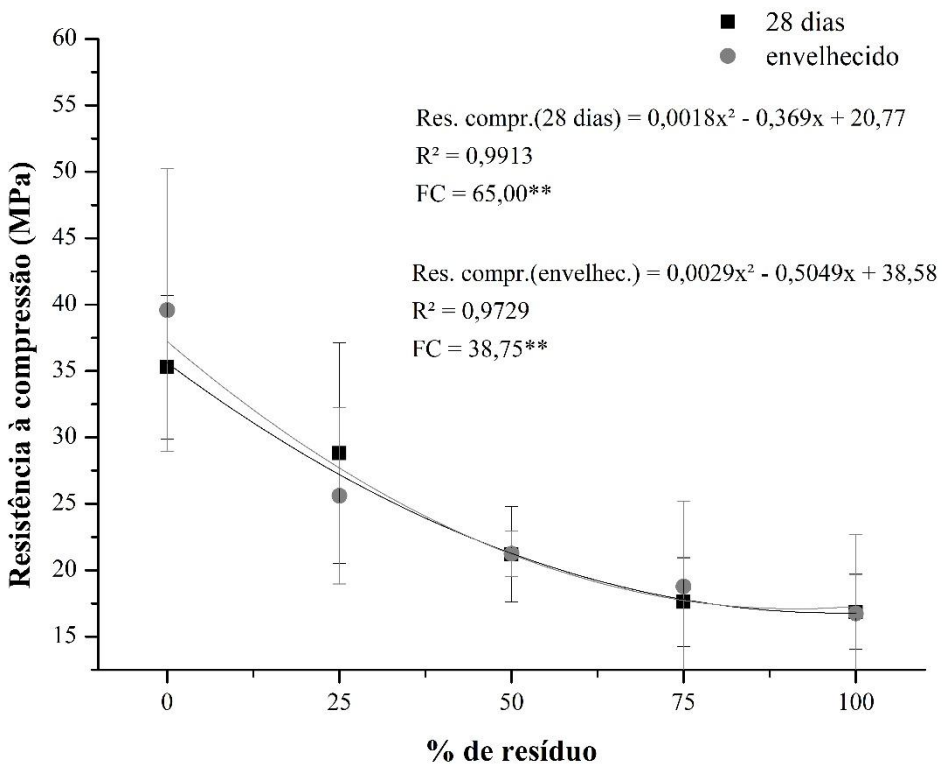
de água para as misturas com 40% de resíduo de perfuração é o mais baixo, porcentagens de substituição superiores aumentam a absorção de água pelos tijolos devido à maior formação de poros no compósito.

Comparando os valores de absorção de água com a NBR 9781 (ABNT, 2013), observa-se que apenas o tratamento controle aos 28 dias e envelhecido e o tratamento com 25% de cascalho de perfuração aos 28 dias obtiveram absorção de água com valor médio menor ou igual a 6% e nenhum valor individual maior do que 7%.

3.3 Análise mecânica dos blocos de concreto para pavimentação

Os resultados de resistência à compressão para os blocos de concreto aos 28 dias e após envelhecidos estão representados na Figura 7. Houve efeito significativo da porcentagem de resíduo de cascalho de perfuração nos blocos de concreto sobre a resistência à compressão. Observou-se uma diminuição dos valores médios de resistência à compressão à medida que a porcentagem de substituição do pó de pedra aumentava, com uma certa estabilização quando comparação a substituição de 75 e 100% de pó de pedra por cascalho.

Figura 7 – Resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação produzidos com cascalho de perfuração.



** Significativo ao nível de 1% de significância

Fonte: Da autora (2024).

Essa queda na resistência está relacionada com a influência do cascalho de perfuração na hidratação do cimento (Figura 2), devido à absorção de água pelas argilas presentes no resíduo de perfuração, que promoveu uma menor hidratação do cimento e consequentemente reduziu o preenchimento dos espaços vazios na matriz. Al-Ansary, Al-Tabbaa (2007); Leonard; Stegemann (2010) apontam algumas limitações e desvantagens no uso do resíduo de extração em materiais cimentícios. O principal problema apontado é a alta concentração de componentes orgânicos, cloretos e bentonita que dificulta o processo de hidratação do cimento e pode diminuir a resistência à compressão do concreto.

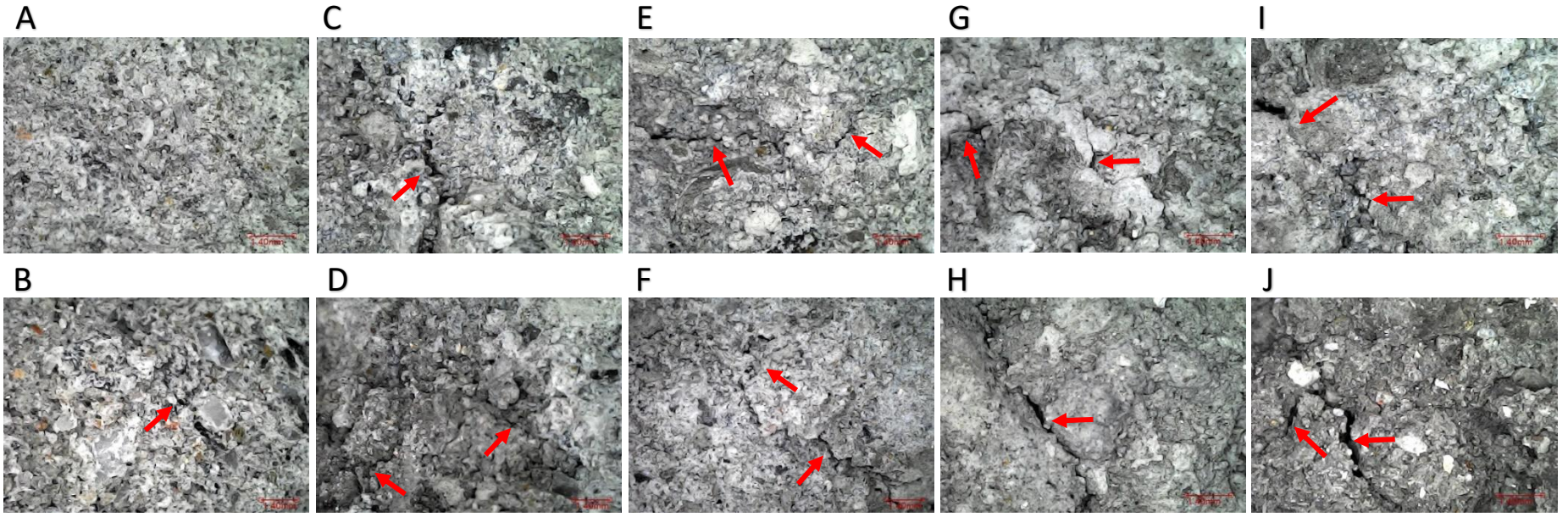
Outro fator relevante foi a menor interação do cascalho com o cimento, que foi afetada devido à maior área superficial do cascalho comparado ao pó de pedra, que impediu o recobrimento efetivo pelas partículas de cimento, gerando maior quantidade de poros e diminuindo a resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação. Segundo Yu et al. (2019) quando utilizado a mesma quantidade de pasta de cimento para diferentes composições granulométricas de agregados observa-se que a pasta de cimento aderida à agregados menores é mais fina, devido à maior área superficial. Essa cobertura do agregado

pelo aglomerante gera efeitos significativos na resistência do concreto, pois o aumento da espessura da pasta cimentícia sobre o agregado, até certos limites, gera ganho de resistência à compressão.

Observa-se na Figura 7 que apesar dos resultados obtidos para as propriedades físicas (densidade, absorção de água e porosidade) dos blocos de concreto, a resistência à compressão do tratamento controle envelhecido aumentou comparado aos 28 dias, enquanto para tratamentos com resíduo de extração não houve grandes alterações. Resultado associado a continuação do processo de hidratação do cimento com os ciclos de molhagem e secagem do envelhecimento acelerado, que compensou a perda de resistência devido a maior formação de poros e fissuras dos blocos de concreto observadas na Figura 8 (SHETTIMA et al., 2016; VILELA et al., 2020; VIANA et al., 2022).

O efeito da continuação da cura do cimento no tratamento controle foi superior ao observado nos tratamentos com resíduos de cascalho pois existia uma maior quantidade de cimento por partículas para promover um melhor recobrimento dos agregados, diferentemente dos compósitos com resíduos de cascalho de perfuração como matéria-prima, que apresentavam maior grau de finura e consequentemente maior área superficial para recobrimento e interação do cimento, apresentando, portanto, maior influência da falta de interação entre os cascalhos e matriz e da porosidade e trincas formadas.

Figura 8 – Micrografias dos blocos de concreto para pavimentação antes e após o envelhecido acelerado.



a) Controle aos 28 dias; b) Controle envelhecido; c) 25% de cascalho aos 28 dias; d) 25% de cascalho envelhecido; e) 50% de cascalho aos 28 dias; f) 50% de cascalho envelhecido; g) 75% de cascalho aos 28 dias; h) 75% de cascalho envelhecido; i) 100% de cascalho aos 28 dias; j) 100% de cascalho envelhecido.

Fonte: Da autora (2024).

Foroutan et al. (2018) avaliando a substituição (volume/volume) de 5 e 20% do agregado fino (areia) por cascalho de perfuração de duas origens diferentes na produção do concreto, não observaram redução significativa da resistência à compressão para misturas de concreto preparadas com cascalhos para atingir as resistências de 19, 8 e 2 MPa, comparando ao tratamento controle. No entanto, uma redução significativa foi observada nos concretos de baixa resistência (0,5 e 1,3 MPa). Resultados associados ao fato de que o maior teor de cimento nas misturas de concreto de alta resistência compense a falta de resistência dos cascalhos de perfuração. Visto que a granulometria mais fina dos cascalho de perfuração necessita de maior quantidade de cimento para um melhor recobrimento.

Mohammed e Cheeseman (2011) ao avaliar a substituição da areia (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100%) na produção de blocos de concreto arenoso por cascalho de perfuração tratado termicamente observaram um ganho de resistência até 40% de substituição da areia pelo resíduo, no entanto maiores porcentagens gera perda de resistência à compressão. Com base nos dados de resistência, os autores indicam que até 70% em peso de areia poderiam ser substituídos por cascalho de perfuração em blocos de concreto arenoso. Substituições maiores que 70% geram menor empacotamento das partículas e consequentemente baixa densidade, elevada absorção de água e menor resistência mecânica.

A norma NBR 9781 (ABNT, 2013) estipula um valor mínimo de 35 MPa para os blocos de concreto utilizados para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha. Desta forma, apenas o tratamento controle obtiveram valores médios para atender à normativa.

4 CONCLUSÃO

O objetivo desse estudo foi avaliar as propriedades físico-mecânicas, microestruturais e de durabilidade dos blocos de concreto para pavimentação produzidos com substituição do pó de pedra por cascalho de perfuração *offshore*. De acordo com os resultados do experimento nas propriedades dos blocos de concreto:

1) A maior densidade do cascalho de perfuração promoveu um aumento na densidade dos blocos a medida que aumentava a substituição do pó de pedra pelo resíduo. No entanto, as propriedades físicas de absorção e porosidade foram comprometidas devido à presença de argilas hidrofílicas no resíduo de perfuração *offshore*, à maior inibição das reações químicas do cimento no processo de hidratação e menor recobrimento das partículas de cascalho de perfuração.
2) Após o envelhecimento acelerado observou-se a formação expressiva de trincas e poros que afetaram negativamente as propriedades físicas dos blocos de concreto. Os ciclos de molhagem e secagem causaram perda de aderência das partículas devido à degradação e movimentação dimensional. No entanto, após o envelhecimento a resistência à compressão aumentou para o tratamento controle e manteve para os blocos com cascalho de perfuração, devido a continuidade do processo de hidratação do aglomerante.
3) Os blocos produzidos com cascalho de perfuração não atenderam a NBR 9781 (ABNT, 2013) e apresentaram queda de resistência com o aumento da substituição do pó de pedra pelo cascalho de perfuração. Resultado associado a inibição causada pelo cascalho de perfuração nas reações exotérmicas do concreto e maior formação de poros e trincas no compósito.
4) Sugere-se a avaliação da produção de blocos de concreto de pavimentação com substituições do pó de pedra menores que 25% pelo cascalho de perfuração, bem como a formulação de novos traços para produção do bloco.

REFERÊNCIAS

AHMAD, J. et al. Partial Substitution of Binding Material by Bentonite Clay (BC) in Concrete: A Review. **Buildings**, v. 12, n.5, 2022. DOI:10.3390/buildings12050634

AL-ANSARY, M. S.; AL-TABBAA, A. Comparison of Stabilized/Solidified Mixed of Model Drill Cuttings Based on the North Sea and Red Sea Areas. Texas: SPE Publication 106799. **SPE E&P Environmental and Safety Conference held in Galvesion**, 2007.

ALBERT, P. C.; PROSSER, C. M. Modeling demonstrates minimal ecological risks of cuttings discharges associated to oil and gas drilling with deep water wells. **Marine Pollution Bulletin**, v. 186, n. 7, 2022.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API RP 13B-2**: Recommended Practice for Field Testing Oil-based Drilling Fluids. 5 ed. [s.i]: American Petroleum Institute (api), 2014. 156 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 948**: Standard Test Method for Dry and Wet Bulk Density, Water Absorption, and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete. West Conshohocken, PA,2001.

ANGHELESCU, L.; CRUCERU, M.; DIACONU, B. Building materials obtained by recycling coal ash and waste drilling fluid and characterization of engineering properties by means of Artificial Neural Networks. **Construction and Building Materials**, v. 227, 2019. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.342

APRIANTI, E. et al. Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review. **Construction and Building Materials**, v. 74, p. 176-187, 2015. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.010

ASIM, N.et al. Wastes from the petroleum industries as sustainable resource materials in construction sectors: Opportunities, limitations, and directions. **Journal of Cleaner Production**, v.284, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13554**: Solo-cimento - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. Rio de Janeiro. 3p. 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12042:** Materiais inorgânicos — Determinação do desgaste por abrasão. Rio de janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9781:** Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 26p. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** Solo - Análise granulométrica. Rio de janeiro, 21p., 2018.

ASTM COMMITTEE C-09 ON CONCRETE AND CONCRETE AGGREGATES. **Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete**. ASTM international, 2013.

AYATI, B. et al. Manufacture and performance of lightweight aggregate from waste drill cuttings. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 252-260, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.134

BAHRANIFARD, Z. et al. Effects of water-cement ratio and superplasticizer dosage on mechanical and microstructure formation of styrene-butyl acrylate copolymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 318, 2022. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125889

BERNARDO, G. et al. The use of oil well-derived drilling waste and electric arc furnace slag as alternative raw materials in clinker production. Resources, **Conservation and Recycling**, v.52, n.1, p.95-102, 2007.

BILSTAD, T. et al. Offshore drilled cuttings management. **AGH Drilling Oil Gas**, v.30, n.1, p.47–49, 2013. https://doi.org/10.7494/drill.2013.30.1.47.

CARDOSO, A. F. A et al. **Reação álcali-agregado – Verificação da reatividade do agregado graúdo, frente ao álcalis do cimento, das principais jazidas fornecedoras de agregados para a região metropolitana de Belém**. RETEC, Ourinhos, v. 8, n. 2, p. 38-49, 2015.

CARVALHO, F. do S. de S. et al. **Characterization of Asphalt Mixtures with Addition of Drill-Well Gravel**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 35, n. 7, 2023. https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-14944

CASTRO, A. L., PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil**. Cerâmica, v. 55, 2009.

COSTA, L. C. et al. Physical and chemical characterization of drill cuttings: A review. **Marine Pollution Bulletin**, v.194, 2023. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115342

CHU, S. H. Effect of natural and recycled aggregate packing on properties of concrete blocks. **Construction and Building Materials**, v. 278, 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122247

CHEN, T. L.; LIN, S.; LIN, Z. S. An Innovative Utilization of Drilling Wastes as Building Materials. E&P **Environmental and Safety Conference**, Galveston, Texas, U.S.A., 2007. https://doi.org/10.2118/106913-MS

EUGENIO, T. M. C. et al. Study on the use of mining waste as raw material for extruded fiber cement production. **Journal of Building Engineering**, v. 63, p. 105547, 2023.

FARRAPO, C. L. et al. Cellulose Associated with Pet Bottle Waste in Cement Based Composites. **Materials Research**, v. 20, n. 5, p. 1380–1387, 2017.

FIALHO, P.F. (2012): **Cascalho de perfuração de poços de petróleo e gás. Estudo potencial de aplicação cem concreto**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.

GRAHAM, E.; OVADIA, J. S. Oil exploration and production in Sub-Saharan Africa, 1990-present: Trends and developments. **The Extractive Industries and Society**, v.6, n.2, p.593-609, 2019. https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.02.001

GUO, C.; ZHANG, X.; IQBAL, S. Does oil price volatility and financial expenditures of the oil industry influence energy generation intensity? Implications for clean energy acquisition. **Journal of Cleaner Production**, v.434, 2024.

GUPTA, N.; NIGAM, S. Crude Oil Price Prediction using Artificial Neural Network. **Procedia Computer Science**, v. 170, p. 642-647, 2020.

HAMADA, H. M. et al. Effect of Volcanic Ash and Natural Pozzolana on mechanical properties of sustainable cement concrete: A comprehensive review. **Case Studies in Construction Materials**, v. 19, 2023.

HOFSTRAND, A. D.; MOLESMI, A. A.; GARCIA, J. F. Curing characteristics of particles from nine northern Rocky Mountain species mixed with portland cement. **Forest Products Journal**, Madison, v. 34, n. 2, p. 57-61, Feb. 1984.

HU, Yuansi et al. Regional distribution, properties, treatment technologies, and resource utilization of oil-based drilling cuttings: A review. **Chemosphere**, p. 136145, 2022.

HWANG, C.; HUYNH, T. **Investigation into the use of unground rice husk ash to produce ecofriendly construction bricks.** Construction and Building Materials, Edinburgh, v. 93, p. 335– 341, 2015.

IBAMA - Instituto Brasileiro Do Meio Ambiente E Dos Recursos Naturais Renováveis. **Nota técnica CGPEG/DILIC/IBAMA nº 01**. Brasil, 2018.

ISMAIL, Abdul Razak et al. Drilling fluid waste management in drilling for oil and gas wells. **Chemical Engineering Transactions**, v. 56, p. 1351-1356, 2017.

JAIN, A. GUPTA, R.; CHAUDHARY, S. Performance of self-compacting concrete comprising granite cutting waste as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v.221, p. 539-552, 2019.

JO, Byung-Wan et al. Characteristics of cement mortar with nano-SiO2 particles. **Construction and building materials**, v. 21, n. 6, p. 1351-1355, 2007.

KHALIL, Kh A. Effect of nanosilica on the hydration characteristics and compressive strength of blended basalt cement pastes. **Egyptian Journal of Chemistry**, v. 59, p. 573-595, 2016.

KHODADADI, M. et al. Reuse of drill cuttings in hot mix asphalt mixture: A study on the environmental and structure performance. **Construction and Building Materials**, v.256, 2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119453

KHONDAKER, A. N., 2000, Modeling the Fate of Drilling Waste in Marine Environment – an Overview. **Computers & Geosciences**, v.26, p. 531-540, 2000.

KLIMOVA, L. V.; SMOLII, V. A.; ROMANYUK, V. S. The use of drilling waste in the production of ceramic building materials. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2022.

KOENDERS, E. A. B.; PEPE, M.; MARTINELLI, E. Compressive strength and hydration processes of concrete with recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 203-212, 2014. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.012

LAI, H. et al. Utilization of oil-based mud drilling cuttings wastes from shale gas extraction for cement clinker production. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 33075-33084, 2020. https://doi.org/10.1007/s11356-020-09541-2

LEBEDEV, A.; CHEREPOVITSYN, A. Waste Management during the Production Drilling Stage in the Oil and Gas Sector: A Feasibility Study. **Resources**, v.13, n.2, 2024. https://doi.org/10.3390/resources13020026

LI, X.; LING, T.; MO, K. H. **Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete – A review**. Construction and Building Materials, v. 240, 117869, 2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117869

LIANG, M. et al. Effects of temperature on autogenous deformation and early-age stress evolution in cement pastes with low water to cement ratio. **Construction and Building Materials**, v. 411, 2024.

LIU, D. et al. Environmental performance, mechanical and microstructure analysis of non-fired bricks containing water-based drilling cuttings of shale gas. **Construction and Building Materials**, v.183, p. 215-225, 2018.

LLANES, M. C. et al. Construction and demolition waste as recycled aggregate for environmentally friendly concrete paving. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 9826–9840, 2022.

LONGO, Thainara et al. Study of mechanical strength and strength to acid attack on cementitious composites with incorporation of silica nanoparticle. **MATERIA-RIO DE JANEIRO**, v. 27, n. 4, 2022.

LOPES, Y. L. V. **Utilização da madeira e cascas de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden na produção de painéis cimento-madeira.** 2004. 60f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

MACIEL, K. R. D. Optimization of Drilling Cuttings Reactivity as a Supplementary Cementitious Material in Ternary Cements. **Materials Research**, V.26, N.1, 2023. https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2022-0599

MÁRMOL, Gonzalo; SAVASTANO JR, Holmer. Study of the degradation of non-conventional MgO-SiO2 cement reinforced with lignocellulosic fibers. **Cement and Concrete Composites**, v. 80, p. 258-267, 2017.

MOHAMMED, B; CHEESEMAN, C. R. Use of Oil Drill Cuttings as an Alternative Raw Material in Sandcrete Blocks. **Waste and Biomass Valorization**, v.2, p. 373-380, 2011.

MOSTAVI, E., ASADI, S., UGOCHUKWU, E. Feasibility study of the potential use of drill cuttings in concrete. **Procedia Engineering**, v.118, p. 1015-1023, 2015. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.543.

NARCISO, C. R. P. Development of iron ore tailings based wood-cement composite panels. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, p.115381–115395, 2023. https://doi.org/10.1007/s11356-023-30602-9

NASSER, R. A.; AL-MEFARREJ, H. A. Evaluation of using midribs of date palm fronds as a raw material for wood-cement composite panels industry in Saudi Arabia. **Agricultural Engineering Research Journal**, v.1, p.43-50, 2016.

OKINO, E. Y. A. et al. Chapa Aglomerada de Cimento-Madeira de Hevea brasiliensis Müll. Arg. **Revista Árvore**, v. 28, n. 3, p 451-457, 2004.

ORESHKIN, Dmitriy V.; CHEBOTAEV, Alexander N.; PERFILOV, Vladimir A. Disposal of drilling sludge in the production of building materials. **Procedia engineering**, v. 111, p. 607-611, 2015.

PEREIRA, L. B. et al. **Environmental impacts related to drilling fluid waste and treatment methods: A critical review.** Fuel, v. 310, B, 2022. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122301

PETRI JUNIOR., IRINEU et al. Influence of Rock Chemical Composition in Microwave Heating and Decontamination of Drill Cuttings. **Materials Science Forum (online)**, v. 899, p. 469-473, 2017.

PETRI JÚNIOR, I et al. Microwave drying remediation of petroleum-contaminated drill cuttings. **Journal of Environmental Management**, v.196, p.659-665, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.068

PETRI JÚNIOR, I. et al. Development and performance of a continuous industrial microwave dryer for remediation of drill cuttings. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 176, p. 362-368, 2019. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.01.075

ROMANO, R. C. O. et al. Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita. **Cerâmica**, v. 62, p. 215-223, 2016.

RYKUSOVA, N. et al. Study of the properties of drill cuttings at their use as technogenic raw materials for the production of building ceramics. **Science Rise**, v.66, n.1, 2020.

SANTOS, J. M. Optimization of the batch decontamination process of drill cuttings by microwave heating. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v.163, p.349-358, 2018. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.01.003

SENTENA, J. A. A. et al. **Degradação de revestimentos de argamassa com finos de resíduos de concreto por ciclos térmicos**. Ambiente Construído, v.18, n.1, 2018. https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000100217

SHEHATA, N.; **Geopolymer concrete as green building materials: Recent applications, sustainable development and circular economy potentials**. Science of The Total Environment, v.836, 2022.

SHETTIMA, A. U. et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 72-79, 2016.

SHU, X. et al. Superimposed hydration exothermic model of cement slurry considering different reaction rates of various active substances. **Construction and Building Materials**, v.372, 2023. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130783

TAYLOR, H. F. W. Cement chemistry. **Thomas Telford Publishing**, 1997. https://doi.org/10.1680/cc.25929

TERRONES, L. A. S. et al. **Effect of the use of recycled glass on concrete design**. Revista Universidad y Sociedad, v. 14, n. 1, 2022.

TOKACH, Yu E. et al. Utilization of Drilling Waste in the Production of Construction Materials. In: **International Conference Industrial and Civil Construction**. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 210-215.

US EPA; Statistical analyses supporting final effluent limitations guidelines and standards for synthetic-based drilling fluids and other non-aqueous drilling fluids in the oil and gas extraction point source category. **US Environmental Protection Agency**, Washington, DC, 2000.

VIANA, Q. S. et al. Physical, mechanical, and thermal properties of concrete roof tiles produced with vermiculite. **Environmental Science and Pollution Research**, v.29, p. 48964-48974, 2022.

VILELA, A. P. Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. **Construction and Building Materials**, v.262, 2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120883

VLASOV, A. S.; PUGIN, K. G.; SURKOV, A. A. Geoecological assessment of the technology for using drilling waste in the composition of asphalt-concrete (Russian). **OIJ**, v.12, p.139-141, 2020. https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-12-139-142

WANG, A.; CAO, S.; YILMAZ, E. Influence of types and contents of nano cellulose materials as reinforcement on stability performance of cementitious tailings backfill. **Construction and Building Materials**, v. 344, p. 128179, 2022.

WANG, X.; CHIN, C. S.; XIA, J. Material Characterization for Sustainable Concrete Paving Blocks. **Applied Sciences**, v. 9, n.6, 2019. https://doi.org/10.3390/app9061197

YANG, J. et al. A novel supplementary cementitious material based on calcined drill cuttings with waste glass to accelerate cement hydration. **Materials Chemistry and Physics**, v. 301, 2023. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127679

YANG, J. et al. Eco-friendly treatment of low-calcium coal fly ash for high pozzolanic reactivity: A step towards waste utilization in sustainable building material. **Journal of Cleaner Production**, v. 238, 117962, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117962

YEO, J. S. et al. **An overview on the properties of eco-friendly concrete paving blocks incorporating selected waste materials as aggregate.** Environmental Science and Pollution Research, v.28, p. 29009-29036, 2021.

YU, F. Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v.209, p. 463-475, 2019.

ARTIGO 2 - EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR RESÍDUOS INDUSTRIAIS POZOLÂNICOS SOBRE AS PROPRIEDADES DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO

Artigo redigido conforme a NBR 6022 (ABNT, 2018) e formatado de acordo com o Manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.

RESUMO

O cascalho de perfuração gerado pela indústria de exploração do petróleo, tornou-se um sério problema ambiental, devido a contaminação pelo fluido utilizado no processo de perfuração. O seu descarte no ambiente só é aceito quando apresenta concentrações de base orgânica menores que 6,9%, no entanto para atingir os valores aceitos pelos órgãos ambientais o cascalho necessita passar por alguns tratamentos, dificultando a gestão do resíduo e necessitando de alternativas mais viáveis para uma correta destinação. A agroindústria também gera grandes quantidades de resíduos, dentre eles as cinzas, que são originadas após a incineração de diversos materiais como o bagaço de cana de açúcar e o eucalipto, para produção de energia. Essas cinzas são destinadas à aterros ou são descartadas inadequadamente no meio ambiente, causando diversos impactos ambientais. A utilização de cinzas no concreto como substituição parcial do cimento vem ganhando popularidade devido às melhorias em suas propriedades, combinadas com benefícios ecológicos e de custo. Porém sua eficiência ainda é questionável e variável, sendo necessária mais avaliações na produção de diferentes materiais, como em blocos de concreto para pavimentação. O aproveitamento dos resíduos é, sem dúvida, uma estratégia chave para o desenvolvimento sustentável. A indústria de cimento gera impactos significativos no meio ambiente e para minimizar os efeitos adversos da sua produção é muito importante avaliar o potencial de substituição do cimento por outros materiais com características pozolânicas, como subprodutos de diferentes indústrias, que podem manter ou até mesmo melhorar as propriedades dos materiais cimentícios. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades físico-mecânicas, microestruturais e durabilidade de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduo de cascalho de perfuração e cinzas de eucalipto e bagaço de cana em substituição ao cimento. Os resíduos foram caracterizados quanto à granulometria, densidade, pozolanicidade e inibição. O cascalho foi caracterizado ainda quanto ao teor de óleo, água e sólidos. Foram produzidos blocos de concreto substituindo 10 e 20% do cimento por cascalho de perfuração, cinzas de eucalipto e cinza de bagaço de cana, além do tratamento controle. Os blocos foram confeccionados por vibrocompressão, para adquirir o tamanho e forma desejado e foram caracterizados quanto à resistência à compressão, absorção de água, densidade aparente, porosidade aparente, caracterização microestrutural e durabilidade. A substituição do cimento pelos resíduos industriais afetou negativamente as propriedades físicas e mecânicas dos blocos de concreto devido à maior inibição das reações de hidratação e o menor recobrimento das partículas, devido ao grau de finura apresentado pelos resíduos. O envelhecimento acelerado gerou perda de aderência e formação de poros e fissuras, no entanto proporcionou através dos ciclos de molhagem uma hidratação continuada, melhorando a resistência à compressão dos blocos. A substituição de 20% de cimento por cinzas de bagaço de cana não é indicada para produção de blocos de concreto para pavimentação.

Palavras-chave: Cascalho de perfuração. Cinzas. Materiais Sustentáveis. *Pavers*. Compósitos Cimentícios.

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o segundo material mais consumido no mundo depois da água, consequentemente, o cimento Portland, principal matéria-prima do concreto, é a substância manufaturada mais consumido no planeta (VIJAYAN et al., 2020).Sua produção resulta em altas emissões de gases de efeito estufa (GEE), contribuindo com aproximadamente 7,8% das emissões de óxido de nitrogênio e 4,8% das emissões de óxido de enxofre, além de materiais particulados (MILLER; MOORE, 2020). A estimativa é que a demanda por concreto e cimento continuará a aumentar, necessitando de estratégias para limitar os impactos causados pela sua produção (HABERT et al., 2020).

A indústria petrolífera tem um papel essencial, indispensável e dinâmico a desempenhar na matriz energética mundial, no entanto gera grandes volumes de resíduos líquidos e sólidos nocivos ao meio ambiente e à saúde pública, considerados difíceis de gerenciar (KAZAMIAS; ZORPAS, 2021). O cascalho de perfuração está entre os resíduos mais preocupantes devido a quantidade gerada e aos contaminantes orgânicos e inorgânicos presentes no material. Esses contaminantes advém dos fluidos utilizados nas operações de perfuração, responsáveis por levantar os cascalhos da perfuração até a superfície, resfriar e lubrificar as brocas, dentre outras funções (DEVILLE, 2022; MENESES; PAULA, 2015; PEDROSA; SAASEN; YTREHUS, 2021).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica esse tipo de resíduo como Classe I (perigosos), por apresentar alta toxicidade, corrosividade e reatividade (PEREIRA et al., 2022) e como parte do processo global de licenciamento todos os operadores são obrigados a realizar avaliações ambientais rigorosas para determinar os riscos do seu descarte e necessidade de tratamento para correta destinação (NJUGUNA et al., 2022).

O descarte do cascalho no mar só pode ser realizado quando a concentração de base orgânica aderida está abaixo de 6,9%, segundo o IBAMA (2018), caso contrário é preciso trata-lo para que essa concentração seja reduzida. No entanto, os custos para realização do tratamento e para destinação final do resíduo tem sido um grande problema enfrentado pelo setor petroleiro, havendo a necessidade de dar outra destinação que não impacte o meio ambiente e que contribua para o desenvolvimento sustentável (MWAURAH et al., 2019; NJUGUNA et al., 2022).

Assim como o setor petroleiro, o setor agrícola também leva a geração massiva de resíduos que necessitam de uma correta destinação. Grandes quantidades de resíduos de

biomassa dos subprodutos da colheita (folhas, palha, caule, dentre outros) são geralmente depositadas em aterros ou usados como fertilizantes ou combustível de biomassa (CHEN et al., 2023; HUANG et al., 2023; SIVAKUMAR; BOZZO et al., 2023).

Quando esses resíduos lignocelulósicos são utilizados na produção de energia, apesar de ser considerado uma produção de energia mais sustentável, produz um resíduo importante denominado cinza de biomassa. A geração de grande quantidade de cinzas tem trazido preocupação em relação ao seu gerenciamento, devido aos impactos ambientais que podem ser causados no ecossistema com o seu descarte inadequado (MUNAWAR et al., 2021).

Esses resíduos industriais, como o cascalho de perfuração e as cinzas de biomassa podem ter níveis aceitáveis de atividade pozolânica dependendo de sua composição química, das condições de produção e do nível de finura (DANISH et al., 2023; DEMING; CHAOGIANG, 2021; OLATOYAN et al, 2023; WANG et al., 2022). A utilização de pozolanas em materiais cimentícios, como concreto e argamassa, minimiza custos e consumo de energia, aumenta a resistência mecânica e a durabilidade da matriz. A contribuição total das pozolanas pode ser através do efeito físico ou de enchimento que é atribuído pela finura das partículas e ao efeito químico ou pozolânico que é atribuído pela reação pozolânica (KHAN et al., 2017; ŠUPIĆ et al., 2021; THOMAS et al., 2021).

Vários estudos foram realizados sobre a substituição do cimento por materiais residuais, como cinzas agrícolas, cinza volante, escória granulada moída de alto forno, microssílica (PANDEY; KUMAR, 2022), resíduo de vidro (ESMAEILI; AL-MWANES, 2021), lama de cal (BORINAGA-TREVINO et al., 2021), sacos plásticos reciclados (ABDEL TAWAB, 2020); pó de resíduo de mármore (GHORBANI et al., 2021), dentre outros. No entanto, os artigos relatam sucesso variável com a incorporação de tais materiais em produtos cimentícios, devido a sua natureza inconsistente. Portanto, compreender melhor as variáveis que afetam as propriedades e a qualidade das matrizes cimentícias é fundamental para prever a utilização bem-sucedida de resíduos na produção de novos materiais sustentáveis.

Este trabalho investigou a presença de característica pozolânica no cascalho de perfuração de poço de petróleo e nas cinzas de bagaço de cana e eucalipto e analisou suas influências nas propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e de durabilidade dos blocos de concreto para pavimentação com substituição parcial do cimento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização do cascalho de perfuração e das cinzas

Os blocos foram produzidos com cascalho de perfuração *offshore* de poço de petróleo, doado pela empresa Petrobras S.A, localizada na Bacia de Santos, Brasil. Conforme informações da empresa doadora, o cascalho de perfuração não passou por nenhum tratamento para diminuir a concentração de base orgânica e durante a extração do petróleo, foi utilizado um fluido à base de olefina interna. Utilizou-se cinzas de eucalipto e bagaço de cana, geradas a uma temperatura superior à 800 ºC, produzidas por uma indústria de cerâmica e de produção de álcool e açúcar, respectivamente, localizadas no sul de Minas Gerais, Brasil. Foram utilizados agregados graúdos (brita 0), agregados miúdos (areia fina e pó de pedra) e cimento CPII-F adquiridos no sul de Minas Gerais, Brasil.

2.1.1 Análise granulométrica

O ensaio de granulometria que integra o peneiramento (fração grossa) e a sedimentação (fração fina) foi realizado para caracterização física do cascalho de perfuração e das cinzas de eucalipto e bagaço de cana, seguindo os procedimentos da NBR 7181 (ABNT, 2018). Foram determinadas as proporções relativas em massa (%) dos tamanhos dos grãos que constituem os materiais.

2.1.2 Ensaio de pozolanicidade

Com o intuito de avaliar o índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias, foi realizado o ensaio de pozolanicidade com os resíduos (cascalho de perfuração *offshore*, cinza de eucalipto e cinza de bagaço de cana), de acordo com as especificações da norma NBR 5752 (ABNT, 2014). A ruptura dos corpos de prova foi realizada em uma máquina universal de ensaio, utilizando uma velocidade de carregamento de 0,25 MPa/s, conforme NBR 5752 (ABNT, 2014).

2.1.3 Teste de inibição

Através da evolução da temperatura de hidratação do cimento avaliou-se a aptidão do cascalho de perfuração e das cinzas com a matriz de compósitos cimentícios, segundo o método proposto por Hofstrand et al. (1984). Cabos termopares do tipo K foram acoplados em um coletor de dados, realizando leituras de temperaturas em intervalos de um minuto, durante 24 horas.

Cada tratamento (mistura proposta para a produção dos blocos) recebeu um cabo termopar e foi inserido à um sistema hermético. Foram adaptadas cinco caixas de isopor no interior da caixa térmica, onde foram depositadas as misturas, completamente isolada por lã de vidro. Os cabos atravessam a tampa da caixa e são conectados à amostra na parte interna dos recipientes de isopor. Para a preparação das misturas, os materiais foram homogeneizados, seguindo os mesmos traços utilizados na produção dos blocos. Posteriormente, a mistura foi repassada para as caixas de isopor, os cabos termopares foram introduzidos na mistura e as caixas foram lacradas. Em seguida foram colocados dentro da caixa térmica vedada e iniciou-se a coleta de dados.

Utilizando a Equação 1, proposta por Hostrand et al. (1984), foi possível calcular o índice de inibição. Para classificação da compatibilidade do material adicionado ao cimento foi utilizada a classificação proposta por Okino et al. (2004), sendo o índice de inibição (I) classificado em baixo ($I < 10$), intermediário ($10 \leq I < 50$), alto ($50 \leq I \leq 100$) e muito alto ($I > 100$).

2.1.4 Teor de óleo, água, sólidos e densidade

Para determinação dos teores de óleo, água e sólidos presente no cascalho de perfuração foi utilizada o método da *American Petroleum Institute* API-RP-13B-2 (API, 2014) que recomenda a prática para teste de amostras à base de fluido oleoso de perfuração. Através da vaporização da água e do óleo de um volume de amostra conhecido, determinou-se as porcentagem de cada componente (óleo, água e sólidos) através da subtração do volume perdido de material, pelo volume inicial da amostra.

Para a determinação da densidade aparente dos resíduos (cascalho de perfuração, cinza de eucalipto e cinza de bagaço de cana) foi utilizada a NBR NM 52 (2009).

2.2 Produção dos blocos de concreto para pavimentação

O traço controle para a produção dos blocos de concreto teve como objetivo atender a resistência característica mínima exigida para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha, apresentando aos 28 dias um resistência à compressão acima de 35 MPa. O traço foi definido diante dos traços comerciais fornecidos por indústrias produtoras de *pavers* localizadas na região do sul do estado de Minas Gerais, Brasil. O traço em massa adotado foi de 54,9% de pó de pedra, 16,5% de areia fina, 16,5% de brita 0, 12,1% de cimento (CP II – F), com relação A/C (água/cimento) de 0,30.

Além do tratamento controle foram produzidos seis tratamentos, sendo avaliado duas porcentagens de substituição para cada resíduo. As porcentagens de substituição do cimento utilizadas foram de 10 e 20% (massa/massa) por cascalho de perfuração ou cinza de eucalipto ou cinza de bagaço de cana de açúcar.

Adicionou-se a brita 0, o pó de pedra, a areia fina, o cimento e o resíduo na betoneira com capacidade de 400 litros, homogeneizou-se os materiais secos e em seguida acrescentou-se a água, homogeneizando novamente a mistura, durante aproximadamente 3 minutos. Em seguida o material foi transferido para a vibro prensa, distribuído uniformemente pelas formas e realizou-se o processo de vibrocompressão. Para cada tratamento foram produzidos 24 corpos de prova, com dimensões aproximadas de 10x20x8 cm (largura x comprimento x espessura, respectivamente), sendo confeccionados 12 blocos por vez, quantidade de corpos de prova que a máquina vibro prensa produz.

Para realização da cura, os blocos após a produção foram mantidos em câmara úmida por 7 dias e depois em temperatura ambiente por 21 dias. Após esse período de 28 dias, os blocos foram caracterizados quanto as propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e de durabilidade.

2.3 Envelhecimento acelerado

Para avaliar as propriedades dos blocos após a exposição a ação do tempo, foi realizado o envelhecimento acelerado seguindo os requisitos descritos pela norma NBR 13554 (ABNT, 2012) que classifica o material por molhagem e secagem. Os blocos passaram por seis ciclos de molhagem e secagem, sendo que em cada ciclo os blocos ficaram por 5 horas imersos em água e posteriormente foram secos em temperatura de 71±2°C por período de 42h, e em seguida foram avaliados quanto as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais.

2.4 Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos blocos de concreto para pavimentação

Os blocos foram ensaiados aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado, para determinação de suas propriedades físicas e mecânicas. A Tabela 1 apresenta os testes e normas utilizadas para avaliação dessas propriedades.

Seguindo os requisitos estipulados pela NBR 9781 (ABNT, 2013), para o teste de compressão foram utilizados seis corpos de prova para cada tratamento, já para os testes físicos foram utilizados três corpos de prova para cada tratamento.

Tabela 1 - Ensaios e normas de execução.

Ensaio	Norma
Resistência à compressão	NBR 9781 (2013)
Absorção de água	ASTM C948-81 (2023)
Densidade aparente	ASTM C948-81 (2023)
Porosidade Aparente	ASTM C948-81 (2023)

Fonte: Da autora (2024).

2.5 Caracterização microestrural

A caracterização microestrutural dos blocos de concreto para pavimentação confeccionados com os diferentes tipos de materiais pozolânicos (cascalho de perfuração, cinzas de eucalipto e bagaço de cana) foi realizada por meio de ensaios de microscopia digital, utilizando um equipamento da marca CoolingTech, modelo U500X. Os ensaios foram realizados em amostras retiradas de parte do corpo de prova após 28 dias e envelhecidas, com dimensões de aproximadamente 5 cm x 5 cm, sem a necessidade de preparo.

2.6 Análise estatística

Para a análise das propriedades dos blocos de concreto para pavimentação, foi realizado um delineamento inteiramente casualizado usando um esquema fatorial 3 x 2 (três tipos de resíduos – cascalho de perfuração, cinza de eucalipto e cinza de bagaço de cana combinados com duas porcentagens (10 e 20%), e um tratamento controle sem resíduo. O teste de Dunnett, a um nível de significância de 5%, foi realizado para comparar cada tratamento utilizando

resíduos com o tratamento controle (sem resíduo). Na avaliação da interação entre os fatores material e porcentagem de substituição, assim como na avaliação de cada fator separadamente, quando não foi observada interação, foi realizada a análise de variância e o teste da média de Scott-Knott, utilizando o programa SISVAR, ambos com nível de significância de 5%. Posteriormente os dados foram confrontados com as normas de comercialização para compressão simples (NBR 9781, 2013) e absorção de água (NBR 9781, 2013).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

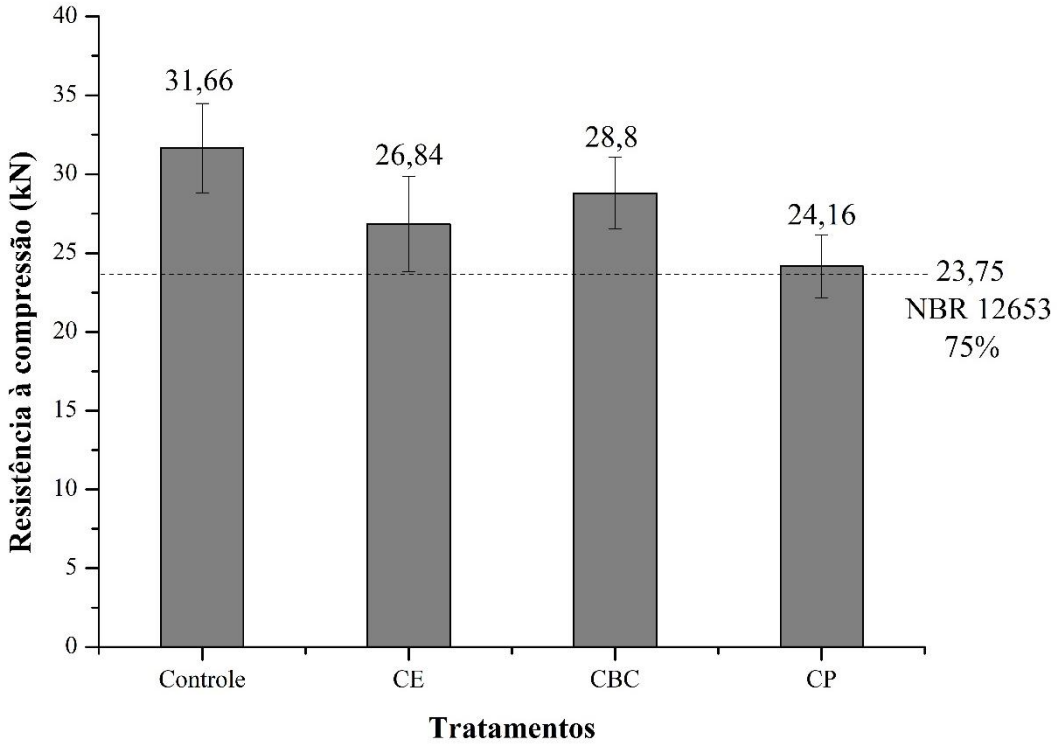
3.1 Caracterização dos resíduos

Os resultados de pozolanicidade, inibição de cura do cimento e granulometria do cascalho de perfuração *offshore*, cinza de eucalipto e cinza de bagaço de cana estão apresentados a seguir. Também estão apresentados os resultados de teor de água, óleo, sólidos e densidade do cascalho de perfuração, bem como a densidade das cinzas.

3.1.1 Análise de pozolanicidade dos resíduos

Mediante o teste de resistência à compressão para análise do índice de atividade pozolânica, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 2, para a argamassa referência (Controle) e para as argamassas com substituição parcial do cimento pelos resíduos cascalho de perfuração (CP); cinza de eucalipto (CE) e cinza de bagaço de cana (CBC).

Figura 2 - Índice de atividade pozolânica dos resíduos



Fonte: Da autora (2024).

Um material é considerado pozolânico quando o valor de resistência à compressão das argamassas produzidas com 25% de substituição do cimento pelo material avaliado, atinge no mínimo 75% da resistência da argamassa controle (ASTM C-618, 2019; NBR 12653, ABNT 2014). Dessa forma, o valor mínimo para a análise foi de 23,75 MPa, assim todos os resíduos apresentaram valores superiores, demonstrando que podem ser considerados materiais pozolânicos e apresentam potencial para substituir o cimento. Dentre os resíduos, o bagaço de cana apresentou o maior índice de pozolanicidade de (90,96%), seguido da cinza de eucalipto (84,78%) e do cascalho de perfuração (76,31%).

Wang et al. (2022) avaliando a atividade pozolânica do cascalho de perfuração encontraram um índice de pozolanicidade de 59%, abaixo do valor encontrado nesse trabalho. Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009) avaliando o efeito da temperatura de calcinação na atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, variando de 400 a 800°C, observaram que o índice pozolânico das cinzas produzido pela queima a 400, 500 e 600 °C aumenta com o aumento das temperaturas de calcinação devido à remoção significativa de carbono. Os valores encontrados para os respectivos tratamentos foram, 28%; 73% e 77%.

Couto et al. (2019) avaliando a inclusão da cinza de eucalipto como aditivo mineral em concreto, obtiveram para as cinzas de eucalipto um índice de atividade pozolânico de 61%, não sendo considerado um material com potencial pozolânico. Os autores atribuíram a falta de atividade pozolânica à dois aspectos. Primeiro, a distribuição granulométrica do resíduo, uma vez que a área superficial para a cinza apresentou-se muito inferior à de outros materiais pozolânicos, sendo que quanto mais fino o material, maior a quantidade de superfície reativa disponível. Em segundo lugar, a baixa reatividade pode estar relacionada à composição química do material, que depende profundamente da presença de fases reativas.

O efeito pozolânico do material gera capacidade de reduzir o calor de hidratação do cimento, de inibir a reação álcali-agregado e elevar a resistência ao ataque por cloretos e sulfatos, ou seja, eleva a durabilidade do concreto com relação a muitos agentes agressivos (MACEDO et al., 2021; VASCONCELOS, 2013).

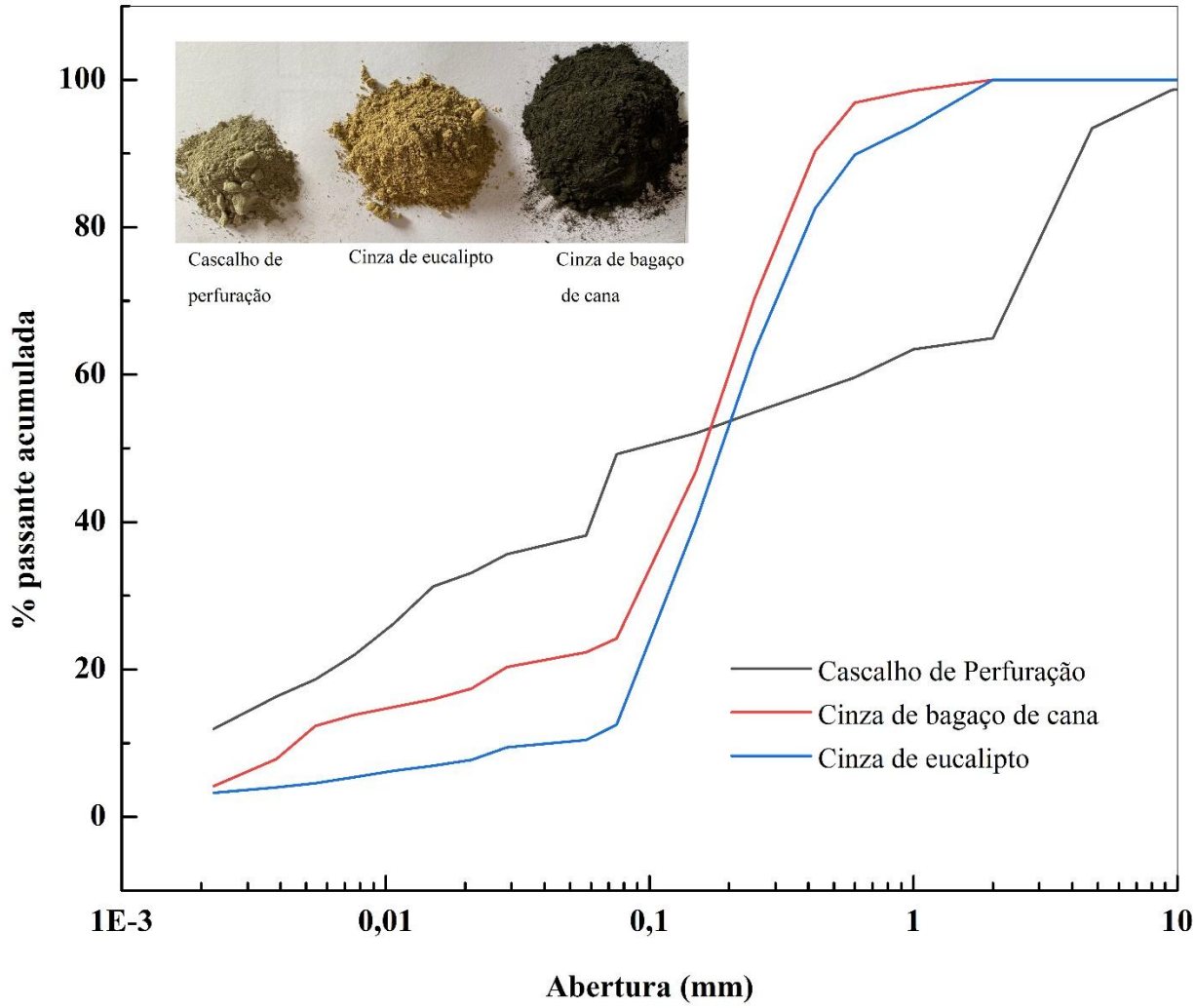
Katare e Madurwar (2021) demonstraram que 50, 45 e 25% de cimento podem ser substituídos por cinzas de bagaço de cana de forma otimizada na fabricação de concreto comum, padrão e de alta resistência, respectivamente, sem afetar suas propriedades. Bonfim e Paula (2021) mostraram que uma argamassa produzida com 30% de cinza de casca de arroz e 10% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar ou cinza de cavaco de eucalipto poderia ser utilizada em substituição ao cimento. Aboutabikh et al. (2016) avaliando as propriedades de material

cimentício incorporando resíduo de cascalho de perfuração, concluiu que a substituição de até 20% do cimento pelo resíduo não afeta adversamente as propriedades da argamassa.

3.1.2 Análise granulométrica

Na Figura 3 estão representadas as curvas granulométricas obtidas para as porcentagens passantes de cascalho de perfuração, cinza de eucalipto e cinza de bagaço de cana.

Figura 3 – Curva granulométrica dos resíduos



Fonte: Da autora (2024).

As cinzas de eucalipto, cinza de bagaço de cana e o cascalho de perfuração obtiveram para dimensão máxima característica (DMC) os valores de 1,2; 0,6 e 9,5 mm, respectivamente. A maior porcentagem das partículas de cinza de eucalipto apresentam dimensões entre 0,075 e

0,15 mm, já das cinzas de bagaço de cana e do cascalho de perfuração apresentaram dimensões menores que 0,075 mm. Apesar da alta porcentagem de partículas menores que 0,075 mm, o cascalho de perfuração apresentou maior módulo de finura (2,13), devido à presença de partículas maiores comparada as cinzas, que apresentaram módulo de finura de 0,87 para as cinzas de bagaço de cana e 1,13 para as cinzas de eucalipto, sendo que quanto maior o módulo de finura, mais graúdo é o agregado.

A substituição do cimento por materiais pozolânicos é fortemente influenciada pela granulometria do material substituto, sua atividade pozolânica é potencializada com a diminuição do tamanho de suas partículas (CORDEIRO et al., 2018; ZHAO et al., 2020). A menor granulometria da cinza de bagaço de cana comparada a cinza de eucalipto gerou maior índice de pozolânicidade. No entanto, apesar da maior parte das partículas de cascalho de perfuração apresentar granulometria menor que 0,075 mm, a presença de partículas maiores e consequentemente maior módulo de finura influenciou para uma menor atividade pozolânica, observadas na Figura 2.

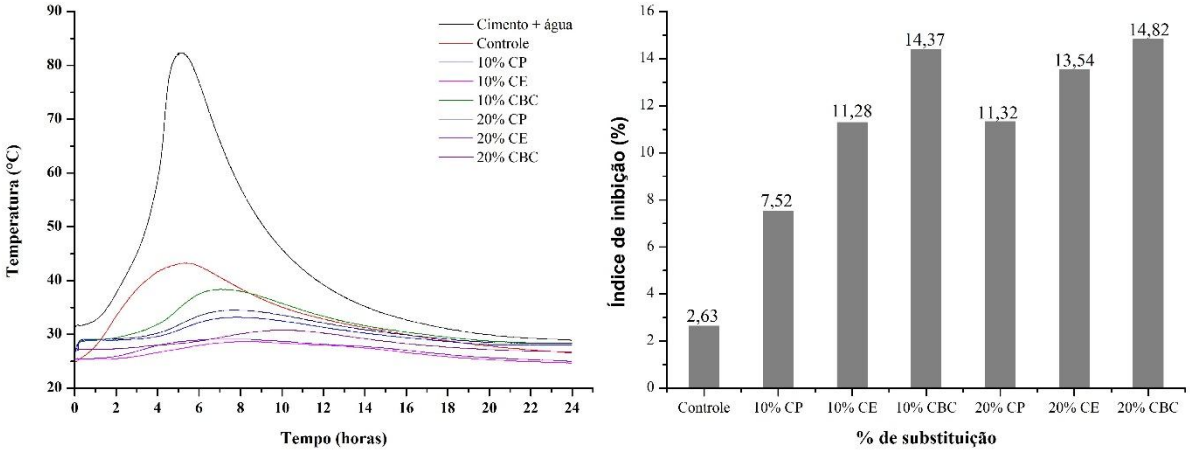
Sampaio, Souza e Gouveia (2014) encontraram para cinzas de bagaço de cana de três diferentes espécies módulo de finura de 1,25; 1,15 e 1,26 e para ambas as cinzas uma DMC de 1,2 mm. Acordi et al. (2020) encontraram para as cinzas de madeira um módulo de finura de 1,5 e uma DMC de 2,36mm. Rollakanti et al. (2020) encontraram para as cinzas de madeira um módulo de finura de 5,6. Foroutan et al. (2018) encontraram para quatro diferentes amostras de cascalho de perfuração um módulo de finura de 2,69; 3,65; 4,13 e 4,18.

3.1.3 Análise de aptidão

Na Figura 4 estão apresentadas as curvas obtidas pelo ensaio de inibição da cura do cimento, do tratamento referência constituído por cimento + água, do traço controle dos blocos e dos traços com substituição do cimento pelos resíduos nas porcentagens de 10 e 20%. Também está representado os índices de inibição convertidos através das curvas de hidratação de acordo com a metodologia de Hofstrand et al. (1984).

Figura 4 – Influência dos resíduos pozolânicos e de suas concentrações na cura do cimento.

A) B)



A) Curva de inibição do cimento + água e dos tratamentos utilizados na produção dos blocos de concreto para pavimentação.B) Índice de Inibição dos tratamentos utilizados para produção dos blocos de concreto para pavimentação.

Fonte: Da autora (2024).

A pasta de cimento apresentou uma temperatura máxima de hidratação inicial de 82,31ºC, a qual ocorreu em um tempo de 5,00 horas de ensaio. Observa-se uma redução na temperatura de hidratação e um aumento no tempo necessário para atingir a temperatura máxima nas formulações utilizadas para produção dos blocos de concreto. A menor redução na temperatura foi observada para o tratamento controle, onde a temperatura máxima de hidratação foi de 43,29ºC, num tempo de ocorrência de 5,40 horas, enquanto a maior redução na temperatura foi observada para o tratamento com 10% de cinza de eucalipto, num tempo de ocorrência de 7,58 horas. Esse aumento se deve a menor reatividade dos agregados e dos resíduos, que podem estar relacionados à maior granulometria, comparado ao cimento (SUN et al., 2022).

Convertendo os dados obtidos em índices de inibição, de acordo com Okino et al. (2004), observa-se que o controle e o tratamento com 10% de cascalho de perfuração *offshore* apresentaram índice de inibição baixo, enquanto os demais tratamentos que tiveram maior interferência na hidratação do cimento, foram classificados como materiais de inibição intermediária.

Os testes mostraram que os teores de adição de resíduos influenciam diretamente, retardando o processo de hidratação, o que está relacionado a maior quantidade de resíduo,

proporcionando uma diluição do cimento. Resultado mais evidente quando comparado as curvas obtidas para cada resíduo em relação às porcentagens de substituição, onde verifica-se um comportamento diferente das curvas de inibição dos tratamentos com cinza de bagaço de cana, que apresenta-se mais distante uma da outra. Ao substituir o cimento com 20% de cinza de bagaço de cana a temperatura máxima de hidratação diminuiu e o tempo de cura aumentou consideravelmente em comparação ao tratamento com 10% de CBC. Esse resultado está relacionado à menor densidade da cinza de bagaço de cana (0,29 $g.cm^{-3}$) comparada aos demais resíduos, cinza de eucalipto (0,56 $g.cm^{-3}$) e cascalho de perfuração (1,48 $g.cm^{-3}$) que foram substituídos na matriz cimentícia em massa, incluindo portanto maior quantidade de cinzas de bagaço de cana no bloco de concreto, resultando numa maior inibição. O efeito de diluição do cimento aumenta à medida que aumenta a taxa de substituição por outro material substituto. Naturalmente, menos cimento implica menos cimento hidratado, consequentemente maior inibição (SOBREABIKH, SOLIMAN E EL NAGGAR, 2016).

Leonard, Roy e Stegemann (2010) avaliando a interação entre o ligante (cimento) e o cascalho de perfuração, observaram que o resíduo diminuiu a quantidade de produto de hidratação do cimento, devido à presença de compostos orgânicos. Katende et al. (2020) relataram uma incompatibilidade do fluido à base de óleo, utilizado na perfuração de poços e presente no cascalho de perfuração, com o cimento obtendo com a mistura uma taxa de hidratação mais lenta. Os autores destacaram que devido à essa incompatibilidade dos produtos forma-se uma rede de microfraturas, causando aumento da permeabilidade e defeitos que levam à redução da resistência da pasta de cimento. A hidratação do cimento Portland é um processo quimicamente sensível, impactado pela temperatura, quantidade de água e presença de quaisquer contaminantes potenciais.

Arif, Clark e Lake (2016) avaliando a inclusão de cinza de bagaço de cana na produção de concreto observou uma reação de hidratação mais lenta para a matriz produzida com resíduo. Os autores observaram que em pequenas quantidades (5%) a cinza de bagaço de cana tem propriedades benéficas para a hidratação do cimento, mas em concentrações mais elevadas (10; 15 e 20%) o efeito diluente supera as propriedades benéficas.

3.2 Análise física dos blocos de concreto para pavimentação

Na Tabela 2 estão apresentados os valores médios de densidade aparente para cada um dos tratamentos avaliados, antes e após o envelhecimento acelerado. Assim como também a

variação dos valores médios dos blocos de concreto produzidos com resíduos em relação aos blocos controle.

Tabela 2 – Densidade aparente dos blocos de concreto para pavimentação.

Tratamento	Densidade Aparente (g/cm³)	Δ (%)	Densidade Aparente Envelhecido (g/cm³)	Δ (%)
10% CP	1,71 $^{(0,01)}$ * a	-0,58	1,67 $^{(0,01)}$ * a	-1,20
20% CP	1,70 $^{(0,00)}$ * a	-1,16	1,68 $^{(0,02)}$ * a	-0,60
10% CE	1,69 $^{(0,01)}$ * a	-1,74	1,67 $^{(0,00)}$ * a	-1,20
20% CE	1,67 $^{(0,01)}$ * a	-2,91	1,66 $^{(0,02)}$ * a	-1,80
10% CBC	1,71 $^{(0,03)}$ * a	-0,58	1,69 $^{(0,02)}$ ns a	0,00
20% CBC	1,69 $^{(0,00)}$ * a	-1,74	1,65 $^{(0,01)}$ * a	-2,40
Controle	1,72 $^{(0,01)}$ a		1,69 $^{(0,00)}$ a	

*Difere estatisticamente pelo Teste de Dunnett (α=0.05) do tratamento controle; ns Não difere estatisticamente pelo teste de Dunnett (α=0.05) do tratamento controle. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de média Scott-knott, a um nível de significância de 5%. Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Fonte: Da autora (2024).

Todos os tratamentos aos 28 dias de cura apresentaram efeito significativo em comparação ao tratamento controle, apresentando uma diminuição na densidade aparente entre -0,58 a -2,91%. A diminuição da densidade está relacionada a menor densidade dos resíduos em comparação ao cimento (BHEEL et al., 2022; ZAREEI; AMERI; BAHRAMI, 2018).

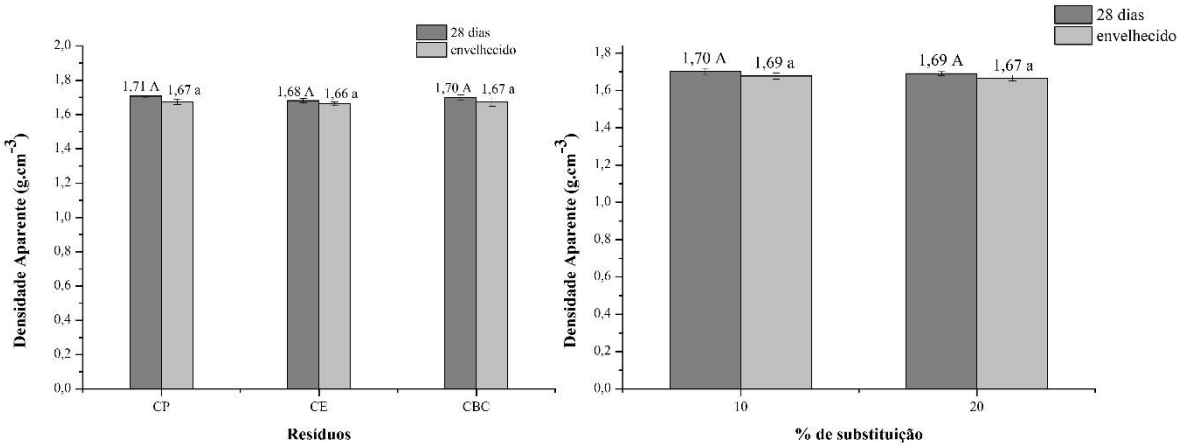
Para os blocos de concreto envelhecidos, os tratamentos apresentaram diminuição significativa na densidade, com variação entre -0,60 a -2,40%, com exceção do tratamento com 10% de bagaço de cana que não apresentou efeito significativo em relação ao controle. Resultado relacionado à maior pozolanicidade da cinza de bagaço de cana. É possível perceber que apesar da elevada atividade pozolânica da cinza de bagaço de cana, quando substituído em maiores porcentagens gera maior inibição na hidratação do cimento, afetando a densidade dos blocos. Akram et al. (2009) observaram um aumento na densidade do concreto com adição de 15% de cinza de bagaço de cana, resultado atribuído à capacidade de preenchimento de microporos. No entanto, os autores observaram uma redução na densidade com substituições além de 20%, que poderia estar relacionado ao preenchimento completo dos poros quando a quantidade de cinza atinge 15%. Devido à distinção na massa específica da cinza do bagaço e do ligante, a densidade do concreto reduz para a substituição acima de 15%.

Comparando os blocos de concreto aos 28 dias de cura com os envelhecidos dentro de cada tratamento, observa-se que não houve diferença estatística com relação à densidade. Apesar do processo de envelhecimento aumentar a formação de poros, o processo contínuo de hidratação do

cimento pode contribuir para aumentar e/ou manter a densidade do compósito (MADHKHAN; SAEIDIAN, 2021; MARCEAU et al., 2017).

Com relação aos resíduos (cascalho de perfuração *offshore*, cinza de eucalipto e cinza de bagaço de cana) e as duas porcentagens (10% e 20%), não foi observada interação para a densidade aparente dos blocos aos 28 dias de cura e envelhecido. Na Figura 5 podem ser visualizados os valores médios de densidade aparente em função do tipo de resíduo e das porcentagens avaliadas, respectivamente. Não houve efeito do tipo de material pozolânico e da sua concentração sobre a densidade dos blocos aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado.

Figura 5 – Valores médios de densidade aparente em função dos resíduos e das porcentagens aplicadas nos blocos de concreto para pavimentação.



Letras maiúsculas comparam as médias aos 28 dias, já as letras minúsculas as médias obtidas após o envelhecimento. Médias seguidas de mesma letra, não diferem entre si pelo teste Scott-knott, a um nível de significância de 5%.

Fonte: Da autora (2024).

Dahiru et al. (2016) avaliando a substituição (10, 20 e 30%) de cimento por cinzas de madeira observaram um aumento na densidade de 0,74% com a substituição de 10% do cimento, no entanto para maiores porcentagens de cinzas, a densidade do compósito diminuiu em até 6,79%, os autores destacaram que a diminuição na densidade afetou a resistência à compressão, diminuindo-a. Chowdhury, Mishra e Suganya (2015) destacam que a menor massa específica da cinza de eucalipto em comparação ao cimento tende a reduzir a densidade do compósito cimentício.

Huang et al. (2022) avaliando a substituição do cimento por 10, 30 e 50% de cascalho de perfuração (massa/massa), observou uma diminuição na densidade do concreto produzido e grande quantidade de poros foi encontrada. Isto foi atribuído ao fato de que a incorporação de

cascalho aumentou a relação água-cimento efetiva da mistura e após a evaporação do excesso de água, um maior número de poros foi formado dentro das amostras de concreto.

Na Tabela 3 estão apresentados os valores médios da porosidade aparente dos blocos de concreto, antes e após o envelhecimento acelerado, para cada um dos tratamentos avaliados. Assim como também a variação dos valores médios dos blocos feitos com resíduos em relação aos blocos controle.

Tabela 3 – Porosidade aparente dos blocos de concreto para pavimentação.

Tratamento	Porosidade (%)	Δ (%)	Porosidade Envelhecido (%)	Δ (%)
10% CP	7,29 $^{(0,40)}$ ns a	0,55	9,73 $^{(0,86)}$ * b	5,08
20% CP	8,18 $^{(0,80)}$ * a	12,83	9,67 $^{(0,81)}$ * a	4,43
10% CE	8,78 $^{(0,39)}$ * a	21,10	9,79 $^{(0,37)}$ * a	5,72
20% CE	9,80 $^{(0,42)}$ * a	35,17	11,41 $^{(0,37)}$ * b	23,22
10% CBC	10,13 $^{(0,01)}$ * a	39,72	11,14 $^{(0,31)}$ * a	20,30
20% CBC	12,66 $^{(1,42)}$ * a	74,62	13,28 $^{(0,43)}$ * a	43,41
Controle	7,25 $^{(0,16)}$ a		9,26 $^{(0,77)}$ b	

*Difere estatisticamente pelo Teste de Dunnett (α=0.05) do tratamento controle; ns Não difere estatisticamente pelo teste de Dunnett (α=0.05) do tratamento controle. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de média Scott-knott, a um nível de significância de 5%. Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.
Fonte: Da autora (2024).

Para a propriedade porosidade aparente, somente o tratamento com 10% de cascalho de perfuração aos 28 dias não apresentou efeito significativo em comparação ao tratamento controle. Os demais tratamentos, aos 28 dias de cura e envelhecidos, apresentaram aumento na porosidade, com variação entre 0,55 à 74,62% e 4,43 à 43,41%, respectivamente. Resultado relacionado à menor inibição causada pela substituição de 10% de cascalho de perfuração (Figura 4), que promoveu uma maior hidratação do cimento e preenchimento dos espaços vazios na matriz, comparado aos demais tratamentos.

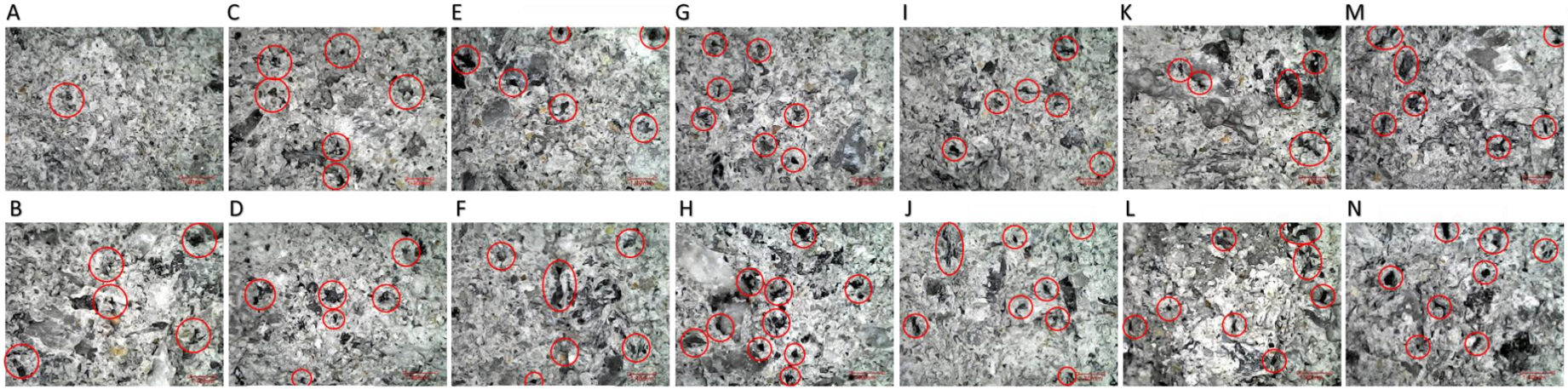
O aumento da porosidade dos blocos de concreto produzidos com substituição de 20% de cimento por cascalho de perfuração pode ser associado à presença de argilas hidrofílicas, do tipo bentonita, que em elevada concentração gerou retenção de maior quantidade de água na mistura, influenciando negativamente na hidratação do cimento, aumentando a quantidade de vazios na argamassa endurecida, como podemos observar na Figura 6 (KHONDAKER, 2000).

Em relação aos tratamentos utilizando cinzas, a maior porosidade está relacionada à microestrutura das cinzas, que são muito porosas e esponjosas e conforme observado com mais clareza para os blocos produzidos com cinza de bagaço de cana, quando adicionadas na matriz

em quantidades elevadas, devido a sua menor densidade, influencia diretamente na hidratação do cimento (maior inibição) e consequentemente na formação dos poros (JAMIL et al., 2016; LO, LEE, LO, 2021; ROBALO et al., 2021; SILVA et al., 2015).

Comparando os blocos de concreto após 28 dias de cura com os blocos envelhecidos dentro de cada tratamento, nota-se que apenas os tratamentos controle, 10% de cascalho de perfuração e 20% de cinza de eucalipto se diferenciaram estatisticamente. É possível observar nas micrografias (Figura 6) o aumento do número de poros nos blocos de concreto após os ciclos de envelhecidos, o que está relacionado a fragilização das ligações entre a matriz e os resíduos sofrida durante os ciclos de envelhecimento (HWANG; HUYNH, 2015).

Figura 6 - Micrografias dos blocos de concreto para pavimentação antes e após o envelhecido acelerado, evidenciando os poros.

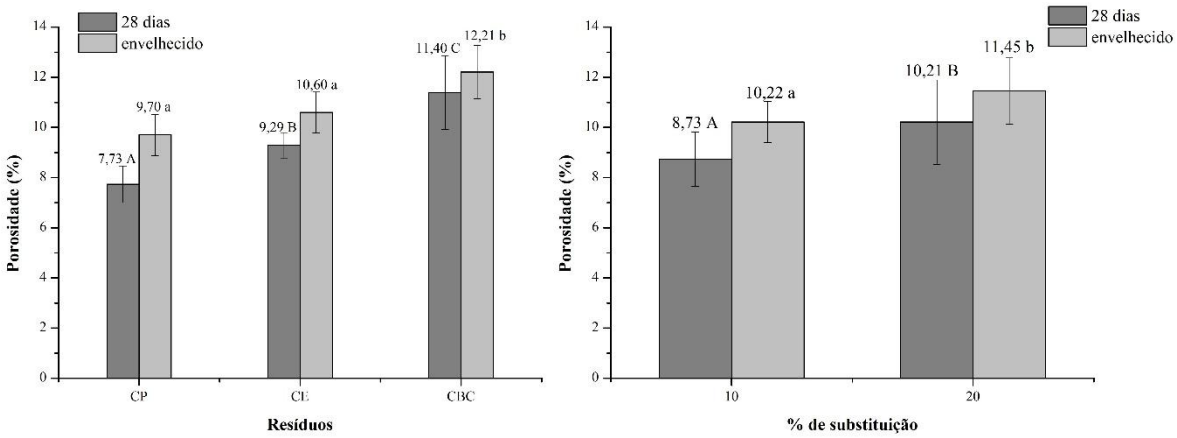


a) Controle aos 28 dias; b) Controle envelhecido; c) 10% de CP aos 28 dias; d) 10% de CP envelhecido; e) 20% de CP aos 28 dias; f) 20% de CP envelhecido; g) 10% de CE aos 28 dias; h) 10% de CE envelhecido; i) 20% de CE aos 28 dias; j) 20% de CE envelhecido; k) 10% de CBC aos 28 dias; l) 10% de CBC envelhecido; m) 20% de CBC aos 28 dias; n) 20% de CBC envelhecido.

Fonte: Da autora (2024).

Com relação aos resíduos (cascalho de perfuração *offshore*, cinza de eucalipto e cinza de bagaço de cana) e as duas porcentagens (10% e 20%), não foi observada interação para a porosidade aparente dos blocos aos 28 dias de cura e envelhecido. Na Figura 7 podem ser visualizados os valores médios de porosidade aparente em função do tipo de resíduo e das porcentagens avaliadas, respectivamente.

Figura 7 - Valores médios de porosidade aparente em função dos resíduos e das porcentagens aplicadas nos blocos de concreto para pavimentação.



Letras maiúsculas comparam as médias aos 28 dias, já as letras minúsculas as médias obtidas após o envelhecimento. Médias seguidas de mesma letra, não diferem entre si pelo teste Scott-knott, a um nível de significância de 5%.

Fonte: Da autora (2024).

Quando avaliada a porosidade aparente em função dos tipos de resíduos para os blocos de concreto aos 28 dias de cura, observa-se que os valores médios se diferenciaram estatisticamente, sendo os maiores valores de porosidade observados para os blocos feitos com cinzas de bagaço de cana, seguidos pelos blocos produzidos com cinzas de eucalipto e os menores valores de porosidade observado para os blocos produzidos com o cascalho de perfuração. Pode-se relacionar a maior porosidade ao índice de inibição encontrado para os materiais, a menor densidade e suas a granulometrias. Uma vez que devido à sua menor densidade foram aplicadas maiores quantidades de resíduos na mistura, combinado ao maior módulo de finura dos resíduos, gerou-se uma maior área superficial e menor recobrimento, proporcionando maior formação de poros (SAVADKOOHI; REISI, 2020).

Para os blocos de concreto após o envelhecimento, houve diferença estatística e os maiores valores de porosidade aparente foram observados para os blocos produzidos com cinza de bagaço de cana. Os tratamentos com cascalho de perfuração e cinza de eucalipto foram iguais estatisticamente. A menor densidade da cinza de bagaço de cana levou a inclusão de uma maior

quantidade de material, comparado aos demais resíduos, influenciando de maneira mais significativa a hidratação do concreto, gerando maior quantidade de poros na matriz. WU et al. (2022) destacam que se a taxa de substituição do cimento pela cinza de bagaço de cana for muito elevada, a diminuição substancial do teor de cimento no concreto pode resultar numa diminuição dos produtos de hidratação, e sem o preenchimento adequado do produto de hidratação, a porosidade do concreto aumenta.

Com relação à avaliação da porosidade em função das porcentagens de resíduos para os blocos aos 28 dias e envelhecidos, nota-se que houve diferença estatística entre os tratamentos e os maiores valores encontrados foram dos tratamentos utilizando 20% de resíduo. Esse resultado está relacionado a inibição causada na hidratação e cura do cimento por parte dos resíduos (Figura 4), uma vez que quanto maior a quantidade de resíduo, maior a inibição e consequentemente maior a formação de poros e absorção de água e menor a resistência mecânica (SOUZA et al., 2021).

Na Tabela 4 estão apresentados os valores médios da absorção de água dos blocos de concreto, antes e após o envelhecimento acelerado, para cada um dos tratamentos avaliados. Assim como também a variação dos valores médios dos blocos feitos com resíduos em relação aos blocos controle.

Tabela 4 – Absorção de água dos blocos de concreto para pavimentação.

Tratamento	**Absorção de Água (%)**	**Δ (%)**	**Absorção de Água Envelhecido (%)**	**Δ (%)**
10% CP	4,26 (0,22) ns a	0,24	5,83 (0,47) * b	3,19
20% CP	4,80 (0,46) * a	12,94	5,75 (0,43) * b	1,77
10% CE	5,26 (0,23) * a	23,76	5,80 (0,18) * a	2,65
20% CE	5,85 (0,22) * a	37,65	6,88 (0,25) * b	21,77
10% CBC	6,00 (0,01) * a	41,18	6,72 (0,17) * a	18,94
20% CBC	7,50 (0,94) * a	76,47	7,77 (0,13) * a	37,52
Controle	4,25 (0,24) a		5,65 (0,24) b	

*Difere estatisticamente pelo Teste de Dunnett (α=0.05) do tratamento controle; ns Não difere estatisticamente pelo teste de Dunnett (α=0.05) do tratamento controle. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de média Scott-knott, a um nível de significância de 5%. Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.
Fonte: Da autora (2024).

É possível observar que a substituição do cimento pelos resíduos não apresentou efeito significativo apenas para o tratamento com 10% de cascalho de perfuração aos 28 dias de cura em comparação aos blocos controle. Os demais tratamentos aos 28 dias de cura e envelhecidos obtiveram efeito significativo, sendo que a absorção de água foi maior comparado ao controle.

A variação para os blocos aos 28 dias de cura foi de 12,94 a 76,47%, já para os blocos envelhecidos foi de 1,77 a 37,52%.

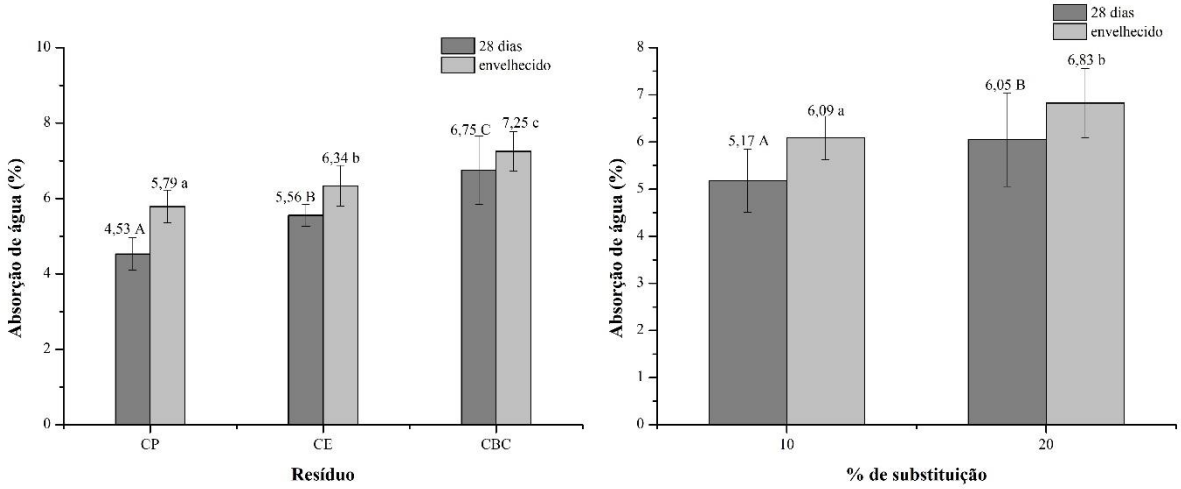
Resultados esses relacionados a porosidade encontrada para os blocos, uma vez que os menores valores de porosidade dos blocos produzidos com 10% de cascalho de perfuração, levou a menor absorção de água, no entanto com o aumento da porosidade dos demais tratamentos observou-se uma maior absorção de água. A permeabilidade do compósito cimentício aumenta com um maior índice de porosidade (NGUYEN et al., 2021).

Comparando os blocos de concreto após 28 dias de cura com os blocos envelhecidos dentro de cada tratamento, nota-se que apenas os tratamentos 10% de cinza de eucalipto, 10 e 20% de cinza de bagaço de cana não diferenciaram estatisticamente. Resultado relacionado à menor porosidade observada para esses tratamentos. Esperava-se que a absorção de água do tratamento com 20% de cascalho de perfuração também não se diferenciasse estatisticamente, conforme os dados de porosidade obtidos, no entanto a presença das argilas hidrofílicas no resíduo podem ter influenciado para uma maior absorção.

Para os demais tratamentos que se diferenciaram estatisticamente os maiores valores de absorção de água foram observados para os tratamentos após o envelhecimento acelerado, assim como observado para porosidade. A degradação sofrida com os ciclos de envelhecimento intensificam a formação de poros e trincas, consequentemente a absorção de água aumenta (METZKER et al., 2022; SENTENA; KAZMIERCZAK; KREIN, 2018).

Com relação aos resíduos (cascalho de perfuração *offshore*, cinza de eucalipto e cinza de bagaço de cana) e as duas porcentagens (10% e 20%), não foi observada interação para a absorção de água dos blocos aos 28 dias de cura e envelhecido. Nas Figuras 8 podem ser visualizados os valores médios de absorção de água em função do tipo de resíduo e das porcentagens avaliadas, respectivamente.

Figura 8 - Valores médios de absorção de água em função dos resíduos e das porcentagens aplicadas nos blocos de concreto para pavimentação.



Letras maiúsculas comparam as médias aos 28 dias, já as letras minúsculas as médias obtidas após o envelhecimento. Médias seguidas de mesma letra, não diferem entre si pelo teste Scott-knott, a um nível de significância de 5%.

Fonte: Da autora (2024).

Quando avaliada a absorção de água em função dos resíduos tanto para os blocos de concreto aos 28 dias de cura quanto para os envelhecidos, observa-se que os valores médios se diferenciaram estatisticamente, sendo os maiores valores de absorção de água observados para os blocos feitos com cinzas de bagaço de cana, seguidos pelos blocos com cinzas de eucalipto e os menores valores obtidos para os blocos com cascalho de perfuração. Resultado diretamente relacionado à maior porosidade dos blocos, devido à maior inibição, menor densidade e ao menor recobrimento das partículas.

Com relação à avaliação da absorção em função das porcentagens de resíduos para os blocos aos 28 dias e envelhecidos, nota-se que houve diferença estatística entre os tratamentos e os maiores valores encontrados foram dos tratamentos utilizando 20% de resíduo. Esses resultados evidenciam mais uma vez a influência da inibição do cimento observada na Figura 4, que devido a granulometria dos resíduos e maiores áreas superficiais, afetam o cobrimento da partícula, gerando maior formação de poros e consequentemente maior absorção de água.

Comparando os valores de absorção de água com a NBR 9781 (ABNT, 2013), observa-se que apenas o tratamento com 20% de cinza de bagaço de cana aos 28 dias não atendeu a norma, que limita a absorção de água com valor médio menor ou igual a 6% e nenhum valor individual maior do que 7%. Enquanto para os tratamentos após o envelhecimento acelerado, somente os tratamentos controle, 10 e 20% de cascalho de perfuração e 10% de cinza de eucalipto atenderam a norma.

Quedou, Wirquin e Bokhoree (2021) avaliando o potencial da substituição do cimento (5, 10, 15 e 20%) por cinzas de bagaço de cana de açúcar paraprodução de concreto sustentável,

observaram que a absorção de água aumentou com o aumento da quantidade de cinzas. O aumento aos 28 dias foi entre 389-476% quando comparado com a mistura de controlo. De acordo com os autores isso pode ser explicado pelo fato da cinza ter um alto valor de absorção devido à sua porosidade.

Chindaprasirt, Sujumnongtokul e Posi (2019) avaliando a durabilidade e propriedades mecânicas do concreto para pavimentos contendo cinza de bagaço em substituição ao cimento (20, 40 e 60%) observaram um aumento na absorção de água com o aumento do volume de cinzas. Os autores também relacionaram os resultados à estrutura porosa das cinzas que também afetou a porosidade do compósito.

Medeiros (2010), também observou um aumento na absorção de água do compósito com o aumento da porcentagem de utilização do cascalho de perfuração. Os resultados evidenciam mais uma vez que a maior concentração de resíduos aumenta a inibição do cimento e consequentemente acentua a absorção de água devido ao maior número de poros no compósito.

3.3 Análise mecânica dos blocos de concreto para pavimentação

Na Tabela 5 estão apresentados os valores médios de resistência à compressão para cada um dos tratamentos avaliados, antes e após o envelhecimento acelerado. Assim como também a variação dos valores médios dos blocos feitos com resíduos em relação ao bloco controle.

Tabela 5 – Resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação

Tratamento	Resistência à compressão (MPa)	Δ (%)	Resistência à compressão Envelhecido (MPa)	Δ (%)
10% CP	34,00 $^{(2,13)}$ * a	-3,63	33,57 $^{(2,74)}$ * a	-15,21
20% CP	33,75 $^{(2,02)}$ * a	-4,34	34,19 $^{(4,24)}$ * a	-13,64
10% CE	33,08 $^{(1,95)}$ * b	-6,24	38,81 $^{(2,35)}$ * a	-1,97
20% CE	31,36 $^{(0,78)}$ * b	-11,11	34,47 $^{(1,57)}$ * a	-12,93
10% CBC	32,81 $^{(0,85)}$ * b	-7,00	37,95 $^{(0,67)}$ * a	-4,14
20% CBC	28,08 $^{(1,32)}$ * a	-20,41	27,81 $^{(1,55)}$ * a	-29,76
Controle	35,28 $^{(2,40)}$ b		39,59 $^{(4,85)}$ a	

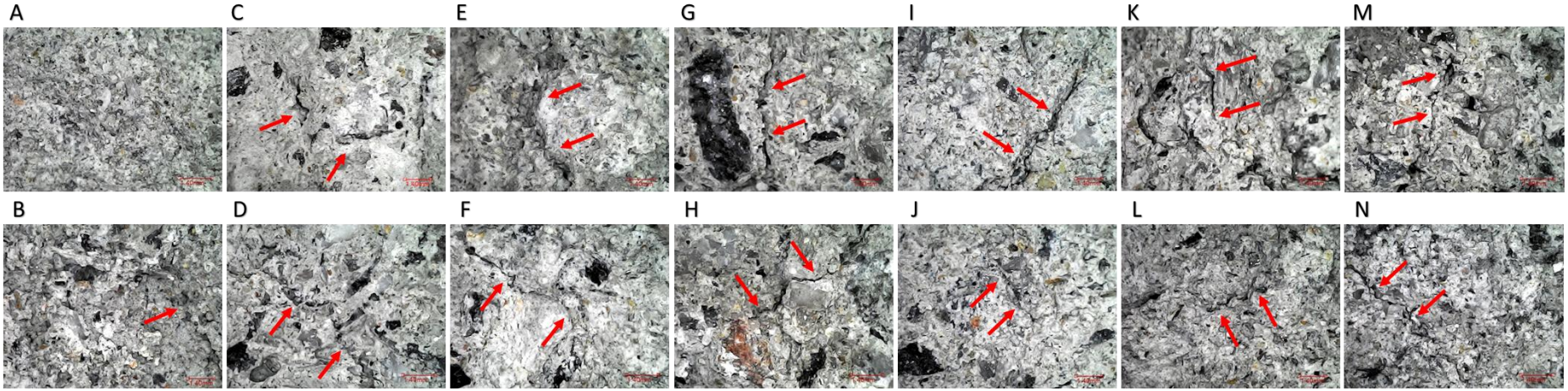
*Difere estatisticamente pelo Teste de Dunnett (α=0.05) do tratamento controle; ns Não difere estatisticamente pelo teste de Dunnett (α=0.05) do tratamento controle. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de média Scott-knott, a um nível de significância de 5%. Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Fonte: Da autora (2024).

Para a resistência à compressão, tanto para os blocos aos 28 dias de cura quanto para os envelhecidos, todos os tratamentos apresentaram efeito significativo em comparação ao

tratamento controle. Observou-se que a utilização dos resíduos na fabricação dos blocos de concreto apresentou uma queda na resistência mecânica, com variação entre -3,63 a -20,41% para os blocos com 28 dias de cura e -1,97 a -29,76% para os blocos envelhecidos. Essa queda na resistência está relacionada a porosidade dos blocos e a formação de fissuras no compósito (ALYOUSEF et al., 2020), conforme pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Micrografias dos blocos de concreto para pavimentação antes e após o envelhecido acelerado, evidenciando as fissuras.



a) Controle aos 28 dias; b) Controle envelhecido; c) 10% de CP aos 28 dias; d) 10% de CP envelhecido; e) 20% de CP aos 28 dias; f) 20% de CP envelhecido; g) 10% de CE aos 28 dias; h) 10% de CE envelhecido; i) 20% de CE aos 28 dias; j) 20% de CE envelhecido; k) 10% de CBC aos 28 dias; l) 10% de CBC envelhecido; m) 20% de CBC aos 28 dias; n) 20% de CBC envelhecido.

Fonte: Da autora (2024).

Comparando os blocos aos 28 dias com os blocos envelhecidos dentro de cada tratamento, nota-se que apenas os tratamentos 10 e 20% de cascalho de perfuração e 20% de cinza de bagaço de cana não se diferenciaram estatisticamente. Os demais tratamentos apresentaram maior resistência à compressão após os ciclos de envelhecimento. A perda de resistência causada pelo aumento da porosidade e formação de trincas com os ciclos de envelhecimento, pode ter sido compensada pela reatividade pozolânica dos resíduos e a hidratação das partículas de cimento, através dos ciclos de molhagem e secagem, contribuindo para o desenvolvimento de resistência em idades posteriores (HASHMI; SHARIQ; BAGI, 2021; MENDES et al., 2021).

Ainda sobre os dados, foi observada interação entre os resíduos (cascalho de perfuração, cinza de eucalipto e cinza de bagaço de cana) e as duas porcentagens aplicadas (10% e 20%) tanto para os blocos aos 28 dias de cura, quanto para os envelhecidos. Os desdobramentos dos dados de resistência à compressão dos blocos de concretos aos 28 dias de cura e envelhecidos podem ser visualizados na Tabela 6 e 7, respectivamente.

Tabela 6 – Valores médios de resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação aos 28 dias de cura (MPa) em função dos tipos de resíduos e suas porcentagens de substituição.

Tratamento	Cascalho de Perfuração	Cinza de Eucalipto	Cinza de Bagaço de Cana
10%	34,00 Aa (2,13)	33,08 Aa (1,95)	32,81 Aa (0,85)
20%	33,75 Aa (2,02)	31,36 Ab (0,78)	28,08 Bc (1,32)

Médias seguidas de mesma letra maiúscula (na coluna) e minúscula (na linha) não diferem entre si pelo teste de média Scott-knott, a um nível de significância de 5%. Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Fonte: Da autora (2024).

Tabela 7 – Valores médios de resistência à compressão dos blocos de concreto para pavimentação envelhecidos (MPa) em função dos tipos de resíduos e suas porcentagens de substituição.

Tratamento	Cascalho de Perfuração	Cinza de Eucalipto	Cinza de Bagaço de Cana
10%	33,57 Aa (2,74)	38,81 Aa (2,35)	37,95 Aa (0,67)
20%	34,19 Aa (4,24)	34,47 Aa (1,57)	27,81 Bb (1,55)

Médias seguidas de mesma letra maiúscula (na coluna) e minúscula (na linha) não diferem entre si pelo teste de média Scott-knott, a um nível de significância de 5%. Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Fonte: Da autora (2024).

Avaliando as porcentagens (10% e 20%) dentro de cada resíduo (cascalho de perfuração *offshore*, cinza de eucalipto, cinza de bagaço de cana), tanto para os blocos aos 28 dias de cura quanto para os envelhecidos, observa-se que apenas os tratamentos com cinza de bagaço de cana apresentaram diferença estatística, sendo os maiores valores obtidos para os blocos com 10% de cinza de bagaço de cana. Resultado relacionado a maior inibição observada para a substituição de 20% de cimento por cinza de bagaço de cana. A maior concentração de partículas de cinza de bagaço de cana na matriz ocasiona menor quantidade de partículas de cimento, consequentemente causa menor recobrimento dos resíduos devido à maior área superficial, gerando menor ganho de resistência (FERRAZ et al, 2020).

AMIN et al. (2020) avaliando compósitos cimentícios com diferentes concentrações de cinzas, concluíram que a mistura contendo 10% de cinza do bagaço da cana-de-açúcar gera maior resistência à compressão, tração e flexão em comparação aos outros compostos sem resíduo.

Abdalla et al. (2022) avaliando as propriedades mecânicas do concreto ecológico de alta resistência produzido com cinza de bagaço de cana (SCBA), observaram para a mistura com 10% de substituição do cimento por cinzas, um aumento significativo na resistência em relação ao controle, com um aumento de 6% aos 28 dias e 11% aos 56 dias, o que é atribuído à conversão de $Ca(OH)_2$ dormente na mistura de controle em cimento C-S-H, C-A-H e C-A-S-H. No entanto, em dosagens mais elevadas de SCBA, a resistência diminuiu em relação ao controle. Segundo os autores o ganho de força só pode ocorrer quando há $Ca(OH)_2$ suficiente para reagir com todo o SCBA. Quando a quantidade de SCBA excede a quantidade de $Ca(OH)_2$ disponível, a SCBA exerce um efeito diluidor na pasta, resultando numa redução na resistência. Os autores observaram também que, enquanto a inclusão de 10% de SCBA produziu concreto na categoria de alta resistência com resistência à compressão aos 28 dias superior a 60 MPa, todos os outros traços com inclusão de SCBA até 40% produziram concreto de grau estrutural com resistência aos 28 dias superior a 25 MPa.

Ao comparar os resíduos (cascalho de perfuração *offshore*, cinza de eucalipto, cinza de bagaço de cana) dentro de cada porcentagem (10% e 20%), tanto para os blocos aos 28 dias de cura quanto para os envelhecidos não houve diferença estatística para a substituição de 10% de resíduo. Ao utilizar 20% de resíduo, para os blocos aos 28 dias de cura, nota-se que todos os tratamentos diferenciaram entre si e que os maiores valores de resistência à compressão foram dos blocos com cascalho de perfuração, cinza de eucalipto e cinza de bagaço de cana,

respectivamente. Já para a porcentagem de 20% após o envelhecimento acelerado, observa-se que os tratamentos com cascalho de perfuração e cinza de eucalipto não apresentaram diferença estatística entre si, no entanto se diferenciaram do tratamento com bagaço de cana, o qual apresentou menor valor de resistência à compressão. É possível observar novamente a influência do índice de inibição dos resíduos nas propriedades físicas e mecânicas dos blocos de concreto, uma vez que o maior índice de inibição das cinzas de bagaço de cana comparado aos demais resíduos proporcionou aumento nas propriedades físicas do bloco, porosidade e absorção, e consequentemente afetou negativamente sua resistência mecânica.

Observa-se que aos 28 dias de cura apenas o tratamento controle atendeu à norma NBR 9781 (ABNT, 2013), que estipula um valor mínimo de 35 MPa. Após o envelhecimento os tratamentos controle, 10% de cinza de eucalipto e 10% de cinza de bagaço de cana atingiram valores superiores à 35 MPa. Destaca-se que os tratamentos utilizando cascalho de perfuração, apesar de apresentar melhores propriedades físicas comparado aos demais tratamentos, não atingiu o valor mínimo de resistência a compressão estabelecido pela norma, no entanto apresentaram valores bem próximos de atender.

Mostavi; Asadi; Ugochukwu (2015) avaliaram a viabilidade do uso de cascalhos de perfuração em concreto como substituição parcial do cimento e observaram redução na resistência à compressão. Os resultados mostraram que a substituição de 5% do cimento por cascalhos de perfuração secos reduz a resistência à compressão do concreto em 10%, em comparação com as amostras de controle, já a substituição de 10, 15 e 20% do cimento por resíduo reduziu a resistência à compressão em 20%, porém, substituindo mais quantidade de cimento por cascalho causa uma queda acentuada na resistência à compressão, observou-se para a substituição de 35% uma queda de 63%. Portanto, substituir 20% do cimento por resíduos de perfuração foi considerado o valor ótimo. Para compensar a redução de resistência causada pela substituição do cimento por resíduos de perfuração, 5, 10, 15, 20 e 25% de cinzas volantes foram adicionados às amostras de concreto contendo 20% de cascalhos de perfuração. Os resultados mostraram um aumento na resistência à compressão de 33% como resultado da adição de 20% de cinza volante. No entanto, a adição de concentrações maiores que 20% de cinzas volantes reduziu significativamente a resistência à compressão. Os resultados mostraram que é possível obter um aumento de 13% na resistência à compressão de amostras de concreto contendo 20% de resíduos de perfuração usando 5% de sílica ativa. Pequenas modificações no traço ou a combinação do cascalho de perfuração com outros materiais pode ser uma alternativa viável para a produção dos blocos de concreto, uma vez que os resultados de resistência à compressão apresentados nessa pesquisa foram próximos dos valores ideais segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013).

Jha; Sachan e Singh (2020) avaliando a cinza de bagaço de cana-de-açúcar (SCBA) como substituto parcial do cimento em concreto (5; 10; 15; 20 e 25%) observaram um aumento na resistência à compressão para a substituição de 10%, no entanto para maiores porcentagens de substituição observou-se um decréscimo na resistência. Este decréscimo na resistência, segundo os autores, pode ser devido à adesão inadequada da cinza do bagaço com a superfície do agregado e do cimento, portanto, resultou na redução da resistência de ligação entre o agregado e o cimento na mistura de concreto.

Hamid e Rafiq (2021) avaliaram o comportamento de duas origens de cinza de madeira como substitutas ao cimento, em diferentes porcentagens (10; 15; 20 e 25%) na produção de concreto. Observou-se que quanto maior a proporção de substituição de cimento na mistura de concreto, menor foi a resistência a compressão encontrada para os corpos de prova aos 28 dias de cura, comparado ao tratamento controle. Os autores observaram ainda uma queda mais acentuada na resistência para uma das cinzas avaliadas, e atribuíram esse resultado à diferença na sua composição química.

4 CONCLUSÃO

O objetivo desse estudo foi avaliar as propriedades físico-mecânicas, microestruturais e de durabilidade dos blocos de concreto para pavimentação produzidos com substituição do cimento por resíduos industriais (cascalho de perfuração *offshore*, cinza de bagaço de cana e cinza de eucalipto) em diferentes concentrações. De acordo com os resultados do experimento nas propriedades dos blocos de concreto:

1) Em relação as propriedades físicas dos blocos de concreto para pavimentação a maior inibição na hidratação do cimento causada pelos resíduos, gerou uma redução na densidade e aumento na porosidade e maior absorção de água. A granulometria dos resíduos influenciaram no recobrimento das partículas e afetaram também as propriedades físicas.
2) Dentre os resíduos avaliados para a produção dos blocos o cascalho de perfuração, seguido da cinza de eucalipto apresentaram melhores resultados físicos comparado às cinzas de bagaço de cana. Apesar da elevada atividade pozolânica das cinzas de bagaço de cana, seu maior módulo de finura e menor densidade impactou negativamente na formação dos produtos de hidratação na matriz.
3) Em relação às propriedades mecânicas dos blocos, a substituição do cimento por resíduos industriais gerou uma queda na resistência mecânica comparada ao tratamento controle, devido à maior formação de poros e fissuras.
4) Avaliando as porcentagens de substituição do cimento, os melhores resultados físicos e mecânicos foram obtidos com 10% de substituição. Resultado também associado à maior inibição com elevadas concentrações de resíduos. A inclusão de 20% de cinza de bagaço de cana foi o tratamento que mais afetou as propriedades dos blocos, sendo dessa forma, a porcentagem menos indicada para a produção de blocos de concreto destinados à pavimentação.
5) Após o envelhecimento acelerado observou-se a formação expressiva de trincas e poros que afetaram negativamente as propriedades físicas dos blocos de concreto. No entanto, os ciclos de molhagem promoveu uma continuação na hidratação das partículas de aglomerantes, proporcionando resistências mecânicas mais elevadas.
6) O tratamento controle atendeu aos valores estipulados pela NBR 9781 (ABNT, 2013) para resistência à compressão aos 28 dias e envelhecido. Após o envelhecimento acelerado, os blocos produzidos com 10% de cinzas (de bagaço de cana e eucalipto) também atenderam a NBR 9781 (ABNT, 2013). Destaca-se que os tratamentos com

cascalho de perfuração *offshore* apresentaram valores próximos aos estabelecidos pela norma e que pequenos ajustes no traço ou combinações do cascalho com outros materiais podem gerar melhores propriedades nos blocos de concreto.

7) Os índices de absorção de água estão abaixo do limite estipulado pela norma NBR 9781 (ABNT, 2013), nos tratamentos utilizando cascalho de perfuração offshore, cinza de eucalipto e 10% de cinza de bagaço de cana.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, T. A. et al. Mechanical Properties of Eco-friendly Concrete Made with Sugarcane Bagasse Ash. **Civil Engineering Journal**, v. 8, n.6, 2022.

ABDEL TAWAB, O. F. et al. Recycling Waste Plastic Bags as a Replacement for Cement in Production of Building Bricks and Concrete Blocks. **Journal of Waste Resources and Recycling**, v.1, n.2, 2020.

ABOUTABIKH, M. et al. Properties of cementitious material incorporating treated oil sands drill cuttings waste. **Construction and Building Materials**, v.111, p. 751-757, 2016. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.163

ACORDI, J. et al. New waste-based supplementary cementitious materials: Mortars and concrete formulations. **Construction and Building Materials**, v. 240, 2020.

AHMAD, J. et al. Effects of waste glass and waste marble on mechanical and durability performance of concrete. **Scientific Reports**, v. 11, n.1, 2021.

AKRAM, T.; MEMON, S. A.; OBAID, H. Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. **Construction and Building Materials**, V. 23, N.2, P.703-712, 2009.

ALYOUSEF, R. et al. A model to develop the porosity of concrete as important mechanical property. **Smart Structures and Systems**, v. 26, n.2, p.147-156, 2020. https://doi.org/10.12989/sss.2020.26.2.147

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 116R-00**: Cement and Concrete Terminology, reaprovado em 2005. Michigan, EUA, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 618**: Standard Specification for Coal Fly. Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. West Conshohocken, PA,2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 948**: Standard Test Method for Dry and Wet Bulk Density, Water Absorption, and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete. West Conshohocken, PA,2001.

AMIN, M. N. et al. **Role of Sugarcane Bagasse Ash in Developing Sustainable Engineered Cementitious Composites**. Frontiers In Materials, [S.L.], v. 7, 8 abr. 2020. Frontiers Media SA. http://dx.doi.org/10.3389/fmats.2020.00065.

ARIF. E.; CLARK, M. W.; LAKE, N. Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production. **Construction and Building Materials**, v.128, p. 287-297, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13554**: Solo-cimento - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. Rio de Janeiro. 3p. 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR 12653** – Materiais Pozolônicos, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12042:** Materiais inorgânicos — Determinação do desgaste por abrasão. Rio de janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9781:** Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 26p. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752:** Índice de atividade pozolânica. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** Solo - Análise granulométrica. Rio de janeiro, 21p., 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004** - Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo -Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BHEEL, N. et al. Use of waste recycling coal bottom ash and sugarcane bagasse ash as cement and sand replacement material to produce sustainable concrete. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 52399-524411, 2022.

BONFIM, W. B.; PAULA, H. M. de. Characterization of different biomass ashes as supplementary cementitious material to produce coating mortar. **Journal of Cleaner Production**, v. 291, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125869

BORINAGA- TREVIÑO, R. et al. Lime mud waste from the paper industry as a partial replacement of cement in mortars used on radiant floor heating systems. **Journal of Building Engineering**, v. 41, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102408

CENTENARO, S. H. Uso de cinzas de biomassa geradas na agroindústria do malte para produção de argamassas. **Revista Internacional de Ciências**, v.11, n.2, 2021.

CHINDAPRASIRT, P.; SUJUMNONGTOKUL, P.; POSI, P. Durability and Mechanical Properties of Pavement Concrete Containing Bagasse Ash. **Materials Today: Proceedings**, v. 17, n.4, p.1612-1626, 2019.

CHEN, Y. C. et al. Evaluating Business Chains and Fertilizing Capacity of Biomass Residues by Material Flow Analysis and Digestate Nutrient Balance. **Waste and Biomass Valorization**, v. 14, p.4269-4280, 2023.

CHOWDHURY, S.; MISHRA, M.; SUGANYA, O. The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: An overview. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 6, n.2, p.429-437, 2015.

CLARK, M. W. et al. High-efficiency cogeneration boiler bagasse-ash geochemistry and mineralogical change effects on the potential reuse in synthetic zeolites, geopolymers, cements, mortars, and concretes. **Heliyon**, v.3, n.4, 2017.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v.23, p.3301-3303, 2009.

CORDEIRO, G. C. et al. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement and Concrete Composites**, v.30, n.5, p. 410-418, 2008. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.001

COUTO, A. F. do. et al. Initial study of Eucalyptus Wood Ash (EWA) as a mineral admixture in concrete. **Dyna**, v.86, n.208, 2019. https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.74580

DANISH, A. et al. Valorization of biomass ashes in the production of cementitious composites: A comprehensive review of properties and performance. **Construction and Building Materials**, v.405, 2023.

DAHIRU, D. Comparative Study of the Compressive Strength of Cement Laterite Brick Produced with Rice Husk Ash and Wood Ash as Partial Replacement Of Cement. **ATBU Journal of Environmental Technology**, v. 9, n.1, 2016.

DEMING, X; CHAOQIANG, W. Physical characteristics and environmental risks assessment of oil-based drilling cuttings residues used for subgrade materials. **Journal of Cleaner Production**, v.323, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129152

DEVILLE, J. P. Chapter 4 - Drilling fluids. **Fluid Chemistry, Drilling and Completion,** Oil and Gas Chemistry Management Series, p.115-185, 2022. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822721-3.00010-1

DNER (1994). DNER-ME 093: **Solos – determinação da densidade real**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, p. 4.

ESMAEILI, J.; AL-MWANES, A. O. A review: Properties of eco-friendly ultra-high-performance concrete incorporated with waste glass as a partial replacement for cement. **Materials Today: Proceedings**, v. 42, n. 5, p.1958-1965, 2021.

FAN, M. et al. Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement. **Construction and Building Materials**, v. 36, p.135-140, 2012.

FERRAZ, P. F. P. et al. Agricultural Residues of Lignocellulosic Materials in Cement Composites. **Applied Sciences**, v. 10, n.22, 2020. https://doi.org/10.3390/app10228019

FOROUTAN, M. et al. Evaluation of the reuse and recycling of drill cuttings in concrete applications. **Construction and Building Materials**, v. 164, p. 400-409, 2018. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.180

GHAREHBAGHI, K.; LUCA, A. DE; CHEN, L. Sustainable utilization of recycled aggregates: robust construction and demolition waste reduction strategies. **Journal of Building Pathology and Adaptation**, v.39, n.4, p. 666-682, 2021.

GHORBANI, S. Effect of magnetized water on the fresh, hardened and durability properties of mortar mixes with marble waste dust as partial replacement of cement. **Construction and Building Materials**, v. 267, 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121049

GRONBA-CHYŁA, A. et al. Municipal waste utilization as a substitute for natural aggregate in the light of the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 440, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140907

HABERT, G. et al. **Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries**. Nature Reviews Earth & Environment, v. 1, p. 559–573, 2020. DOI: 10.1038/s43017-020-0093-3

HAMID, Z.; RAFIQ, S. An experimental study on behavior of wood ash in concrete as partial replacement of cement. **Materials Today: Proceedings**, v.46, n.9, p.3426-3429, 2021.

HASHMI, A. F. ; SHARIQ, M. ; BAQI, A. An investigation into age-dependent strength, elastic modulus and deflection of low calcium fly ash concrete for sustainable construction. **Construction and Building Materials**, v. 283, 2021.

HOFSTRAND, A. D.; MOLESMI, A. A.; GARCIA, J. F. Curing characteristics of particles from nine northern Rocky Mountain species mixed with portland cement. **Forest Products Journal**, Madison, v. 34, n. 2, p. 57-61, Feb. 1984.

HUANG, H. et al. Biomass briquette fuel, boiler types and pollutant emissions of industrial biomass boiler: A review. **Particuology**, v.77, p.79-90, 2023.

HUANG, Q. et al. Utilizing shale gas drilling cuttings as admixture in cement mortars: a case study in Fuling, Chongqing, China. **Environmental Science and Pollution Research**, v.29, p. 24362-24369, 2022.

HWANG, C.; HUYNH, T. Investigation into the use of unground rice husk ash to produce ecofriendly construction bricks. **Construction and Building Materials**, Edinburgh, v. 93, p. 335– 341, 2015.

JAMIL, M. et al. Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 185-198, 2016.

JHA, P.; SACHAN, A. K.; SINGH, R. P. Agro-waste sugarcane bagasse ash (ScBA) as partial replacement of binder material in concrete. Materials Today: Proceedings, v.44, n.1, p.419-427, 2021.

KATARE, V. D.; MADURWAR, M. V. **Process standardization of sugarcane bagasse ash to develop durable high-volume ash concrete**. Journal of Building Engineering, v.39, p.102-151, 2021.

KATENDE, A.; LU, Y.; BUNGER, A.; RADONJIC, M. Experimental quantification of the effect of oil based drilling fluid contamination on properties of wellbore cement. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v.79, 2020.

KAZAMIAS, G.; ZORPAS, A. A. Drill cuttings waste management from oil & gas exploitation industries through end-of-waste criteria in the framework of circular economy strategy. **Journal of Cleaner Production**, v. 322, 2021.

KHAN, M. N. N. et al. Filler effect of pozzolanic materials on the strength and microstructure development of mortar. **Structural Engineering**, v. 21, p. 274-284, 2017.

KHONDAKER, A. N., 2000, Modeling the Fate of Drilling Waste in Marine Environment – an Overview. **Computers & Geosciences**, 26 (2000) pp. 531-540.

KWEK, S. Y.; AWANG, H. Utilization of industrial waste materials for the production of lightweight aggregates: a review. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, v.10, n.1, p. 353-381, 2021.

LEONARD, S. A.; ROY, A. D.; STEGEMANN, J. A. Stabilization/Solidification of Petroleum Drill Cuttings: Thermal and Microstructural Studies of Binder Hydration Products. **Environmental Engineering Science**, v. 27, n.10, 2010. https://doi.org/10.1089/ees.2010.0147

LO, F. C.; LEE, M. G.; LO, S. L. Effect of coal ash and rice husk ash partial replacement in ordinary Portland cement on pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 286, 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122947

LOPES, Y. L. V. **Utilização da madeira e cascas de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden na produção de painéis cimento-madeira.** 2004. 60f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

MACEDO, J. V. da. et al. Avaliação da influência da adição da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na mitigação da reação álcali-agregado. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.3, p. 27002-27020, 2021.

MADHKHAN, M.; SAEIDIAN, P. Mechanical Properties of Ultra-high Performance Concrete Reinforced by Glass Fibers under Accelerated Aging. **International Journal of Engineering**, v. 34, n.5, p.1074-1084, 2021.

MARCEAU, S. et al. Influence of accelerated aging on the properties of hemp concretes. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 524-530, 2017. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.129

MEDEIROS, L. C. (2010): **Adição de cascalho de perfuração da bacia de potiguar em argilas para uso em materiais cerâmicos: influência da concentração e temperatura de queima.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Rio Grande do Norte.

MENDES, R. F. et al. Study of the use of polymeric waste as reinforcement for extruded fiber-cement. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 42737-42749, 2021.

MENESES, C. G. & PAULA, G. A. Avaliação do Resíduo de Cascalho de Perfuração de Poços de Petróleo da Bacia Potiguar e Alternativas para sua Destinação e Reaproveitamento. **Revista Eletrônica de Petróleo e Gás**, v. 3(1), p. 29-38, 2015.

METZKER, S. L. O. et al. Soil-Cement Bricks Development Using Polymeric Waste. **Environmental Science and Pollution Research**, v.29, p. 21034-21048, 2022.

MOSTAVI, E.; ASADI, S.; UGOCHUKWU, E. Feasibility Study of the Potential Use of Drill Cuttings in Concrete. **Procedia Engineering**, v. 118, p. 1015-1023, 2015. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.543

MUNAWAR, M. A. Challenges and opportunities in biomass ash management and its utilization in novel applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.150, 2021.

MILLER, S. A.; MOORE, F. C. Climate and health damages from global concrete production. **Nature Climate Change**, v. 10, p. 439–443, 2020. DOI: 10.1038/s41558-020-0733-0

MWAURAH, P. W. et al. Novel oil extraction technologies: Process conditions, quality parameters, and optimization. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v.19, n.1, p. 3-20, 2020. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12507

NGUYEN, M. H. et al. Incorporating industrial by-products into cement-free binders: Effects on water absorption, porosity, and chloride penetration. **Construction and Building Materials**, v. 304, 2021.

NJUGUNA, J. et al. The fate of waste drilling fluids from oil & gas industry activities in the exploration and production operations. **Waste Management**, v.139, p. 362-380, 2022. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.025

OKINO, E. Y. A. et al. Chapa Aglomerada de Cimento-Madeira de Hevea brasiliensis Müll. Arg. **Revista Árvore**, v. 28, n. 3, p 451-457, 2004.

OLATOYAN, O. J. et al. Potential use of biomass ash as a sustainable alternative for fly ash in concrete production: A review. **Hybrid Advances**, v.4, 2023.

PANDEY, A.; KUMAR, B. Utilization of agricultural and industrial waste as replacement of cement in pavement quality concrete: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 24504-24546, 2022.

PEDROSA, C.; SAASEN, A.; YTREHUS, J. D. Fundamentals and Physical Principles for Drilled Cuttings Transport—Cuttings Bed Sedimentation and Erosion. **Energies**, v.14, n.3, 2021. https://doi.org/10.3390/en14030545

PEREIRA, L. B. et al. Environmental impacts related to drilling fluid waste and treatment methods: A critical review. **Fuel**, v. 310, parte B, 2022.

QUEDOU, P. G.; WIRQUIN, E.; BOKHOREE, C. Sustainable concrete: Potency of sugarcane bagasse ash as a cementitious material in the construction industry. **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, 2021.

RIBEIRO, U. G. et al. Desempenho mecânico e durabilidade de argamassas contendo adições de resíduos de carvão vegetal amazônico. **Matéria**, Rio de Janeiro, v.26, n.3, 2021. https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13015

ROBALO, K. et al. Efficiency of cement content and of compactness on mechanical performance of low cement concrete designed with packing optimization. **Construction and Building Materials**, v.266, parte B, 2021.

ROLLAKANTI, C. R. et al. An experimental investigation on mechanical properties of concrete by partial replacement of cement with wood ash and fine sea shell powder. **Materials Today: Proceedings**, v. 43, p. 2, p.1325-1330, 2021.

SAMPAIO, Z. L. M.; SOUZA; P. A. B. F.; GOUVEIA, B. G. Análise da influência das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar no comportamento mecânico de concretos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, n. 4, 2014. https://doi.org/10.1590/S1983-41952014000400006

SAVADKOOHI, M. S.; REISI, M. Environmental protection based sustainable development by utilization of granite waste in Reactive Powder Concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 266, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121973

SENTENA, J. A. A.; KAZMIERCZAK, C. S.; KREIN, L. A. Degradation of rendering mortars made with fine concrete aggregates by thermal cycles. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 211-224, jan./mar. 2018.

SILVA, R. B. Cinzas de biomassa geradas na agroindústria do cacau: caracterização e uso em substituição ao cimento. **Ambiente Construído**, v.15, n.4, 2015. https://doi.org/10.1590/s1678-86212015000400053

SIVAKUMAR, D. ; BOZZO, G. Mushroom Biomass Waste Is a Source of the Antioxidants Ergothioneine and Glutathione, **Sustainability**, v.15, n.15, 2023. https://doi.org/10.3390/su151511961

SOUZA, A. B. et al. Study on the feasibility of using agricultural waste in the production of concrete blocks. **Journal of Building Engineering**, v.42, 2021.

SUN, X. et al. Mechanical activation of steel slag to prepare supplementary cementitious materials: A comparative research based on the particle size distribution, hydration, toxicity assessment and carbon dioxide emission. **Journal of Building Engineering**, v. 60, 2022.

ŠUPIĆ, S. Reactivity and Pozzolanic Properties of Biomass Ashes Generated by Wheat and Soybean Straw Combustion. **Materials**, v. 14, n.4, 2021. https://doi.org/10.3390/ma14041004

THOMAS, S. et al. Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: A comprehensive review.

Journal of Building Engineering, v. 40, p. 102332, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102332

VASCONCELOS, M.C.A. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de canade-açúcar utilizando métodos físicos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

VIJAYAN, D. S. et al. **Evaluation of ferrock: A greener substitute to cement.** Materials Today: Proceedings. v. 22, n. 3, p. 781-787, 2020. DOI:10.1016/j.matpr.2019.10.147

WANG, C. et al. Pozzolanic activity and environmental risk assessment of water-based drilling cuttings of shale gas. **Construction and Building Materials**, v. 348, 2022.

WU, N. et al. Use of sugar cane bagasse ash in ultra-high performance concrete (UHPC) as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 317, 2022. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125881

YOGITHA B. et al. Progress of sugarcane bagasse ash applications in production of Eco-Friendly concrete – Review. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, n. 1, p. 695-699, 2020. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.814

ZAREEI; S. A.; AMERI, F.; BAHRAMI, N. Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v.184, p.258-268, 2018.

ZHAO, Y. et al. The particle-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118521

ZHENG, D. et al. Study of high volume circulating fluidized bed fly ash on rheological properties of the resulting cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 86-93, 2017. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.127