

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RAYSSA PASSOS DAMASCENO FONTES

ANÁLISE DO USO DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA
PRODUÇÃO DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA PAVIMENTAÇÃO

MACEIÓ – AL

2023

RAYSSA PASSOS DAMASCENO FONTES

ANÁLISE DO USO DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA
PRODUÇÃO DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA PAVIMENTAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Colegiado do Curso de
Engenharia Civil da Universidade Federal
de Alagoas como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Profa. Dra. Karoline Alves de Melo Moraes (Orientadora)

Profa. Ma. Aline Calheiros Espindola (Coorientadora)

MACEIÓ - AL

2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

N972d Fontes, Rayssa Passos Damasceno.

Análise do uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na produção de concreto permeável para pavimentação / Rayssa Passos Damasceno Fontes. - 2023.

48 f. : il.

Orientadora: Karoline Alves de Melo Moraes.

Co-orientadora: Aline Calheiros Espíndola.

Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 42-48.

1. Concreto - Permeabilidade. 2. Bagaço de cana - Cinzas. 3. Concreto - Resistência. I. Título.

CDU: 693.54/.56

Folha de Aprovação

RAYSSA PASSOS DAMASCENO FONTES

ANÁLISE DO USO DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA PRODUÇÃO DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA PAVIMENTAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido a banca examinadora do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovado em 11 de outubro de 2023.

Documento assinado digitalmente
 KAROLINE ALVES DE MELO MORAES
Data: 16/10/2023 10:17:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Karoline Alves de Melo Moraes (Orientadora)
Universidade Federal de Alagoas

Documento assinado digitalmente
 ALINE CALHEIROS ESPINDOLA
Data: 16/10/2023 11:04:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Me. Aline Calheiros Espindola (Coorientadora)
Universidade Federal de Alagoas

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 ALEXANDRE LIMA MARQUES DA SILVA
Data: 11/10/2023 16:06:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alexandre Lima Marques da Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Alagoas

Documento assinado digitalmente
 SILVIA BEATRIZ BEGER UCHOA
Data: 16/10/2023 10:59:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Silvia Beatriz Beger Uchôa (Examinador Interno)
Universidade Federal de Alagoas

AGRADECIMENTOS

A conclusão do curso de Engenharia Civil na UFAL significa para mim o fim de um ciclo de muitas lutas travadas, medos superados e crenças ressignificadas. Primeiramente agradeço a Deus por todas as oportunidades vividas e histórias escritas durante a minha jornada, agradeço e dedico esse Trabalho de Conclusão de Curso:

À minha família por estarem sempre presentes incentivando a realização desse sonho. Em especial aos meus pais, Luzia e Ronaldo, que não mediram esforços em me proporcionar uma educação de qualidade, sentindo as minhas dores, vivendo a minha rotina e me dando todo o suporte além do necessário. Ao meu anjo da guarda, minha avó Benedita, que sempre acreditou no meu potencial, zelou por mim e me amou todos os dias em que estive na terra. Aos meus irmãos, Rafael e Rodrigo, pelo apoio e auxílio nos momentos de dificuldade. Aos meus gatos, que são meus anjos de quatro patas, e que de forma singela me confortaram em momentos difíceis.

Aos amigos que adquiri durante o curso, Alana, Beatriz, Rayane, Sebastião e Pedro, com os quais compartilhei meus dias de graduação, entregas de trabalho, provas, aflições, alívios, choros e risos, e que foram um suporte essencial nessa reta final.

Ao PET Ciência e Tecnologia, por me apresentar ao ensino, à pesquisa e à extensão no meio universitário, por me apresentar a novas realidades, por despertar habilidades e por ter sido um lugar de refúgio durante muitos momentos da graduação. Aos meus professores Tutores Eduardo Lucena e Luciano Santos, que me orientaram e inspiraram durante o tempo que permaneci no programa. Aos colegas de PET Erick, Valeria e Vinicius, que se tornaram amigos para além do programa. Ao Centro Acadêmico de Engenharia Civil, o qual pude fazer parte e vivenciar de perto a busca pelos direitos dos estudantes e melhorias no curso.

A todos os meus professores, que compartilharam conhecimento, experiências e deixaram um pouquinho de si para me transformar em uma profissional capacitada, competente e humana. Ao CTEC e à UFAL, pelo ensino público, gratuito e de qualidade, por terem sido minha segunda casa durante os anos de graduação, pelos investimentos realizados em meus estudos e me ensinar muito mais do que a engenharia. Aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Materiais – LEMA, em especial ao Valdemir, pelo auxílio nessa reta final.

À minha orientadora, Karoline Alves, pela oportunidade e por todo o apoio prestado durante boa parte da minha graduação. Foram de extrema valia todos os conselhos, conversas e discussões. Agradeço-a, também, pelo acolhimento nos momentos mais difíceis, acima de tudo, por acreditar no meu potencial. Agradeço à minha coorientadora, Aline Calheiros, pela disponibilidade constante em ajudar e por todo auxílio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Obrigada por tudo.

RESUMO

O Censo demográfico de 2022 revelou que o Brasil possui 208 milhões de habitantes, com cerca de 85% vivendo em áreas urbanas. O crescimento populacional acarreta o aumento da urbanização desordenada, resultando no aumento das áreas impermeabilizadas, que aliado a outros fatores levam a sobrecarga do sistema convencional de drenagem. Na busca por soluções alternativas, surge o pavimento permeável de concreto. As camadas do sistema permitem a infiltração da água, que recebe o direcionamento correto. O concreto permeável utilizado na camada de revestimento é composto por aglomerante, agregado graúdo e água, sua produção permite a incorporação de aditivos e adições, que podem ser provenientes de resíduos da construção civil ou da agroindústria, como as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar. A incorporação dessas cinzas à mistura representa uma nova utilização através da reciclagem, contribuindo para a redução da geração de resíduos e alinhando-se à 12^a meta dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Diante da problemática em questão, o presente trabalho teve por objetivo determinar o traço de referência para o concreto permeável destinado ao uso de pedestres e com a incorporação de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, substituindo 5% e 10% do cimento utilizado para produção de corpos de prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm e placas de 200 mm x 200 mm x 60 mm. A fim de analisar o comportamento dos traços, as amostras foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão axial e permeabilidade. Com os resultados encontrados, observou-se que a incorporação da cinza à mistura reduz a resistência e a permeabilidade do concreto permeável. No entanto, se mantiveram dentro dos valores identificados na literatura e na norma. Chegou-se à conclusão de que o emprego das cinzas é promissor, ainda que reduzindo os parâmetros analisados no estudo, apesar de sua aplicação se limitar a áreas de tráfego leve. Recomenda-se que as dosagens e o processo de compactação sejam revistos em estudos futuros. Assim como, a incorporação de novos ensaios que permitam a melhor caracterização do resíduo utilizado e do concreto produzido.

Palavras-Chave: Concreto permeável; Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar; Resistência; Permeabilidade.

ABSTRACT

The 2022 demographic census revealed that Brazil has 208 million inhabitants, with about 85% living in urban areas. Population growth leads to an increase in disordered urbanization, resulting in an increase in impermeable areas, which, along with other factors, overloads the conventional drainage system. In search of alternative solutions, permeable concrete pavement emerges. The layers of the system allow water infiltration, which is correctly directed. The permeable concrete used in the coating layer is composed of binder, coarse aggregate and water, its production allows the incorporation of additives and additions, which can come from waste from the construction industry or agroindustry, such as sugarcane bagasse ash. The incorporation of these ashes into the mixture represents a new use through recycling, contributing to the reduction of waste generation and aligning with the 12th goal of the Sustainable Development Goals. Given the problem at hand, this work aimed to determine the reference trace for permeable concrete intended for pedestrian use and with the incorporation of sugarcane bagasse ash, replacing 5% and 10% of the cement used to produce cylindrical test specimens of 100 mm x 200 mm and plates of 200 mm x 200 mm x 60 mm. In order to analyze the behavior of the traces, the samples were submitted to axial compression resistance and permeability tests. With the results found, it was observed that the incorporation of ash into the mixture reduces the resistance and permeability of permeable concrete. However, they remained within the values identified in the literature and in the standard. It was concluded that the use of ashes is promising, although reducing the parameters analyzed in the study, despite its application being limited to areas of light traffic. It is recommended that dosages and compaction process be reviewed in future studies. As well as, the incorporation of new tests that allow a better characterization of the waste used and the concrete produced.

Keywords: Pervious concrete; Sugar cane bagasse ash; Strength; Permeability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Permeabilidade Urbana.....	7
Figura 2 Sistema de infiltração do pavimento permeável.....	11
Figura 3 Estrutura típica de um pavimento permeável.....	12
Figura 4 Estrutura típica de um pavimento de concreto permeável	13
Figura 5 Placa de concreto permeável.....	15
Figura 6 Ciclo de geração do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar	17
Figura 7 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar.....	18
Figura 8 Procedimento experimental adotado.....	19
Figura 9 Moinho planetário de bolas de marca Retsch	20
Figura 10 Detalhe do encaixe do vaso de moagem ao moinho.....	20
Figura 11 Equalização da temperatura do querosene.....	21
Figura 12 Adição da cinza ao querosene	22
Figura 13 Ensaio para determinação da massa unitária	23
Figura 14 Determinação da massa da amostra submersa	24
Figura 15 Ensaio para determinação da massa unitária	25
Figura 16 Amostras e conjunto de peneiras.....	26
Figura 17 Análise visual para controle da mistura.....	28
Figura 18 Corpos de prova cilíndricos.....	29
Figura 19 Corpos de prova prismáticos.....	29
Figura 20 Corpos de prova desmoldados	30
Figura 21 Cura úmida dos corpos de prova	30
Figura 22 Esquema ensaio de permeabilidade	31
Figura 23 Material retido na peneira #10.....	33
Figura 24 Aspecto visual da CBCA antes (esq.) e após moagem e passagem na peneira #30 (dir.).....	34
Figura 25 Curva granulométrica do agregado graúdo.....	34
Figura 26 - Corpo de prova rompido no ensaio de compressão axial	36
Figura 27 Gráfico da evolução da resistência à compressão axial do traço 1:3, em MPa	37
Figura 28 Gráfico evolução coeficiente de permeabilidade.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Componentes do Cimento Portland composto CP II – F 32.....	25
Tabela 2 Composição dos traços estudados na pesquisa	34
Tabela 3 Resistência à Compressão média.....	35
Tabela 4 Coeficiente de permeabilidade	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	COMENTÁRIOS INICIAIS	7
1.2	OBJETIVOS	8
1.2.1	Objetivo geral	8
1.2.2	Objetivos específicos	9
1.3	JUSTIFICATIVA	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	PAVIMENTO PERMEÁVEL	11
2.2	CONCRETO PERMEÁVEL	13
2.3	CINZA DO BAGAÇO DE CANA	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1	COLETA E BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO	20
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	21
3.2.1	Cinza do bagaço de cana-de-açúcar	21
3.2.2	Agregado graúdo	23
3.2.3	CIMENTO	26
3.2.4	ÁGUA	27
3.2.5	DOSAGENS, MOLDAGEM E ENSAIOS NO CONCRETO ENDURECIDO	27
3.2.6	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1	BENEFICIAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA	33
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO	34
4.3	CIMENTO	35
4.4	DOSAGENS	35
4.5	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	36
4.6	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE	38
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS

Segundo a prévia do Censo demográfico de 2022, o Brasil tem 208 milhões de habitantes. A maior parte da população brasileira vive em áreas urbanas, cerca de 85% (IBGE, 2022). O crescimento populacional implica no aumento da urbanização, onde parte se dá de forma desordenada. Uma consequência de seu desenvolvimento incorreto, do ponto de vista urbanístico, é o aumento da taxa de impermeabilização do solo (ALLEVANT, 2020). Isto acarreta a diminuição da infiltração das águas pluviais e, por consequência, aumenta o escoamento superficial ocasionando alagamentos e inundações, representado na Figura 1, prejudicando a qualidade de vida da população (BANDEIRA *et al.*, 2016).



Fonte: BH Recicla, 2021

Além deste fator, o lixo acumulado nas vias urbana é transportado pelas águas pluviais e depositado nos pontos de escoamento dessa água (TUCCI, 2003). Diante destes fenômenos, surgem discussões para resolução da problemática em questão. As soluções empregadas são baseadas em sistema clássico de drenagem, e são eficientes até atingir novos picos de vazão e tornarem a sobrecarregar (BAPTISTA *et al.*, 2011). A melhor forma de lidar com o problema é investir em medidas de prevenção, através de sistemas eficientes de drenagem (SÃO PAULO, 2012).

Neste contexto, novas pesquisas buscam trazer soluções alternativas por meio das técnicas compensatórias, dentre elas tem-se o pavimento permeável (AMARAL, 2017). O sistema eleva o grau de permeabilidade, permitindo reduzir volumes de

escoamento superficial e vazões de pico a níveis iguais ou até inferiores aos observados antes da urbanização (TUCCI, 2003).

O pavimento permeável é formado por camadas, cada uma com grau de permeabilidade que permita a passagem da água e do ar. A camada de revestimento recebe a atividade direta do tráfego, devendo resistir ao atrito. Usualmente são utilizados três tipos de camada de revestimento, sendo elas: de concreto permeável; asfalto permeável e blocos intertravados (ABNT, 2015).

O concreto permeável é composto por cimento, agregado graúdo, água, e pode conter aditivos e adições minerais (TENNIS *et al.*, 2004). Não possui atualmente uma dosagem ideal, por isso destaca-se a importância do estudo de diversas composições e incorporação de materiais não convencionais à mistura. A utilização de resíduos oriundos de outros seguimentos da indústria como adições minerais na produção de misturas cimentícias tem sido bastante explorada, por ser duplamente benéfica para o meio ambiente, uma vez que ao mesmo tempo que concede destinação a este resíduo, antes descartado, contribui para reduzir a poluição ambiental causada pela exploração das fontes finitas de matéria prima (MOURA *et al.*, 2018). Esse pensamento está alinhado com a 12^a meta dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, que dentre as suas diretrizes visa diminuir a geração de resíduos por redução, reciclagem e reuso (NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL, 2023).

Ante o exposto, a cinza resultante da queima do bagaço de cana-de-açúcar surge como material alternativo a ser incorporado ao concreto como adição mineral devido ao seu potencial pozolânico, determinado no trabalho de Cordeiro *et al.* (2009). Essa pesquisa busca somar as funcionalidades do concreto permeável com a reutilização do resíduo, substituindo parcialmente o cimento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo produzir concreto permeável destinado ao tráfego de pedestres, substituindo parcialmente o cimento por cinzas resultantes da queima do bagaço de cana-de-açúcar.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar parâmetros de dosagens para validação do uso da cinza do bagaço de cana no concreto permeável;
- Verificar o desempenho mecânico e a permeabilidade dos concretos produzidos.

1.3 JUSTIFICATIVA

A impermeabilização do solo ocasionada pelas mudanças no terreno natural, impossibilita a infiltração e percolação das águas pluviais (MULLER, 2017). Para Tucci e Bertoni (2003), essa problemática tem se agravado devido ao aumento da ocupação urbana desordenada. A construção de edificações associada à pavimentação de ruas e jardins, gera a impermeabilização de extensas áreas, sendo necessário direcionar a água precipitada para o sistema de drenagem, que é responsável por captar e redirecionar o fluxo.

O somatório destes fatores, gera o colapso dos sistemas pluviais, frequente em diversas cidades do país (LAMB, 2014). As técnicas compensatórias são alternativas que auxiliam no gerenciamento da drenagem urbana. O pavimento permeável é uma dessas ferramentas, empregado pela função de infiltrar e armazenar de forma temporária a água, e é usualmente utilizado para pavimentação de áreas com tráfego de pessoas, como calçadas, praças, parques e estacionamentos de veículos leves (BAPTISTA *et al.*, 2011).

Todas as camadas do sistema que constituem o pavimento permeável possuem sua devida importância, destacando-se a camada de revestimento, que além de permitir a infiltração da água, fica em contato direto com o tráfego, necessitando resistir ao atrito. O concreto permeável é empregado para revestir pavimentos permeáveis (ABNT, 2015). A composição dessa camada requer estudos para melhor dosagem dos materiais, que permita cumprir a sua função. Neste sentido, o trabalho desenvolvido por Ramos (2018), que além dos materiais tradicionais do concreto permeável como o cimento, agregado graúdo e água, incorporou a cinza de madeira, encontrando resultados significantes.

Os resíduos oriundos de usinas e outros segmentos, vem ganhando destaque pelo alto potencial de uso na construção civil. Nesse sentido, vale destacar um trabalho anterior realizado no grupo de pesquisa Materiais Ecoeficientes para Construção Civil (MECOEFICON), no qual o presente trabalho está inserido. Pacífico (2020) analisou o potencial pozolânico das cinzas de bagaço de cana, observando-se a necessidade de realizar ajustes no processo de beneficiamento do resíduo, a fim de viabilizar seu emprego. Isto torna ainda mais necessário os estudos de resíduos dessa origem.

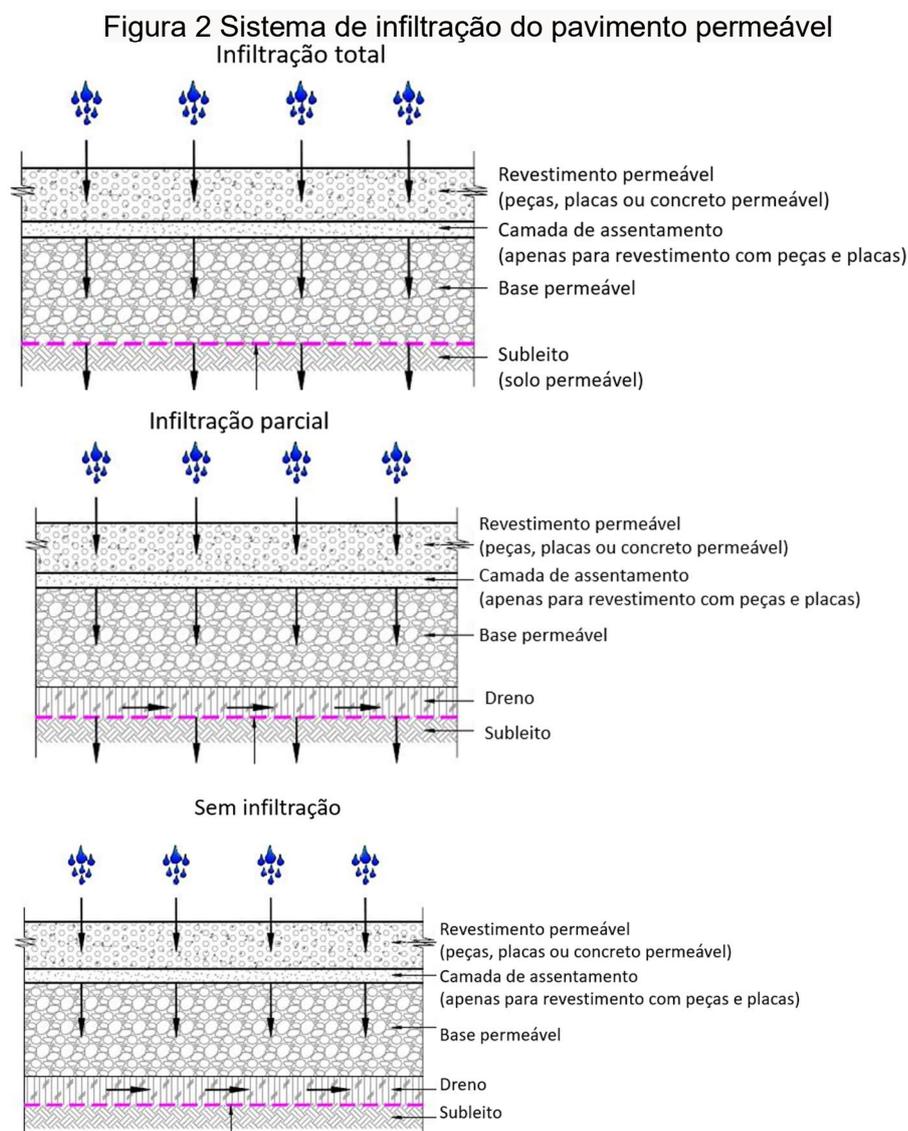
Em estudos realizados por Paula *et al.* (2009), observou-se que a incorporação de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em misturas de cimento Portland proporcionou às argamassas mais porosidade, conferindo maior absorção de água. Este resultado se torna relevante quando a intenção é produzir misturas mais porosas, a exemplo do concreto permeável.

Dessa forma, percebe-se a importância deste trabalho, buscando explorar as funcionalidades do concreto permeável, empregado como alternativa de pavimentação para minimizar os impactos da impermeabilização nas áreas urbanas. Além da utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em substituição parcial do cimento na produção desse concreto, buscando a redução do consumo desse material, que gera impactos ambientais negativos pela utilização de fontes finitas no processo de fabricação e grande liberação de gás carbônico na atmosfera (CALDAS *et al.*, 2016).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

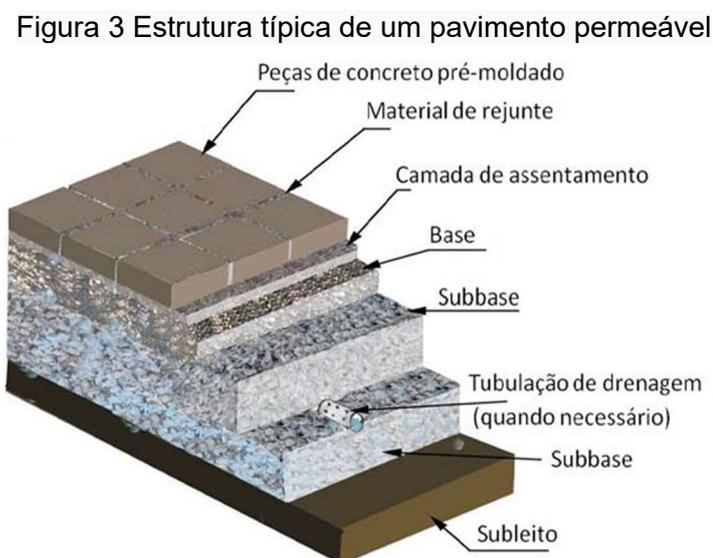
2.1 PAVIMENTO PERMEÁVEL

Para Batezini (2013), pavimento permeável é caracterizado por sua elevada porosidade e boa drenabilidade. Devido a essa capacidade de infiltrar a água através de sua estrutura, eles são soluções utilizadas para aliviar o sistema de drenagem convencional, concedendo conforto em dias de chuvas por diminuir o acúmulo de água no pavimento. O pavimento permeável é adaptável às condições do local onde será implementado, sendo possível utilizar três sistemas de infiltração, onde: a água é totalmente absorvida pelo solo, parcialmente absorvida ou não será absorvida, a receber outra destinação (ABNT, 2015), conforme ilustrado na Figura 2.



Fonte: Adaptado de ABNT, 2015

Conforme Marchioni e Silva (2013), as camadas do pavimento permeável devem ser dimensionadas considerando-se a precipitação do local e as características do subleito, além das condições de tráfego às quais o pavimento estará sujeito. A camada superior é a de revestimento, podendo ser produzida em asfalto permeável, blocos de concreto e placas de concreto permeável. A Figura 3 retrata a estrutura típica de um pavimento permeável, com revestimento permeável, camada de assentamento, base e sub-base permeáveis, podendo conter tubulação de drenagem, de acordo com o sistema de infiltração adotado (ABNT, 215).



Fonte: Marchioni e Silva (2013)

A camada de assentamento se aplica aos projetos onde o revestimento é em intertravado de concreto ou com placas de concreto permeáveis. A Figura 4 traz a configuração padrão de pavimento de concreto permeável, abaixo do revestimento tem-se a camada de base, composta de agregados e que poderá, a depender das especificações de projeto, armazenar temporariamente a água pluvial e conduzir o volume a um reservatório, a fim de controlar o escoamento (BAPTISTA *et al.*, 2011).

Figura 4 Estrutura típica de um pavimento de concreto permeável



Fonte: Marchioni e Silva (2013)

2.2 CONCRETO PERMEÁVEL

Segundo Vogt (2019), o concreto permeável possui índice de vazios em torno de 15% a 25%, responsável pela alta permeabilidade da camada de revestimento. Tal característica se dá pela pouca ou nenhuma quantidade de agregado miúdo em sua mistura, sendo composto por água, cimento e agregado graúdo (HOLTZ, 2011). O bom desempenho em relação à sua capacidade drenante permite o emprego do concreto permeável como solução mitigadora dos níveis elevados de impermeabilização, ocasionados pela urbanização das cidades (LAMB, 2014).

Em razão da elevada porosidade, há a redução da resistência mecânica em relação ao concreto convencional, limitando seu uso a áreas de tráfego leve, como em ciclovias, calçadas, estacionamentos, tendo como sua principal função a absorção da água superficial e a não acumulação dela na superfície do pavimento. O concreto permeável pode desenvolver resistência mecânica à compressão simples na faixa de 2,8 a 28 MPa aos 28 dias (ACI, 2010). A ABNT NBR 16416 (2015) determina a resistência mecânica mínima à compressão de 20 MPa, para peças de concreto permeável, com espessuras de 6 cm ou 8 cm.

As proporções dos materiais da mistura variam dependendo da finalidade do revestimento, em relação ao tipo de tráfego a qual será sujeito. A relação cimento/agregado e o procedimento de compactação empregados na produção de

concretos permeáveis são os dois fatores que afetam diretamente as características mecânicas do material (ACI, 2010). Não há uma definição acerca da relação cimento/agregado ideal. Trabalhos como o de Gagliardo et al. (2021) e Schwetz et al. (2015) que encontraram diferentes resultados para as mesmas proporções estudadas reforçam isto. O primeiro encontrou os melhores resultados de resistência mecânica para o traço 1:3, e o segundo determinou resultados superiores para o traço 1:4.

A norma brasileira 16416 (2015), classifica concreto permeável de acordo com o tipo de solicitação, para o tráfego de pedestres ou veículos leves, sendo requerido uma resistência e espessura mínimas para cada aplicação, de 6 cm e 8 cm, respectivamente. Já Dellate e Clearly (2006) foram mais além, classificaram o concreto permeável em três tipos, levando em consideração a resistência mecânica e a permeabilidade, no entanto não atribuíram valores de referência para tal definição. Para eles o concreto permeável pode ser classificado em:

- concreto permeável hidráulico, de baixa resistência mecânica e elevada permeabilidade, aplicações não estruturais;
- concreto permeável normal, de resistência e permeabilidade intermediárias, possui uma mistura sem adição de agregado miúdo, podendo ser aplicado em estacionamentos para veículos leves e calçadas;
- concreto permeável estrutural, com elevada resistência mecânica e baixa permeabilidade, devido a incorporação de agregado miúdo a mistura, utilizado em estacionamento e rua que possuem tráfego de veículos pesados.

O concreto permeável pode ser moldado em peças, que irão compor a camada de revestimento do sistema. A norma NBR 16416 (ABNT, 2015) apresenta três tipologias desses revestimentos: intertravado permeável, concreto permeável e placas de concreto permeável (Figura 5). Para atender ao proposto, todas as camadas, desde o revestimento até a base ou sub-base, devem atender a critérios mínimos de permeabilidade.

Figura 5 Placa de concreto permeável



Fonte: OTERPREM (2019)

A exigência de atender requisitos mecânicos, hidráulicos e de durabilidade, torna o cálculo da dosagem para o concreto permeável mais restrito em relação ao concreto convencional (CASTRO *et al.*, 2009). Segundo Lamb (2014), a proporção cimento/agregado graúdo mais eficiente em termos de resistência à compressão e coeficiente de permeabilidade é entre 1:3 e 1:5. Para a relação água/cimento a ACI (2010) recomenda uma faixa de 0,26 a 0,45 para obter a trabalhabilidade desejada.

No trabalho de Lian e Zhuge (2010), foi definido o intervalo de 0,30 a 0,38 para a relação água/cimento do concreto permeável, levando em consideração os efeitos na trabalhabilidade, resistência e permeabilidade do concreto. No entanto, observou-se que a resistência foi comprometida a partir de 0,34, enquanto os melhores resultados foram obtidos com 0,32, não sendo aconselhável utilizar uma relação menor que 0,30.

Para melhorar a durabilidade, resistência e trabalhabilidade do concreto permeável, podem ser adicionados a mistura materiais complementares, como aditivos e adições minerais (BATEZINI, 2013). Os aditivos mais usuais são: superplastificantes, retardadores de pega e redutores de água (TENNIS *et al.* (2004). Dentre as adições minerais estudadas, estão: metacaulim, sílica ativa, cinza volante, cinza da casca de arroz e cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA). As adições minerais são eficazes para aumentar a resistência à compressão e tração no concreto, enquanto as químicas modificam resistências de pega e endurecimento da pasta, influenciando na taxa de hidratação do cimento (METHA e MONTEIRO, 2008).

Conhecer a influência dessas incorporações na resistência, trabalhabilidade e permeabilidade do concreto, é de suma importância para atender aos requisitos mínimos dispostos na NBR 16416 (ABNT, 2015). Os trabalhos desenvolvidos por Monteiro (2010) e Barzotto (2016) estudaram a influência de diferentes dosagens no comportamento mecânico e hidráulico desse material. Supriya e Murali (2023) analisaram o comportamento do concreto permeável com as adições minerais, como a cinza volante e a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, apontaram ganho na resistência e redução no coeficiente de permeabilidade.

2.3 CINZA DO BAGAÇO DE CANA

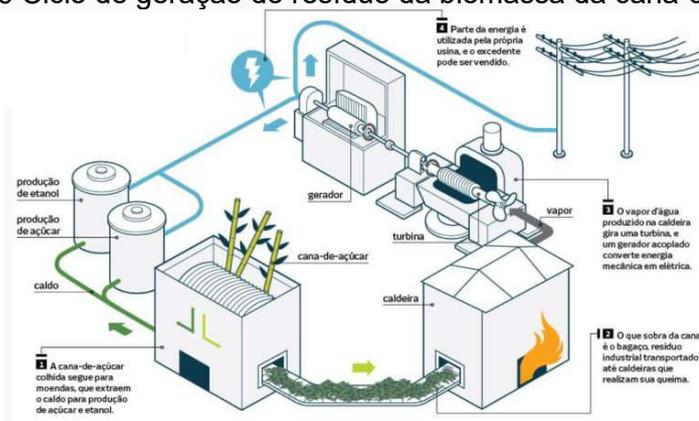
A cultura da cana-de-açúcar tem sua devida significância no cenário agrícola e na economia brasileira. O país foi o maior produtor mundial no complexo sucroalcooleiro, na safra de 2020/21, responsável por cerca de 654 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, que foram destinadas à produção de aproximadamente 41 milhões de toneladas de açúcar e 29 bilhões de litros de etanol (NACHILUK, 2021). O estado de Alagoas é o maior produtor de cana-de-açúcar no Nordeste, registrou 18,2 milhões de toneladas na safra 2021/22, aumento de 12,9% em relação à safra anterior (MOVIMENTO ECONÔMICO, 2022).

O processo de extração do caldo gera um elevado volume do bagaço da cana-de-açúcar, e as próprias usinas utilizam o bagaço como fonte de geração de energia elétrica (REVISTA PESQUISA FAPESP, 1998). Segundo Cordeiro *et al.* (2009), a queima do bagaço de cana produz a cinza como material residual, sua disposição, em parte dos casos, não obedece ao descarte correto, o que pode acarretar um sério problema ambiental. Estimativas mostram que, para cada tonelada de cana-de-açúcar processada, são produzidos aproximadamente seis quilos de cinza do bagaço (SALES; LIMA, 2010).

Ao chegar à usina a cana é pesada em uma balança com capacidade de 120 ton e, em seguida, é encaminhada para a estocagem ou moagem imediata. Para este último, o processo se dá em etapas que facilitam a extração do caldo da cana, o qual é destinado a produzir açúcar ou etanol.

Desta etapa de extração obtém-se o bagaço da cana que é enviado como combustível para o setor de geração de vapor, composto de quatro caldeiras que operam com pressão de trabalho de 21 kgf/cm². No interior delas, na parte da fornalha, ocorre a queima do bagaço da cana, cuja temperatura de combustão varia entre 700 °C e 750 °C, originando as cinzas residuais (ANJOS *et al.*, 2012). A Figura 6 ilustra as etapas acima descritas.

Figura 6 Ciclo de geração do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar



Fonte: Adaptado de ENERGÊS (2020)

A indústria está cada vez mais adotando a reciclagem e a reutilização de resíduos como uma prática importante para promover a sustentabilidade. Essas ações ajudam a minimizar o impacto ambiental causado pela produção industrial, bem como a reduzir os custos, uma vez que o destino dos resíduos geralmente envolve altos custos de transporte e disposição em aterros. Uma opção viável para mitigar o impacto ambiental é incorporar esses resíduos na produção de materiais para a indústria da construção civil (BORLINI *et al.*, 2005), que é uma grande consumidora de energia e matérias-primas não renováveis.

A cinza residual é composta principalmente por dióxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃) (CORDEIRO *et al.*, 2009). Em teoria, qualquer tipo de cinza, seja de origem industrial ou vegetal, contendo principalmente sílica, pode ser utilizada como adição mineral, desde que seja produzida no estado amorfo e possua uma granulometria adequada (JOHN *et al.*, 2003). Na Figura 7 tem-se a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, coletada logo após a queima do bagaço.

Figura 7 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: Autora (2023)

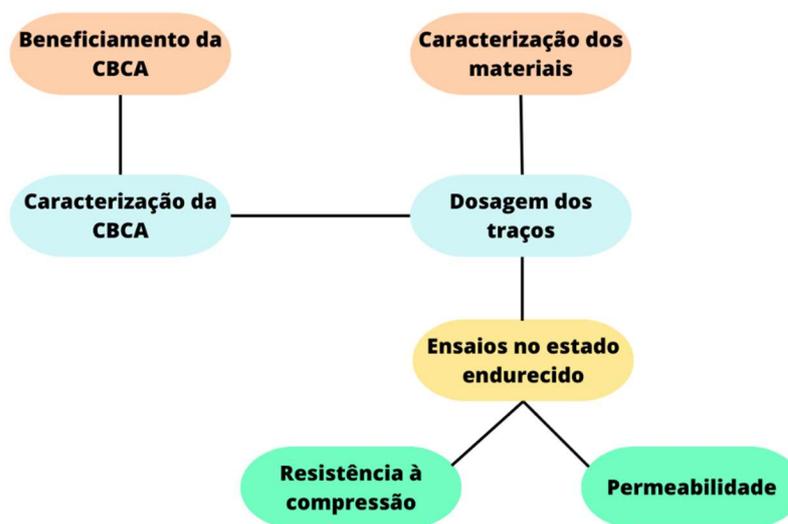
O material gerado tem potencial para ser utilizado na construção civil. Devido a sua composição podem ser incorporados a misturas, substituindo parcialmente o agregado miúdo ou o cimento (SALES; LIMA, 2010). O trabalho desenvolvido por Cordeiro *et al.* (2009) determinou que a CBCA tem potencial pozolânico. A adição do resíduo ao concreto permeável pode melhorar suas propriedades. O trabalho desenvolvido por Paula *et al.* (2009) e Gorges *et. al.* (2019), indicaram o aumento da porosidade e a viabilidade de substituição de até 20% de cimento pelas cinzas em misturas cimentícias, sem prejuízo de resistência para misturas cimentícias, atingindo melhor desempenho com 5%. Todas as dosagens tinham o objetivo de contemplar as exigências de permeabilidade e resistência à compressão fornecidas pela NBR 16416 (ABNT, 2016), sendo estes verificados a partir dos ensaios nos concretos endurecidos. Além disso, as adições ajudam a reduzir o consumo de cimento, tornando o concreto mais sustentável.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para que os objetivos deste trabalho experimental fossem alcançados, foram confeccionadas amostras prismáticas e cilíndricas de concreto permeável para os ensaios mecânicos e de permeabilidade. A primeira etapa desse estudo consistiu na caracterização dos materiais, em especial da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, seguindo com a produção das misturas e ensaios. As atividades foram realizadas no Laboratório de Estruturas e Materiais – LEMA e no Laboratório de Síntese de Catalisadores – LSCat, localizados no Centro de Tecnologia – CTEC, da Universidade Federal de Alagoas – UFAL.

Posteriormente, realizou-se um estudo exploratório na literatura existente, com o objetivo de determinar o traço inicial e as variações com adição do resíduo. Logo após, foram moldados os corpos de prova e iniciado o processo de cura úmida para os ensaios com o concreto endurecido, realizado em três idades, 7, 14 e 28 dias. A Figura 8 esquematiza o procedimento experimental adotado.

Figura 8 Procedimento experimental adotado



Fonte: Autora (2023)

Os resultados obtidos foram comparados aos valores presentes na NBR 16416 (ABNT, 2015) e na literatura estudada, a fim de analisar o comportamento do concreto permeável frente as alterações que o resíduo proporcionou à resistência e permeabilidade.

3.1 COLETA E BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO

A cinza utilizada durante a produção experimental do concreto permeável foi coletada de uma usina sucroalcooleira localizada no município de Campo Alegre, em Alagoas. O resíduo coletado foi transportado até o LEMA, onde inicialmente passou pela secagem em estufa a 105°C (+/- 5), por um período de 24h.

A princípio foi realizado o peneiramento da cinza utilizando as peneiras de malha #10 (1,8 mm), #30 (600 µm) e #48 (300 µm), a escolha dessas peneiras foi baseada nos estudos desenvolvidos por Pacífico (2020). Nesta fase foi verificado pouco material passante nas peneiras #30 e #48, optando-se pela moagem do material passante na peneira #10.

A moagem seguiu o procedimento adotado no trabalho de Pacífico (2020), utilizando o moinho planetário de bolas de marca Retsch, modelo PM 100, no LSCat, como demonstrado na Figura 9. Foram utilizadas 12 esferas, para melhorar as forças de fricção e impacto, por 30 minutos e a 360 rpm. Cerca de 200 g de cinza foram adicionados, juntamente com as esferas, ao vaso de moagem, que é acoplado ao moinho, como detalhado na Figura 10. Por fim, programou-se o tempo e a rotação requeridos e, após este procedimento, a cinza moída foi peneirada novamente, agora utilizando a peneira #30. O material retido foi descartado.

Figura 9 Moinho planetário de bolas de marca Retsch



Fonte: Autora (2023)

Figura 10 Detalhe do encaixe do vaso de moagem ao moinho



Fonte: Autora (2023)

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.2.1 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar

3.2.1.1 ***Massa específica***

O ensaio de massa específica foi realizado conforme descrito na NBR 16605 (ABNT, 2017), e executado em duplicidade. O procedimento utilizou o frasco de *Le Chatelier*, nele foram adicionados 250 mL de querosene, escolhido por não reagir quimicamente com a cinza, e o conjunto foi levado ao banho de água por 30 min, a fim de equalizar a temperatura, conforme a Figura 11.

Figura 11 Equalização da temperatura do querosene



Fonte: Autora (2023)

Após este período, foi realizada a primeira leitura do volume (L_0). Em seguida, foram adicionados 60 g de cinza com o auxílio de um funil de vidro, como ilustra a

Figura 12. Novamente o conjunto foi levado ao banho de água por 30 min para equilíbrio da temperatura. Por fim, foi aferida a segunda leitura do volume (L_f).

Figura 12 Adição da cinza ao querosene



Fonte: Autora (2023)

A massa específica é obtida através da Equação 1:

$$\rho = \frac{M}{L_f - L_0} \quad (1)$$

Sendo,

ρ – Massa específica (g/cm^3);

M - Massa do agregado (g);

L_0 - Leitura inicial (cm^3)

L_f - Leitura final (cm^3)

3.2.1.2 **Massa unitária**

O ensaio de massa unitária foi realizado seguindo a metodologia descrita na NBR NM 45 (ABNT, 2006), consistindo na utilização de um recipiente cilíndrico, cujo volume e massa foram determinados. A cinza foi adicionada no cilindro até transbordar, nivelando a superfície e registrando a massa do recipiente preenchido, conforme a Figura 13 ilustra.

Figura 13 Ensaio para determinação da massa unitária



Fonte: Autora (2023)

A massa unitária é obtida por meio da Equação 2:

$$\rho_u = \frac{M_c - M}{V} \quad (2)$$

Sendo,

ρ_u – Massa unitária (g/cm³);

M_c - Massa do recipiente com a cinza (g);

M - Massa do recipiente (g);

V – Volume do recipiente (cm³).

3.2.2 Agregado graúdo

O uso de agregado graúdo em concreto é fundamental para garantir a estabilidade e a resistência mecânica da mistura, além de conferir as propriedades desejadas para cada tipo de aplicação. Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2022), agregado graúdo é um material granular de partículas maiores que 4,75 mm. O agregado graúdo utilizado na produção do concreto permeável era de origem basáltica, proveniente de fornecedores locais. Para caracterizar o material a ser empregado na dosagem do concreto, realizaram-se os ensaios de massa específica, massa unitária e a granulometria do agregado.

3.2.2.1 *Massa específica*

A massa específica do agregado graúdo foi obtida conforme a NM 53 (ABNT, 2009), a Figura 14 ilustra o procedimento adotado.

Figura 14 Determinação da massa da amostra submersa



Fonte: Autora (2023)

A massa específica do agregado seco é obtida pela Equação 3:

$$\rho_s = \frac{M}{M - M_a} \quad (3)$$

Sendo,

ρ_{sss} – Massa específica (g/cm³);

M - Massa do agregado seco (g);

M_a - Massa da amostra submersa (g).

A massa específica do agregado na condição de saturada superfície seca é obtida pela Equação 4:

$$\rho_{sss} = \frac{M_{sss}}{M_{sss} - M_a} \quad (4)$$

Sendo,

ρ_{sss} – Massa específica (g/cm³);

M_{sss} - Massa do agregado saturada superfície seca (g);

M_a - Massa da amostra submersa (g).

A massa específica aparente do agregado é obtida pela Equação 5:

$$\rho_a = \frac{M}{M_{SSS} - M_a} \quad (5)$$

Sendo,

ρ_a – Massa específica (g/cm³);

M - Massa do agregado seco (g);

M_{SSS} - Massa do agregado saturada superfície seca (g);

M_a - Massa da amostra submersa (g).

Por fim, é possível determinar a absorção de água do agregado por meio da Equação 6:

$$a = \frac{M_{SSS} - M}{M} * 100 \quad (6)$$

Sendo,

a – Absorção de água (%)

M - Massa do agregado seco (g);

M_{SSS} - Massa do agregado saturada superfície seca (g).

3.2.2.2 **Massa unitária**

A determinação da massa unitária do agregado graúdo seguiu o Método A da NBR NM 45 (ABNT, 2006), a Figura 15 ilustra o ensaio realizado.

Figura 15 Ensaio para determinação da massa unitária



Fonte: Autora (2023)

A massa unitária é obtida por meio da Equação 7:

$$\rho u = \frac{M_c - M}{V} \quad (7)$$

Sendo,

ρu – Massa unitária (g/cm³);

M_c - Massa do recipiente com a brita (g);

M - Massa do recipiente (g);

V – Volume do recipiente (cm³).

3.2.2.3 Composição granulométrica

O ensaio seguiu as etapas que constam na NBR NM 248 (ABNT, 2003), como ilustrado na Figura 16. Os dados foram coletados para posterior realização dos cálculos e elaboração da curva granulométrica. O módulo de finura do agregado e a dimensão máxima característica também foram determinados.

Figura 16 Amostras e conjunto de peneiras



Fonte: Autora (2023)

3.2.3 CIMENTO

O cimento Portland, segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), é um material aglomerante hidráulico, composto principalmente de clínquer, que é um material obtido a partir da calcinação de uma mistura de calcário, argila e outros aditivos. A mistura formada por estes componentes é aquecida em um forno à temperatura de clínquerização (1450 °C) dando origem então ao clínquer, que é moído juntamente com adições e formam os cimentos comumente utilizados.

Assim como nos concretos convencionais, o Cimento Portland é o principal aglomerante utilizado na confecção do concreto permeável. Neste trabalho foi utilizado o cimento Portland CP II-F 32, com adição de material carbonático (fíler), garantindo maior impermeabilidade e durabilidade ao concreto produzido com este tipo de cimento. A norma que o regulamenta é a NBR 16697 (ABNT, 2018) que padroniza sua composição conforme a Tabela 1.

Tabela 1 Componentes do Cimento Portland composto CP II – F 32

Cimento	Componentes			
	Clínquer + Gesso	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
CP II F – 32	94 -90 %	-	-	6 – 10 %

Fonte: Adaptado NBR 16697 (2018)

3.2.4 ÁGUA

A água é um elemento fundamental na produção de qualquer mistura cimentícia, com o concreto permeável não é diferente. A qualidade da água empregada nas misturas pode alterar o resultado desejado. A presença de impurezas pode interferir na pega do cimento, afetar negativamente na resistência do concreto ou causar manchas em sua superfície, ocasionando manifestações patológicas futuras. A água utilizada para a produção do concreto em estudo é potável e fornecida pela concessionária local.

3.2.5 DOSAGENS, MOLDAGEM E ENSAIOS NO CONCRETO ENDURECIDO

3.2.5.1 *Dosagens do concreto permeável*

O traço padrão foi definido dentro dos intervalos encontrados na literatura, constituída apenas de cimento, agregado graúdo e água. Este traço foi utilizado como base para definição das demais dosagens. Foram estabelecidos os teores de 5% e 10% de substituição do cimento pela cinza do bagaço de cana de açúcar. Os percentuais de substituição foram escolhidos com base nos valores encontrados na literatura.

3.2.5.2 *Moldagem e cura dos corpos de prova*

De posse dos traços definidos a partir das etapas anteriores, iniciou-se o processo de mistura e confecção dos corpos de prova. Seguiu-se a metodologia empregada por Schaefer *et al.* (2006), que encontraram resultados positivos para os parâmetros analisados. A sequência de mistura está descrita a seguir:

1. Adicionar todo o agregado com 5% do peso total do cimento na betoneira;
2. Misturar por 1 minuto;
3. Adicionar o restante dos materiais;
4. Misturar por 3 minutos;
5. Deixar a mistura em repouso por 3 minutos;
6. Misturar por mais 2 minutos.

Após o período de mistura, finalizou-se a homogeneização com o auxílio da colher de pedreiro. O controle da mistura foi pela análise tátil-visual, consistindo em apertar uma pequena amostra do concreto no estado fresco, observando que os componentes estavam envoltos em uma pasta brilhosa de cimento e que a amostra ao ser comprimida na mão não desmoronou (TENNIS *et al.*, 2004), a Figura 17 apresenta a realização do teste. O teste serviu para dosar a quantidade de água na mistura, caso não atendesse aos parâmetros mencionados, mais água poderia ser adicionada. Prosseguiu-se com a moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos.

Figura 17 Análise visual para controle da mistura



Fonte: Autora (2023)

Os corpos de prova cilíndricos foram moldados em formas com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, sendo produzidos 9 para cada traço. A moldagem foi executada em uma única camada, adensada utilizando haste vibratória imersa no concreto por 10 segundos, como mostra a Figura 18.

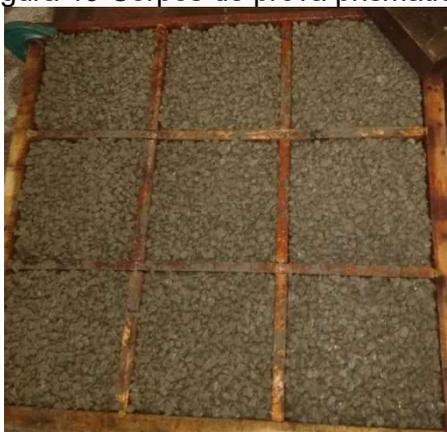
Figura 18 Corpos de prova cilíndricos



Fonte: Autora (2023)

Para a realização do ensaio de permeabilidade do concreto, fez-se necessário produzir as formas para moldar placas com 200 mm de largura, 200 mm de comprimento e 60 mm de espessura, para que atendesse a exigência de espessura mínima requerida na NBR 16416 (2015). As formas foram de madeira e untadas com desmoldante. A moldagem foi feita em 3 camadas com energia de compactação de 15 golpes com soquete de 3,5 kg por camada, a Figura 19 ilustra os corpos de prova moldados. Aguardou-se o período de 24h para realizar a desmoldagem de todos os corpos de prova, como ilustrado na Figura 20. Em seguida, foram para cura úmida, Figura 21, até as devidas idades de ensaio.

Figura 19 Corpos de prova prismáticos



Fonte: Autora (2023)

Figura 20 Corpos de prova desmoldados



Fonte: Autora (2023)

Figura 21 Cura úmida dos corpos de prova



Fonte: Autora (2023)

3.2.6 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL

3.2.6.1 *Ensaio no concreto endurecido*

Os ensaios realizados para verificar as propriedades dos concretos elaborados para o presente estudo no estado endurecido foram: ensaio de resistência à compressão axial e a determinação do coeficiente de permeabilidade. Todos os ensaios seguiram as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018).

3.2.6.2 *Resistência à compressão axial*

O ensaio foi norteado pela NBR 5739 (ABNT, 2018), dele obteve-se a resistência à compressão das amostras dos concretos. O ensaio consistiu no

posicionamento do corpo de prova em uma prensa adequada, seguindo da aplicação de uma carga axial.

Para cada traço foram rompidos 3 exemplares nas idades de 7, 14 e 28 dias. O traço 1:4 foi rompido apenas aos 28 dias de cura. Na realização do ensaio utilizou-se uma prensa com capacidade de carga de 200 tf, da marca Amsler, disponível no laboratório. Posteriormente ao ensaio, pode-se calcular a tensão de ruptura a partir da Equação 8.

$$f_c = \frac{F}{\frac{\pi * D^2}{4}} \quad (8)$$

Onde,

f_c – Resistência à compressão (MPa);

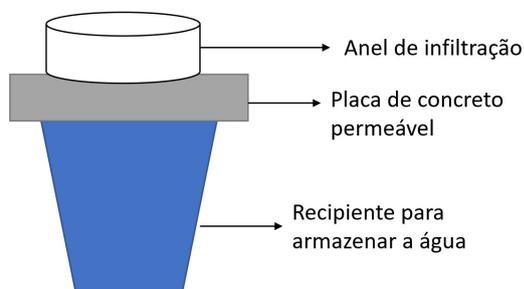
F - Carga de ruptura (N);

D - Diâmetro do corpo de prova (mm).

3.2.6.3 Coeficiente de permeabilidade

O ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade seguiu o procedimento prescrito na NBR 16416 (ABNT, 2015). O método consiste na fixação de um anel de infiltração, posicionado na superfície do concreto permeável, conforme ilustrado na Figura 22. As laterais do cilindro foram vedadas com adesivo de silicone acético, para evitar a perda de água.

Figura 22 Esquema ensaio de permeabilidade



Fonte: Autora (2023)

As placas ensaiadas foram submetidas a pré-molhagem, com massa de água e tempo de molhagem estabelecidos na norma. O volume de água é

(9)

despejado no interior do anel, em velocidade suficiente para manter o nível de água entre as marcações de 10 e 15 mm. A contagem de tempo é iniciada no momento que a água entra em contato com a superfície da placa. Ao final do ensaio pode-se determinar o coeficiente de permeabilidade a partir da Equação 9. No ensaio de permeabilidade, as placas moldadas foram ensaiadas nas idades de 7, 14 e 28 dias, utilizando duas amostras e obtendo-se o coeficiente a partir da média entre elas.

$$k = \frac{C * m}{d^2 * t}$$

Onde,

k – Coeficiente de permeabilidade (mm/h);

m - Massa de água infiltrada (kg);

d - Diâmetro interno do anel de infiltração (mm);

t - Tempo necessário para toda a água percolar (s);

C - Fator de conversão de unidades do Sistema Internacional, com valor igual a 4.583.666.000.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 BENEFICIAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA

Após a recepção e secagem em estufa, foi possível observar a presença de pedaços do bagaço de cana de açúcar com combustão incompleta, sendo necessário o peneiramento antes da moagem com a peneira #10, como observado na Figura 23, sendo feito o descarte do material retido.

Figura 23 Material retido na peneira #10



Fonte: Autora (2023)

Após a moagem, passou-se a cinza na peneira #30, restando pouco ou nenhum material retido, o que demonstrou a eficiência no processo de moagem empregado. A Figura 24 ilustra o aspecto da cinza antes e após a moagem. Todo o processo foi indispensável para tornar o resíduo mais fino, permitindo uma melhor incorporação a mistura. Após a finalização desta etapa, o resíduo estava pronto para ser caracterizado e utilizado na produção dos concretos.

4.3 CIMENTO

O cimento Portland utilizado para confecção dos corpos de prova foi o CP II-F-32, comumente utilizado na construção civil. A massa específica do cimento pode variar ligeiramente de acordo com o fabricante, no geral, a massa específica do CP II F 32 está entre $3,0 \text{ g/cm}^3$ a $3,2 \text{ g/cm}^3$. Para determinação das dosagens, adotou-se o valor de massa específica igual a $3,0 \text{ g/cm}^3$.

4.4 DOSAGENS

Tomando como base os melhores resultados de resistência e permeabilidade encontrados nos estudos de Lian e Zhuge (2010) e Lamb (2014), foi definido, a princípio, o traço 1:4 (cimento: agregado graúdo) e a relação água/cimento de 0,32 para o concreto permeável de referência (PADRÃO1), constituído apenas de cimento, agregado graúdo e água. No momento da moldagem dos corpos de prova, notou-se que a mistura apresentava trabalhabilidade reduzida, o que impactou diretamente na compactação das camadas. Optou-se pela alteração do traço padrão para 1:3 (PADRÃO2) (cimento: agregado graúdo), mantendo a relação água/cimento.

O traço padrão serviu como base para definição das demais dosagens. Foram estabelecidos os teores de 5% e 10% de substituição do cimento pela cinza do bagaço de cana. Todas as dosagens tinham o objetivo de contemplar as exigências de permeabilidade e resistência mecânica à compressão, sendo estes verificados a partir dos ensaios nos concretos endurecidos. A Tabela 2 traz a composição dos traços definidos. Totalizando a produção de 4 traços, e para cada traço foram moldados 9 corpos de prova prismáticos e 9 corpos de prova cilíndricos.

Tabela 2 Composição dos traços estudados na pesquisa

TRAÇO	CIMENTO	CINZA	BRITA	A/C
PADRÃO1	1	0	4	0,32
PADRÃO2	1	0	3	0,32
CBCA5	1	0,05	3	0,32
CBCA10	1	0,11	3	0,32

Fonte: Autora (2023)

4.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A influência dos teores de substituição do cimento pela cinza do bagaço de cana foi analisada segundo o ensaio de resistência à compressão nos corpos de prova cilíndricos. Após cumprir os prazos de cura determinados, os corpos de prova cilíndricos passaram pelo processo de capeamento com pasta de cimento, a fim de nivelar as bases com o propósito de distribuir uniformemente as cargas aplicadas. A técnica de capeamento foi escolhida devido à rugosidade da superfície do concreto, ocasionada pelo elevado teor de agregado graúdo, de modo que a retificação poderia ocasionar perda de material e gerar irregularidades nas faces do corpo de prova, prejudicando a precisão dos resultados. A Figura 26 ilustra um corpo de prova após o rompimento.

Figura 26 - Corpo de prova rompido no ensaio de compressão axial



Fonte: Autora (2023)

É possível observar que o rompimento se deu entre os agregados, na ligação feita pela pasta de cimento. Como no trabalho de Silva (2019) pode-se concluir que a resistência da ligação entre os agregados é inferior a resistência do próprio agregado que compõe o concreto permeável.

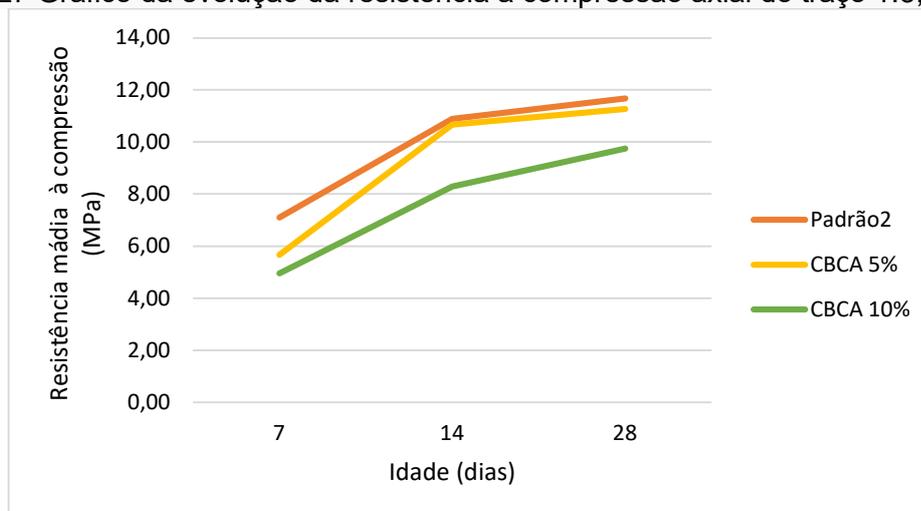
Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial estão presentes na Tabela 3, foram obtidos da média dos valores encontrados para cada idade. A evolução das resistências médias em função do tempo está apresentada na Figura 27.

Tabela 3 Resistência à Compressão média

Resistência à Compressão (MPa)				
IDADE (DIAS)	PADRÃO1	PADRÃO2	CBCA 5%	CBCA 10%
7	-	7,10	5,67	4,96
14	-	10,89	10,66	8,29
28	5,10	11,68	11,27	9,75

Fonte: Autora (2023)

Figura 27 Gráfico da evolução da resistência à compressão axial do traço 1:3, em MPa



Fonte: Autora (2023)

As resistências encontradas estão abaixo de 20 MPa, valor esperado pela NBR 16416 (ABNT, 2015) para o ensaio de resistência à compressão. A norma não especifica um traço que agregue tal resistência ao material produzido. No entanto, os resultados encontrados estão dentro do intervalo de resistência à compressão de 2,8 a 28 MPa (ACI, 2010). Os valores aumentaram de forma crescente com o progresso da cura úmida.

A resistência à compressão média máxima alcançada foi de 11,68 MPa aos 28 dias, obtida da amostra padrão2, sem adição de cinza. Este valor foi seguido por 11,27 MPa, atingido aos 28 dias pelo concreto com substituição de 5%. De modo geral, percebe-se o decréscimo da resistência à medida que se aumenta o percentual de cinza, chegando a 16,5% a variação entre o maior e o menor valor alcançado aos 28 dias para o traço 1:3. No entanto, resistências maiores podem ser atingidas em idades mais avançadas devido ao potencial pozolânico da cinza, determinado nos estudos de Cordeiro *et al.* (2008), pelo alto teor de sílica do resíduo. A

aplicabilidade do concreto alcançado se limita a áreas de tráfego de pedestres, como calçadas.

A resistência obtida no traço 1:4 foi de 5,10 MPa aos 28 dias. O valor alcançado ficou bem abaixo das demais resistências para o traço 1:3 na mesma idade. Conforme mencionado, durante a moldagem dos corpos de prova deste traço, notou-se a redução da trabalhabilidade da mistura que pode ter afetado a compactação das camadas, impactando diretamente no ganho de resistência.

4.6 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

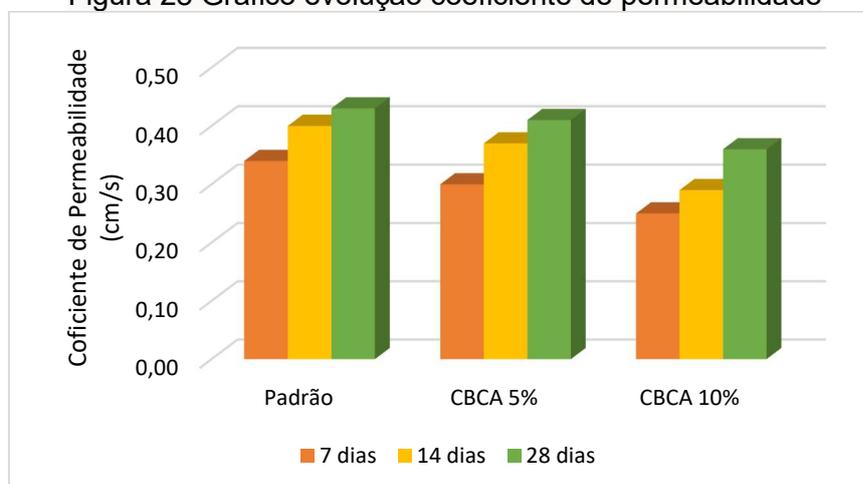
O coeficiente de permeabilidade recomendado pela NBR 16416 (ABNT, 2015) deve ser maior que 10^{-3} m/s, para o concreto permeável utilizado como revestimento. Os valores médios alcançados ficaram dentro do previsto pela norma, como estão descritos na Tabela 4 e podem ser observados na Figura 28. O ensaio não foi realizado para o concreto produzido com o traço 1:4.

Tabela 4 Coeficiente de permeabilidade

Coeficiente de permeabilidade (m/s)			
Idade (dias)	Padrão2	CBCA 5%	CBCA 10%
7	$3,4 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-3}$
14	$4,0 \times 10^{-3}$	$3,7 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-3}$
28	$4,3 \times 10^{-3}$	$4,1 \times 10^{-3}$	$3,6 \times 10^{-3}$

Fonte: Autora (2023)

Figura 28 Gráfico evolução coeficiente de permeabilidade



Fonte: Autora (2023)

Analisando os resultados encontrados, fica evidente o ganho na permeabilidade com a evolução da idade do concreto. Aos 28 dias o maior coeficiente encontrado foi na amostra padrão com $4,3 \times 10^{-3}$ m/s, seguido pela amostra com adição de 5%, $4,1 \times 10^{-3}$ m/s, uma redução de 4,7%. A variação entre o máximo e mínimo encontrados foi de 16,3%. Nota-se a diminuição do coeficiente à medida que aumenta o percentual de cinza ao concreto. O que leva a acreditar que o resíduo diminui os espaços vazios na estrutura, diminuindo então a permeabilidade do material, característica não desejável para o concreto permeável. No entanto, manteve-se dentro do indicado em norma.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando os resultados, pode-se concluir que os objetivos do trabalho foram alcançados durante o procedimento experimental. Com base na literatura e em testes, foi possível definir um traço de referência a ser utilizado para as substituições definidas. Ficou evidente nos estudos preliminares que a resistência mecânica e a permeabilidade são parâmetros essenciais para a validação do concreto permeável. Uma vez que a resistência define sua aplicação, tráfego pedestres ou de veículos leves, e o coeficiente de permeabilidade da camada de revestimento dirá se o concreto poderá ser empregado como solução alternativa na drenagem urbana.

Os valores de resistência obtidos estão dentro do intervalo encontrado na revisão bibliográfica. Em relação aos resultados de permeabilidade foi constatado que os traços se mostraram satisfatórios aos valores requeridos pela NBR 16416 (2015). No entanto, verificou-se que conforme há um aumento no percentual de resíduo incorporado à mistura, o traço sofre diminuição da resistência à compressão e da permeabilidade.

De modo geral, a utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como substituto parcial do cimento no concreto permeável mostrou-se promissora, com base nos parâmetros analisados, pois ainda que reduzindo estes, manteve-se dentro dos valores estabelecidos em norma e encontrados em outros trabalhos existentes. Sua aplicação se limitaria a áreas de tráfego leve, como ciclovias e calçadas (BARZOTTO, 2016).

Recomenda-se que em estudos futuros, as dosagens sejam revisadas, variando o percentual de cinzas em substituição ao cimento e a relação água/cimento. Analisar a viabilidade de se utilizar outras proporções de agregado graúdo, que não afetem a trabalhabilidade da massa produzida. Que sejam utilizados outros meios de compactação das amostras, pois o método empregado no estudo pode ter influenciado os resultados alcançados nos ensaios realizados.

Além disso, somar aos ensaios de caracterização do resíduo, o ensaio de lixiviação, a fim de determinar o comportamento do resíduo quando incorporado a mistura. A realização do ensaio de massa específica no concreto fresco e, adicionar

aos estudos do concreto endurecido, o ensaio de resistência à compressão e flexão nas placas, determinação do índice de vazios e o acompanhar a resistência a compressão em idade mais avançadas, podem ser parâmetros interessantes a serem analisados juntamente com as características aqui observadas.

REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE 522. Pervious Concrete (**ACI 522R-10**). Farmington Hills: American Concrete Institute, 2010.

ALLEVANT. Os impactos causados pela excessiva impermeabilização do solo. Disponível em: <<https://allevant.com.br/os-impactos-causados-pela-excessiva-impermeabilizacao-do-solo/>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

AMARAL, A.C.R. **Pavimento intertravado de concreto convencional e permeável**. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.

ANJOS, M. A. S. dos; FERREIRA, D. F.; BORJA, E. V. Influência da finura do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar na atividade pozolânica com a cal. **Holos**, ano 28, v. 2, pp. 44-57, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. ABCP. **Manual de Placas de Concreto**: Passeio Público. São Paulo, 2010.

_____. ABCP. **Guia básico de utilização do Cimento Portland**. Boletim técnico, São Paulo, n.106, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto: Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **ABNT NBR NM 53**: Agregado graúdo – determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **ABNT NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **ABNT NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **ABNT NBR 7211: Agregados Para Concreto – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2022.

_____. **ABNT NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

_____. **ABNT NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos.** Rio De Janeiro, 2018.

_____. **ABNT NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio De Janeiro, 2018.

BANDEIRA, A. P. N.; NUNES, P. H. de S.; LIMA, M. G. de S. **Gestão de riscos ambientais em municípios da região metropolitana do Cariri,** Ceará, Brasil. *Ambiente & Sociedade*, v. 19, p. 81-100, 2016.

BARZOTTO, A. C. **Estudo De Diferentes Dosagens Para A Produção Do Concreto Permeável.** Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) –Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2016.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana.** 2 ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para área de veículos leves.** 133p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BORLINI, M. C.; SALES, H. F.; VIEIRA, C. M. F.; CONTE, R. A.; PINATTI, D. G.; MONTEIRO, S. N. **Cinza da Lenha para Aplicação em Cerâmica Vermelha – Características da Cinza.** São Paulo, v. 51, n. 319, jul./set. 2005.

BH RECICLA. **Impermeabilização do solo: entenda esse problema.** Disponível em: <<https://bhrecicla.com.br/blog/impermeabilizacao-do-solo-entenda-esse-problema/>>. Acesso em: 08 out. 2023.

CALDAS, L. R.; SPOSTO, R. M.; PIRES, A. C.; PAULSEN, J. S. Sustentabilidade na construção civil: avaliação do ciclo de vida energético e de emissões de CO₂ de fachadas para habitações sociais. *Sustentabilidade em Debate*, v. 7, n. 2, p. 238-256, 2016.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. *Química Nova*, v. 32, p. 82-86, 2009.

ENERGÊS. Dez perguntas sobre a biomassa. 2020. Disponível em: <<https://energes.com.br/biomassa/10-perguntas-sobre-a-biomassa/>>. Acesso em: 15 dez. 2022.

GAGLIARDO, D. P., GAGLIARDO, J. C., LINTZ, R. C. C., BARBOZA, L. A. G. Concreto Permeável Para Utilização em Pavimentação. 3º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos - TECSIC. 2021.

GORGES, G. de C.; WEDEKIND, J. P.; SOUSA, T. B. de. Substituição parcial do cimento Portland por cinza do bagaço da cana-de-açúcar em argamassa. *Revista de Tecnologia e Inovação*, v. 5, n. 2, p. 1-10, 2019.

HOLTZ, F da C. Uso do concreto permeável na drenagem urbana: análise e viabilidade técnica e do impacto ambiental. 2011. 118p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

IBGE. Prévia do Censo Demográfico 2022: Brasil tem 208 milhões de habitantes. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/pt/noticias.html?newsid=4206>>. Acesso em: 1 de ago. de 2023.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. **Cinza e aglomerantes alternativos**. In: Freire, W. J.; Beraldo, A. L. *Tecnologia e materiais alternativos de construção*. Campinas: UNICAMP, 2003. cap.6, p.145-190.

LAMB, G.S. **Desenvolvimento e análise do desempenho de elementos de drenagem fabricados em concreto permeável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. 150 p.

LIAN, C.; ZHUGE, Y. **Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation**. Elsevier Journal Construction and Building Materials, 2010. M. Urban drainage specific climates: urban drainage in humid tropics. Paris: UNESCO. IHPV. Technical Documents in Hydrology. No.40. v.I. cap.4, p 103 – 124.

MARCHIONI, M. L; SILVA, C. O. **Conceitos e requisitos para pavimento de concreto permeável**. Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). São Paulo, 2013.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1 ed. São Paulo: PINI, 1994. 581 p.

MONTEIRO, A. C. N. **Concreto Poroso: Dosagem e Desempenho**. 36 p. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

MOURA, J. M. B. M.; GOHR PINHEIRO, I.; CARMO, J. L. Gravimetric composition of the rejects coming from the segregation process of the municipal recyclable wastes. *Waste management*, v. 74, p. 98-109, 2018.

MOVIMENTO ECONÔMICO. **Safra da cana-de-açúcar faz Pernambuco e Alagoas terem mais empregos formais**. Movimento Econômico, 27 de outubro de 2022. Disponível em: <https://movimentoeconomico.com.br/geral/redacao/2022/10/27/safra-da-cana-de-acucar-faz-pernambuco-e-alagoas-terem-mais-empregos-formais/>. Acesso em: 1 de maio de 2023.

MULLER; M. Z. **Técnica Compensatória de Drenagem Urbana: Um Estudo Sobre Pavimento de Concreto Permeável**. Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Civil. Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2017.

NACHILUK, K. **Alta na Produção e Exportações de Açúcar Marcam a Safra 2020/21 de Cana**. Análises e Indicadores do Agronegócio, São Paulo, v. 16, n. 6, jun. 2021, p. 1-5. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=15925#:~:text=O%20 brasil%20%C3%A9%20o%20maior,de%20litros%20de%20etanol1>>. Acesso em: 05 fev. 2022.

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 12 out. 23.

Nigri, I. R. **Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos Gerais de Projeto Estabelecidos pela Norma ABNT NBR 16416: 2015**. 45p. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro /Escola Politécnica. Rio de Janeiro, 2017.

OTERPREM. **Blocos e pisos intertravados e placas de concreto**. São Paulo, 2019. Disponível em:< <https://www.oterprem.com.br/>>. Acesso em: 19 de fev. de 2022.

PACÍFICO, F. F. M. **Caracterização de material pozolânico a partir do resíduo de biomassa para uso na construção civil**. 66p. Dissertação. (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Associação Instituto de Tecnologia de Pernambuco, Recife, 2020.

PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. 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, n.3, p.353–357, 2009.

RAMOS, G. M. **Análise das Propriedades do Concreto Permeável com Adição de Agregado Miúdo e Resíduo (Cinza de Madeira)**. 90 p. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

REVISTA PESQUISA FAPESP. **Cardápio energético**. Edição Impressa 30, abril 1998.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Aproveitamento de resíduos na construção. Coleção Habitare: Utilização de Resíduos na Construção Habitacional, Porto Alegre, **ANTAC**, v. 4, 2003.

SALES, A.; LIMA, S. A. Use of brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. **Waste Management**, v. 30, n. 6, pp. 1114-1122, 2010.

SANTOS, I. S. **Análise da viabilidade de utilização do resíduo da lapidação do granilite em concreto permeável**. 44 p. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, Rio Verde, 2020.

SCHAEFER, V., WANG, K., SEULEIMAN, M., KEVERN, J. **Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates**. Final Report, Civil Engineering, Iowa State University, 2006.

São Paulo (cidade). Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: gerenciamento do sistema de drenagem urbana. São Paulo, 2012.

SILVA, G. C. G. da. **Estudo experimental do concreto permeável para pavimentação**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 2019.

SUPRIYA, A., MURALI, K. The development of the compressive strength of pervious concrete using sugarcane bagasse ash and flyash, *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.338>.

SCHWETZ, P. F., LORENZI, A., SILVA FILHO, L. C. P., FERREIRA, L. Z., LINHARES, V., PARISOTO, M. Otimização do traço do concreto permeável para pavimentação de fluxo leve. CONPAT. Lisboa, 2015.

TENNIS, P.D.; LEMING, M.L.; AKERS, D.J. **Pervious Concrete Pavements**. EB302.02, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, United States, 2004.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

TUCCI, C.E. M.; **Parâmetros dos Hidrogramas Unitários para Bacias Urbanas Brasileiras**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, Vol. 8, 2003.

UKWATTAGE, N. L; RANJITH, P. G., BOUAZZA, M. The use of coal combustion fly ash as a soil amendment in agricultural lands (with comments on its potential to improve food security and sequester carbon). **Fuel**, v.109, p.400–408, 2013.

VOGT, L. C. **Estudo de dosagem de concreto permeável de alta resistência para pavimentação**. 89p. Monografia. (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2019.