

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTU SENSU* EM
ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE

**SARJETA SUSTENTÁVEL DE CONCRETO PERMEÁVEL
CONTENDO AGREGADOS RECICLADOS DE
CONCRETO E CINZA DE MADEIRA DE EUCALIPTO**

Autor: Gilmar Fernando de Melo Júnior
Orientador: Dr. Hugo Leonardo Souza Lara Leão

RIO VERDE – GO
Agosto - 2022

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTU SENSU* EM
ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE

**SARJETA SUSTENTÁVEL DE CONCRETO PERMEÁVEL
CONTENDO AGREGADOS RECICLADOS DE
CONCRETO E CINZA DE MADEIRA DE EUCALIPTO**

Autor: Gilmar Fernando de Melo Júnior
Orientador: Dr. Hugo Leonardo Souza Lara Leão

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração Tecnologia Ciência dos Materiais.

RIO VERDE – GO
Agosto - 2022

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

M528 Fernando de Melo Júnior, Gilmar
Sarjeta sustentável de concreto permeável contendo agregados
reciclados de concreto e cinza de madeira de eucalipto / Gilmar
Fernando de Melo Júnior. Rio Verde 2022.

66f. il.

Orientador: Prof. Dr. Hugo Leonardo Souza Lara Leão.
Dissertação (Mestre) - Instituto Federal Goiano, curso de
0233144 - Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e
Sustentabilidade (Campus Rio Verde).
I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 93/2022 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

SARJETA SUSTENTÁVEL DE CONCRETO PERMEÁVEL CONTENDO AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO E CINZA DE MADEIRA DE EUCALIPTO

Autor: Gilmar Fernando de Melo Júnior
Orientador: Prof. Dr. Hugo Leonardo Souza Lara Leão

TITULAÇÃO: Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade - Área de Concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

APROVADO em 30 de agosto de 2022.

Prof. Dr. Edgar Bacarji
Avaliador externo - UFG

Prof. Dr. Michell Macedo Alves
Avaliador Interno - IF Goiano / Rio Verde

Prof. Dr. Hugo Leonardo Souza Lara Leão
Presidente da banca - IF Goiano / Rio Verde

Documento assinado eletronicamente por:

- **Hugo Leonardo Souza Lara Leao, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 05/09/2022 15:42:33.
- **Michell Macedo Alves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 05/09/2022 15:57:41.
- **Edgar Bacarji, Edgar Bacarji - Professor Avaliador de Banca - Universidade Federal de Goiás (01567601000143)**, em 14/09/2022 15:26:43.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 11/08/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 414933

Código de Autenticação: 9eee251475



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3620-5600



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 81/2022 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Unidade do IF Goiano:	Campus Rio Verde	
Programa de Pós-Graduação:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Defesa de:	Dissertação	Defesa de número: 54
Data: 30/08/2022	Hora de início: 08:00h	Hora de encerramento: 11:00h
Matrícula do discente:	2020102331440072	
Nome do discente:	Gilmar Fernando de Melo Júnior	
Título do trabalho:	SARJETA SUSTENTÁVEL DE CONCRETO PERMEÁVEL CONTENDO AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO E CINZA DE MADEIRA DE EUCALIPTO	
Orientador:	Hugo Leonardo Souza Lara Leão	
Área de concentração:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Linha de Pesquisa:	Tecnologia e Ciência dos Materiais	
Projeto de pesquisa de vinculação	SARJETA SUSTENTÁVEL DE CONCRETO PERMEÁVEL CONTENDO AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO E CINZA DE MADEIRA DE EUCALIPTO	

Titulação:	Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade
------------	--

Nesta data, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora, Prof. Dr. Hugo Leonardo Souza Lara Leão (Presidente da banca), Prof. Dr. Edgar Bacarji (Avaliador Externo), Prof. Dr. Michell Macedo Alves (Avaliador Interno) sob a presidência do primeiro, em sessão pública realizada por vídeo conferência via Google Meet à distância, para procederem a avaliação da defesa de dissertação, em nível de Mestrado, de autoria de GILMAR FERNANDO DE MELO JÚNIOR, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Hugo Leonardo Souza Lara Leão, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida o(a) autor (a) da dissertação para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o(a) examinado(a), tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, e procedidas às correções recomendadas, a dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE**. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGEAS da versão definitiva da dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60** (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Tese em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Decisão da banca: Aprovada

Esta defesa é parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna do IFGoiano.

Documento assinado eletronicamente por:

- Edgar Bacarji, Edgar Bacarji - Professor Avaliador de Banca - Universidade Federal de Goiás (01567601000143), em 14/09/2022 15:27:58.
- Michell Macedo Alves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 05/09/2022 15:58:24.
- Hugo Leonardo Souza Lara Leao, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 05/09/2022 15:42:53.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 11/08/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 414918
Código de Autenticação: 1419d7c838





TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- ☐ Tese (doutorado)
☒ Dissertação (mestrado)
☐ Monografia (especialização)
☐ TCC (graduação)

- ☐ Artigo científico
☐ Capítulo de livro
☐ Livro
☐ Trabalho apresentado em evento

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Gilmar Fernando de Melo Júnior

Matrícula:

2020102331440072

Título do trabalho:

SARJETA SUSTENTAVEL DE CONCRETO PERMEAVEL CONTENDO AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO E CINZA DE MADEIRA DE EUCALIPTO

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 24 / 02 / 2026

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde

Local

24 / 10 / 2025

Data

Gilmar Fernando de Melo Júnior

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Algo Leonardo S. Z. Leão

Assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder o privilégio de cursar o mestrado, por me guiar e me dar forças em todos os momentos da minha vida, com certeza, sozinho eu jamais teria chegado até aqui. Foram tempos difíceis vivenciados na pandemia do COVID-19 e Deus foi, sem dúvida, ao longo de todo esse período, minha proteção.

À minha esposa, Júlia Rezende Mota, por ser meu amparo e minha fonte de energia para seguir em frente, sem seu companheirismo e sua ajuda essa conquista não teria sido possível.

Aos meus pais, por todo o empenho dedicado à minha formação acadêmica, desde sempre foram grandes apoiadores do meu desenvolvimento pessoal e profissional. Estendo os agradecimentos aos meus demais familiares que se fazem presentes na minha vida e na minha trajetória.

Ao meu orientador, pela paciência e por todo conhecimento compartilhado. Estendo os agradecimentos aos professores do PPGEAS e servidores do Instituto Federal Goiano, que contribuem para a existência e funcionamento do mestrado. Agradeço também à Universidade de Rio Verde e ao César Filho, técnico de laboratório, por toda infraestrutura física e intelectual empregada na minha pesquisa.

Aos meus amigos e companheiros de pesquisa, Mariana Gouveia e Geovane Rocha, pois juntos enfrentamos grandes desafios e uma grande corrida contra o tempo depois de quase dois anos afastados em razão da pandemia. Obrigado por toda ajuda no desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço a todos que contribuíram para que essa conquista se tornasse possível.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Gilmar Fernando de Melo Júnior, nasceu na cidade de Piracanjuba – Goiás, no dia 19 de junho de 1996. Filho de Gilmar Fernando de Melo e Ana Maria Ribeiro de Melo, concluiu a graduação em Engenharia Civil pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde em 2018. Em 2019, cursou uma pós-graduação em Gerenciamento de Obras e Controle de Custos em BIM pela Faculdade Cambury. Em 2020, ingressou no Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade no Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde.

ÍNDICE GERAL

	Página
ÍNDICE DE TABELAS.....	10
ÍNDICE DE FIGURAS	11
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES.....	12
RESUMO.....	14
ABSTRACT.....	16
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Sistema de drenagem urbana	21
1.1.1 Aspectos legais da drenagem urbana	22
1.1.2 Desenvolvimento científico do sistema de drenagem.....	25
1.2 Gestão de resíduos sólidos	26
1.2.1 Aspectos legais da gestão de resíduos sólidos	28
1.2.2 Desenvolvimento científico no reaproveitamento de resíduos sólidos.....	30
2 OBJETIVOS	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34
3 CAPÍTULO 1	39
Resumo	39
Abstract.....	40
3.1 Introdução	41
3.2 Referencial teórico	41
3.3 Método	44
3.3.1 Materiais	45
3.3.2 Índice de desempenho pozolânico da CME.....	46
3.3.3 Dosagem, mistura, moldagem e cura dos corpos de prova.....	48
3.3.4 Avaliação de desempenho mecânico	50
3.3.5 Avaliação de desempenho hidráulico	50
3.4 Resultados e discussões	51
3.4.1 Índice de atividade pozolânica na CME	51
3.4.2 Massa específica no estado fresco	52
3.4.3 Resistência à compressão.....	54
3.4.4 Coeficiente de permeabilidade.....	55
3.4.5 Concreto permeável com substituição de CME e ARC.....	56
3.4 Conclusões	57
3.5 Referências.....	58
4 CONCLUSÃO GERAL.....	64

ÍNDICE DE TABELAS

Página

Tabela 1 - Estimativa de valor para investimento em drenagem e manejo de águas pluviais urbanas por macrorregião do Brasil para os anos de 2014 a 2023 em milhões de reais de dezembro/2012.....	25
Tabela 2 - Tecnologias de tratamento indicadas para os resíduos da construção civil...	30
Tabela 3 - Tecnologias de tratamento indicadas para os resíduos sólidos industriais. ...	30
Tabela 4 - Propriedades físicas e química do cimento Portland CP-II-F-32 e CME.....	46
Tabela 5 - Propriedades físicas do agregado natural e do ARC.	46
Tabela 6 - Proporção de materiais utilizados para moldagem das argamassas.	47
Tabela 7 - Frações granulométricas da areia normal e respectivas quantidades.	47
Tabela 8 - Proporções típicas de materiais constituintes de concreto permeável.....	48
Tabela 9 - Consumo de materiais por traço para produção do concreto permeável.....	49
Tabela 10 - Coeficiente de permeabilidade do concreto permeável com CME e ARC.	56
Tabela 11 - Resultados dos ensaios realizados para o traço CME-5+ARC-20.	57

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1- Detalhamento em corte de sarjeta convencional.....	19
Figura 2 - Municípios com inundações no período de cinco anos anterior à 2008 por macrorregião.	24
Figura 3 - Percentual dos investimentos distribuídos nas macrorregiões.....	25
Figura 4 - Processos de aproveitamento de resíduo.....	32
Figura 5 - Amostras de CME (a) antes do processo de requeima e (b) após o processo de requeima.....	45
Figura 6 - Frações granulométricas separadas em laboratório: (a) 2,40 a 2,00 mm; (b) 2,00 a 1,20 mm; (c) 1,20 a 0,60 mm; (d) 0,60 a 0,30 mm e (e) 0,30 a 0,15 mm.	47
Figura 7 - Resistência à compressão da argamassa A (referência) e argamassa B (25% de cimento substituído por CME).....	52
Figura 8 - Massa específica do concreto permeável no estado fresco com substituição de CME.....	53
Figura 9 - Massa específica do concreto permeável no estado fresco com substituição de ARC.	53
Figura 10 - Resistência à compressão do concreto permeável contendo CME aos 7 e aos 28 dias.	54
Figura 11 - Resistência à compressão do concreto permeável contendo ARC aos 7 e aos 28 dias.	55

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo/sigla	Significado
Δ	Diferença mínima significativa
ρ	Massa específica do concreto no estado fresco, em kg/m ³
%	Por cento
a/c	Relação água/cimento
A	Absorção de água do concreto no estado endurecido, em %
A ₁	Área interna do recipiente de PVC, em m ²
A ₂	Área do corpo de prova de concreto permeável, em m ²
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Abrelpe	Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AGETOP	Agência Goiana de Transportes e Obras
AN	Agregado natural
ANA	Agência Nacional das Águas
ANOVA	Análise de variância
ARC	Agregado reciclado de concreto
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
°C	Graus Célsius
cm	Centímetro
cm ² /g	Centímetro quadrado por grama
CME	Cinza de madeira de eucalipto
CO ₂	Gás carbônico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
D	Diâmetro, em mm
DMC	Dimensão máxima característica, em mm
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
F	Força de compressão, em N
f _c	Resistência à compressão, em MPa
f _{cA}	Resistência à compressão da argamassa A, em MPa
f _{cB}	Resistência à compressão da argamassa B, em MPa
g	Gramas
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
GOINFRA	Agência Goiana de Infraestrutura e Transportes
H ₀	Hipótese inicial
h ₁	Cota inicial, em m
h ₂	Cota final, em m

H _a	Hipótese adicional
IAP	Índice de atividade pozolância com o cimento Portland, em %
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
I _v	Índice de vazios do concreto no estado endurecido, em %
K	Coeficiente de permeabilidade, em m/s
kg/hab/ano	Quilograma por habitante por ano
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
L/s	Litros por segundo
M	Massa, em kg
m/s	Metros por segundo
mm	Milímetro
mm/s	Milímetro por segundo
MPa	Megapascal
NBR	Norma brasileira
PERS/GO	Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Goiás
Plansab	Plano Nacional de Saneamento Básico
PMGIRS	Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
q	Amplitude
QMRes	Quadrado médio do resíduo
r	Número de repetições
RCC	Resíduo da construção civil
RCD	Resíduo de construção e demolição
RSI	Resíduo sólido industrial
SECIMA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos
SEMAD	Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos
SUS	Sistema Único de Saúde
t	Toneladas
V	Volume, em dm ³

RESUMO

MELO JÚNIOR, GILMAR FERNANDO DE. Instituto Federal Goiano – campus Rio Verde – GO, agosto 2022. **Sarjeta sustentável de concreto permeável contendo agregados reciclados de concreto e cinza de madeira de eucalipto.** Orientador (a): Hugo Leonardo Souza Lara Leão.

O crescimento populacional acelerado e o desenvolvimento de grandes cidades ao longo do anos desencadearam problemas ambientais para a sociedade. A ocupação do solo sem planejamento ocasionou uma mudança na sua conformação natural, diminuindo a infiltração das águas pluviais, gerando sobrecarga nos cursos d'água. A grande geração de resíduos provenientes das indústrias e da construção civil e sua destinação incorreta em aterros irregulares também são fatos que impactam negativamente o meio ambiente. Daí surge a necessidade de encontrar soluções sustentáveis sem prejudicar o desenvolvimento e o crescimento das cidades, sendo uma dessas possibilidades os materiais de construção alternativos, advindos da reciclagem. Isto posto, o presente trabalho avaliou a viabilidade de uso de dois resíduos sólidos, a cinza de madeira de eucalipto (CME) e o agregado reciclado de concreto (ARC), em substituição aos materiais convencionais, cimento Portland e agregado natural de rocha basáltica, na produção de concreto permeável para execução de sarjetas de vias urbanas. A pozolanicidade da CME foi determinada por meio do teste de desempenho pozolânico com o cimento Portland, que resultou em um IAP de 108%. Foram feitas substituições de 5, 10 e 15% de CME e de 10, 20 e 30% de ARC no concreto permeável para realização de ensaios mecânicos e hidráulicos. Foram constatados ganho de resistência e redução na permeabilidade para ambas as substituições em relação ao concreto referência, além disso, por meio desses resultados, foi estabelecido um novo traço contendo os dois resíduos simultaneamente. Para o novo traço, foram utilizados os melhores desempenhos individuais, sendo eles, 5% de

CME e 20% de ARC. O concreto permeável contendo os dois resíduos atingiu um ganho de resistência de 91% e uma redução de permeabilidade de 62%, ainda assim ambos os resultados atendem as normas, podendo o concreto ser utilizado *in loco* para execução de sarjetas de vias urbanas.

Palavras-chave: drenagem urbana; resíduos sólidos; coeficiente de permeabilidade; resistência mecânica; concreto poroso.

ABSTRACT

MELO JÚNIOR, GILMAR FERNANDO DE. Federal Institute Goiano – campus Rio Verde – GO, august 2022. **Sustainable permeable concrete gutter containing recycled concrete aggregates and eucalyptus wood ash.** Advisor: Hugo Leonardo Souza Lara Leão.

Accelerated population growth and the development of large cities over the years have triggered environmental problems for society. The unplanned land occupation caused a change in its natural conformation, reducing the infiltration of rainwater and generating overload in water courses. The large generation of waste from industries and civil construction and its incorrect destination in irregular landfills are also facts that negatively impact the environment. Hence arises the need to find sustainable solutions without harming the development and growth of cities, and one of these possibilities is alternative building materials, arising from recycling. That said, the present work evaluated the feasibility of using two solid wastes, eucalyptus wood ash (EWA) and recycled concrete aggregate (RCA), in substitution of conventional materials, Portland cement and natural basaltic rock aggregate, in the production of permeable concrete for the execution of urban street gutters. The pozzolanicity of EWA was determined through the pozzolanic performance test with Portland cement, which resulted in an IAP of 108%. Replacements of 5, 10 and 15% of EWA and 10, 20 and 30% of RCA were performed in the permeable concrete for mechanical and hydraulic tests. Strength gain and permeability reduction were observed for both substitutions in relation to the reference concrete, in addition, through these results, a new trace was established containing the two residues simultaneously. For the new trait, the best individual performances were used, being 5%

of EWA and 20% of RCA. The permeable concrete containing the two residues achieved a strength gain of 91% and a permeability reduction of 62%, yet both results meet the standards and can be used in loco for the execution of gutters of urban roads.

Keywords: urban drainage; solid waste; permeability coefficient; mechanical resistance; porous concrete.

1 INTRODUÇÃO

No decorrer da história a população foi se tornando cada vez mais urbana e menos rural. Esse aumento da população urbana no Brasil teve início na década de 1930 provocado por mudanças econômicas e sociais no país. Em 1970, a população urbana superou a rural, isso mostra a velocidade com que ocorreu o processo de urbanização no Brasil, muito maior do que em países mais avançados (BRITO; HORTA; AMARAL, 2018).

O processo de êxodo rural acabou gerando o desenvolvimento dos atuais centros urbanos, tendo havido, para a acomodação da população, uma ocupação desregulamentada das metrópoles, acarretando impermeabilização do solo urbano. As consequências do processo de urbanização que mais impactam na drenagem urbana são as modificações no escoamento superficial, sendo que, apesar de representarem um problema de baixo impacto, a longo prazo, as interferências sobre o clima também podem gerar inconformidades relevantes no balanço hídrico, provocando modificações, inclusive, na qualidade das águas (TUCCI, 2001).

A ocupação desordenada provocou uma mudança na conformação natural do solo, incluindo a impermeabilização, que reduz a infiltração das águas pluviais e diminui o volume da recarga do lençol freático. Além disso, o aumento do escoamento superficial das águas pluviais gera sobrecarga nos cursos d'água, ocasionando inundações. A cidade de Rio Verde, situada no sudoeste goiano, é um exemplo dessa realidade. Estão presentes 14 mananciais dentro da área urbana de Rio Verde, sendo o ponto mais crítico da cidade, alvo de inundações, o entorno do Córrego do Sapo.

Dentro da temática referente à estruturação urbanística das cidades e ao controle do uso do solo, em 10 de julho de 2001, foi promulgada a Lei nº 10.257 (BRASIL, 2001), que instituiu instrumentos de política urbana, no âmbito do planejamento municipal, podendo ser citados o plano diretor, disciplina do parcelamento, uso e ocupação do solo

e zoneamento ambiental. O plano diretor é um instrumento utilizado para direcionar o desenvolvimento e a expansão urbana, sendo obrigatório para todas as cidades com mais de 20 mil habitantes, devendo ser revisado a cada 10 anos (BRASIL, 2001).

Em 2007 foi instituída a Lei Complementar nº 5.318 (RIO VERDE, 2007), que dispõe sobre o Plano Diretor e o Processo de Planejamento do Município de Rio Verde. A referida Lei aborda no seu Art. 43, inciso VIII, que devem ser implantados programas eficientes de drenagem pluvial no município. Além disso, está em vigor a Lei Complementar nº 5.478 (RIO VERDE, 2008), que dispõe sobre o uso e a ocupação do solo urbano, estabelecendo, independentemente do zoneamento, a destinação de 20% da área dos terrenos à área permeável. Portanto, verifica-se que estão presentes na cidade leis que contemplam as questões abordadas referentes à drenagem urbana e à ocupação do solo, porém ainda assim os problemas persistem.

No que tange ao escoamento de águas pluviais, o sistema de sarjeta convencional constituído geralmente de concreto tem superfície lisa e regular (Figura 1). Em locais de desníveis acentuados na cidade, essa característica do sistema convencional provoca aumento da velocidade de escoamento, impactando negativamente, considerando que a força da água pode danificar a infraestrutura urbana. Além disso, o direcionamento de forma mais rápida das águas pluviais aos cursos d'água pode carregar resíduos sólidos, obstruindo os componentes de captação da água como bocas de lobo e cooperando com as inundações.

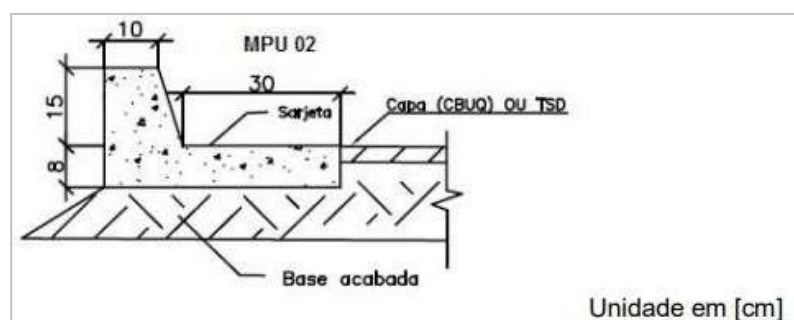


Figura 1- Detalhamento em corte de sarjeta convencional.

Fonte: AGETOP (2016).

Em paralelo às questões de drenagem, há também as limitações do gerenciamento dos resíduos sólidos das cidades. São diversas as atividades humanas geradoras de resíduos, entre as quais, são citadas a construção civil e as indústrias. Em 2018, foi aprovada a Lei Complementar nº 142 (RIO VERDE, 2018), que aprova o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Rio Verde – GO (PMGIRS), cujo

objetivo é contribuir para uma gestão eficiente dos resíduos no município em busca da não geração, redução e reutilização, além da coleta, transporte, tratamento e disposição final adequada.

Dados da Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (APRELPE, 2021) mostram que a geração de RCC no Brasil no ano de 2020 foi de 221,19 kg/hab/ano. A região Centro-Oeste apresentou o maior índice do país, ficando acima da média nacional, com 319,38 kg/hab/ano. Em Rio Verde, foi registrada no ano de 2018 uma geração média de 298,26 kg/hab/ano de RCC (RIO VERDE, 2018).

No ano de 2013, o estado de Goiás tinha 2.270 indústrias com licenças ambientais emitidas pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos (SECIMA), porém, em um estudo acerca da geração de resíduos sólidos industriais (RSI), apenas 136 indústrias prestaram informações. Isso mostra que o estado de Goiás tem um déficit relativo à gestão de RSI, pois verifica-se ausência de um sistema eficiente que obrigue as indústrias a fornecer esses dados ao governo (GOIÁS, 2017; OLIVEIRA, 2015).

Com base no levantamento dessas 136 indústrias, constatou-se que, em 2013, foram geradas 8.481.679,95 toneladas de RSI em Goiás. Também foi feito um levantamento por macrorregião e municípios, sendo a cidade Rio Verde responsável por gerar 92.016,12 toneladas, equivalente a 252,10 toneladas diárias, para o mesmo ano (OLIVEIRA, 2015). Existe uma pesquisa em andamento no site da Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – SEMAD com o intuito de realizar um inventário de resíduos sólidos gerados por indústrias e mineradoras no estado de Goiás, cujos dados ainda não foram disponibilizados.

Portanto, este trabalho de pesquisa teve como finalidade propor uma alternativa para as duas problemáticas expostas: ineficiência do sistema de drenagem urbana e a geração de resíduos da construção civil e resíduos sólidos industriais na cidade de Rio Verde – Goiás, mediante estudo de sarjetas sustentáveis de concreto permeável constituído pela incorporação de agregados reciclados de concreto (ARC) e cinzas de madeira de eucalipto (CME).

A sarjeta é uma alternativa sustentável visto que, em sua composição, existem dois tipos de resíduos sólidos, proporcionando a reciclagem de materiais que seriam descartados na natureza. Além disso, a permeabilidade também é fator impactante, conferindo característica sustentável ao componente, pois contribui com a percolação de água, reabastecimento do lençol freático, diminuição do escoamento superficial e melhor

distribuição das águas dentro da bacia hidrográfica, ocasionando então impactos positivos ao município de Rio Verde – GO, atuando a favor da legislação vigente.

1.1 Sistema de drenagem urbana

A drenagem urbana deve ser entendida não só como um problema de engenharia, sendo ainda mais abrangente, englobando questões políticas e sociológicas. Por conseguinte, ela pode ser entendida como um conjunto de elementos que visam a diminuir os riscos à saúde e segurança, os impactos causados por enchentes e promover o desenvolvimento urbano de forma ordenada, metódica e sustentável (TUCCI, 2001).

Os sistemas de drenagem urbana são classificados em dois tipos (BOTELHO, 2017; TUCCI, 2001):

- Microdrenagem: em áreas urbanas é definida pelo traçado das ruas, compreendendo a drenagem superficial, onde o escoamento ocorre por meio das sarjetas, e drenagem profunda através de tubos enterrados que captam a água pelas bocas de lobo.
- Macro drenagem: áreas em fundos de vales que coletam águas pluviais dos sistemas de microdrenagem ou não, onde o escoamento é bem definido mesmo que não exista um curso d'água abundante.

Um sistema pluvial de microdrenagem é formado por diversos componentes, entre os quais, cita-se a sarjeta. Esses componentes são elementos situados às margens das vias públicas, paralelamente ao meio-fio, que têm a função de coletar as águas pluviais das vias e direcioná-las à boca de lobo (DNIT, 2006; TUCCI, 2001).

De acordo com Tucci (2001), a implementação de intervenções para o sistema de drenagem urbana depende de alguns fatores:

- Políticas que atuem no setor para que sejam traçados os objetivos de acordo com as necessidades do município e os meios legais, institucionais, técnicos e financeiros para sua consolidação;
- Organização das disciplinas de uso e ocupação do solo urbano e drenagem urbana, para que haja uma comunicação entre si, como, por exemplo, na ocupação

por parte da população de áreas de várzea sujeitas à inundação;

- Planejamento de curto, médio e longo prazo da expansão urbana, que prevê não só a situação nos limites urbanos, mas também dentro de um contexto geral;
- Criação de órgãos dentro do município para pôr em prática as legislações, que seja responsável por atuar na propagação à sociedade, incentivando a participação pública, atuando como agente de liderança;
- Conhecimento das tecnologias aplicadas à construção civil para pôr em prática projetos e obras do sistema de drenagem urbana; e
- Divulgação à sociedade por meio de campanhas de conscientização pública.

1.1.1 Aspectos legais da drenagem urbana

A Constituição Federal (BRASIL, 1988), em seu Art. 21, expressa que é competência da União instituir diretrizes para o desenvolvimento urbano, inclusive habitação, saneamento básico e transportes urbanos. Em seu Art. 23, esclarece que é responsabilidade da União, Estados, Distrito Federal e Municípios promover programas de construção de moradias e a melhoria das condições habitacionais e de saneamento básico.

A Lei nº 8.080, que constitui o Sistema Único de Saúde (SUS), traz como condicionante à promoção da saúde, entre outras, ações sobre o saneamento básico e vigilância sanitária. Está no campo de atuação do SUS a participação na formulação da política de saneamento básico e execução de ações (BRASIL, 1990).

Em 2007 foi promulgada a Lei nº 11.445 (BRASIL, 2007), que estabelece as diretrizes nacionais e a política federal do saneamento básico. Porém, em 2020, foi aprovada a Lei nº 14.026 (BRASIL, 2020), que a modifica, além de outras alterações e providências como a atribuição à Agência Nacional das Águas (ANA) a competência para instituir normas de referência para a regulação dos serviços de saneamento básico.

Entende-se por saneamento básico:

Conjunto de serviços públicos, infraestruturas e instalações operacionais de:

- Abastecimento de água potável: constituído pelas atividades e pela disponibilização e manutenção de infraestruturas e instalações operacionais necessárias ao abastecimento público de água potável, desde a captação até as ligações prediais e seus instrumentos de medição;
- Esgotamento sanitário: constituído pelas atividades e pela disponibilização e manutenção de infraestruturas e instalações operacionais necessárias à coleta, ao transporte, ao tratamento e à disposição final adequados dos esgotos sanitários, desde as ligações prediais até sua destinação final para produção de água de reúso ou seu lançamento de forma adequada no meio ambiente;
- Limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos: constituídos pelas atividades e pela disponibilização e manutenção de infraestruturas e instalações operacionais de coleta, varrição manual e mecanizada, asseio e conservação urbana, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos domiciliares e dos resíduos de limpeza urbana; e
- Drenagem e manejo das águas pluviais urbanas: constituídos pelas atividades, pela infraestrutura e pelas instalações operacionais de drenagem de águas pluviais, transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas, contempladas a limpeza e a fiscalização preventiva das redes (BRASIL, 2020).

É obrigação também da União, sob a coordenação do Ministério do Desenvolvimento Regional, a elaboração do Plansab - Plano Nacional de Saneamento Básico (BRASIL, 2007). Assim sendo, o Plansab foi lançado em 2014 pelo Ministério das Cidades após 6 anos de elaboração, consistindo em três etapas: a) formulação do Pacto pelo Saneamento Básico: mais saúde, qualidade de vida e cidadania (2008); b) elaboração do Panorama do Saneamento Básico no Brasil (2009-2010); e c) Consulta Pública que distribuiu a versão preliminar do Plansab à sociedade (BRASIL, 2014).

Foi feito um levantamento em 2008, por meio da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), em 5.204 dos 5.565 municípios brasileiros acerca de inundações ocorridas nos cinco anos anteriores à pesquisa. Tendo essa pesquisa como referência, constatou-se que 48% dos municípios foram atingidos por um ou mais eventos de inundações. Desse total, a região Centro-Oeste foi a que apresentou menor proporção de municípios que declararam ocorrências, com um percentual de 29% (Figura

2). Além disso, o Centro-Oeste é a macrorregião brasileira que apresentou o menor índice de municípios com problemas de ocupação irregular e falta de ordenamento e controle do uso do solo (BRASIL, 2014, apud IBGE, 2009)

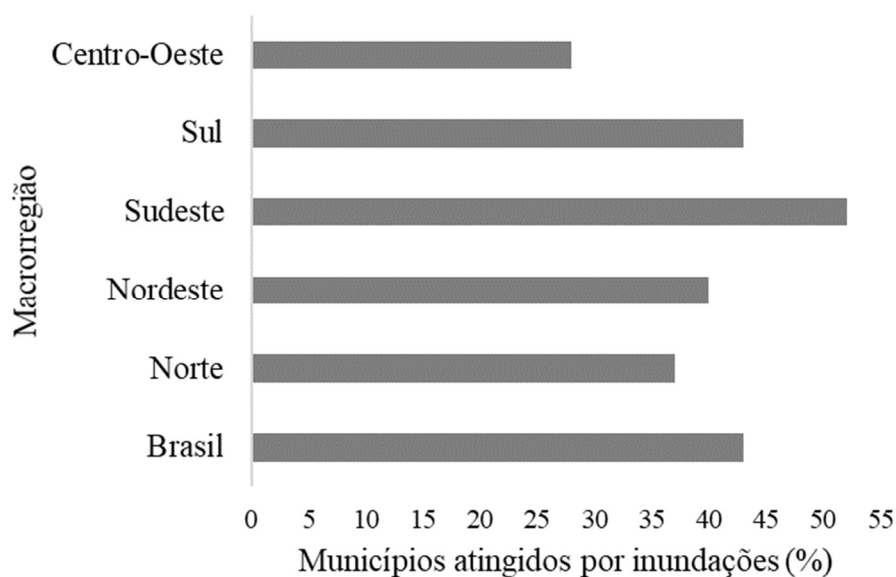


Figura 2 - Municípios com inundações no período de cinco anos anterior à 2008 por macrorregião.

Fonte: Adaptado de Brasil (2014) *apud* IBGE (2009).

Com base no levantamento de dados, foi proposto um planejamento de curto, médio e longo prazo, elaborando perspectivas da situação de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas para dispor de investimentos na área. Para tal, foram considerados quatro aspectos (BRASIL, 2014):

- Implantação de sistemas de drenagem em áreas de expansão urbana;
- Reposição dos sistemas de drenagem ao longo do horizonte da simulação;
- Foco na redução dos riscos de inundações por meio da reposição de sistemas de drenagem clássicos, já presentes nos municípios; e
- Adequação dos sistemas de drenagem em áreas que já sofrem com inundações.

Com respaldo nessas considerações, foi levantada a previsão orçamentária necessária para a consolidação das obras de expansão e reposição entre os anos de 2014 e 2023. O valor estipulado foi de 68,7 bilhões de reais, sendo que a macrorregião Sul do país levaria 42,5% do total. A Tabela 1 mostra os investimentos discriminados dentro do planejamento de curto, médio e longo prazo, e a Figura 3, o percentual disponibilizado para cada macrorregião do país (BRASIL, 2014).

Tabela 1 - Estimativa de valor para investimento em drenagem e manejo de águas pluviais urbanas por macrorregião do Brasil para os anos de 2014 a 2023 em milhões de reais de dezembro/2012

Macrorregião	Expansão			Reposição			Total		
	2014 -2018	2014 -2023	2014 -2033	2014 -2018	2014 -2023	2014 -2033	2014 -2018	2014 -2023	2014 -2033
Norte	932	1818	2896	184	353	743	1117	2171	3639
Nordeste	3074	6026	9482	528	1017	2130	3603	7043	11612
Sudeste	3529	6879	10677	1913	3767	7580	5442	10646	18257
Sul	8466	16862	25420	958	1893	3800	9425	18755	29220
Centro-Oeste	1262	2495	3790	552	1094	2188	1813	3589	5978
Total	17263	34080	52265	4135	8124	16441	21400	42204	68706

Fonte: Adaptado de Brasil (2014).

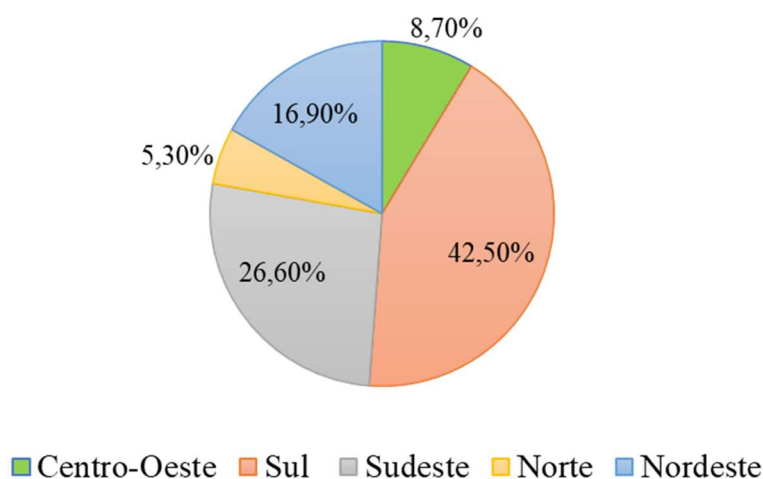


Figura 3 - Percentual dos investimentos distribuídos nas macrorregiões

Fonte: Adaptado de Brasil (2014).

1.1.2 Desenvolvimento científico do sistema de drenagem

Os desafios enfrentados referentes aos problemas de drenagem urbana são uma questão cada vez mais confrontada por cidadãos e governantes. Estudos nessa área estão se tornando cada vez mais frequentes, sendo necessário, para sua realização, analisar índices das bacias hidrográficas onde as cidades estão localizadas (ZHU *et al.*, 2016).

De acordo com Dong, Guo e Zeng (2017), a eficiência de um sistema de drenagem depende tanto do grau de urbanização quanto das mudanças climáticas. A intensificação das precipitações ocasionadas por alterações climáticas e a

impermeabilização do solo, em razão da ocupação urbana, tendem a sobrecarregar os sistemas de drenagem urbana. Um estudo de caso em Kunming, na China, comprovou que um aumento de 20% do volume de chuva levaria a uma redução de 16% na resiliência do sistema, enquanto um aumento de 20% na taxa de impermeabilização, considerando somente a urbanização, desencadearia uma redução de 13%.

Em Xangai, China, foi desenvolvido um estudo integrado por meio da análise de sensoriamento remoto, informações geográficas, análise de custos do ciclo de vida e simulação hidrológica em busca de alternativas que mitigassem o problema de inundações proporcionados por chuvas mais longas. Verificou-se então que a eficiência de integração de três sistemas diferentes seria suficiente para absorver esse volume: barril de chuva, concreto permeável e telhado verde (XIE *et al.*, 2017).

O concreto permeável é tido como uma alternativa para o congestionamento dos sistemas de drenagem urbana. Sartipi e Sartipi (2019) elencaram três etapas para a implementação de pavimentos permeáveis: a) identificar a quantidade de chuva do local em estudo; b) analisar a topografia da região; e c) dimensionar o concreto permeável com base na necessidade de captação de água. Foi desenvolvido um estudo de caso, baseado nessa metodologia, nos subúrbios de Sydney, tendo sido comprovado que o uso do concreto permeável aplicado em calçadas com espessura de 15 cm aumentará em 0,082 L/s a absorção de águas pluviais.

1.2 Gestão de resíduos sólidos

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos podem ser definidos como todo sedimento encontrado no estado sólido ou semissólido cuja origem seja de atividades humanas incluindo as indústrias, os hospitais, os comércios, os serviços, a varrição, a área agrícola e a geração doméstica. São incluídos também na categoria de resíduos sólidos os lodos provenientes do tratamento de água e substâncias líquidas que não podem ser descartadas no sistema de esgoto ou em cursos d'água. A norma discrimina duas classes de resíduos sólidos:

- Resíduos classe I – Perigosos: resíduos que apresentam periculosidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxidade, patogenicidade ou que

constem nos anexos A e B na norma. São exemplos dessa classe de resíduos: latas de tinta, óleos minerais e lubrificantes, serragens contaminadas com óleo, entre outros;

- Resíduos classe II – Não perigosos:
 - Resíduos classe II A – Não inertes: são aqueles que não se enquadram nas características dos resíduos classe I e classe II B. Exemplos: materiais orgânicos da indústria alimentícia, resíduos provenientes da limpeza de caldeiras, fibras de vidro, entre outros;
 - Resíduos classe II B – Inertes: resíduos que, ao serem submetidos ao teste de solubilidade, conforme especificado pela NBR 10007 (ABNT, 2004), não infringem os padrões de potabilidade da água. Exemplos: entulho, sucatas de ferro e aço, entre outros.

Por outro lado, a Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), que instituiu a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), também traz a definição e a classificação dos resíduos sólidos, que são aqueles oriundos de atividades humanas, cuja destinação final é necessária, podendo ser apresentados no estado sólido, semissólido, gasoso (desde que contido em recipiente) ou líquido, cujo lançamento na rede de esgoto ou nos corpos d'água seja inviável. Esses resíduos podem ser classificados em duas formas:

- Quanto à origem:
 - Resíduos domiciliares;
 - Resíduos de limpeza urbana;
 - Resíduos sólidos urbanos;
 - Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços;
 - Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico;
 - Resíduos industriais;
 - Resíduos de serviços de saúde;
 - Resíduos da construção civil;
 - Resíduos agropecuários;
 - Resíduos de serviços de transportes; e
 - Resíduos de mineração.
- Quanto à periculosidade:
 - Resíduos perigosos; e
 - Resíduos não perigosos.

A Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (2002a) define os resíduos da construção civil (RCC), também intitulados como resíduos de construção e demolição (RCD), como:

Resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha. (CONAMA, 2002a).

Ainda de acordo com a Resolução CONAMA nº 307 (2002a), os RCC podem ser classificados em quatro categorias:

- Classe A: aqueles que podem ser reciclados ou reutilizados como agregados, provenientes de demolições, construções e reformas de obras de infraestrutura e obras de edificações. Estão incluídos nessa categoria materiais cerâmicos, argamassas e concretos;
- Classe B: aqueles que podem ser reciclados para outras finalidades como plástico, papel, vidros, metais e madeiras. E de acordo com a Resolução CONAMA nº 469 (2015), incluem-se embalagens de tinta e gesso;
- Classe C: aqueles que ainda não têm uma tecnologia viável para o seu processo de reciclagem; e
- Classe D: aqueles que são perigosos, oferecendo riscos à saúde como tintas, solventes, óleos e materiais que contenham em sua composição amianto ou outros produtos prejudiciais à saúde.

Já os resíduos sólidos industriais (RSI) são definidos, de acordo com a Resolução CONAMA nº 313 (2002b), como:

Todo o resíduo que resulte de atividades industriais e que se encontre nos estados sólido, semissólido, gasoso - quando contido, e líquido - cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição. (CONAMA, 2002b).

1.2.1 Aspectos legais da gestão de resíduos sólidos

Como já mencionado, está previsto na Constituição Federal (BRASIL, 1988) ser competência da União prover saneamento básico para a população, e a gestão dos resíduos sólidos ser parte integrante do saneamento básico (BRASIL, 2020). Por consequência, por meio da promulgação da Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), foi instituída no Brasil a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), cuja visão é a atuação na gestão integrada e no gerenciamento ambientalmente correto dos resíduos sólidos. No mesmo ano foi aprovado o Decreto nº 7.404 (BRASIL, 2010), que tinha como finalidade estabelecer as diretrizes para tornar executivo a PNRS. A referida lei estabelece que devem ser criados planos para o desenvolvimento do setor, a saber:

- O Plano Nacional de Resíduos Sólidos;
- Os planos estaduais de resíduos sólidos;
- Os planos microrregionais de resíduos sólidos e os planos de resíduos sólidos de regiões metropolitanas ou aglomerações urbanas;
- Os planos intermunicipais de resíduos sólidos;
- Os planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos; e
- Os planos de gerenciamento de resíduos sólidos.

A partir da promulgação da Lei 12.305 (BRASIL, 2010), surgiu então o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR), um dos principais instrumentos de controle e reformulação das ações dentro da PNRS. Por meio do SINIR, os estados e municípios podem fornecer dados referentes a resíduos sólidos de forma eficaz para assim promover a consolidação de um panorama nacional.

No entanto, antes da aprovação da PNRS, foi lançado em 2002, o CONAMA, instituído pela Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981 e regulamentado pelo Decreto nº 99.274 de 6 de junho de 1990, cujas resoluções nº 307 e nº 313 abordam diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, e o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais.

Em 2015 foi lançado o Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Goiás (PERS/GO), que subsidiou a realização do diagnóstico dos resíduos sólidos no estado para definir as diretrizes. Por meio do PERS/GO, foi proposta uma rota tecnológica, tanto para os RCC quanto para os RSI. A Tabela 2 mostra as proposições feitas para os RCC com base na classificação proposta pela Resolução CONAMA nº 307 (2002a).

Tabela 2 - Tecnologias de tratamento indicadas para os resíduos da construção civil.

Resíduo da construção civil	Classificação conforme CONAMA	Destinação
Inertes reutilizáveis ou recicláveis como agregados	Classe A	Britagem/reutilização
Comuns recicláveis	Classe B	Triagem/reciclagem
Inertes não reutilizáveis ou recicláveis como agregados	Classe C	Aterro sanitário
Perigosos	Classe D	Incineração ou aterro de perigosos

Fonte: Adaptado de Goiás (2015) *apud* NURSOL/UFG (2015).

Os resíduos sólidos industriais recebem tratamentos distintos de acordo com a sua classificação, proposta pela NBR 10004 (ABNT, 2004), conforme exposto na Tabela 3 (GOIÁS, 2015):

Tabela 3 - Tecnologias de tratamento indicadas para os resíduos sólidos industriais.

RSI – Classificação ABNT NBR 10004 (2004)	Destinação
Classe I – perigosos	Estado líquido encaminhado para incineradores e estado sólido enviado para incineradores ou para aterro de resíduos perigosos
Classe II-A – não inertes	Aterros sanitários municipais desde que sejam tarifados
Classe II-B – inertes	Destinados às centrais de britagem

Fonte: Adaptado de Goiás (2015) *apud* NURSOL/UFG (2015).

1.2.2 Desenvolvimento científico no reaproveitamento de resíduos sólidos

Foi desenvolvido um estudo na Malásia acerca da geração e gestão de RCC, envolvendo construtores, empreiteiros, incorporadores e órgãos governamentais, no qual foram avaliadas algumas estratégias para minimizar os efeitos desse problema ambiental. Algumas das estratégias levantadas consistem na aplicação do conceito dos “3R”: reduzir, reutilizar e reciclar. Foi observado que a redução da geração dos RCC deve ser contemplada desde a fase de projeto e planejamento da obra até a execução, prevendo

métodos construtivos mais modernos (ESA; HALOG; RIGAMONTI, 2017).

Esa, Halog e Rigamonti (2016) propõem o conceito de economia circular, um sistema já utilizado em países desenvolvidos que tem uma visão em três níveis: micro, meso e macro. A visão micro corresponde à modernização do método construtivo e a partir dessa evolução provocar uma redução na origem. No nível meso, a proposta é a mudança nos métodos de aquisição dos materiais, de modo que as construtoras estejam cientes da importância da gestão e redução da geração dos resíduos por meio da compra. No nível macro, a estratégia é elaborar mecanismos de controle e monitoramento para que possa ser dado o suporte necessário.

O setor da construção em muitos países ainda depende muito da mão de obra, sendo importante monitorar os trabalhadores para que seja incentivada a prática da redução do desperdício (ESA; HALOG; RIGAMONTI, 2017). Porém, mesmo reduzindo o desperdício, ainda serão gerados resíduos, e uma alternativa que pode ser utilizada para minimizar os efeitos da geração de RCC é a sua reciclagem na transformação de novos materiais de construção. Robayo-Salazar, Rivera e Gutiérrez (2017) desenvolveram um estudo de três tipos de resíduos: resíduos de tijolo de argila vermelha, resíduos de concreto e resíduos de vidro. Os resultados comprovaram a eficiência da utilização desses três tipos de resíduos na produção de novos materiais de construção.

A partir da utilização de agregados reciclados, algumas propriedades do concreto são alteradas, incluindo o aumento da resistência à abrasão, pois a rugosidade da superfície do agregado reciclado é maior (DUARTE; BRAVO; BRITO; NOBRE, 2019), em comparação com agregados naturais, e os agregados reciclados de concreto apresentam menor peso específico e maior absorção. Tal fato está aliado à presença de argamassa ao redor das partículas que impacta diretamente na sua aplicação em concreto (KABIR; AL-SHAYEB; KHAN, 2016; CAMPOS, 2019).

Da mesma forma que os RCC podem ser reciclados e aplicados na construção civil, os RSI também têm esse potencial. Tang *et al.* (2019) investigaram três tipos de resíduos industriais para avaliação da durabilidade do concreto a ataques de sulfato de sódio: vidro residual, pó de ganga de carvão e cinzas volantes. Foram preparadas misturas de concreto em proporções de 10%, 20% e 30% de substituição do cimento Portland, tendo os corpos de prova permanecido imersos durante 22 meses em solução de sulfato de sódio. Constatou-se que os RSI foram eficientes, sendo o vidro residual o que apresentou melhor resposta. Além disso, foi observado que a relação água/cimento (a/c) interfere diretamente no desempenho do concreto.

Pela incorporação de cinzas de madeira em argamassas, sua trabalhabilidade é afetada, podendo tal fato ser comprovado por meio do estudo de Cheah e Ramli (2011), em que afirmam que para se obter a mesma trabalhabilidade da argamassa de referência nas argamassas que contêm a incorporação da cinza de madeira, é necessário um acréscimo de água à mistura, além do uso de aditivo superplastificante, recomendado pela NBR 5752 (ABNT, 2014).

De fato, o aproveitamento de resíduos na construção civil é uma realidade. De acordo com Rocha e Cheriaf (2003), existem algumas definições importantes que devem ser consideradas para o uso de resíduos como materiais de construção, conforme exposto abaixo e na Figura 4.

- Recuperação: remoção do resíduo da sua rota comum de coleta e tratamento;
- Valorização: estabelecer valor comercial a certo resíduo;
- Valorização energética: uso do potencial calorífico do resíduo;
- Reciclagem: utilizar o resíduo em um ciclo de produção como matéria-prima em substituição parcial ou total de um material tradicional;
- Reciclagem química: reconhecimento de valor na forma de produtos químicos; e
- Reemprego: utilizar o resíduo para um fim equivalente ao seu primeiro ciclo de produção.



Figura 4 - Processos de aproveitamento de resíduo.
Fonte: Adaptado de Rocha & Cheriaf (2003).

2 OBJETIVOS

Geral

Avaliar a eficiência hidráulica e mecânica da sarjeta sustentável produzida com concreto permeável produzido a partir da incorporação de agregado reciclado de concreto (ARC) e cinza de madeira de eucalipto (CME).

Específicos

- I. Analisar o índice de atividade pozolânica da cinza de madeira de eucalipto (CME);
- II. Determinar as propriedades físicas dos materiais utilizados no concreto permeável: cimento, cinza de madeira de eucalipto agregado natural e agregado reciclado de concreto;
- III. Analisar a influência da substituição dos materiais convencionais pelos materiais reciclados: cinza de madeira de eucalipto e agregado reciclado de concreto;
- IV. Estabelecer uma proporção de mistura dos materiais;
- V. Mensurar a eficiência do concreto permeável perante os requisitos normativos, impostos pelo DNIT, para aplicação como sarjeta; e
- VI. Avaliar propriedades hidráulicas e mecânicas do concreto permeável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA GOIANA DE TRANSPORTES E OBRAS. IT-02: Manual de pavimentação urbana. Goiás, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos. Águas de chuva: engenharia das águas pluviais nascidas. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2017. 344 p.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, 1988. 855 p.

_____. Decreto nº 7.404 de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [2010]. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm>. Acesso em: 08 de julho de 2020.

_____. Decreto nº 99.274 de 6 de junho de 1990. Regulamenta a Lei nº 6.902, de 27 de abril de 1981, e a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõem, respectivamente, sobre a criação de Estações Ecológicas e Áreas de Proteção Ambiental e sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [1990]. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/Antigos/D99274.htm>. Acesso em: 15 de agosto de 2020.

_____. Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [1981]. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938.htm>. Acesso em: 15 de agosto de 2020.

_____. Lei nº 8.080 de 19 de setembro de 1990. Dispõe sobre as condições para a promoção, proteção e recuperação da saúde, a organização e o funcionamento dos serviços correspondentes e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [1990]. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8080.htm>. Acesso em: 26 de julho de 2020.

_____. Lei nº 10.257 de 10 de julho de 2001. Regulamenta os Arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [2001]. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm>. Acesso em: 11 de julho de 2020.

_____. Lei nº 11.445 de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. (Redação pela Lei nº 14.026, de 2020). Brasília, DF: Presidência da República, [1990]. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20072010/2007/lei/l11445.htm>. Acesso em: 26 de julho de 2020.

_____. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [2010]. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 08 de agosto de 2020.

_____. Lei nº 14.026 de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000 [...]. Brasília, DF: Presidência da República, [1990]. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato20192022/2020/Lei/L14026.htm>. Acesso em: 26 de julho de 2020.

_____. Ministério das Cidades. Plano Nacional de Saneamento Básico – Plansab. Brasília, 2014, 220 p.

BRITO, Fausto; HORTA, Cláudia Júlia Guimarães; AMARAL, Ernesto FL. A urbanização recente no Brasil e as aglomerações metropolitanas. Open Science Framework Preprints, 2018.

CAMPOS, Bruna Oliveira. Pavimento permeável incorporado com agregado reciclado de concreto. 2019. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, Pró-reitoria de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação, Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 2019.

CHEAH, Chee Ban; RAMLI, Mahyuddin. The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, [s.l.], v. 55, n. 7, p. 669- 685, maio 2011. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344911000231?via%3Dihub>>. Acesso em: 17 de junho de 2020.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002a. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, DF [2002]. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/_arquivos/36_09102008030504.pdf>. Acesso em: 09 de agosto de 2020.

_____. Resolução nº 313, de 29 de outubro de 2002b. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Brasília, DF [2002]. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=335>> Acesso em: 09 de agosto de 2020.

_____. Resolução nº 469, de 29 de julho de 2015. Altera a Resolução CONAMA n 307, de 05 de julho de 2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, DF [2015]. Disponível em: <<http://www.ctpconsultoria.com.br/pdf/Resolucao-CONAMA-469-de-29-07-2015.pdf>>

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES – DNIT. Norma DNIT 018/2006 – ES. Drenagem – sarjetas e valetas – especificação de serviço. Riode Janeiro, 2006.

DONG, Xin; GUO, Hao; ZENG, Siyu. Enhancing future resilience in urban drainage system:green versus grey infrastructure. *Water Research*, [S.L.], v. 124, p. 280-289, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.038>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135417306115?via%3Dihub>>. Acesso em: 01 de agosto de 2020.

DUARTE, Gonçalo; BRAVO, Miguel; BRITO, Jorge de; NOBRE, José. Mechanical performance of shotcrete produced with recycled coarse aggregates from concrete. *Construction and Building Materials*, [S.L.], v. 210, p. 696-708, jun. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819306476>>. Acesso em: 09 de agosto de 2020.

ESA, Mohd Reza; HALOG, Anthony; RIGAMONTI, Lucia. Developing strategies for managing construction and demolition wastes in Malaysia based on the concept of circular economy. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, [S.L.], v. 19, n. 3, p. 1144-1154, 1 jun. 2016. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-016-0516-x>>. Acesso em: 09 de agosto de 2020.

ESA, Mohd Reza; HALOG, Anthony; RIGAMONTI, Lucia. Strategies for minimizing construction and demolition wastes in Malaysia. *Resources, Conservation and Recycling*, [S.L.], v. 120, p. 219-229, maio 2017. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344916303901>>. Acesso em: 09 de agosto de 2020.

GOIÁS. Secretaria de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos (SECIMA). Plano de Resíduos Sólidos do Estado de Goiás. 2017. Disponível em: <https://www.meioambiente.go.gov.br/arquivos/pers_versao_final_forum_de_residuos_solidos.pdf>. Acesso em: 17 de julho de 2020.

KABIR, Shahid; AL-SHAYEB, Ammar; KHAN, Imran M.. Recycled Construction Debris as Concrete Aggregate for Sustainable Construction Materials. *Procedia Engineering*, [S.L.], v. 145, p. 1518-1525, 2016. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816301989>>. Acesso em: 09 de agosto de 2020.

OLIVEIRA, Adjane Damasceno. Panorama dos resíduos sólidos industriais e de mineração do estado de Goiás. 2015. 218 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia do Meio Ambiente, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

RIO VERDE. Lei complementar nº 142 de 2018. Aprova o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Rio Verde - GO - PMGIRS, e dá outras providências. Rio Verde, GO: Prefeitura Municipal de Rio Verde, 2018.

_____. Lei complementar nº 5.318 de 2007. Dispõe sobre o Plano Diretor eo Processo de Planejamento do Município de Rio Verde e dá outras providências. Rio Verde, GO: Prefeitura Municipal de Rio Verde, 2007.

_____. Lei complementar nº 5.478 de 2008. Dispõe sobre o uso e ocupação do solo urbano – zoneamento da sede do município de Rio Verde. Rio Verde, GO: Prefeitura Municipal de Rio Verde, 2008.

ROBAYO-SALAZAR, Rafael Andrés; RIVERA, Jhonathan Fernando; GUTIÉRREZ, Ruby Mejía de. Alkali-activated building materials made with recycled construction and

demolition wastes. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 149, p. 130-138, set. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817310073>>. Acesso em: 09 de agosto de 2020.

ROCHA, Janaíde Cavalcante; CHERIAF, Malik. Aproveitamento de resíduos na construção. In: ROCHA, Janaíde Cavalcante; JOHN, Vanderley M. *Utilização de resíduos na construção habitacional*. 4. ed. Porto Alegre: ANTAC, 2003. Cap. 3. p. 73-93.

SARTIPI, Mohsen; SARTIPI, Farid. Stormwater retention using pervious concrete pavement: great western sydney case study. *Case Studies In Construction Materials*, [S.L.], v. 11, p. 1-8, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00274>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509519303766>>. Acesso em: 05 de agosto de 2020.

TANG, Zhuo; LI, Wengui; KE, Guojun; ZHOU, John L.; TAM, Vivian W.y.. Sulfate attack resistance of sustainable concrete incorporating various industrial solid wastes. *Journal of Cleaner Production*, [S.L.], v. 218, p. 810-822, maio 2019. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619303737>>. Acesso em: 09 de agosto de 2020.

TUCCI, Carlos E. M.. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS e ABRH, 2001.

XIE, Jiaqiang; CHEN, Hao; LIAO, Zhenliang; GU, Xianrong; ZHU, Dajian; ZHANG, Jin. An integrated assessment of urban flooding mitigation strategies for robust decision making. *Environmental Modelling & Software*, [S.L.], v. 95, p. 143-155, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.027>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815216303449>>. Acesso em: 04 de agosto de 2020.

ZHU, Zhihua; CHEN, Zhihe; CHEN, Xiaohong; HE, Peiying. Approach for evaluating inundation risks in urban drainage systems. *Science of the Total Environment*, [S.L.], v. 553, p. 1-12, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.025>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969716302364>>. Acesso em: 04 de agosto de 2020.

3 CAPÍTULO 1

(Normas de acordo com a revista Ambiente Construído)

Avaliação mecânica e hidráulica de sarjetas de concreto permeável
contendo cinza de madeira e agregado reciclado

*Mechanical and Hydraulic Assessment of Pervious Concrete Curbs
Containing Wood Ash and Recycled Aggregate*

Resumo

O avanço da urbanização provoca impactos significativos, como aumento na geração de resíduos sólidos e a impermeabilização do solo, que resultam em sobrecarga dos sistemas de drenagem e dos cursos d'água. Nesse contexto, torna-se essencial aplicar medidas sustentáveis para mitigar tais efeitos. Este estudo avaliou a eficiência do concreto permeável produzido com cinza de madeira de eucalipto (CME) e agregado reciclado de concreto (ARC) para aplicação em sarjetas. Foram analisadas propriedades mecânicas e hidráulicas em substituições de 5%, 10% e 15% de CME e 10%, 20% e 30% de ARC. Com base nessas análises, definiu-se um traço contendo simultaneamente os dois resíduos. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste de *Tukey* para verificação estatística. Observou-se que o uso dos resíduos aumentou a resistência à compressão e reduziu o coeficiente de permeabilidade. O traço com 5% de CME e 20% de ARC apresentou o melhor desempenho, com ganhos de resistência de 65% e 118% em relação ao traço de referência e redução da permeabilidade em 44% e

41%, respectivamente. O traço combinado obteve ganho de resistência de 91% e redução de permeabilidade de 62%. Conclui-se que o material atende aos requisitos normativos para uso em sarjetas.

Palavras-chave: cinza de madeira; resíduos de construção e demolição; resíduos industriais; permeabilidade; concreto poroso.

Abstract

The process of urbanization significantly impacts society by increasing solid waste generation and soil impermeabilization, which overload drainage systems and watercourses. In this context, implementing sustainable measures to mitigate these effects becomes essential. This study evaluated the efficiency of pervious concrete produced with eucalyptus wood ash (EWA) and recycled concrete aggregate (RCA) for use in curbs. Mechanical and hydraulic properties were analyzed with replacement levels of 5%, 10%, and 15% of EWA and 10%, 20%, and 30% of RCA. Based on these analyses, a mix containing both residues simultaneously was defined. The results were subjected to analysis of variance (ANOVA) and Tukey's test for statistical validation. The use of these residues increased compressive strength and reduced the permeability coefficient. The mix with 5% EWA and 20% RCA showed the best performance, with compressive strength gains of 65% and 118% compared to the reference mix and permeability reductions of 44% and 41%, respectively. The combined mix achieved a 91% strength gain and a 62% reduction in permeability. Therefore, it was concluded that the material meets the normative requirements for both strength and permeability, making it suitable for use in curb construction.

Keywords: wood ash; construction and demolition waste; industrial waste; permeability; porous concrete.

3.1 Introdução

O concreto permeável é um material que compartilha os mesmos componentes do concreto convencional, diferindo principalmente pela redução ou eliminação do agregado miúdo em sua composição. Essa característica permite que ele desempenhe papel fundamental na drenagem urbana, promovendo a infiltração da água no solo, reduzindo o escoamento superficial e contribuindo para a recarga do lençol freático. Por sua combinação de propriedades hidráulicas e sustentáveis, o concreto permeável tem se destacado como uma alternativa promissora em projetos de pavimentação de calçadas, estacionamentos e outras áreas que não exigem elevada resistência mecânica.

Além disso, a incorporação de resíduos sólidos na produção do concreto permeável representa uma estratégia ambientalmente responsável. Cinzas de madeira podem substituir parcialmente o cimento, reduzindo o consumo de energia e as emissões de gases poluentes durante a fabricação, ao mesmo tempo em que podem contribuir para a resistência e a durabilidade do material quando utilizadas em pequenas proporções. De forma complementar, agregados provenientes de resíduos da construção civil podem ser empregados em substituição ao agregado natural, aumentando a porosidade do concreto e mantendo propriedades mecânicas adequadas para sua aplicação.

Neste contexto, o presente estudo investigou a utilização de cinza de madeira de eucalipto e agregado reciclado de concreto no concreto permeável, avaliando diferentes teores de substituição de forma individual e combinada. Foram analisadas as propriedades de resistência à compressão e à permeabilidade, com o objetivo de verificar o desempenho do material e sua viabilidade para a execução de sarjetas sustentáveis.

3.2 Referencial teórico

O concreto permeável é constituído basicamente pelos mesmos componentes que o concreto convencional, exceto pela fração de agregado miúdo, que é reduzida ou eliminada da sua composição. É considerado uma alternativa eficaz e sustentável para a mitigação de falhas nos sistemas de drenagem, sendo fundamental para a recarga do

lençol freático, reduzindo o escoamento superficial de águas pluviais (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004). Tal fato faz do concreto permeável um material promissor que vem ganhando destaque entre incorporadoras e empreiteiros em razão dos seus benefícios (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016).

Tennis, Leming e Akers (2004) trazem algumas características típicas do concreto permeável. Tem densidade no estado fresco entre 1600 e 2000 kg/m³, permeabilidade entre 1,3 e 12,2 mm/s e porosidade de 10 a 35%. Em termos de propriedades mecânicas, sua resistência à compressão varia de 3,5 a 28 MPa e a resistência à flexão varia de 1 a 3,8 MPa. Por ter resistência inferior ao concreto tradicional, seu uso é mais empregado em situações que exigem menos resistência mecânica como na execução de calçadas e estacionamentos (LO; LO; LEE, 2020).

Outra alternativa sustentável é o reaproveitamento de resíduos sólidos na construção civil. Entre esses resíduos, pode-se destacar o uso de cinzas de madeira como material suplementar, atuando em substituição ao cimento Portland em diversas aplicações em substituição ao cimento na produção de artefatos cimentícios como concretos e argamassas (PAVLÍKOVÁ *et al.*, 2018; CHEAH; RAMLI, 2011; SIGVARDSEN *et al.*, 2019; TEIXEIRA; CAMÕES; BRANCO, 2019; SIGVARDSEN; GEIKER; OTTOSEN, 2021a).

As cinzas de madeira desempenham papel mitigador, tanto do ponto de vista dos recursos naturais limitados para fabricação dos materiais de construção tradicionais, quanto atuando na redução da emissão de CO₂ e no consumo de energia, tendo em vista que no processo de fabricação do cimento há um grande consumo de energia térmica e emissão de gases prejudiciais (SIGVARDSEN; GEIKER; OTTOSEN, 2021a; LUHAR; CHAUDHARY; LUHAR, 2018; SINGH *et al.*, 2015). De acordo com Pavlíková *et al.* (2018), a substituição de 20% de cimento Portland por cinza de madeira atingiu uma redução de 15% de CO₂ e 16% de energia para produção da argamassa.

Apesar de a composição química das cinzas variar significativamente entre as espécies de madeira, em geral são ricas em compostos de cal e sílica (CHEAH; RAMLI, 2011). Seu uso é associado a seu potencial de desempenhar reações pozolânicas em misturas de argamassas e concretos. Em resposta a isso, alguns autores relatam a ocorrência de tais reações na presença da cinza de madeira (PAVLÍKOVÁ *et al.*, 2019; RAMOS; MATOS; SOUSA-COUTINHO, 2013; PAVLÍKOVÁ *et al.*, 2018).

Em termos de resistência mecânica, a utilização de cinzas tende a provocar uma redução (ACORDI *et al.*, 2020; TEIXEIRA; CAMÕES; BRANCO, 2019). Sigvardsen,

Geiker e Ottosen (2021a) constataram que a presença da cinza de madeira favorece a formação de etringita, componente que confere resistência ao concreto, ressaltando que em excesso pode ocasionar microfissuras nas argamassas. A recomendação é de que a substituição de cinzas por cimento Portland em pequenas quantidades gera uma resposta positiva (TEIXEIRA; CAMÕES; BRANCO, 2019; RAMOS; MATOS; SOUSA-COUTINHO, 2013).

Outro resíduo sólido com potencial de reciclagem são os resíduos da construção civil (RCC), que podem ser utilizados em substituição aos agregados naturais (YAN et al., 2020; TAVARES; KAZMIERCZAK, 2016; ULLOA-MAYORGA et al., 2018; ROBAYO-SALAZAR; RIVERA; GUTIÉRREZ, 2017).

Tavares e Kazmierczak (2016) avaliaram o uso de agregados reciclados na produção de concreto permeável e, como resposta, obtiveram aumento de absorção, considerando que o agregado reciclado tem maior porosidade. As propriedades mecânicas tendem a se reduzir com o aumento de substituição de agregado natural por agregado reciclado, porém atingindo o requisito mínimo de resistência para aplicação (LIU et al., 2019; EL-HASSAN; KIANMEHR; ZOUAOUI, 2019; YAP et al., 2018).

A trabalhabilidade do concreto permeável diminui com o aumento do teor de substituição de agregado natural por agregado reciclado, em contrapartida ocorre aumento do coeficiente de permeabilidade (EL-HASSAN; KIANMEHR; ZOUAOUI, 2019; YAP et al., 2018). Em relação ao uso de cinzas de madeira, também foi constatado que o aumento do teor de substituição tende a reduzir a trabalhabilidade. Foi observado também redução no calor de hidratação, atribuindo uma vantagem para o seu uso, considerando que pode evitar o surgimento de trincas (TEIXEIRA; CAMÕES; BRANCO, 2019; CHEAH; RAMLI, 2011).

Isto posto, em busca de uma opção construtiva sustentável, este artigo avaliou a eficiência do concreto permeável com incorporação de resíduos sólidos. Para isso foram avaliados os resíduos de forma individual: a cinza de madeira de eucalipto (CME) nas frações de substituição de 5, 10 e 15% e agregado reciclado de concreto (ARC) nas frações de substituição de 10, 20 e 30%. Tendo como referência os resultados obtidos individualmente, definiu-se um teor de substituição dos dois resíduos simultaneamente. Foram avaliados a resistência à compressão (ABNT, 2018a), requisito exigido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes DNIT-ES 018 (2006), e o coeficiente de permeabilidade.

3.3 Método

O concreto permeável foi constituído pela incorporação de cinza de madeira de eucalipto (CME) em substituição parcial ao cimento Portland e pelo agregado reciclado de concreto (ARC) obtido pelo beneficiamento de resíduos de concreto, processo esse conduzido na usina de reciclagem de resíduos da construção civil (RCC) da Prefeitura Municipal de Rio Verde – Goiás em substituição parcial ao agregado natural.

Foram feitas caracterizações físicas e químicas dos materiais no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde por meio de ensaios normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Para os materiais aglomerantes (cimento Portland e CME), foram determinadas as propriedades de massa específica (ABNT, 2017), superfície específica (ABNT, 2015) e perda ao fogo (ABNT, 2018b), além de ter sido determinado o índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias (ABNT, 2014a) da CME. Os agregados natural e ARC foram caracterizados em relação à sua granulometria (ABNT, 2022), densidade na condição seca, absorção de água (ABNT, 2021) e índice de vazios (ABNT, 2021).

Posteriormente, foi avaliada a influência da substituição de cimento por CME e agregado natural (AN) por ARC por meio de testes mecânicos aos 7 e 28 dias e testes hidráulicos aos 28 dias, ambos realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade de Rio Verde. Por fim, determinou-se, com base nos resultados anteriores, um percentual de substituição dos dois resíduos simultaneamente para a produção do concreto permeável, tendo ambos os ensaios, mecânicos e hidráulicos, sido realizados.

Todos os ensaios que têm amostras ou mais tiveram seu resultado submetido à análise de variância (ANOVA) para verificar se existe diferença significativa entre os resultados, para tal, foram atribuídas duas hipóteses: hipótese inicial (H_0), que expressa que não existe diferença significativa entre os resultados, e hipótese adicional (H_a), que nega a hipótese inicial, considerando um nível de significância de 5%. Os resultados que mostraram diferença significativa foram submetidos ao teste de média *Tukey* para avaliar e confirmar quais tratamentos apresentam essa diferença através da diferença mínima significativa de *Tukey* (Δ), expressa na Equação 1, em que se relaciona o quadrado médio do resíduo (QMRes) com o número de repetições (r) do ensaio, em questão, em função

da amplitude (q).

$$\Delta = q \times \frac{\sqrt{QMRes}}{r} \quad (\text{Eq. 1})$$

3.3.1 Materiais

A cinza de madeira de eucalipto (CME) empregada como material de substituição ao cimento Portland foi proveniente de uma agroindústria situada no município de Rio Verde – Goiás, que utiliza combustão da madeira na geração de energia térmica. O resíduo coletado passou por um processo de requeima para atingir sua forma final de cinzas (Figura 5). Tal processo consistiu primeiramente na construção de blocos prismáticos (10x10x10 cm) do resíduo para facilitar a combustão, posteriormente os blocos foram colocados em contato direto com fogo por 20 minutos a uma temperatura de cerca de 400 °C (aferida com termômetro a laser) para formação de brasa. Por fim, foram colocados em um recipiente metálico para que a combustão ocorresse por completo. Foi utilizado como aglomerante convencional o cimento Portland CP-II-F-32, por recomendação da NBR 5752 (ABNT, 2014a).



Figura 5 - Amostras de CME (a) antes do processo de requeima e (b) após o processo de requeima.

Foram determinadas, para ambos os materiais, as propriedades de massa específica (ABNT, 2017), perda ao fogo (ABNT, 2018b) e superfície específica (ABNT, 2015a), conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades físicas e químicas do cimento Portland CP-II-F-32 e CME.

Propriedades	Cimento Portland	CME
Massa específica (g/cm ³)	3,02	2,43
Superfície específica (cm ² /g)	2429,86	8148,01
Perda ao fogo (%)	7,19	25,01

O agregado reciclado de concreto (ARC) foi fornecido pela indústria de reciclagem de RCC da Prefeitura Municipal de Rio Verde – Goiás, sendo composto por resíduos de concreto que sofreram um processo de britagem e separação granulométrica. O agregado gráúdo natural a ser utilizado foi a brita de origem basáltica com dimensão característica de 9,5 mm. O agregado natural de basalto (AN) e o agregado reciclado de concreto (ARC) foram submetidos aos ensaios de granulometria (ABNT, 2022), índice de vazios (ABNT, 2021b), densidade na condição seca e absorção de água (ABNT, 2021^a) (Tabela 5). Foi utilizado aditivo superplastificante para aumentar a trabalhabilidade da mistura, com massa específica de 1,110 g/cm³.

Tabela 5 – Propriedades físicas do agregado natural e do ARC.

Propriedades	Agregado natural	ARC
Dimensão máxima característica – DMC (mm)	12,5	12,5
Densidade na condição seca (g/cm ³)	2,98	2,09
Índice de vazios (%)	39,16	41,62
Teor de absorção (%)	13,15	19,94

3.3.2 Índice de desempenho pozolânico da CME

O índice de desempenho pozolânico da CME foi avaliado segundo o método descrito pela NBR 5752 (ABNT, 2014a). Foram produzidas duas dosagens de argamassa: argamassa A, contendo somente os materiais tradicionais, e argamassa B em que 25% da massa de cimento foi substituída pela CME. O traço definido pela norma segue a proporção de 1:3 em massa de aglomerante e agregado, respectivamente. Para cada argamassa, foram moldados 6 corpos de prova com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. A Tabela 6 mostra a quantidade de material necessário para a produção das amostras.

Tabela 6 - Proporção de materiais utilizados para moldagem das argamassas.

Material	Argamassa A	Argamassa B
Cimento CP II-F-32	624,00	468,00
Material pozolânico	-	156,00
Areia normal ⁽¹⁾	1872,00	1872,00
Água	300,00	300,00
Aditivo superplastificante	-	(2)

⁽¹⁾ Quatro frações de 468,00 g

⁽²⁾ Quantidade de aditivo superplastificante necessária para manter o índice de consistência da argamassa B em ± 10 mm do obtido na argamassa A.

Fonte: Adaptado de ABNT (2014a).

Para a produção das argamassas, a norma especifica o uso de areia normal, que consiste em uma areia padronizada que deve estar separada em 4 frações granulométricas. O processo de separação ocorreu no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade de Rio Verde e seguiu as proporções indicadas pela NBR 7214 (ABNT, 2014b)(Tabela 7 e Figura 6).

Tabela 7 - Frações granulométricas da areia normal e respectivas quantidades.

Denominação da fração	Abertura nominal de malha das peneiras (mm)	Porcentagem retida acumulada, em peso (%)
16	2,4 e 1,2	25 ± 5 ⁽¹⁾
30	1,2 e 0,6	50 ± 5
50	0,6 e 0,3	75 ± 5
100	0,3 e 0,15	97 ± 3

⁽¹⁾ % retida entre 2,4 mm e 2,0 mm (5 ± 5) e % retida entre 2,0 mm e 1,2 mm (20 ± 5)

Fonte: Adaptado de ABNT (2019).

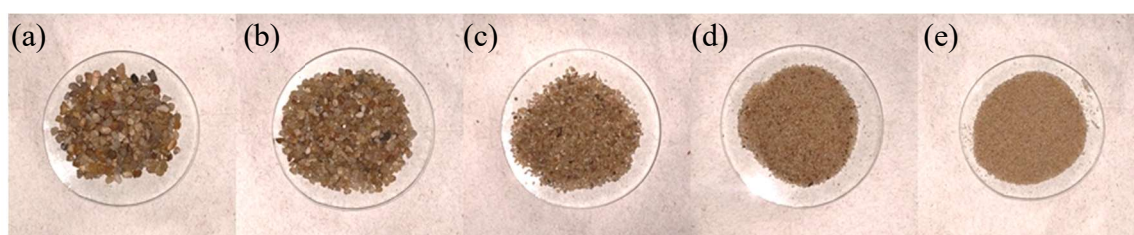


Figura 6 - Frações granulométricas separadas em laboratório: (a) 2,40 a 2,00 mm; (b) 2,00 a 1,20 mm; (c) 1,20 a 0,60 mm; (d) 0,60 a 0,30 mm e (e) 0,30 a 0,15 mm.

A mistura dos materiais foi feita conforme método da NBR 7215 (ABNT, 2019), que prevê o seguinte processo: adicionou-se toda a água e cimento no misturador e, em velocidade baixa, misturou-se por 30 segundos, em seguida adicionou-se gradualmente a areia normal, sem desligar o equipamento, em um tempo de 30 segundos, posteriormente, colocou-se o equipamento em velocidade alta e se misturou por 30 segundos. Após esse tempo, o misturador foi desligado e a mistura ficou em repouso por

90 segundos, sendo que nos primeiros 30 segundos, com o auxílio de uma espátula, foi feita a limpeza das portas e da espátula do misturador. Por fim, em velocidade alta, ocorreu a mistura por mais 60 segundos.

Após a realização da mistura, aferiu-se o índice de consistência da argamassa, e em seguida, fez-se a moldagem dos corpos de prova, contemplando 4 camadas com 30 golpes uniformemente distribuídos em cada camada. Após 28 dias de cura submersa, os corpos de prova foram capeados e submetidos a um ensaio de resistência à compressão axial (ABNT, 2019). Através da Equação 2, determinou-se o índice de atividade pozolânica da CME (IAP) em porcentagem, fazendo a relação entre a resistência à compressão da argamassa B (f_{cB}) e a da argamassa A (f_{cA}).

(Eq. 2)

$$IAP = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100$$

3.3.3 Dosagem, mistura, moldagem e cura dos corpos de prova

Devido à inexistência de um método definitivo para determinação da proporção dos materiais constituintes do concreto permeável, o traço foi determinado segundo as recomendações da norma americana ACI 522R-10 (2010). A Tabela 8 apresenta as proporções típicas dos materiais constituintes do concreto permeável de acordo com a norma e o traço adotado para o concreto permeável referência da pesquisa. Além disso, foi utilizado também o aditivo superplastificante ADI-SUPER H50 da Aditibrás, na proporção de 0,2% em relação à massa de cimento.

Tabela 8 - Proporções típicas de materiais constituintes de concreto permeável.

Material	ACI 522R-10 (2010)	Adotado
Materiais cimentícios (kg/m³)	270 a 415	363
Agregado (kg/m³)	1190 a 1480	1210
Relação de água e cimento (a/c)	0,27 a 0,34	0,3
Índice cimento/agregado, em massa	30%	30%
Razão finos/agregado graúdo, em massa	20%	-

Fonte: Adaptado de ACI (2010).

A partir da definição do traço referência, foram determinadas as porcentagens de substituição dos materiais convencionais pelos resíduos sólidos em estudo. O cimento

Portland foi substituído pela CME nas proporções de 5, 10 e 15%, cujos corpos de prova têm a seguinte identificação: CME-5, CME-10, CME-15. Já o agregado natural foi substituído pelo ARC nas proporções de 10, 20 e 30%, com a seguinte identificação: ARC-10, ARC-20 e ARC-30, conforme visto na Tabela 9. Para todos os traços, foram mantidos constantes a relação a/c e o consumo de aditivo superplastificante.

Tabela 9 - Consumo de materiais por traço para produção do concreto permeável.

Traço	Cimento (kg/m ³)	Agregado natural (kg/m ³)	CME (kg/m ³)	ARC (kg/m ³)
REF	363,00	1210,00	-	-
ARC-10	363,00	1089,00	-	121,00
ARC-20	363,00	968,00	-	242,00
ARC-30	363,00	847,00	-	363,00
CME-5	344,85	1210,00	18,15	-
CME-10	326,70	1210,00	36,30	-
CME-15	308,55	1210,00	54,45	-

Foi adotado o método de mistura e moldagem de Schaefer *et al.* (2006), que consistiu na mistura a seco do agregado com 5% da massa total do aglomerante por um minuto. Em seguida, foram adicionados ao restante do aglomerante, água, o aditivo superplastificante e misturados por mais 3 minutos. Logo depois a mistura ficou em repouso por 3 minutos, por fim, misturou-se por mais 2 minutos.

A moldagem ocorreu pelo preenchimento dos moldes em 3 camadas, tendo cada camada recebido 25 golpes com a haste de adensamento. Para cada traço foram moldados quinze corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas e, em seguida, submetidos ao processo de cura submersa até a data da realização dos ensaios mecânicos e hidráulicos.

Antes da moldagem foi feito o ensaio de massa específica aparente do concreto no estado fresco (ABNT, 2008). O procedimento consiste em determinar a massa de concreto (M), em kg, necessária para preencher um volume conhecido (V) em dm³ e, a partir da Equação 3, determinar a massa específica (ρ) expressa em kg/m³. Para isso foram registrados a massa e o volume do recipiente limpo e seco, posteriormente foi acrescentado o concreto em três camadas que receberam 25 golpes cada, foi nivelada a borda do recipiente e registrada a massa do conjunto.

(Eq. 3)

$$\rho = \frac{M}{V} \times 1000$$

3.3.4 Avaliação de desempenho mecânico

A norma DNIT-ES 018 (2006) estabelece as especificações de serviço de sarjetas e prescreve que o concreto convencional deverá ser dosado para atingir uma resistência à compressão mínima de 15 MPa. Para tanto, foi feito um ensaio de compressão axial, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018a), para determinação da sua resistência.

O ensaio foi feito para as idades de 7 e 28 dias no Laboratório de Estruturas da Universidade de Rio Verde, onde foram rompidas 6 amostras para cada idade. Antes da sua realização, os corpos de prova foram capeados com enxofre e tiveram seu diâmetro aferido. Foi utilizada uma prensa automática da Instron Modelo EMIC 23, módulo de 2000 kN, em que, através da relação entre a força máxima alcançada (F) e o diâmetro aferido (D), determinou-se a resistência à compressão (f_c) das amostras, expressa em MPa, conforme indicado na Equação 4.

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (\text{Eq. 4})$$

3.3.5 Avaliação de desempenho hidráulico

O coeficiente de permeabilidade mínimo exigido pela NBR 16416 (ABNT, 2015b) para pavimentos de CP é de 10^{-3} m/s. A utilização do concreto permeável proposta por esse estudo é para execução de sarjetas, porém, por falta de normativa específica, será adotada essa recomendação.

Para a realização do procedimento, foi adotado o método de Neithalath, Weiss e Olek (2006), que consiste na aferição do tempo necessário para o escoamento de um volume conhecido de fluido, em seguida, através da Lei de Darcy, determina-se o coeficiente de permeabilidade. Para isso, foi construído um permeâmetro adaptado, composto por um recipiente de PVC com 20 cm de comprimento (área interna A_1). Abaixo desse tubo foi posicionado o corpo de prova de concreto permeável (área interna A_2 e comprimento L), que foi revestido em filme PVC e assentado sobre uma caixa sifonada de 10 cm de altura e diâmetro de saída de 50 mm, onde está conectada uma

válvula que controla o fluxo de água. Por fim, um tubo de drenagem foi conectado posterior à válvula, com seu topo alinhado à amostra

Com a válvula aberta, foi adicionada água até que o corpo de prova ficasse saturado e o tubo de drenagem, completamente cheio. Em seguida, a válvula foi fechada e acrescentou-se água ao recipiente de PVC acoplado acima do corpo de prova até que ficasse cheio. Por fim, abriu-se novamente a válvula e aferiu-se o tempo (t) necessário em segundos para que água se deslocasse de uma cota inicial (h_1) de 20 cm até uma cota final (h_2) de 7 cm. Através da Lei de Darcy (Equação 5), determinou-se o coeficiente de permeabilidade (K), tendo sido ensaiados 3 corpos de prova para cada traço.

(Eq. 5)

$$K = \frac{A_1 \times L}{A_2 \times t} \times \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$

3.4 Resultados e discussões

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados, com ênfase nas propriedades mecânicas e hidráulicas dos concretos permeáveis produzidos. A análise busca correlacionar o efeito da substituição por cinza de madeira de eucalipto e agregado reciclado de concreto no desempenho do produto final.

3.4.1 Índice de atividade pozolânica na CME

Para a determinação do índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias, é necessário relacionar os valores de resistências como indicado na Equação 2, para tanto o valor de IAP obtido foi de 108%. Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), o parâmetro adotado como referência para ambas as classificações de materiais pozolânicos é de que o IAP seja maior ou igual a 90%, sendo assim, a CME atende ao requisito normativo. De acordo com a análise de variância (ANOVA), os resultados não apresentam diferença significativa entre si (Figura 7).

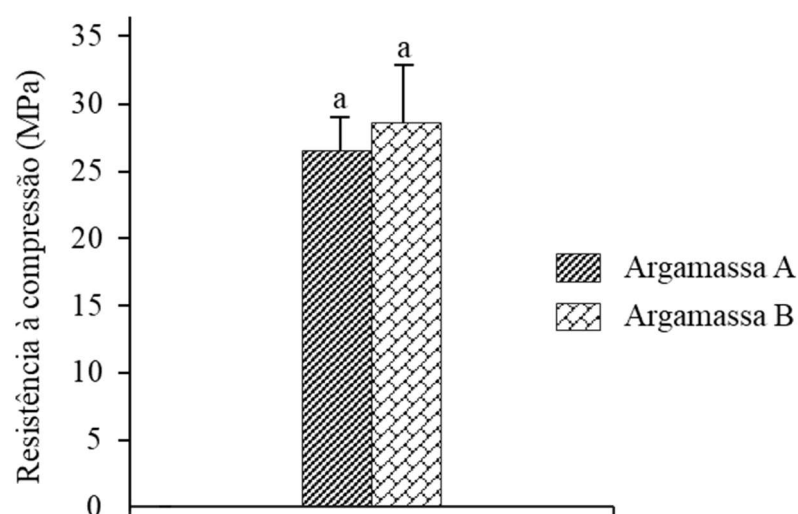


Figura 7 - Resistência à compressão da argamassa A (referência) e argamassa B (25% de cimento substituído por CME).

Sigvardsen, Geiker e Ottosen (2021b) conduziram o mesmo experimento e constataram atividade pozolânica em cinzas de madeira provenientes de usina de calor e energia, porém seguindo os requisitos da norma americana ASTM C618 (IAP $\geq$ 75%). A área superficial da CME, determinada pelo método de Blaine (ABNT, 2015), foi superior à do cimento, e isso pode interferir diretamente na resistência do concreto, uma vez que favorece as reações químicas, conferindo mais resistência ao elemento.

3.4.2 Massa específica no estado fresco

Os valores de massa específica no estado fresco de todos os traços de concreto permeável, exceto o traço ARC-30, ficaram dentro do limite recomendado de 1600 kg/m³ a 2000 kg/m³ (TENNIS, LEMING E AKERS, 2004). As Figuras 8 e 9 mostram os valores para as substituições de CME e ARC, respectivamente.

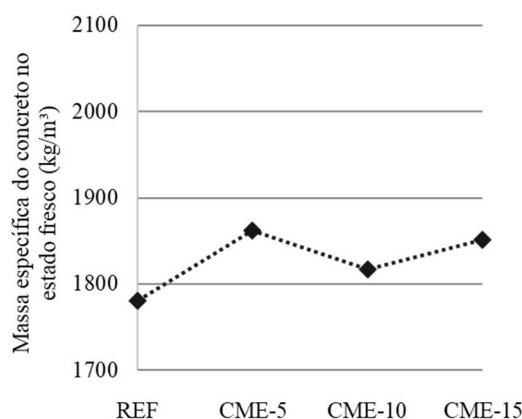


Figura 8 - Massa específica do concreto permeável no estado fresco com substituição de CME.

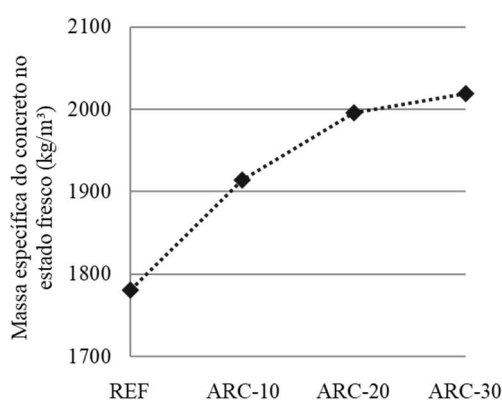


Figura 9 - Massa específica do concreto permeável no estado fresco com substituição de ARC.

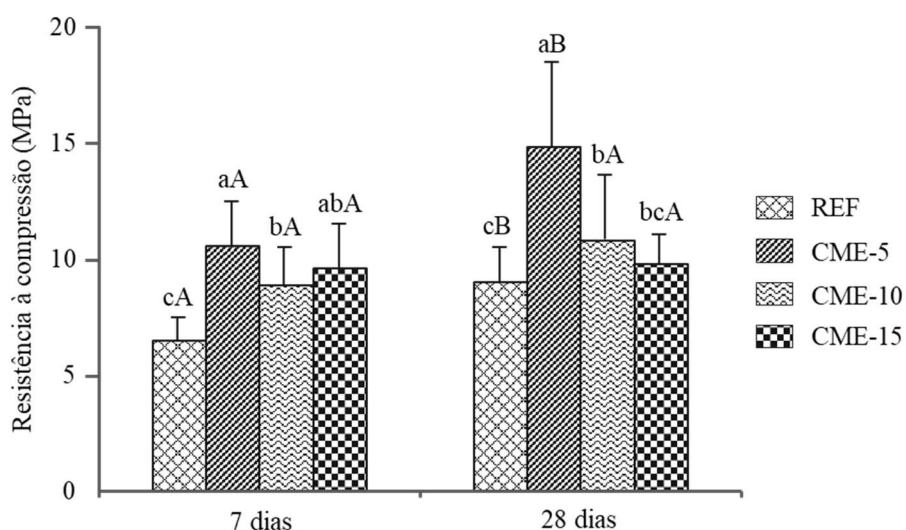
O resultado do ensaio para o concreto permeável contendo CME apresentou um acréscimo sutil no valor da massa específica. Avaliando a massa específica da CME, nota-se uma diminuição em relação ao cimento, porém sua superfície específica é maior, ou seja, suas partículas têm uma dimensão inferior ao cimento, havendo, portanto, redução na porosidade do concreto permeável, fato comprovado também mais adiante pelo coeficiente de permeabilidade. Saboo *et al.* (2019) também identificaram aumento de massa específica quando avaliaram a substituição de cimento por cinzas volantes, além de terem constatado que as cinzas tinham também uma superfície específica superior à do cimento.

A massa específica do concreto contendo ARC apresentou crescimento na medida em que o teor de substituição aumentava. Silva, Brito e Dhir (2018) observaram que quanto maior a absorção de água do RCD, menor será sua massa específica no estado fresco, no entanto a variação na absorção de água do ARC em relação ao agregado natural foi pequena, isto posto, encontra-se a justificativa do aumento da massa específica.

3.4.3 Resistência à compressão

A Figura 10 mostra a resposta ao ensaio de resistência à compressão para o concreto permeável que contém CME. Foram feitas também análise de variância (ANOVA) e análise de significância das médias pelo teste de *Tukey*. Avaliando os resultados, observa-se acréscimo de resistência para o traço CME-5, tanto aos 7 quanto aos 28 dias, além de sua média diferir significativamente das demais.

Lo, Lee e Lo (2021) aos 7 dias constataram redução na resistência à compressão do concreto permeável com uso de cinza de carvão, porém, aos 28 dias, as amostras superaram o concreto referência. Atestaram que isso se deve ao fato de as reações pozolânicas ocorrerem com idades mais avançadas. Saboo *et al.* (2019) também identificaram ganho de resistência com o uso de cinzas volantes em concretos permeáveis.

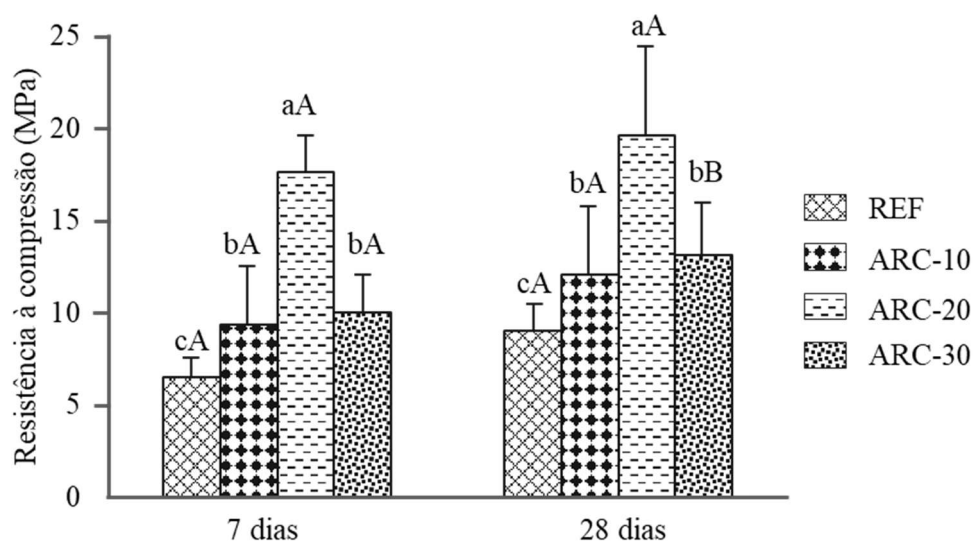


Médias com letras iguais, minúsculas e maiúsculas, não diferem entre si e entre as idades de cura, respectivamente, comprovado pelo teste de *Tukey*, a uma probabilidade de 5%.

Figura 10 - Resistência à compressão do concreto permeável contendo CME aos 7 e aos 28 dias.

A Figura 11 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão do concreto permeável contendo ARC, constando também a significância dos resultados calculada pelo teste de *Tukey*. A resistência média à compressão do concreto permeável, de acordo com a literatura, chega a quase 30 MPa, sendo que a incorporação de resíduos de construção e demolição (RCD) tende a reduzi-la (EL-HASSAN; KIANMEHR;

ZOUAOUI, 2019; YAP et al., 2018; XUAN; ZHAN; POON, 2017; JANG; KIM; SICAKOVA, 2021). No entanto, de acordo com Kim (2022), a qualidade do agregado reciclado na produção de concretos interfere diretamente na resistência mecânica e na durabilidade. A qualidade está ligada ao processo de produção do resíduo, à resistência do concreto que o originou e pelo seu uso anterior. Apesar de a origem do ARC ser desconhecida, os valores de resistência mecânica superaram o traço referência, validando sua qualidade e aplicabilidade.



Médias com letras iguais, minúsculas e maiúsculas, não diferem entre si e entre as idades de cura, respectivamente, comprovado pelo teste de *Tukey*, a uma probabilidade de 5%.

Figura 11 - Resistência à compressão do concreto permeável contendo ARC aos 7 e aos 28 dias.

Entre as substituições de ARC, o traço ARC-20 apresentou o melhor resultado, com uma resistência à compressão de 19,62 MPa, atendendo ao requisito normativo para execução de sarjetas (DNIT, 2006). Avaliando a significância dos resultados entre as idades de rompimento, somente o traço ARC-30 apresentou diferença significativa, os demais foram considerados estatisticamente semelhantes.

3.4.4 Coeficiente de permeabilidade

O ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade, realizado de acordo com o método de Neithalath, Weiss e Olek (2006), apresentou resultados

positivos, atendendo ao requisito da NBR 16416 (ABNT, 2015b), que determina que o coeficiente de permeabilidade para concretos permeáveis seja de no mínimo 10^{-3} m/s.

A Tabela 10 apresenta os resultados para todos os traços.

Tabela 4 - Coeficiente de permeabilidade do concreto permeável com CME e ARC aos 28 dias.

Traço	k (m/s)
REF	$16,444 \times 10^{-3}$
CME-5	$9,252 \times 10^{-3}$
CME-10	$10,149 \times 10^{-3}$
CME-15	$11,987 \times 10^{-3}$
ARC-10	$10,059 \times 10^{-3}$
ARC-20	$9,746 \times 10^{-3}$
ARC-30	$10,504 \times 10^{-3}$

Fazendo um comparativo entre a resistência à compressão e o coeficiente de permeabilidade, nota-se que o traço com menor resistência (REF) foi o que apresentou maior coeficiente de permeabilidade, em contrapartida, os traços mais resistentes (CME-5 e ARC-20) foram os que apresentaram menor permeabilidade. Isto posto, entende-se que há uma relação inversa entre essas duas grandezas, o que se justifica pelo fato de que quanto mais vazios, menos resistente será o concreto. Saboo *et al.* (2019) observaram a mesma relação entre as duas propriedades quando analisaram o efeito de cinzas volantes no concreto permeável, pois quando a permeabilidade crescia, a resistência diminuía.

3.4.5 Concreto permeável com substituição de CME e ARC

A partir da análise individual de resistência à compressão dos corpos de prova com substituição de CME e ARC, determinou-se um traço com a incorporação dos dois resíduos simultaneamente no concreto permeável. De acordo com o resultado do ensaio de resistência à compressão, os traços que atingiram o melhor desempenho foram CME-5 (5% de substituição de cimento Portland por CME) e ARC-20 (20% de substituição de agregado natural por ARC). Assim sendo, foi feita a moldagem de um novo traço (CME-5+ARC-20), baseado nessa reposta, e feitos os mesmos ensaios dos demais traços. A Tabela 11 mostra todos os resultados.

Tabela 115 - Resultados dos ensaios realizados para o traço CME-5+ARC-20.

Propriedades	Valor
Massa específica concreto fresco (kg/m ³)	1988,99
Resistência à compressão - 7 dias (MPa)	14,64
Resistência à compressão - 28 dias (MPa)	17,17
Coeficiente de permeabilidade (m/s)	$6,296 \times 10^{-3}$

De acordo com a ANOVA e com o teste de *Tukey*, os resultados de resistência à compressão do traço CME-5+ARC-20 são estatisticamente distintos do REF, tanto aos 7 quanto aos 28 dias. A resistência à compressão aumentou em 90,8% aos 28 dias, atingindo uma média de 17,17 MPa, tendo superado a resistência da norma, que estabelece uma resistência à compressão mínima de 15 MPa para a construção de sarjetas.

O coeficiente de permeabilidade encontrado, se contrapondo à resistência e reafirmando o que foi mencionado, foi mais baixo que o REF em 61,7 %, atingindo um valor de $6,296 \times 10^{-3}$ m/s. Apesar de o valor ser inferior ao REF, o requisito normativo para que o concreto seja considerado permeável é que o coeficiente de permeabilidade seja no mínimo 10^{-3} m/s (ABNT, 2015), sendo assim, atende ao requisito.

3.4 Conclusões

O principal objetivo deste estudo foi investigar as propriedades do concreto permeável que tivesse em sua composição dois tipos de resíduos sólidos, CME e ARC. Os resultados mostraram que uma substituição de 5% de CME e 20% de ARC resultou em um concreto permeável eficiente e aplicável por atender às condições impostas para o uso em sarjetas, e de acordo com o coeficiente de permeabilidade, o concreto é classificado como permeável. Para isso, foram utilizados uma dosagem de 1:3,333 (cimento: agregado), relação a/c de 0,3, e um consumo de aditivo superplastificante de 0,2% da massa de cimento.

Tendo os ensaios como referência, determinou-se que a CME, a partir do tratamento de requeima realizado e das condições ambientes impostas, foi considerada um material pozolânico, chegando a atingir um IAP de 108%. E seu uso no concreto permeável de forma isolada não atingiu o resultado esperado, sendo assim, não pode ser aplicada em sarjetas de forma individual. Vale salientar que o tratamento térmico e o

processamento interferem no resultado, assim sendo, estudos posteriores podem desenvolver um processamento mais eficaz para seu uso de forma isolada.

O ARC utilizado na pesquisa não tem origem conhecida, ou seja, foi coletado de uma usina onde não há controle no processamento de resíduos de concreto quanto à sua resistência ou uso anterior. No entanto, apresentou bons resultados para todas as faixas de substituição estudadas, tendo, aos 20% de substituição, atingido resistência suficiente para aplicação em sarjetas.

3.5 Referências

ACORDI, J. et al. New waste-based supplementary cementitious materials: mortars and concrete formulations. *Construction and Building Materials*, [S.L.], v. 240, p. 117877, abr. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819333306>>. Acesso em 15 de julho de 2022.

ACI 522R-10. **Report on pervious concrete**. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute; 2010. 38p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

._____. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015a.

._____. **NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimento. Riode Janeiro, 2015b.

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

._____. **NBR 16917**: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021a.

._____. **NBR 16972**: Agregados - Determinação de massa unitária e índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021b.

._____**NBR 17054:** Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

._____**NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018a.

._____**NBR 5752:** Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014a.

._____**NBR 7214:** Areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 2014b.

._____**NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão. Rio de Janeiro, 2019.

._____**NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

._____**NBR 9833:** Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

._____**NBR NM 18:** Cimento Portland – Análise química – Determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2018b.

CHANDRAPPA, Anush K.; BILIGIRI, Krishna Prapoorna. Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: a state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 111, p. 262-274, maio 2016. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816301131> >. Acesso em: 15 de agosto de 2020.

CHEAH, Chee Ban; RAMLI, Mahyuddin. The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: an overview. **Resources, Conservation and Recycling**, [S.L.], v. 55, n. 7, p. 669- 685, maio 2011. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344911000231> >. Acesso em: 13 de agosto de 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 018-ES:** Drenagem – Sarjetas e valetas – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

EL-HASSAN, Hilal; KIANMEHR, Peiman; ZOUAOUI, Souhail. Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 212, p. 164-175, jul. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819308281?via%3Dihub>>. Acesso em: 15 de julho de 2022.

JANG, Haneol; KIM, Jeonghyun; SICAKOVA, Alena. Effect of Aggregate Size on Recycled Aggregate Concrete under Equivalent Mortar Volume Mix Design. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 11, n. 23, p. 11274, 28 nov. 2021. MDPI AG. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/23/11274>>. Acesso em 15 de agosto de 2022.

KIM, Jeonghyun. Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: an overview. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 328, p. 127071, abr. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822007541?via%3Dihub>>. Acesso em 15 de agosto de 2022.

LIU, Tiejun; WANG, Zhongzhen; ZOU, Dujian; ZHOU, Ao; DU, Junze. Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method. **Cement and Concrete Research**, [S.L.], v. 122, p. 72-82, ago. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884618309128?via%3Dihub>>. Acesso em: 19 de fevereiro de 2021.

LO, Fang-Chen; LEE, Ming-Gin; LO, Shang-Lien. Effect of coal ash and rice husk ash partial replacement in ordinary Portland cement on pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 286, p. 122947, jun. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821007078?via%3Dihub>>. Acesso em: 12 de agosto de 2022.
mmmmmm

LO, Fang-Chen; LO, Shang-Lien; LEE, Ming-Gin. Effect of partially replacing ordinary Portland cement with municipal solid waste incinerator ashes and rice husk ashes on pervious concrete quality. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.L.], v. 27, n. 19, p. 23742-23760, 16 abr. 2020. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-020-08796-z>>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2021.

LUHAR, Salmabanu; CHAUDHARY, Sandeep; LUHAR, Ismail. Thermal resistance of flyash based rubberized geopolymer concrete. **Journal of Building Engineering**, [S.L.], v. 19, p. 420-428, set. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.ez369.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2352710218300846?via%3Dihub>>. Acesso em: 26 de janeiro de 2021.

NEITHALATH, Narayanan; WEISS, Jason; OLEK, Jan. Characterizing Enhanced Porosity Concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance. **Cement and Concrete Research**, [S.L.], v. 36, n. 11, p. 2074-2085, nov. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.09.001>.

PAVLÍKOVÁ, Milena; ZEMANOVÁ, Lucie; POKORNÝ, Jaroslav; ZÁLESKÁ, Martina; JANKOVSKÝ, Ondřej; LOJKA, Michal; SEDMIDUBSKÝ, David; PAVLÍK, Zbyšek. Valorization of wood chips ash as an eco-friendly mineral admixture in mortar mix design. **Waste Management**, [S.L.], v. 80, p. 89-100, out. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X18305488>>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2021.

PAVLÍKOVÁ, Milena; ZEMANOVÁ, Lucie; POKORNÝ, Jaroslav; ZÁLESKÁ, Martina; JANKOVSKÝ, Ondřej; LOJKA, Michal; PAVLÍK, Zbyšek. Influence of Wood-Based Biomass Ash Admixing on the Structural, Mechanical, Hygric, and Thermal Properties of Air Lime Mortars. **Materials**, [S.L.], v. 12, n. 14, p. 1-22, 10 jul. 2019. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.ez369.periodicos.capes.gov.br/pmc/articles/PMC6678867/>>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2021.

RAMOS, Telma; MATOS, Ana Mafalda; SOUSA-COUTINHO, Joana. Mortar with wood waste ash: mechanical strength carbonation resistance and asr expansion. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 49, p. 343-351, dez. 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813007563>>. Acesso em 24 de julho de 2022.

ROBAYO-SALAZAR, Rafael Andrés; RIVERA, Jhonathan Fernando; GUTIÉRREZ, Ruby Mejía de. Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 149, p. 130-138, set. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817310073?via%3Dihub>>. Acesso em: 18 de outubro de 2020.

SABOO, Nikhil *et al.* Effect of fly ash and metakaolin on pervious concrete properties. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 223, p. 322-328, out. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.ez369.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S095006119316149?via%3Dihub>>. Acesso em: 10 agosto de 2022.

Schaefer V, Wang K, Suleiman M, Kevern J. Mix design development for pervious concrete in cold weather climates. *Cent Transp Res Educ Iowa State Univ* [Internet]. 2006;(February):67. Available from: http://www.ctre.iastate.edu/reports/mix_design_pervious.pdf

SIGVARDSEN, Nina M.; KIRKELUND, Gunvor M.; JENSEN, Pernille E.; GEIKER, Mette R.; OTTOSEN, Lisbeth M.. Impact of production parameters on physiochemical characteristics of wood ash for possible utilisation in cement-based materials. **Resources, Conservation and Recycling**, [S.L.], v. 145, p. 230-240, jun. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344919300916?via%3Dihub>>. Acesso em: 13 de agosto de 2020.

SIGVARDSEN, Nina M.; GEIKER, Mette R.; OTTOSEN, Lisbeth M.. Phase development and mechanical response of low-level cement replacements with wood ash and washed wood ash. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 269, p. 27-33, fev. 2021a. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820332384?via%3Dihub>>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2021.

SIGVARDSEN, Nina M.; GEIKER, Mette R.; OTTOSEN, Lisbeth M.. Reaction mechanisms of wood ash for use as a partial cement replacement. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 286, p. 122889, jun. 2021b. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122889>.

SINGH, B.; ISHWARYA, G.; GUPTA, M.; BHATTACHARYYA, S.K.. Geopolymer concrete: a review of some recent developments. **Construction and Building Materials**, [S.L.], v. 85, p. 78-90, jun. 2015. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815002834?via%3Dihub>>. Acesso em: 26 de janeiro de 2021.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S.. The influence of recycled concrete aggregates on pervious concrete. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 75- 89, fev. 2016. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S198341952016000100075&lng=en&tlng=en>. Acesso em: 15 de agosto de 2020.

TEIXEIRA, E.R.; CAMÕES, A.; BRANCO, F.G.. Valorisation of wood fly ash on concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, [S.L.], v. 145, p. 292-310, jun. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344919300916>>. Acesso em: 13 de agosto de 2020.

TENNIS, Paul, D.; LEMING, Michael, L.; and AKERS, David, J., Pervious Concrete Pavements, EB302.02, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA, 2004, 36 pages.

ULLOA-MAYORGA, Vivian Andrea et al. Performance of pervious concrete containing combined recycled aggregates. *Ingeniería e Investigación*, [S.L.], v. 38, n. 2, p. 34-41, 1 maio 2018. Universidad Nacional de Colombia.

XUAN, Dongxing; ZHAN, Baojian; POON, Chi Sun. Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, [S.L.], v. 84, p. 214-221, nov. 2017. Elsevier BV.

YAP, Soon Poh *et al.* Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 181, p. 155-165, abr. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618302336?via%3Dihub>>. Acesso em: 26 de julho de 2022.

4 CONCLUSÃO GERAL

O estudo de novos materiais é importante para aplicação na indústria da construção civil, uma vez que muitos dos materiais tradicionais são provenientes de recursos limitados e envolvem degradação ambiental para sua produção, como o cimento Portland. Além disso, a reciclagem de resíduos sólidos e o seu emprego como material de construção é uma tendência uma vez que a geração de resíduos é crescente e ininterrupta.

Esse estudo tinha como propósito viabilizar o uso da CME e do ARC na produção de concreto permeável, que por sua vez, também possui uma vertente sustentável pois visa o reabastecimento do solo a partir da infiltração das águas pluviais, sendo assim de acordo com o exposto concluiu-se que:

- Foi comprovada viabilidade do uso de resíduos sólidos na produção de artefatos de concreto, para este estudo em questão o concreto permeável, afirmado tanto pela literatura quanto pelos resultados numéricos obtidos. A substituição dos materiais convencionais pelos resíduos em estudo, CME e RCD, contribuíram para o ganho de resistência em relação ao traço referência. Alidao ao ganho de resistência, foi observada uma redução do coeficiente de permeabilidade, ou seja, os traços com maior resistência resultaram nos menores coeficientes de permeabilidade, no entanto, todos os atingiram o valor mínimo de 10^{-3} m/s.
- A CME ao ser submetida ao ensaio de índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias obteve resposta positiva se caracterizando, por meio deste teste, como material pozolânico, levando-se em consideração o seu uso anterior na indústria e o tratamento de requeima utilizado nessa pesquisa. O seu uso de forma individual no concreto permeável, foi positivo, porém não alcançou o exigido para aplicação em sarjetas, porém o ARC apresentou desempenho satisfatório quando aplicado de forma individual.

Por fim, conclui-se que o principal objetivo da pesquisa foi atingido, o concreto permeável com substituição de cinza de madeira de eucalipto (CME) e agregado reciclado de concreto (ARC) atende ao requisito normativo do DNIT e pode ser usado para construção de sarjetas de rodovias e ruas. Além disso, os resultados mostram que a permeabilidade do concreto atingiu o especificado pela NBR 16416 (ABNT, 2015b).

Sugere-se temas para pesquisas futuras, a saber:

- Processamento e tratamentos térmicos para otimizar e melhorar o desempenho da CME como material pozolânico, além de caracterizações químicas para determinar sua composição e explicar o seu comportamento;
- Investigação da composição química do concreto permeável contendo CME e ARC e determinação da sua microestrutura;
- Aplicação em campo do concreto permeável com substituição dos materiais tradicionais por CME e ARC e avaliar propriedades como durabilidade e permeabilidade.