INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS

MESTRADO EM TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS

FERNANDA BIANCHI DELEPRANI

CONCRETO PERMEÁVEL COM UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS RECICLADOS

Vitória

2022

FERNANDA BIANCHI DELEPRANI

CONCRETO PERMEÁVEL COM UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS RECICLADOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Sustentáveis do Instituto Federal do Espírito Santo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia Sustentáveis.

Área de Concentração: Desenvolvimento de Produtos e Processos Sustentáveis

Linha de Pesquisa: Tecnologias Sustentáveis em Materiais e Processos.

Orientador: Prof. Drª. Rosana Vilarim da Silva.
Coorientador: Prof. Drª. Georgia Serafim Araújo.

Vitória
2022

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Nilo Peçanha do Instituto Federal do Espírito Santo)

D346c Deleprani, Fernanda Bianchi.

Concreto permeável com utilização de materiais reciclados / Fernanda Bianchi Deleprani. – 2022.

77 f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Rosana Vilarim da Silva.

Coorientadora: Geórgia Serafim Araújo.

Dissertação (mestrado) – Instituto Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-graduação em Tecnologias Sustentáveis, Vitória, 2022.

1. Construção civil. 2. Concreto – Permeabilidade. 3. Resíduos como material de construção. 4. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 5. Poliestireno. 6. Sustentabilidade. I. Silva, Rosana Vilarim. II. Araújo, Geórgia Serafim. III. Instituto Federal do Espírito Santo. IV. Título.

CDD 21 – 690

Elaborada por Marcileia Seibert de Barcellos – CRB-6/ES - 656

FERNANDA BIANCHI DELEPRANI

CONCRETO PERMEÁVEL COM UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS RECICLADOS

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Tecnologias Sustentáveis, vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Sustentáveis do Instituto Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Sustentáveis.

Aprovada em 19 de agosto de 2022

COMISSÃO EXAMINADORA

Rosana Vilarim da Silva
Doutora Rosana Vilarim da Silva
Instituto Federal do Espírito Santo - Ifes
Orientadora
(Telepresença: Portaria Nº 783 de 19/11/2021 - Campus Vitória)

Rosana Vilarim da Silva
Doutora Geórgia Serafim Araújo
Instituto Federal do Espírito Santo - Ifes
Coorientadora
(Telepresença: Portaria Nº 783 de 19/11/2021 - Campus Vitória)

Rosana Vilarim da Silva
Doutor André Gustavo de Sousa Galdino
Instituto Federal do Espírito Santo - Ifes
Membro Interno
(Telepresença: Portaria Nº 783 de 19/11/2021 - Campus Vitória)

Rosana Vilarim da Silva
Doutor Ronaldo Pilar
Universidade Federal do Espírito Santo - Ufes
Membro Externo
(Telepresença: Portaria Nº 783 de 19/11/2021 - Campus Vitória)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida. A Ele toda honra e toda glória.

A minha família, meus pais Carlos e Rosângela e minha irmã Franciane, obrigada por fazerem dos meus sonhos, os sonhos de vocês.

Ao meu companheiro, Eduardo, pela parceria que formamos para a vida, seu valioso e incansável apoio foi definitivo em todas os momentos desse trabalho que, juntamente com a descoberta da chegada de nossa filha Luiza, ampliou a energia para alcançar nossos objetivos.

A professora Doutora Rosana Vilarim da Silva, pela orientação, discussões e reflexões que foram fundamentais ao longo de todo percurso.

A minha coorientadora professora Doutora Georgia Serafim Araujo, o agradecimento pelo grande incentivo, que foi fundamental para realizar o estudo. Saliento o apoio incondicional prestado, parceria e paciência.

Ao Laboratório de Ultraestrutura Celular Carlos Alberto Redins da UFES - Luccar, pelo uso do microscópio eletrônico de varredura.

À FAPES pelo apoio financeiro.

Ao IFES, campus Vitória, seus servidores, ao Programa de Pós-graduação em Tecnologias Sustentáveis e seus professores que me ajudaram nesse desafio.

E a todos que contribuíram, de alguma forma, para que esse título fosse alcançado.

Muito obrigada!

The present is theirs; the future, for which I have really worked, is mine.

Nikola Tesla

RESUMO

Esta dissertação propõe desenvolver e caracterizar blocos intertravados de concreto permeável utilizando materiais reciclados como o RCD e o poliestireno expandido (EPS). Foi utilizado um traço de 1:3 e relação a/c de 0,40 empregando areia de rio com granulometria # 1,2 - 2,4 mm e pedrisco com granulometria # 4,8 - 6,3 mm. Além do traço de referência foram elaborados traços com substituição do pedrisco por RCD, nos percentuais de 30 e 100% em massa, e traços com RCD e EPS, nos quais o EPS é incluído à mistura nos percentuais de 10 e 20% (equivalente em volume da massa da areia). Para cada traço foram fabricados seis blocos (20 cm x10 cm x 6 cm) e um corpo de prova cilíndrico (10 cm x 20 cm). Após a cura úmida, blocos e corpos de prova foram aquecidos em estufa a 100^{o}C por 24h para redução do volume do EPS e formação de vazios. Os blocos foram avaliados por meio de ensaios de compressão. Ensaios de absorção de água e de permeabilidade foram realizados nos corpos de prova cilíndricos. Todos os traços atenderam a exigência mínima da ABNT NBR 16416:2015 (Pavimentos permeáveis de concreto – requisitos e procedimentos), quanto ao coeficiente de permeabilidade que é 10^{-3} m/s, sendo considerados permeáveis. A resistência à compressão dos blocos com o traço de referência e com 30% de RCD, com ou sem EPS, atingiram valores próximos ou acima do mínimo de 20MPa, conforme exige a ABNT NBR 16416. Como conclusão verificou-se que é possível a utilização do RCD, na proporção de até 30% em substituição ao agregado graúdo, e a inclusão do EPS nos percentuais avaliados, para a produção de blocos intertravados permeáveis.

Palavras-chave: Concreto permeável. Resíduo de construção civil e demolição. Poliestireno expandido. Reciclagem.

ABSTRACT

This dissertation develop and characterize interlocking permeable concrete blocks using recycled materials such as RCD and expanded polystyrene (EPS). A mix of 1:3 and w/c ratio of 0,40 was used, using river sand with granulometry # 1.2 - 2.4mm and gravel with granulometry # 4.8 – 6.3 mm. Ind addition to the reference trace, trace were prepared with the replacement of the gravel by RCD, in the percentages of 30 and 100% in masses, traces and traces with RCD and EPS, in witch the EPS is included in the mixture in the percentages of 10 and 20% (equivalent in volume of the mass of sand). For each trace, six blocks (20 cm x 10 cm x 6 cm) and cylindrical specimen (10 cm x 20 cm) were manufactured. After curing, blocks and heated specimens were heated in an oven at 100°C for 24h to reduce the EPS volume and void formation. The blocks were executed through tests of. Water absorption and permeability tests were performed on cylindrical specimens. All traces meet a minimum requirement of ABNT NBR 16416:2015 (Permeable concrete floors - requirements and procedures), regarding the permeability coefficient, wich is 10^{-3} m/s, being considered permeable.
The compressive strength of the blocks with the reference trace and with 30% of RCD, with or without EPS, reached values close to or above the minimum of 20MPa, as required by ABNT NBR 16416. In conclusion, it was found that it is possible to use of the RCD, in the proportion of up to 30% in substitution of the coarse aggregate, and the inclusion of the EPS in the evaluated percentages, for the production of permeable interlocking blocks.

Keywords: Pervious concrete. Construction and demolition waste. Expanded Polystyrene. Recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Conexão do tema geral do trabalho com os ODS..... 18
Figura 2 - Municípios afetados pelas chuvas no Espírito Santo em 2020..... 21
Figura 3 - Distribuições granulométricas..... 22
Figura 4 - Pavimentos permeáveis mais utilizados..... 25
Figura 5 - Revestimento de pavimento intertravado permeável..... 29
Figura 6 - Revestimento de pavimento constituído de placas de concreto permeável..... 29
Figura 7 - Pavimento com revestimento de concreto permeável moldado no local..... 29
Figura 8 - Composição do pavimento permeável 31
Figura 9 - Sistema de infiltração de pavimento permeável..... 31
Figura 10 - Fórmula estrutural do poliestireno..... 38
Figura 11 - Placa de poliestireno expandido..... 39
Figura 12 Aplicabilidade do EPS..... 39
Figura 13 - Relatório de ensaios cimento CPIII 40 RS..... 41
Figura 14 - Poliestireno expandido..... 44
Figura 15 - Fluxograma da metodologia..... 44
Figura 16 - Aspecto do EPS antes e após aquecimento..... 47
Figura 17 - Metodologia de moldagem dos corpos de prova cilíndricos..... 51
Figura 18 - Metodologia de moldagem dos blocos intertravados..... 52
Figura 19 - Metodologia para a realização dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica 54
Figura 20 - Ensaio de resistência à compressão de um bloco intertravado 55
Figura 21 - Aparato para realização do ensaio de permeabilidade..... 57
Figura 22 - Bloco intertravado moldado com relação a/c de 0,35 60
Figura 23 - Bloco intertravado moldado com relação a/c de 0,40 60
Figura 24 - Gráfico comparativo da resistência à compressão e da absorção de água dos blocos intertravados..... 61
Figura 25 - Gráfico comparativo de resistência à compressão e do índice de vazio dos blocos intertravados 62
Figura 26 - Média e desvio padrão da compressão dos blocos 65

Figura 27 - Fragmentos de blocos após ruptura 67
Figura 28 - Fragmentos do bloco RCD30EPS após ruptura 67
Figura 29 - Superfície de fratura do bloco de referência observada no MEV 68
Figura 30 - Superfície de fratura do bloco RCD30EPS10 observada no MEV 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Proporções típicas em misturas de concreto permeável.....	24
Tabela 2 -	Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável.....	30
Tabela 3 -	Classificação e descrição dos resíduos.....	37
Tabela 4 -	Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto.....	37
Tabela 5 -	Faixas granulométricas do RCD	42
Tabela 6 -	Composição do RCD para cada faixa granulométrica (% em massa) ..	43
Tabela 7 -	Massa específica do pedrisco, da areia e do RCD	46
Tabela 8 -	Massa específica unitária do EPS.....	47
Tabela 9 -	Resumo dos dados e referências utilizadas para a definição dos parâmetros da pesquisa.....	49
Tabela 10 -	Nomenclaturas e percentuais de resíduos utilizados nos traços	50
Tabela 11 -	Composição dos traços utilizados nesse trabalho relação a/c 0,40.....	50
Tabela 12 -	Resultado do ensaio de resistência à compressão traço 1:3.....	58
Tabela 13 -	Resultado do ensaio de resistência à compressão traço 1:4.....	58
Tabela 14 -	Coeficiente de permeabilidade dos traços de referência.....	59
Tabela 15 -	Resultado do ensaio de resistência à compressão, absorção de água e índice de vazios dos blocos.....	61
Tabela 16 -	Coeficiente de permeabilidade das argamassas de referência, com RCD e EPS.....	63
Tabela 17 -	Descrição da compressão dos blocos.....	65
Tabela 18 -	Teste de normalidade.....	66
Tabela 19	Comparação entre a compressão dos blocos	66

LISTA DE SIGLAS

ABCP - Associação Brasileira Cimento Portland

ABRECON - Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - American Concrete Institute

ANOVA - Análise de Variância

ARC - Agregado de Resíduo de Concreto

ARM – Agregado de Resíduo Misto

ASTM – American Society for Testing and Materials

CCP – Concreto de Cimento Portland

cps – corpos de prova

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

EPS - Poliestireno Expandido

IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto

IFES - Instituto Federal do Espírito Santo

LEED - Leadership in Energy and Environmental Design

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR - Norma Brasileira Registrada

NM - Norma Mercosul

ODS - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

PCP - Precast Concrete Pavement

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

PS – Poliestireno

RCC - Resíduo de Construção Civil

RCD - Resíduo de Construção e Demolição

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

USGBC - United States Green Building Council

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	13
2	**OBJETIVOS**	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	15
3	**REVISÃO DE BIBLIOGRÁFICA**	16
3.1	SUSTENTABILIDADE DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	16
3.1.1	**Relação do tema do trabalho com os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável**	17
3.2	CONCRETO	18
3.3	CONCRETO PERMEÁVEL	20
3.4	PAVIMENTOS PERMEÁVEIS	25
3.5	NORMAS TÉCNICAS PARA CONCRETOS PERMEÁVEIS	28
3.6	CONCRETO PERMEÁVEIS COM MATERIAIS ALTERNATIVOS	32
3.7	RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (RCD) E POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)	36
3.7.1	**Resíduo de construção civil e demolição (RCD)**	36
3.7.2	**Poliestireno expandido (EPS)**	38
4	**METODOLOGIA**	40
4.1	MATERIAIS	40
4.1.1	**Água**	40
4.1.2	**Agregado miúdo**	40
4.1.3	**Agregado graúdo**	40
4.1.4	**Cimento CPIII**	40
4.1.5	**RCD**	41
4.1.6	**EPS**	43
4.2	METÓDOS	44
4.2.1	**Caracterização das matérias primas**	46
4.2.1.1	Peneiramento e separação das faixas granulométricas desejadas	46
4.2.1.2	Massa específica unitária	46
4.2.1.3	Teste de aquecimento do EPS	47
4.2.2	**Definição dos traços, moldagem e ensaios dos corpos de prova**	48

4.2.2.1 Definição dos traços..... 48
4.2.2.2 Moldagem e ensaios dos corpos de prova cilíndricos para o traço de referência..... 50
4.2.2.3 Produção e ensaios dos blocos intertravados e corpos de prova Cilíndricos..... 51
4.2.3 Inspeção visual e análise dimensional..... 53
4.2.4 Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica..... 53
4.2.5 Ensaio de resistência à compressão dos blocos..... 55
4.2.6 Ensaio de permeabilidade..... 56
4.2.7 Análise da superfície de fratura dos blocos a 57
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... 58
5.1 DEFINIÇÃO DO TRAÇO DE REFERÊNCIA..... 58
5.2 ENSAIOS DOS BLOCOS INTERTRAVADOS..... 59
5.2.1 Análise estatística dos resultados do ensaio de resistência à compressão 64
5.2.2 Análise da superfície de fratura dos blocos 66
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 69
REFERÊNCIAS..... 71

1. INTRODUÇÃO

Segundo a ABNT NBR 16416 (2015), pavimento permeável é o pavimento que atende simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento e, cuja estrutura permite a percolação de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar dano à sua estrutura.

É utilizado em áreas urbanas, sendo uma maneira de minimizar os impactos provocados pela pavimentação convencional impermeável. Durante chuvas intensas, a pavimentação impermeável contribui para o aumento do escoamento das águas superficiais com potencial de inundações repentinas.

Segundo Batezini (2013), a aplicação do pavimento permeável permite o recarregamento dos aquíferos subterrâneos e, redução da velocidade e da quantidade do escoamento superficial das águas pluviais. Além disso, favorece uma utilização mais eficiente do solo, uma vez que, minimiza, ou até dispensa outras obras de micro drenagem local como pontos de acúmulo de água.

Botteon (2017) afirma que nos últimos anos o concreto permeável utilizado como revestimento dos pavimentos permeáveis, é considerado uma solução ecologicamente correta e sustentável. Este tipo de concreto vem ganhando destaque e relevância na indústria da construção civil, sobretudo por ser reconhecido pelo Conselho de Construções Ecológicas dos EUA a United States Green Building Council (USGBC), que define o sistema Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) de classificação de construções sustentáveis. O concreto permeável pode contribuir para algumas categorias na certificação do LEED, sendo: Locais Sustentáveis; Eficiência Hídrica; Materiais e Recursos; e Inovação em Design (SABNIS, 2012).

A permeabilidade do concreto é obtida pelo controle da distribuição granulométrica dos agregados e consequentemente do percentual de vazios. As propriedades do concreto permeável dependem da granulometria do agregado, quantidade de cimento, relação água/cimento e quantidade de vazios. A graduação do agregado graúdo influencia diretamente sua resistência e permeabilidade, que são fatores importantes para o desempenho do concreto permeável (IBRACON, 2017).

Para a fabricação do concreto permeável geralmente são utilizados insumos naturais virgens (brita, areia e água), cuja produção pode ter forte impacto no meio ambiente, como também é o caso do cimento (ABCP, 2013).

Outro problema é a geração de resíduo do setor de construção civil. Por ser, responsável pelo consumo de 40% a 75% de matéria-prima produzida no planeta, a construção civil, apenas no Brasil, gera cerca de meia tonelada de entulhos (resíduos de construção e demolição) os quais geram custos para a sua coleta, seu transporte e deposição em local apropriado (AGOPYAN, 2013; ABRECON 2020). O uso de fontes alternativas de materiais em substituição aos insumos naturais virgens, é uma forma de diminuir o impacto ambiental atrelado à produção industrial civil.

Um dos possíveis destinos para os Resíduos Sólidos da Construção Civil e Demolição (RCD), e um dos principais produtos quando se pensa na valorização e na extensão da vida útil desses resíduos, são os agregados reciclados (JIMÉNEZ et al.,2012). Pesquisas recentes demonstram que o agregado reciclado de RCD pode substituir total ou parcialmente agregados naturais para a pavimentação, concreto estrutural e não estrutural, argamassa para alvenaria e outros usos diversos (THOMAS et.al., 2020).

Nesse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo elaborar e caracterizar um concreto permeável, utilizando materiais alternativos, o RCD e poliestireno expandido (EPS) reciclado. Este concreto será utilizado para a confecção de blocos intertravados de pavimentação permeáveis.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver e avaliar o desempenho de blocos intertravados de pavimentação permeáveis fabricados com resíduos de construção e demolição (RCD) em substituição parcial ao agregado graúdo natural e com incorporação de poliestireno expandido (EPS).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o desempenho dos blocos intertravados de pavimentação permeável do traço de referência e se atendem aos requisitos da norma para este tipo de produto, ABNT NBR 16416:2015;

- Avaliar a utilização do RCD como substituto do agregado natural (pedrisco), para confecção dos blocos intertravados de pavimentação permeável;

- Avaliar o efeito do EPS como gerador de vazios após o aquecimento dos blocos intertravados de pavimentação permeável;

- Avaliar o desempenho dos blocos intertravados de pavimentação permeável com agregados reciclados, no que se refere à resistência mecânica, análise dimensional, absorção de água, indicie de vazios e permeabilidade;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SUSTENTABILIADE E RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Os problemas ambientais do mundo contemporâneo são, em sua grande maioria, gerados pela ação direta ou indireta de fatores antropológicos. O homem assumiu uma função essencial quanto ao impacto negativo no meio ambiente, o que constitui uma preocupação para a humanidade (ABRECON, 2020). Como exemplo desses impactos negativos podemos citar, o consumo de grandes quantidades de recursos naturais e a consequente produção de resíduos sólidos urbanos, gerados pelo desenvolvimento acelerado e o grande adensamento populacional, na maioria das cidades na atualidade.

Dentre os resíduos sólidos urbanos, um dos que causam maior impacto ambiental é o RCD, objeto de estudo deste trabalho. Com o avanço tecnológico, a indústria da construção civil ganhou em termos de qualidade, produtividade, redução de custos, geração de empregos e competitividade entre empresas. Contudo, os resíduos oriundos dessa atividade são causadores de prejuízos ambientais e sociais. Estima-se que a quantidade de resíduos sólidos nos aterros sanitários seja composta de 61% de RCD, 25% de resíduos domésticos e 14% de outros. Praticamente todas as atividades desenvolvidas no setor da construção civil, são geradoras de resíduos, conforme dados da Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério das Cidades (SNIS, 2018).

O resíduo de construção e demolição é composto em sua maioria por fragmentos de rocha, materiais cimentícios (blocos, concreto, argamassa), cerâmica vermelha, cerâmica branca, revestimento e asfalto. Pesquisas demonstram que 83% dos RCD possuem um alto potencial para reciclagem, comprovando ser esta a única indústria capaz de absorver quase que totalmente os resíduos que produz (ABRECON, 2020).

No entanto, para que os RCD possam ser usados é importante a separação desde a sua geração: materiais perigosos, como solvente e asbestos, e componentes que são considerados impurezas, como gesso, madeira, vidro, metais, plástico e solo, devendo assim, ser separados dos outros resíduos da construção civil. O seu beneficiamento

envolve desde a sua coleta do canteiro de obras e transporte, passando por separação, moagem e peneiramento, até a sua estocagem para posterior utilização.

Contudo, a observação da literatura disponível, demonstra uma pouquidade no aproveitamento de RCD como matéria-prima principal de novos materiais de construção civil.

3.1.1 Relação do tema do trabalho com os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável

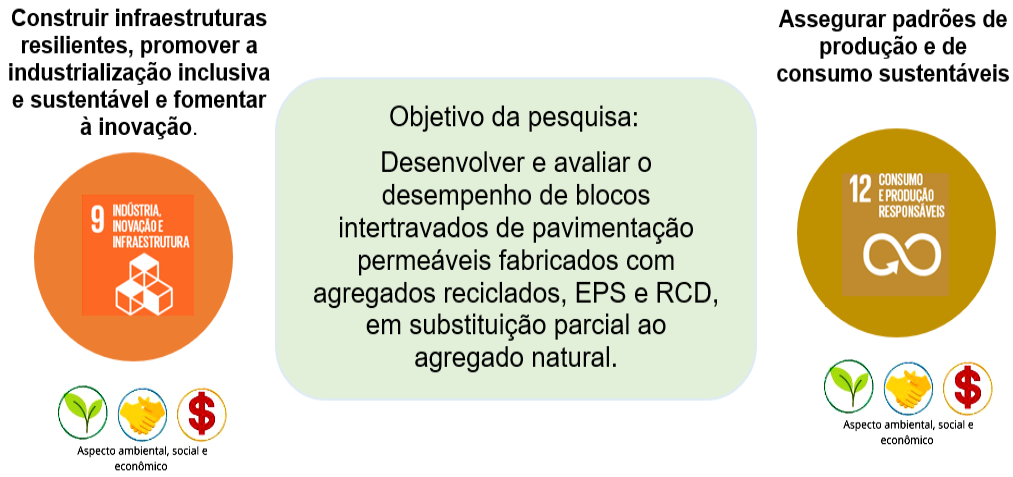
Entende se por crescimento sustentável - definido pelo Relatório Bruntland (documento elaborado em 1987 pela Comissão Mundial da ONU, na Conferência das Nações Unidas, definindo diretrizes para desenvolvimento sustentável) como sendo aquele que “satisfaça as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer suas próprias necessidades” - englobando o reuso e a reciclagem de materiais descartados pela Construção Civil, sem prejuízo ao meio ambiente.

Em setembro de 2015, os chefes de Estado e de Governo e altos representantes se reuniram na sede das Nações Unidas em Nova York e definiram os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável globais e 169 metas que propõem ações ao longo de 15 anos, com o intuito de promover saúde, educação de qualidade e equidade de direitos a todos, exterminando a pobreza mundial, protegendo o meio ambiente e garantindo a igualdade de gênero os quais entraram em vigor no ano de 2016 para a implementação desta Agenda em 2030 (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO, 2015).

O presente estudo colabora diretamente com dois ODS, sendo eles o ODS número nove (indústria, inovação e infraestrutura), através do estimulo de fortalecer a pesquisa científica, de modo a melhorar a capacidade tecnológica com incentivo a inovação, tornando as indústrias mais sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente correto; e o ODS número doze (consumo e produção sustentáveis), assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis para alcançar o manejo ambientalmente saudável de todos os resíduos, ao longo do ciclo de vida destes, e

reduzir significativamente a liberação para o ar, água e solo, minimizando impactos sobre a saúde humana e meio ambiente. Ainda, até 2030, deve-se reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso. A conexão do tema geral do trabalho com os ODS está apresentada no infográfico da Figura 1.

Figura 1 – Conexão do tema geral do trabalho com os ODS.



Fonte: Adaptado Nações Unidas (2015).

3.2 CONCRETO

O concreto é um dos principais materiais utilizados na construção civil, e um dos materiais mais usados em obras de infraestrutura, conhecido pela capacidade de resistir a grandes esforços de compressão, o concreto é um material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdos e graúdos e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários como aditivos químicos, pigmentos, metacaulim, sílica ativa e outros materiais pozolânicos.

As características do concreto dependem da natureza do agregado, da natureza da pasta de cimento-água e das quantidades relativas dos dois. Em outras palavras, as propriedades do concreto são governadas por suas estruturas internas, a exemplo do que ocorre com qualquer outro material (SACCANI *et al*., 2000).

A qualidade do concreto está diretamente relacionada com a relação água/cimento (a/c). Essa relação é muito importante, pois a quantidade de água tem grande influência na resistência do concreto, o excesso de água aumenta a retração do concreto depois de seco causando fissuras. Geralmente, o fator água/cimento está em torno de 0,4 – 0,7. Dependendo da quantidade de material, com uma relação 0,3 a/c ficará muito difícil de trabalhar e, 0,8 a/c torna o material muito fraco.

Dentre as normas criadas para o uso de concreto, destaca se a ABNT NBR 12655:2022 Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação, que é aplicável para estruturas moldadas na obra, estruturas pré-moldadas e componentes estruturais pré-fabricados para edificações e estruturas de engenharia. Estabelece requisitos para as propriedades do concreto fresco e endurecido, bem como suas verificações, a composição, o preparo e controle, a aceitação e o recebimento do concreto. No mercado são encontrados diferentes tipos de concreto, dentre os quais destacam-se:

Concreto convencional – concreto de massa específica seca determinada de acordo com a ABNT NBR 9778:2006, compreendida entre 2000Kg/m³ e 2800Kg/m³, de resistência variando de 10MPa a 40MPa.

Concreto armado – concreto que adiciona armações de aço a fim de aumentar sua resistência a forças de compressão e tração e seu comportamento estrutural depende da aderência entre o concreto e armadura. A armadura é chamada passiva, o que significa que as tensões e deformações nela existentes devem-se exclusivamente às ações aplicadas na peça.

Concreto leve – concreto de massa específica seca determinada pela ABNT NBR 9778:2006, inferior a 2000Kg/m³. Concretos com estrutura porosa, geralmente à base de ligantes hidráulicos, podendo ser obtidos com a utilização de agregados leves, com a incorporação de ar ou sem finos.

Concreto pesado – concreto com massa específica seca determinada de acordo com a ABNT NBR 9778:2006 superior a 2500Kg/m³, possui agregados de maior massa, como hematita, barita e magnetita. É comumente utilizado em projetos específicos,

como construção de usinas que usam energia atômica, gasodutos, hospitais ou câmaras de raio x, pois seus agregados ajudam a barrar a radiação.

Concreto protendido - consiste basicamente na inserção de cabos de aço de alta resistência no concreto. A norma ABNT NBR 6118:2014 diferencia o concreto protendido do concreto armado, como sendo aquele em que o aço é pré tracionado e travado nas extremidades do elemento estrutural e, tem como principal função a de impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos na estrutura, conforme descrito na norma.

Concreto alta resistência (CAR) – concreto com resistência característica à compressão superior a 50 MPa definido pela norma ABNT NBR 12655:2022. Utilizado em fundações, lajes, pilares, vigas, dentre outras situações, pois, é capaz de suprir as necessidades de resistência com um menor volume de material em menor tempo.

3.3 CONCRETO PERMEÁVEL

O avanço da urbanização tem como consequência principal o aumento das áreas impermeáveis, áreas essas que anteriormente possuíam infiltração natural, agora apresentam apenas um escoamento superficial. A drenagem da água é realizada através do solo, contudo, o escoamento e retorno da água aos lençóis freáticos são dificultados em áreas urbanas, o que resulta em alterações nos leitos dos rios e dos canais, bem como no aumento no volume e constância das enchentes (TAVARES, 2016).

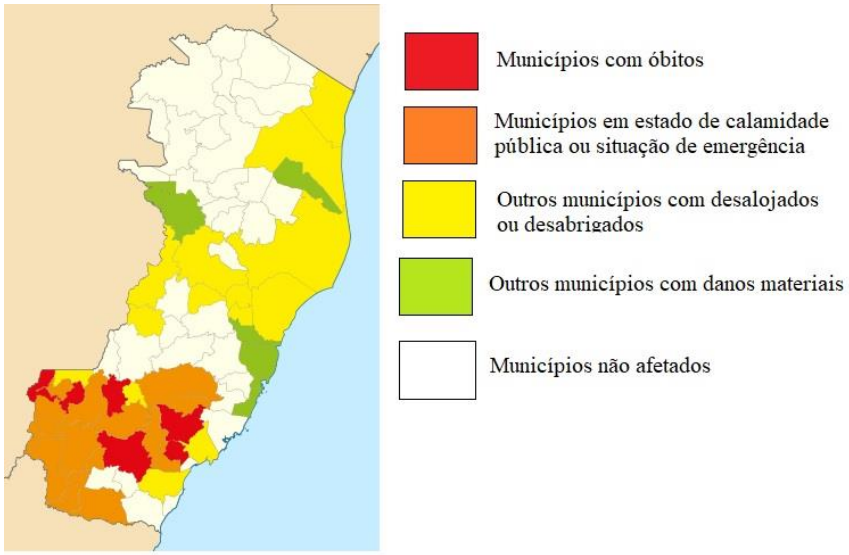
A impermeabilização de diversas áreas nas cidades provoca o aumento da vazão, que, por sua vez, gera o aumento de volume da água que segue para a rede de drenagem e, como a mesma não suporta todo o volume, culmina em problemas de inundações e alagamentos.

Também conhecido como concreto poroso, o concreto permeável é caracterizado por ser uma variedade de concreto com volume de poros interligados entre si. Dependendo da sua composição, o concreto permeável é caracterizado pela elevada porosidade e boa drenabilidade e, devido a essa capacidade de deixar a água infiltrar através de sua superfície porosa, a utilização quando corretamente projetada e

implantada, pode influenciar significativamente nas vazões de pico que ocorrem durante eventos de chuva em determinado local.

Segundo dados da Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil do Espírito Santo (2021) o número total de municípios que sofreram inundações e desastres provocados pelas enchentes das fortes chuvas no mês de janeiro de 2020 foi de 22, conforme ilustrado na Figura 2. Além dos prejuízos significativos para o setor público e privado, foram mais de 15 mil pessoas desabrigadas ou desalojadas, 10 óbitos, além dos transtornos da rede viária nos picos pluviométricos.

Figura 2 – Municípios afetados pelas chuvas no Espírito Santo até 30 de janeiro de 2020.



Fonte: Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil do Espírito Santo (2020).

As medidas de controle de enchente podem ser classificadas em dois tipos: estruturais, que envolvem obras ou uso de equipamentos e tecnologia, sendo consideradas mais onerosas; não-estruturais, soluções gerenciais de menor custo que procuram intervir nas causas que podem originar ou agravar um problema.

As águas pluviais que infiltram por entre a matriz porosa do concreto permeável diminuem a vazão superficial e favorecem o uso mais eficiente do solo, essa característica é atribuída ao fato de possuir uma rede de macro poros interconectados que formam canais permitindo a drenagem da água, dispensando grandes obras de drenagem tais como pontos de retenção, valas ou tubulações.

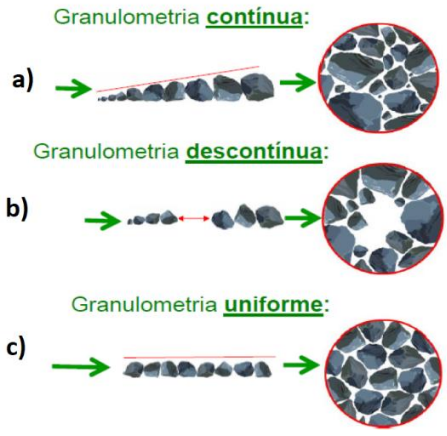
Além de demandar um menor custo durante o seu ciclo de vida em detrimento aos sistemas de drenagem convencionais, auxiliam na redução da incidência de enxurradas urbanas, responsáveis por carregar uma grande quantidade de resíduos e poluentes aos corpos de água. Absorvem menos radiação solar, favorecendo a conservação da arborização em áreas pavimentadas, pois possibilita o recebimento de água e ar pelas raízes.

Adicionalmente, esse tipo de pavimento é conhecido pelos seus benefícios de filtragem de água, principalmente para hidrocarbonetos de petróleo, zinco e sólidos suspensos contidos na água da chuva (ROSEEN et at., 2012). Como desvantagem, o pavimento permeável não pode ser aplicado em vias de tráfego de cargas pesadas, devido a sua baixa resistência.

Utilizado em áreas de tráfego leve, os setores comerciais e de uso residencial são as principais áreas elegíveis para a realização dos pavimentos permeáveis, tendo como exemplo: estacionamentos, áreas de manobra, garagens residenciais, calçadas, jardins e áreas externas de condomínios, praças e pátios, pois não recebem cargas significativas que podem afetar a estrutura.

De uma maneira geral, os pavimentos permeáveis, sejam em forma de placa pré-fabricadas ou moldados no local, são conseguidos com o controle da granulometria do agregado (COSIC et al., 2015; TORRES, 2015). O controle do volume de vazios, comumente para concretos, consiste no controle da distribuição granulométrica dos agregados, como apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Distribuições granulométricas: a) Contínua, b) Descontínua e c) Uniforme.



Fonte: Adaptado de Farias e Palmeira (2007).

Na distribuição granulométrica contínua (Figura 3-a) há um aumento gradual dos grãos, uma melhor trabalhabilidade e um menor índice de vazios, mas desde que sejam utilizadas as proporções corretas, sempre haverá um grão menor que ocupará os espaços vazios entre os grãos maiores. Por outro lado, a graduação descontínua (Figura 3-b) apresenta mais vazios entre os grãos, na qual algumas faixas granulométricas são excluídas a fim de se reduzir o volume de vazios até certo limite, sendo possível obter uma otimização entre as propriedades que dependem de maneiras opostas do volume de vazios: a permeabilidade e a resistência mecânica. Agregados de graduação uniforme (Figura 3-c) apresentam maior contato entre si e permitem que haja pequenos espaços entre os grãos.

O concreto produzido com agregados de granulometria contínua proporciona uma maior trabalhabilidade e um menor consumo de cimento, já o com granulometria descontínua proporciona uma maior resistência e um maior consumo de cimento enquanto que o com granulometria uniforme apresenta um maior consumo de água (IBRACON, 2017).

A porosidade, no pavimento permeável é considerada determinante primária da magnitude da condutividade hidráulica e da resistência à compressão. Enquanto na primeira é diretamente proporcional, na segunda, inversamente. Então, o fator determinante de uma dosagem de concreto permeável está na definição de um valor ideal de vazios, para que se alcance a resistência esperada, garantindo também permeabilidade. Essa última propriedade é regida, majoritariamente, pela proporção de agregado graúdo em relação à argamassa (ADEWUMI et al., 2016).

Para a geração de vazios em pavimentos permeáveis, podem ser utilizados agregados de granulometria continuas (tipo uniforme) ou descontinuas. Os agregados comumente utilizados do tipo uniforme, possuem diâmetro máximo de 19mm. Para granulometrias descontinuas, são usualmente empregadas as seguintes faixas granulométricas: 19mm - 4,8mm, 9,5mm - 2,4mm, 9,5mm - 1,2mm (TENNIS et al., 2004).

Eventualmente são incorporados aditivos a mistura, como os super plastificantes para obter melhoria na trabalhabilidade das misturas do concreto permeável; aditivos

retardadores de pega para o controle do tempo de pega, a qual ocorre muito rapidamente no concreto permeável e, dependendo da relação água/cimento, aditivos redutores de água.

É válido inicialmente afirmar que não existe um método de dosagem racional de concretos permeáveis, tal como aqueles usuais empregados na dosagem de concretos plásticos convencionais. Além disso, é essencial a expansão de consciência para o fato de que conceitos sólidos relacionados a dosagem de concretos plásticos, como, por exemplo, as Leis de Lyse e Abrams, não são diretamente aplicáveis aos concretos permeáveis devido as características particulares do material, que emergem da ausência de finos, sendo sua consistência sempre baixa (seca) e sua resistência governada pela área de contato entre as partículas de agregado graúdo, proporcionada exclusivamente pelo volume de pasta de cimento presente na mistura.

As proporções desses materiais são definidas por meio de experimentos e procedimentos de dosagem em laboratório, a chamada dosagem experimental. É válido ressaltar a importância: razão cimento/agregado e procedimento de compactação ou adensamento empregado na produção do material. Afinal, são capazes de influenciar diretamente as características mecânicas do concreto, como, por exemplo, a massa específica (ACI, 2010).

MERIGHI et al. (2006) apresenta as faixas de proporções dos materiais comumente utilizados nas composições de concreto permeável, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1- Proporções típicas em misturas de concreto permeável.

Materiais	**Consumo/Proporções (Kg/m³)**
Material cimentício (Kg/m³)	270 a 415
Agregado graúdo (Kg/m³)	1.190 a 1.480
Relação água/cimento (a/c) em massa	0,27 a 0,34
Relação cimento/agregado em massa	1:4 a 1:4,5
Relação agregado miúdo/agregado graúdo em massa	0 a 1:1

Fonte: MERIGHI et al. (2006).

Sendo produzido a partir de materiais comuns à composição do concreto de cimento Portland convencional (CCP), o concreto permeável se distingui fundamentalmente, pela redução da quantidade de agregados miúdos, ou até mesmo pela sua ausência.

O ligante hidráulico mais usado como aglomerante em concretos permeáveis trata-se do tradicional cimento Portland, materiais suplementares como a cinza volante, a escória granulada de alto forno moída e a sílica ativa podem, ainda, ser empregados com o intuito de otimizar determinadas propriedades mecânicas do concreto (ACI, 2010). Para garantir seu potencial permeável, Batezini (2013) salienta que é necessário analisar criteriosamente as proporções das adições incorporadas à mistura.

3.4 PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Os tipos de pavimentos permeáveis mais utilizados são o pavimento de asfalto poroso, pavimento de concreto permeável e o pavimento de blocos de concreto vazado, exemplificados na Figura 4.

Figura 4- Pavimentos permeáveis mais utilizados: a) Asfalto poroso, b) Concreto permeável e c) Bloco de concreto vazado.

Fonte: Silva (2012).

Conforme o boletim ACI 522-R10 (ACI, 2010), o concreto permeável foi utilizado pela primeira vez em 1852, na Europa, na construção de duas casas a partir de cimento, brita e água. Contudo, foi patenteado somente em 1980, nos Estados Unidos (GRUBEŠA et al., 2018).

Li (2009) destaca que mesmo sendo uma tecnologia antiga, remontando há mais de 150 anos, a referida, só começou a ganhar força a partir da década de 1970, nos Estados Unidos, com a aplicação em estacionamentos e algumas avenidas. Diferentemente da Europa, sua aplicação nos Estados Unidos se dava devido às suas características de permeabilidade, no intuito de mitigar os efeitos, cada vez mais recorrentes, de inundações (GHAFOORI,1995).

Polastre e Santos (2006) citam como exemplos o Parque Tecnológico de Belo Horizonte -MG, que tem sua pavimentação executada em concreto permeável, minimizando o risco de inundações no recinto e ainda alimentando as nascentes do parque. Citam ainda, o caso da Prefeitura de São Paulo, também em 2006, que em parceria com uma empresa privada utilizaram o concreto permeável na recuperação de áreas degradadas com o intuito de auxiliar a manutenção de aquíferos subterrâneos.

Em 2012 a Prefeitura do Rio de Janeiro criou o decreto 35745, denominado, qualificação QUALIVERDE, uma certificação com o objetivo de incentivar empresas a utilizarem pavimentos permeáveis dentre as ações e práticas sustentáveis destinadas a redução dos impactos ambientais. Embora esse tipo de pavimento seja empregado há décadas pelo mundo, no Brasil, pesquisas e referências acerca dessa tecnologia são incipientes.

Pelo fato de ser um material bastante interessante para pavimentos que não sofrem cargas elevadas, este material tornou-se um objeto de estudo de muitas pesquisas, uma vez que apresentou um bom desempenho e durabilidade quando empregado em revestimento de pavimentos em áreas de veículos leves e circulação de pessoas, o que, coligado à sua capacidade de drenagem possibilita o seu emprego como equipamento urbano de mitigação dos níveis de impermeabilização intensificado pela urbanização das cidades. Uma vez evidenciada a vantagem do concreto permeável, quando analisados os fatores relacionados à permeabilidade do solo, ele pode tornar-se ainda mais vantajoso, caso faça uso de resíduos sólidos (Cardoso, Shimosaka, Filho & Paulazzi, 2017).

Os estudos acerca da utilização de concreto permeável aplicado à pavimentação vêm se desenvolvendo de forma gradual, com aplicação de alguns projetos. Dentre as

diversas características do pavimento permeável, a sua resistência à compressão e a permeabilidade são as mais estudadas. O coeficiente de permeabilidade, também chamado de condutividade hidráulica ou taxa de percolação, representa uma das mais relevantes características do concreto permeável (BATEZINI, 2013).

Suleiman et al. (2006) analisaram a influência da energia de compactação nas propriedades do concreto permeável e concluíram que moldagens com 15 golpes de bastão metálico em cada uma das três camadas de corpo de prova cilíndrico, com vibração posterior, melhora as condições de resistência mecânica após a cura, sem prejuízo a condutividade hidráulica.

Para Höltz (2011), o concreto permeável tem sua densidade influenciada, diretamente, pelas propriedades e proporções dos materiais utilizados e pela metodologia de compactação usada. Normalmente encontram-se densidades da ordem de 1600 kg/m³ a 2000 kg/m³.

Os autores Curvo (2017) e Batezini (2019), estudaram variações de granulometria de agregados, tipos de cimento e teores de superplastificante, buscando respeitar a relação entre cimento e agregados entre 1:4 e 1:4,5 recomendadas em estudos anteriores. Concluíram que é importante ter uma devida dosagem na mistura, principalmente para a limitação do teor de aditivo superplastificante, tendo em vista que qualquer quantidade diferente da dosagem pode acarretar em uma mistura com diferentes propriedades e, até mesmo com segregação e colmatação no fundo da camada.

Botelho e Aguado (2020) analisaram que os corpos de prova com variação de granulometria entre 4,75 - 12,5 mm apresentaram resistências abaixo de 10 MPa aos 28 dias. Porém, estão dentro da normalidade mencionada pela ACI 522-R06 (2006), com concretos permeáveis variando de 2,8 MPa a 28 MPa. Em relação aos ensaios de permeabilidade, notou se que o concreto permeável atingiu os aspectos esperados, percolando com êxito a água precipitada em curto período.

Além dos procedimentos de dosagem, moldagem, avaliação e caracterização sistemática do material, é preciso desenvolver também, estudos que ponderem os benefícios ambientais e econômicos intrínsecos ao pavimento permeável.

3.5 NORMAS TÉCNICAS PARA CONCRETOS PERMEÁVEIS

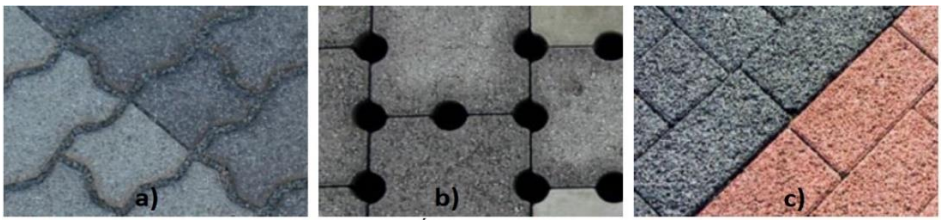
As primeiras recomendações normativas para o concreto permeável publicadas foram o manual da Precast Concrete Pavement (PCP) (TENNIS et al.,2004); e ACI522R-10 (ACI, 2010). Ambas abordam aspectos técnicos do material e seus constituintes, métodos simplificados de dosagem e ensaios de caracterização.

Nos últimos anos, a ASTM (*American Society for Testing and Materials)* lançou uma coletânea de normativas para caracterização do concreto permeável: ASTM C1754 (2012), para determinar a densidade e conteúdo de vazios do concreto permeável no estado endurecido; a ASMT C1747 (2013), para determinar a resistência a degradação do concreto permeável por impacto e abrasão; a ASTM C1688 (2014), para determinar a densidade e conteúdo de vazios do concreto permeável no estado fresco; ASTM C1701 (2017), para determinar a permeabilidade do concreto permeável.

Em agosto de 2015 foi publicada a primeira norma sobre os pavimentos permeáveis no Brasil, a ABNT NBR 16416:2015: Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos e Procedimentos, com enfoque para blocos intertravados e para o ensaio da permeabilidade. Embora existam normativas para caracterização do concreto permeável, não há normas ou abordagens aprofundadas na literatura sobre a utilização de ensaios não destrutivos, método do ultrassom por exemplo, para uma caracterização direta do pavimento permeável.

Na ABNT NBR 16416:2015 são contempladas como opções de revestimento as peças de concreto para pavimentação intertravada, podendo ser do tipo juntas alargadas (Figura 5-a), áreas vazadas (Figura 5-b), concreto permeável (Figura 5-c). A Figura 6 apresenta revestimento de pavimento constituído de placas de concreto permeável e a Figura 7 um pavimento com revestimento de concreto moldado no local.

Figura 5– Revestimento de pavimento intertravado permeável: a) Juntas alargadas, b) Áreas vazadas e c) Concreto permeável.



Fonte: Febestral (2008).

Figura 6 – Revestimento de pavimento constituído de placas de concreto permeável.

Fonte: Silva (2012).

Figura 7 – Pavimento com revestimento de concreto permeável moldado no local.

Fonte: Marchioni e Silva (2011).

Por revestimento permeável, a referida norma entende que se trata da camada que recebe diretamente a ação de rolamento e carga de veículos, tráfego de pedestres ou cargas estáticas e, simultaneamente, atende aos critérios de permeabilidade.

Importante parâmetro definido pela norma, o coeficiente de permeabilidade (k), representa a velocidade de percolação da água em um elemento ou estrutura permeável. Esse coeficiente deve ser superior a 10^{-3} m/s para pavimentos recém-construídos, qualquer que seja o tipo de revestimento adotado.

Os requisitos de resistência mecânica e espessura mínima para os revestimentos, estão descritos na Tabela 2. A norma propõem também, em caráter informativo, um método de dimensionamento hidráulico alternativo das camadas de base e/ou sub-base.

Tabela 2 – Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável.

Tipo de revestimento	**Tipo de solicitação**	**Espessura mínima (mm)**	**Resistência mecânica característica (MPa)**	**Método de ensaio**
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60,0	≥ 35,0[a]	ABNT NBR 9781
	Tráfego leve	80,0		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	≥ 20,0 [a]	
	Tráfego leve	80,0		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	≥ 2,0[b]	ABNT NBR 15805
	Tráfego leve	80,0		
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60,0	≥ 1,0[c]	ABNT NBR 12142
	Tráfego leve	100,0	≥ 2,0[c]	

[a] determinação da resistência à compressão, conforme na ABNT NBR 9781.

[b] determinação da resistência à flexão, conforme na ABNT NBR 15805.

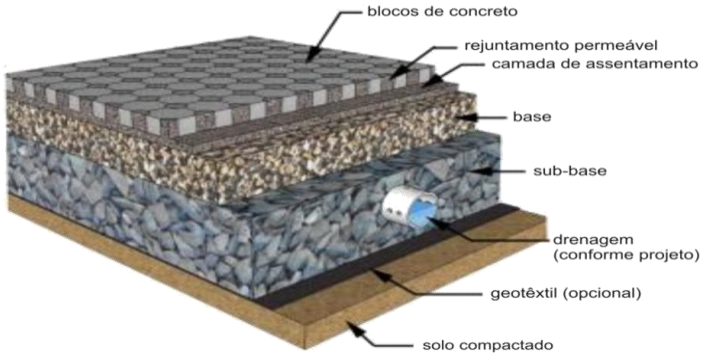
[c] determinação da resistência à tração na flexão, conforme na ABNT NBR 12142

Fonte: ABNT NBR 16416:2015.

Composto por camadas (Figura 8), o pavimento permeável possui o revestimento como última camada a ser aplicada. Abaixo dele, há a camada de assentamento que é precedida pela base permeável. É indicada a instalação de uma manta geotêxtil antes da camada de solo compactado, que é a última camada do pavimento Figura 8.

Conforme sistema de infiltração, definido pela ABNT NBR 16416:2015, ainda podem ser adicionados um tubo drenante e uma membrana impermeável.

Figura 8- Composição do pavimento permeável.



Fonte: ABCP (2013).

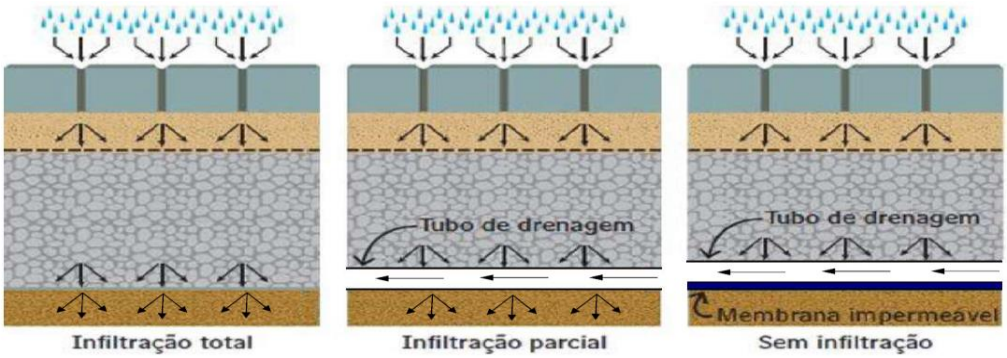
O sistema de infiltração, apresentado na Figura 9, é classificado em três tipos:

- Infiltração total: onde toda a água infiltrada é direcionada ao subleito;

- Infiltração parcial: que apresenta uma tubulação de drenagem que coleta parte da água infiltrada, enquanto outra parte segue para o subleito para complementar a infiltração;

- Sem infiltração: onde toda água infiltrada é coletada pelo tubo drenante e impedida de passar para o subleito com o auxílio de uma membrana impermeável.

Figura 9- Sistema de infiltração de pavimento permeável.



Fonte: Silva (2012).

Para a moldagem do concreto permeável, não existe nenhum método específico normatizado. Contudo, Schaefer et al. (2006) observaram que a ordem de mistura dos

componentes altera as características do produto final. Assim desenvolveram um procedimento diferente do tradicional, em que os agregados são misturados com a água e posteriormente é adicionado o cimento. Neste novo procedimento os agregados são misturados com uma pequena porcentagem de cimento e posteriormente é adicionada a água com o restante do cimento.

3.6 CONCRETOS PERMEÁVEIS COM MATERIAIS ALTERNATIVOS

Muitas pesquisas têm sido realizadas na busca de se desenvolver pavimentos permeáveis a partir de materiais alternativos, especialmente aqueles reciclados ou reaproveitados e, até mesmo, materiais que possam ser posteriormente reciclados.

Fernandes (2020) fabricou concreto permeável com variação dos teores de argamassa em 35% e 40% e variação dos teores de substituição de agregados naturais por RCD em 15% e 30%. Todos os concretos estudados atingiram resistência à compressão e à tração satisfatórias. Do ponto de vista da permeabilidade, foi atingido o valor mínimo de 1,0 mm/s requisitado pela ABNT NBR 16416:2015.

Ibrahim et al. (2020) estudaram as características hidráulicas e de resistência do concreto permeável que contém 72% de RCD em volume dos constituintes totais da mistura de concreto. Utilizaram agregados reciclados com diâmetros variando entre 4,75 e 10mm. Analisaram três tipos de concreto: com 100% de RCD grosso, 100% de RCD grosso mais 10% de RCD fino e com 100% de RCD mais 10% de areia de rio (agregado fino). Variaram a relação água cimento nos fatores 0,30, 0,35 e 0,40. A proporção do concreto considerou o volume necessário que não alterasse o conteúdo do vazio alvo de 15%, de acordo com a ACI 522R. As misturas de concreto permeável sem finos produziram menor resistência, seguidas pelas amostras de concreto contendo agregados finos reciclados, a permeabilidade teve pouca variação entre as amostras.

Rones (2020) desenvolveu e avaliou o desempenho de blocos intertravados permeáveis fabricados com argamassa de base cimentícia com substituição parcial da areia grossa em 5,10,15 e 20% por parafina e EPS reciclado. Após a cura úmida os blocos foram aquecidos para degradação da parafina e do EPS. Ao comparar os resultados com os traços de referência, apenas as argamassas com 5% (de parafina

ou de EPS) e 10% de EPS apresentaram desempenho superior. Os blocos não apresentaram resistência mecânica adequada para este tipo de produto, conforme requisitos da norma ABNT NBR 16416:2015, apesar de apresentarem alta permeabilidade, o que pode estar relacionado a quantidade de cimento empregada, a composição granulométrica e ao procedimento de moldagem e desforma dos blocos. Concluiu que o EPS e a parafina podem ser usados como elementos geradores de vazios, uma vez que inserção destes não alterou o comportamento dos blocos, quando comparado à argamassa de referência.

Alves (2020) avaliou o comportamento de duas composições de concreto para aplicação em paredes, um com substituição parcial de 12,5 e 15% do volume de agregado miúdo por EPS e outro com substituição de 60 e 70% do volume de agregado graúdo por borracha de pneu. A granulometria do agregado miúdo utilizado foi de 2,36 mm e do agregado graúdo na faixa de 4,8 - 12,5 mm. O traço utilizado foi de 1:2:3 (cimento: areia média: brita), relação a/c de 0,54 e foi utilizado aditivo superplastificante para aumentar a coesão e melhorar a consistência. Os resultados mostraram que os concretos com borracha de pneu e EPS são mais porosos do que o de referência, no entanto, apenas o concreto com EPS alcançou a resistência mínima exigida de 20 MPa.

Junior et al. (2019) analisaram a viabilidade técnica do uso de lascas da borracha das câmaras de ar de pneus associado ao concreto permeável para o uso em pavimentação urbana. Desenvolveram uma dosagem visando o uso comercial tanto em forma de blocos, pavers, dentre outros materiais. A média da resistência mecânica do traço de referência obtido foi de 27,2 MPa e da dosagem com lascas de borracha foi de 25,5 MPa. Ainda que a resistência mecânica desse material seja menor que o valor mínimo de 35 MPa determinado pela norma ABNT NBR 9781:2013, foi considerado aceitável pela ABNT NBR 16416:2015 para utilização em pavimentos com baixa intensidade de sobrecarga.

Carvalho e Motta (2019) realizaram estudo sobre a utilização do EPS e do EPS reciclado substituindo parcialmente os agregados graúdos e miúdos em concretos. Avaliaram, suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas no estado fresco e endurecido, visando aplicação em paredes estruturais de edificações. Os concretos

com EPS apresentaram resistência à compressão inferior ao concreto de referência, entretanto, o desempenho quanto à absorção por capilaridade e às propriedades térmicas foi melhor nos concretos com EPS.

Junior (2019), avaliou o desempenho físico e mecânico de placas cimentícias para vedação com diferentes percentuais de EPS em substituição parcial de 10 e 15% do agregado miúdo, com incorporação de aditivo hiperplastificante 0,2%. Foi utilizado EPS com faixa granulométrica < 4,75mm e relação a/c de 0,48. As placas cimentícias apresentaram valores de resistência a tração superiores a mínima exigida pela ABNT NBR 15498:2016[1] , concluindo que é possível utilizar o EPS como substituto parcial do agregado miúdo para as placas cimentícias.

Ramos (2018), analisou a adição de cinza de madeira a areia média, como agregado miúdo nas dosagens de composição do concreto permeável, avaliando os valores de resistência à compressão e flexão na tração. As dosagens estudadas foram eficientes em termos de resistência à compressão e à tração sem alterar o coeficiente permeabilidade (k), que se manteve a mesma ordem de grandeza, 10^{-3} m/s, valor típico de permeabilidade de concretos a base de pedregulhos e areias.

Favaretto et al (2017) utilizaram o RCD como agregado substituto da areia natural com três frações granulométricas: grossa (4,75-1,18mm), média (1,18-0,6mm) e fina (<0,6mm) para a confecção de concreto expandido, uma relação a/c de 0,5 com adição de agente espumoso amida 90, na proporção 30:1 (água: amida 90). Obtiveram produtos com propriedades compatíveis a dos produtos comerciais.

Guerra (2015) realizou estudo sobre a influência do poliestireno expandido (EPS) como substituto de 50% do agregado graúdo no concreto. O concreto com EPS não atingiu a resistência à compressão mínima exigida pela norma ABNT NBR 12655:2015; isto ocorreu devido à má distribuição dos agregados na massa e baixa energia de compactação.

Gesoglu et al. (2014) estudaram as propriedades do concreto drenante com a adição de diferentes tipos de resíduos de borrachas de pneus em formato de fibras.

[1] Norma cancelada e substituída por ABNT NBR 15498:2021.

Concluíram que é possível obter concretos drenantes com maior resistência à compressão ou melhor permeabilidade dependo das características do resíduo, mas que, na média, concretos com resíduos tem menores propriedades de resistência e queda na permeabilidade, sendo a utilização do mesmo viável em áreas de estacionamento.

Murray et al. (2014) inovaram utilizando materiais alternativos em todos os componentes do revestimento permeável, tanto reforço quanto matriz. Foi desenvolvido um pavimento permeável de quitosana, um biopolímero que é obtido como subproduto da indústria de frutos do mar, reforçado por borracha moída obtida a partir de pneus usados triturados. Os autores concluíram que tal material pode ser utilizado como revestimento permeável além de ser capaz de remover poluentes, como zinco dissolvido na água e potencialmente outros metais.

Bhutta et al. (2013) fabricaram um concreto permeável, com propriedades próximas ao produto comercial, a partir de misturas com agregados reciclados, polímeros reciclados a base de borracha de estireno-butadieno (SBR) e látex. Os autores constataram que os concretos elaborados com agregados reciclados apresentaram maior volume de vazios e menor resistência à compressão. Entretanto, a adição dos polímeros levou a uma redução no volume de vazios e elevação da resistência à compressão. A adição do polímero também facilitou o processamento do concreto.

Como visto, o uso do RCD substituindo os agregados no concreto é comum na literatura, inclusive em produtos comerciais. Já o uso do EPS, seja em concretos ou argamassas, é citado em alguns trabalhos (GUERRA, 2015; JUNIOR, 2019; CARVALHO E MOTTA, 2019; ALVES 2020 e RONES, 2020). Não foram encontrados na literatura trabalhos que associem os dois tipos de materiais e que utilizem a técnica de aquecimento para degradação do polímero e geração de vazios, como utilizado neste trabalho.

3.7 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (RCD) E POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

3.7.1 Resíduo de construção civil e demolição (RCD)

Resíduo de construção civil (RCC) e resíduos de construção e demolição (RCD) são termos sinônimos e cuja definição é dada pelo CONAMA Resolução 307/2002 como:

> Os 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.(BRASIL, Resolução CONAMA N° 307, de 5 de julho de 2002, 2002).

Os resíduos sólidos são distribuídos em classes A, B, C e D (Tabela 3). Na classe A, estão os resíduos que podem ser reutilizados como agregados depois de reciclados, podendo ser empregados como agregados finos e grossos.

Os agregados provenientes dos resíduos de classe A são separados em duas categorias: agregado de resíduo de concreto (ARC) e agregado de resíduo misto (ARM). Segundo a ABNT NBR 15116:2021, o primeiro tipo tem em sua composição de fração graúda, no mínimo 90% de fragmentos à base de cimento Portland e rochas, já o segundo tem no máximo 90% de fragmentos. Para ser utilizado como agregado em concreto sem função estrutural, o resíduo tem que ser da classe A e atender aos requisitos específicos mostrados na Tabela 4.

Tabela 3 – Classificação e descrição dos resíduos.

Classe	Descrição
A	São os resíduos reutilizáveis como agregados, oriundos de construção, demolição, reformas e reparos de: pavimentação e de outras obras de infraestruturas (inclusive solos provenientes de terraplanagem); edificações, como componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento e outros, argamassa e concreto; peças pré moldadas em concreto (blocos, tubos, meio fios e outros) produzidos no canteiro de obras.
B	São resíduos recicláveis para outras destinações (plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e outros).
C	São resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou sua recuperação (gesso e seus derivados).
D	São os resíduos perigosos oriundos do processo de construção (tintas, solventes, óleos e outros) ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos (clinicas radiológicas, instalações industriais e outros).

Fonte: ABNT NBT 15116:2021.

Tabela 4 - Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto.

Propriedades		**Agregado reciclado classe A**				**Normas de ensaios**	
		ARCO		ARM		Normas de ensaios	
		Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Teor de fragmentos à base de cimentos e rochas (%)		≥90	-	<90	-	Anexo A	-
Absorção de água (%)		≤7	≤12	≤12	≤17	ABNT NBR 16917:2021	ABNT NBR NM 30
Contaminantes – teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Cloretos	1				ABNT NBR 9917	
	Sulfatos	1				ABNT NBR 9917	
	Materiais não minerais	2				Anexo A	Anexo B
	Torrões de argila	2				ABNT NBR 7218	
	Teor total máximo de contaminantes	3				-	
Teor de material passante na malha 75µm		≤10	≤15%	≤10%	≤20%	ABNT NBR 16973	

[1] Para efeitos dessa Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

Fonte: ABNT NBR 15116:2021.

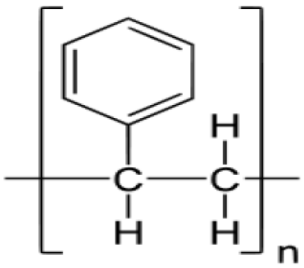
3.7.2 Poliestireno expandido (EPS)

O poliestireno (PS) é um polímero vinílico, que apresenta um grupo fenila ligado a um dos carbonos do monômero em sua estrutura, como visto na Figura 10. Na forma expandida (Figura 11), o poliestireno passa a ser chamado de poliestireno expandido (EPS). Segundo Oliveira (2013) o EPS foi descoberto em 1949 e, a produção no mundo supera os 2,95 milhões de toneladas ano.

Derivado de petróleo, de composição 98% ar e apenas 2% de plástico, o EPS oferece uma combinação única de características, como boa resistência, leveza, ser inerte, fácil manuseio e ser totalmente reciclável (Tessari, 2015). Diante dessas virtudes, ele se torna muito atraente para a indústria e sua aplicação é bem ampla, englobando áreas como a construção civil, isolamento térmico, embalagens industriais e artigos de consumo (Figura 12). Apesar dessas características, um grande problema relacionado a esse produto, diz respeito a sua reciclagem.

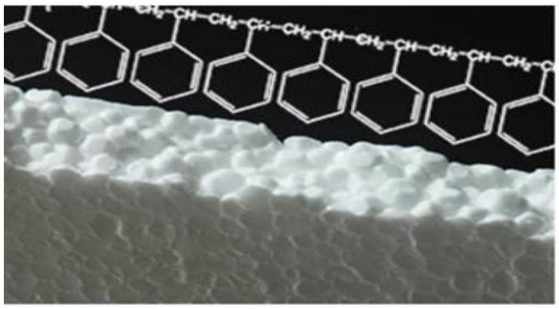
Dentre eles, destacam se o desconhecimento da população em saber que o produto é reciclável o que, dificulta as etapas de descarte e, por consequência, a coleta; a escassez de aplicação para o EPS reciclado, pois as aplicações atuais estão restritas a uma gama pouco variada de produtos e enfrentam diversas limitações quanto a sua utilização, referentes a uma suposta qualidade inferior ou a questões de higiene e o baixo preço de compra, pois o valor pago por quilo do EPS é muito desvalorizado se comparado com outros materiais reciclados, como o alumínio por exemplo.

Figura 10- Fórmula estrutural do poliestireno.



Fonte: Fogaça (2020).

Figura 11 – Placa de poliestireno expandido (EPS).



Fonte: Fogaça (2020).

Figura 12 – Aplicabilidade do EPS: a) Embalagens industriais; b) Artigos de consumo e c) Placa de EPS para lajes pré-moldadas.

Fonte: Fogaça (2020).

4. METODOLOGIA

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Água

A água utilizada foi fornecida pela concessionária de abastecimento local CESAN, que garante estar isenta de impurezas nocivas à hidratação do cimento conforme ABNT NBR 15900-1:2009.

4.1.2 Agregado miúdo

A areia utilizada é areia de rio do tipo quartzosa, adquirida no comércio local de Vitória/ES, na faixa granulométrica de 1,2 – 2,4 mm.

4.1.3 Agregado graúdo

Como agregado graúdo foi utilizado o pedrisco de origem granítica na faixa granulométrica de 4,8 – 6,3 mm, adquirida no comércio local de Vitória/ES**.**

4.1.4 Cimento

O cimento utilizado foi o Portland CPIII 40 RS da Mizu. As características como a finura, resistência, tempos de pega e análise química serão obtidas junto à cimenteira e são apresentados na Figura 13.

Figura 13- Relatório de ensaios do cimento CPIII 40 RS.

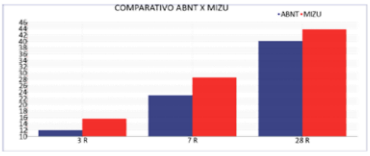
Ensaios	Período	02/05/2022 31/05/2022	01/06/2022 25/06/2022
Ensaios Físicos			
#325 (%)		1,33	1,13
#200 (%) <8,0		0,14	0,13
Blaine (cm²/g)		4294	4415
Início pega (min)		215	209
>60			
Fim pega min		262	259
<720			
R3 (MPa)		15,59	16,62
>12,0			
R7 (MPa)		28,63	29,23
>23,0			
R28 (MPa)		43,76	-
>40,0			
Massa específica (g/cm³)		2,93	2,95
Consistência normal (%)		32,25	32,37

Controle Estatístico

					R3	R7	R28								
Média	0.24	0.51	0.93	0.69	15.59	28.63	43.76	2.93	4294	1.33	0.14	0.00	215	262	32.25
Desvio	0.14	0.16	0.11	0.10	1.15	1.98	1.74	0.00	139	0.20	0.03	0.00	9	11	0.57
NBR 16697:2018	<6,5	<5,0	<4,5	-	>12,0	>23,0	>40,0	-	-	-	<8,0	<5,0	>60	<720	-

Comparativo ABNT x MIZU

	ABNT	MIZU
R3	12	15.59
R7	23	28.63
R28	40	43.76



Responsável Técnico
Kênia Gomes Aires
CRQ: 21.3.00318

Fonte: Retirado do relatório fornecido por Polimix Mizzu (2022).

4.1.5 RCD

Para a realização do presente projeto, foi utilizado o RCD granulado doado pela Ureserra, empresa localizada no município de Serra/ES. O RCD utilizado é proveniente predominantemente de demolição de estruturas de concreto. A caracterização do RCD já foi realizada em trabalhos anteriores por pesquisadores do grupo de pesquisa Materiais de Construção Civil, do IFES campus Vitória (RUPP, 2018). Os procedimentos e resultados obtidos por Rupp (2018) são descritos a seguir.

O RCD granulado bruto, foi peneirado e classificado em três faixas granulométricas como mostra a Tabela 5. Os granulados retidos na peneira de 6,3 mm e passantes na peneira de 4,8 mm foram descartados.

Tabela 5- Faixas granulométricas do RCD.

Faixa	**Granulometria**
Grosso	< 9,5 mm e >6,3mm
Médio	<6,3 mm e >4,8mm
Fino	<4,8mm e >2,4mm

Fonte: RUPP (2018).

Após classificados, os RCD peneirados passaram por um processo de lavagem, cujo propósito foi remover a poeira e pós presentes no material, além de resíduos, como folhas, madeira, materiais metálicos e plásticos. Em seguida o RCD foi espalhado sobre lonas plásticas, onde permaneceu secando por uma semana em ambiente refrigerado.

Para a identificação dos materiais presentes no RCD, e seus respectivos percentuais, foi feito um quarteamento para cada faixa granulométrica seguindo a norma NBR NM 27:2001[2]. Após a obtenção das amostras, as mesmas foram pesadas, seus componentes foram classificados e separados e em seguida pesados individualmente.

Os materiais que compõem o RCD foram classificados visualmente como: argamassa de concreto, rochas naturais, cerâmica vermelha, gesso, pós e outros. A Tabela 6 apresenta o percentual em massa de cada material presente no RCD para cada uma das três faixas granulométricas.

[2] Norma cancelada e substituída pela ABNT NBR 16915:2021.

Tabela 6 - Composição do RCD para cada faixa granulométrica (% em massa).

Faixa Granulométrica	Faixa 1 (grosso)	Faixa 2 (médio)	Faixa 3 (fino)
Argamassa de concreto	48,59%	48,22%	47,46%
Rochas naturais	46,46%	48,11%	46,87%
Cerâmicas	2,25%	1,05%	1,19%
Gesso	0,31%	0,81%	1,02%
Pós	0,63%	0,97%	1,14%
Outros	1,74%	0,83%	2,31%

Fonte: RUPP (2018).

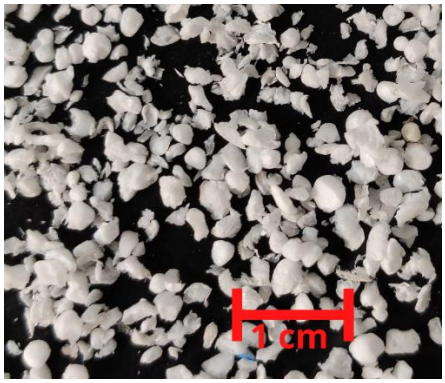
De acordo com a Tabela 6, pode-se observar que os percentuais de cada material para as diferentes faixas granulométricas são próximos, podendo-se considerar que a composição das diferentes granulometrias é semelhante. Os materiais que predominam na composição do RCD são a argamassa de concreto e as rochas naturais, que encontram-se em quantidades próximas e juntas representam mais de 94% da composição do RCD. Esses materiais são os mais desejáveis na composição do RCD, por apresentarem maior resistência.

Materiais como o gesso e os pós são em geral indesejáveis. O gesso, pela sua baixa resistência e pela presença de sulfatos em sua composição. Referente a sua dissolução em água, o que pode levar a formação de vazios no interior do concreto, seria uma característica interessante para a presente pesquisa, entretanto, o baixo percentual observado não deve ter impacto significativo nos resultados de permeabilidade. Já os pós podem preencher os vazios entre os granulados reduzindo a permeabilidade, mas, a exemplo do gesso, se encontram em teores muito baixos no RCD.

4.1.6 EPS

Foi utilizado o poliestireno expandido (EPS) reciclado na faixa granulométrica de # 1,2 – 2,4 mm obtido em uma Cooperativa de Catadores da cidade de Vitória/ES. A Figura 14 apresenta o EPS utilizado.

Figura 14 – Poliestireno expandido.

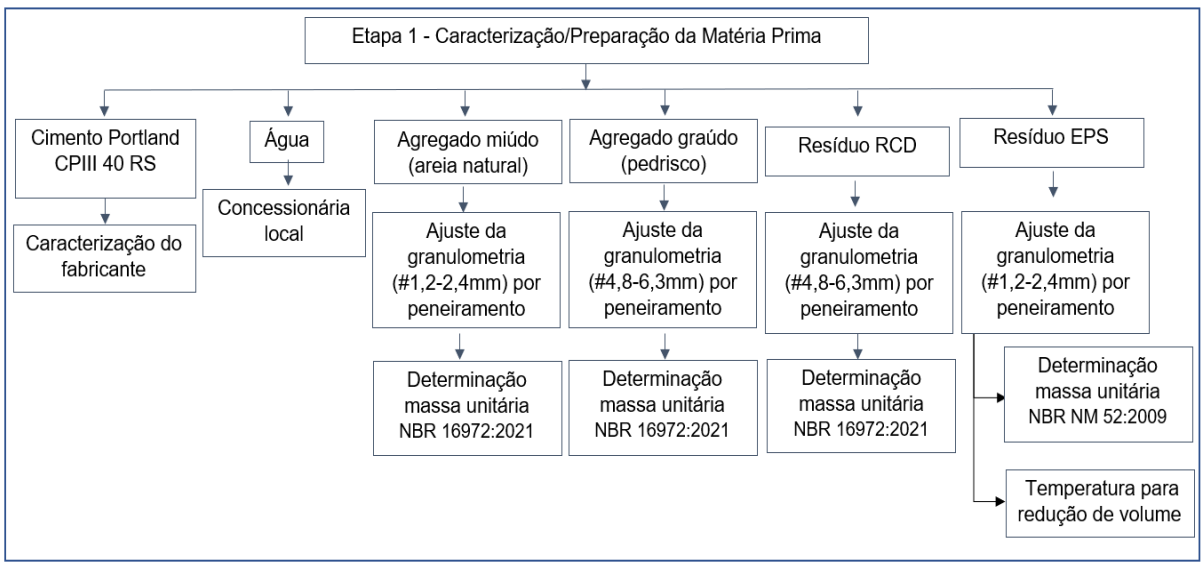


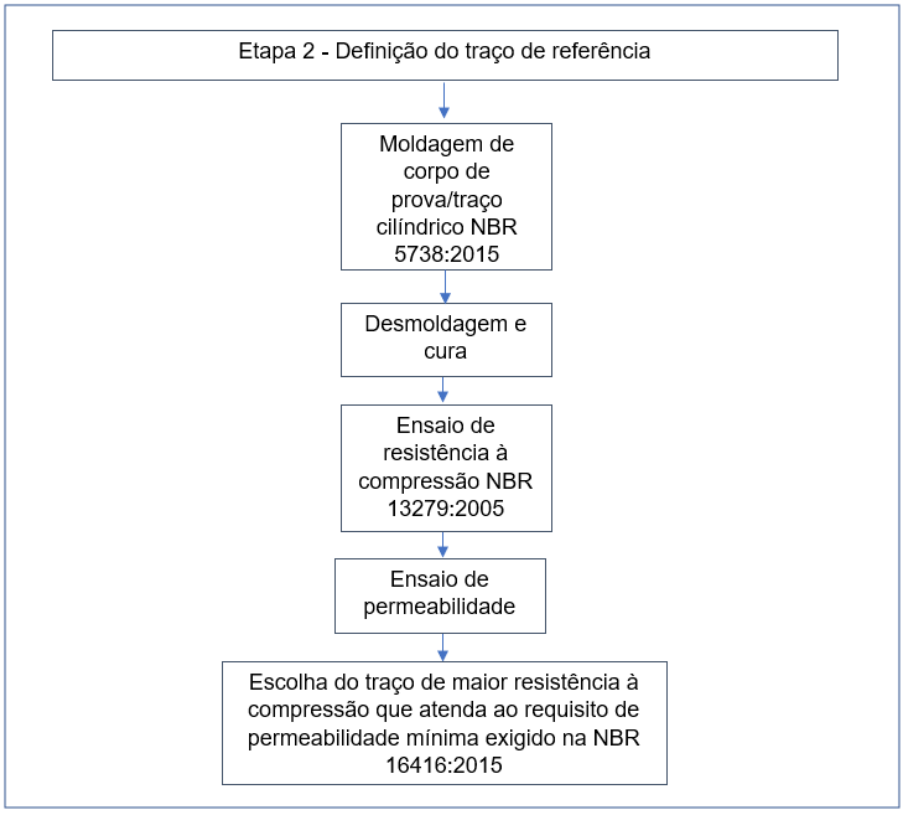
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

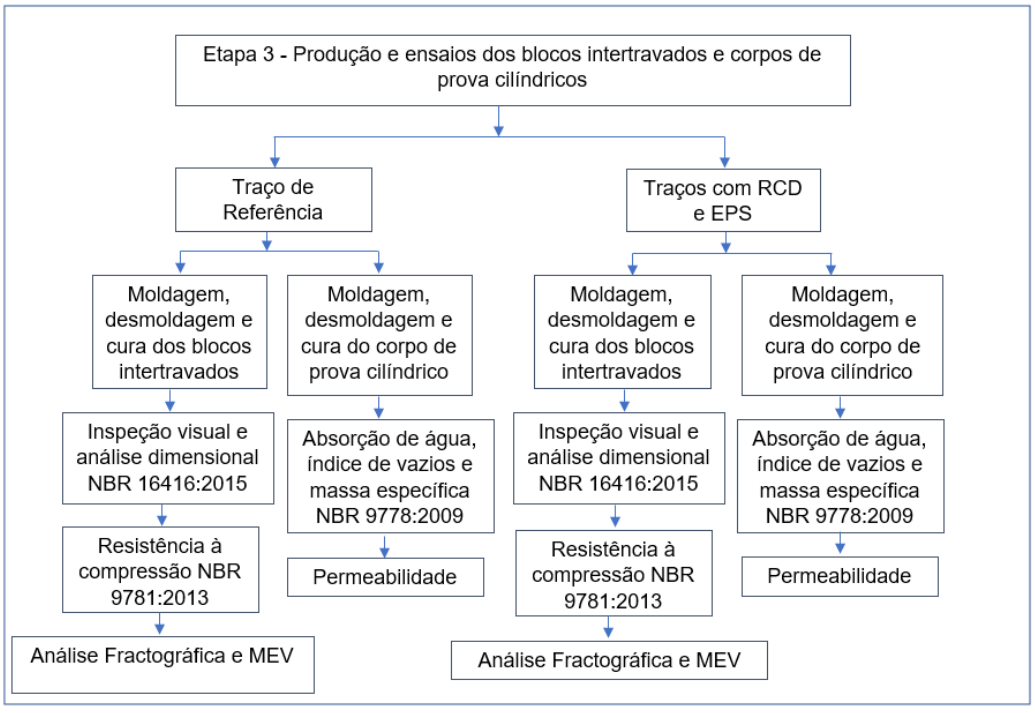
4.2 MÉTODOS

O trabalho foi dividido em três etapas. A etapa 1 consiste na caracterização e preparação das matérias primas. A etapa 2 consiste na definição do traço de referência e a etapa 3 na produção e ensaios de corpos de prova cilíndricos e dos blocos intertravados de concreto permeável. A Figura 15 apresenta o fluxograma da metodologia.

Figura 15- Fluxograma da metodologia: Etapa 1 - Preparação e caracterização das matérias primas, Etapa 2 - Definição do traço de referência, Etapa 3 – Produção e caracterização dos blocos intertravados de concreto permeável e dos corpos de prova cilíndricos.







Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.2.1 Caracterização das matérias primas

4.2.1.1 Peneiramento e separação das faixas granulométricas desejadas

A areia, o pedrisco, o RCD e o EPS foram submetidos a peneiramento para selecionar a faixa granulométrica desejada. Para a areia e o EPS foi selecionada a faixa granulométrica de 1,2 - 2,4 mm (agregado miúdo). Para o pedrisco e o RCD foi selecionada a faixa de 4,8 - 6,3 mm (agregado graúdo). Após o processo de separação, os agregados miúdos e graúdos foram misturados para formar uma composição granulométrica de 70% de agregado na faixa # 4,8 - 6,3 mm e 30% na faixa # 1,2 - 2,4 mm. Essas faixas foram definidas com base na literatura pesquisada e em trabalhos anteriores desenvolvidos pelos pesquisadores do IFES, *campus* Vitória. A Tabela 9 apresenta um resumo dos dados obtidos na literatura que nortearam a definição dos parâmetros para a condução dessa pesquisa.

4.2.1.2 Massa específica unitária

Seguindo recomendações da norma ABNT NBR 16972:2021, a areia, o pedrisco e o RCD foram submetidos ao ensaio para a determinação da massa específica unitária. Para o EPS, a determinação da massa específica unitária seguiu as recomendações da NBR NM 52:2009[3] e foi realizada anteriormente por Rones (2020). As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados da massa específica unitária do pedrisco, da areia, do RCD e, do EPS respectivamente.

Tabela 7- Massa específica unitária do pedrisco, areia e do RCD.

	Massa específica unitária (g/cm³)
Pedrisco	1,50
Areia	1,45
RCD	1,30

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

[3] Norma cancelada e substituída pela ABNT NBR 16916: 2021.

Tabela 8 – Massa específica unitária do EPS.

	Massa específica unitária (g/cm³)
EPS	0,011

Fonte: Rones (2020).

4.2.1.3 Teste de aquecimento do EPS

O EPS passou por aquecimento em estufa para determinar, de forma empírica, a temperatura que promova uma redução significativa do volume do mesmo. O objetivo foi de estimar a temperatura e tempo ideais para o aquecimento dos corpos de prova e blocos intertravados. Esta análise foi realizada por Rones (2020) que desenvolveu uma argamassa permeável com EPS e parafina, utilizando o mesmo EPS utilizado deste trabalho. A Figura 16 mostra o aspecto do EPS após o aquecimento em estufa na temperatura de 80°C por 8h (RONES, 2020). Com base nas observações de Rones (2020) foi definida a temperatura de 100°C por 24h para o aquecimento dos corpos de prova e dos blocos neste trabalho.

Figura 16- Aspecto do EPS antes (a) e após (b) o aquecimento à 80°C por 8h.

Fonte: Adaptado de Rones (2020).

4.2.2 Definição dos traços, moldagem e ensaios dos corpos de prova

4.2.2.1 Definição dos traços

Com base na literatura, foram definidos os parâmetros a serem utilizados nesse trabalho. A Tabela 9 apresenta as referências utilizadas para a definição de cada parâmetro, quais sejam: relação cimento / agregado, relação a/c, percentual de substituição do agregado natural por RCD e EPS e, distribuição granulométrica do agregado.

Para a definição do traço de referência foram elaborados dois traços com relação cimento / agregado de 1:3 (1 - 0,6 - 2,4 – cimento - agregado miúdo - agregado graúdo) e 1:4 (1 - 0,8 - 3,2 – cimento - agregado miúdo - agregado graúdo) e relação a/c 0,35. Dentre eles, o que apresentou maior resistência à compressão e atendeu a permeabilidade mínima foi definido como traço de referência.

Vale salientar que para a produção dos blocos foi necessário alterar a relação a/c para 0,40, como será explicado posteriormente. Durante a moldagem dos blocos intertravados, observou se que o resíduo RCD absorveu grande quantidade de água, tornando a massa extremamente seca e heterogênea, em que era possivel visualizar que os grãos de areia não aderiram a argamassa de cimento, resultando em uma difícil moldagem e desforma.

Com base no traço de referência foram formulados os traços com RCD e os traços com RCD e EPS, totalizando seis traços.

Tabela 9 - Resumo dos dados e referências utilizadas para a definição dos parâmetros da pesquisa.

Parâmetros definidos para o estudo		**Dados coletados na bibliografia**
Traço (cimento: agregado)	1:3 1:4	1:4 – 1:4,5 (cimento: agregado) -Morighi (2006) 1:3 e 1:4 - (cimento: areia) - Monteiro (2010) 1:3 (cimento: agregado) – Junior (2019) 1:2:3 – (cimento: areia média: brita) - Alves (2020)
Relação a/c	0,35 e 0,4	0,48 – Junior (2019) 0,54 – Alves (2020) 0,35 – Rones (2020) 0,30, 0,35, 0,40 - Ibrahim (2020)
Percentual de substituição do RCD	30% e 100%	50% do volume de brita substituída por EPS- Guerra (2015)
Percentual de incorporação do EPS	10% e 20%	10 e 15% do agregado miúdo por EPS reciclado - Junior (2019) 5,10,15 e 20% da areia substituída pelo volume equivalente de parafina e EPS reciclado – Rones (2020) 15 e 30% do agregado graúdo por RCD – Fernandes (2020)
Distribuição granulométrica	Pedrisco e RCD na faixa # 4,8 - 6,3 mm Areia e EPS na faixa # 1,2 - 2,4 mm	< 4,75 mm - Junior (2019) 0,6 – 0,0063 mm - Alves (2020) 20% de agregado na faixa # 2,4 - 4,8 mm e 80% de agregado na faixa # 0,6 – 1,2 mm – Rones (2020) # 4,75 – 10 mm - Ibrahim (2020)

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Foram feitos dois traços com substituição de 30% e 100% em massa do agregado graúdo por RCD, denominados RCD30 e RCD100. Com base no traço com 30% de RCD, foram feitos mais dois traços incorporando 10% e 20% de EPS, denominados RCD30EPS10 e RCD30EPS2O. Devido à diferença de massas específicas dos agregados miúdo e do EPS, foi efetuada a equivalência de volumes. Para cada traço foi selecionado determinado percentual em massa de insumo virgem (agregado miúdo) e verificado o seu volume, para ser adicionado o volume equivalente do insumo reciclado (EPS).

Com base no traço com 100% de RCD foi feito mais um traço incorporando 10% de EPS, denominado RCD100EPS10. A Tabela 10 apresenta um resumo da composição dos traços e a Tabela 11 descreve a quantidade em massa dos materiais utilizados para compor os traços com relação a/c 0,40.

Tabela 10 – Nomenclaturas e percentuais de resíduos utilizados nos traços.

Nomenclatura do traço	Percentual de RCD (%)	Percentual de EPS (%)
REF	0	0
RCD30	30	0
RCD100	100	0
RCD30EPS10	30	10
RCD30EPS20	30	20
RCD100EPS10	100	10

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 11- Composição dos traços utilizados nesse trabalho com relação a/c 0,40.

Traço	Cimento (kg)	Água (kg)	Areia (kg)	Pedrisco (kg)	RCD (kg)	EPS (g)
Referência	4,27	1,71	3,82	8,89	0	0
RCD30	5,34	2,14	4,77	7,81	2,34	0
RCD100	5,34	2,14	4,77	0	11,11	0
RCD30EPS10	4,27	1,71	3,82	6,25	1,87	3,74
RCD30EPS20	4,27	1,71	3,82	6,25	1,87	7,49
RCD100EPS10	5,34	2,14	4,77	0	11,11	4,68

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

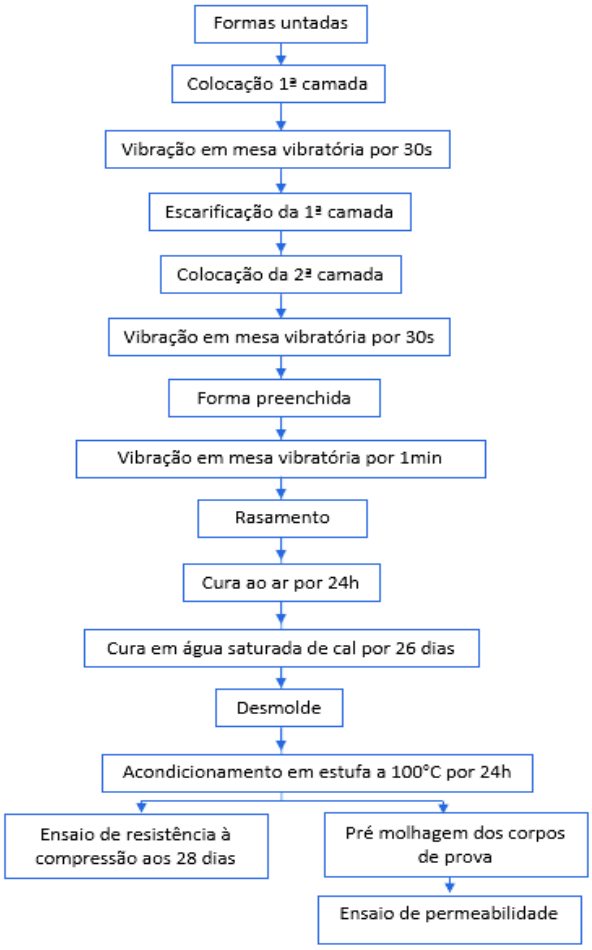
4.2.2.2 Moldagem e ensaios dos corpos cilíndricos para o traço de referência

Conforme explicado anteriormente para a definição do traço de referência foi utilizada inicialmente a relação a/c de 0,35. Foram feitos dois traços, 1:3 e 1:4 e, para cada

traço foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x altura) para a determinação da resistência à compressão conforme a ABNT NBR 13279:2005 e permeabilidade conforme Melo (2017).

O procedimento para a moldagem e ensaios dos corpos de prova seguiu o fluxograma apresentado na Figura 17. Os corpos de prova de referência foram aquecidos em estufa no intuito de manter o mesmo procedimento a ser adotado para os demais traços, com RCD e EPS.

Figura 17- Metodologia de moldagem dos corpos de prova cilíndricos



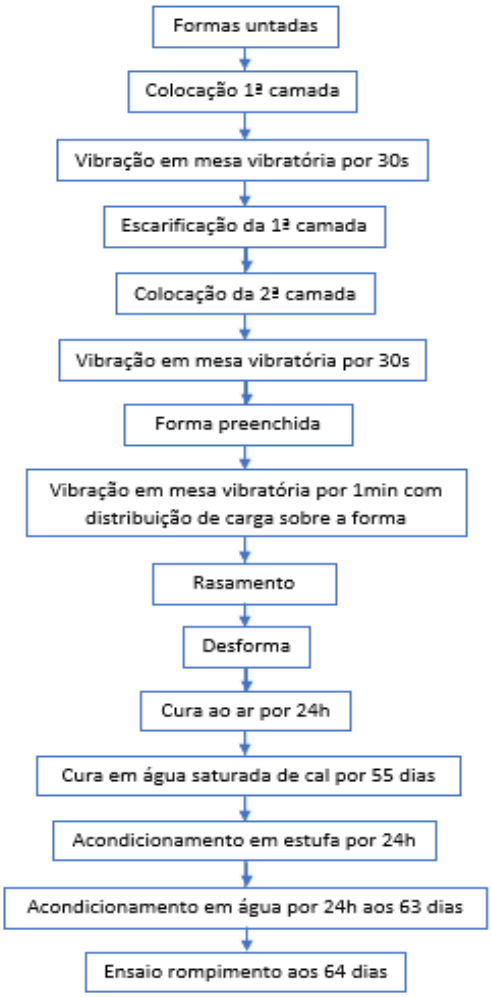
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.2.2.3 Produção e ensaios dos blocos intertravados e de corpos de prova cilíndricos

Foram produzidos seis blocos intertravados e um corpo de prova cilíndrico para cada um dos traços indicados na Tabela 11. Para a moldagem foi utilizada uma forma

plástica com 43 x 12 x 8 cm, com capacidade para moldar quatro blocos intertravados de 20 x 10 x 6 cm. Para a moldagem dos blocos foi seguido o procedimento, apresentado na Figura 18 e para a moldagem dos corpos de prova cilíndricos o procedimento apresentado na Figura 17.

Figura 18 - Metodologia de moldagem dos blocos intertravados.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Por questões operacionais foi necessário permanecer com os blocos intertravados em cura de água saturada de cal por 55 dias e ensaiá-los aos 64 dias de cura. É sabido que aos 28 dias o concreto já atingiu cerca de 90% de sua resistência total, portanto, acredita-se que a interferência nos resultados seria mínima, sendo que o incremento de resistência após esse período é em torno de 10%.

4.2.3 Inspeção visual e análise dimensional

Na inspeção visual e na análise dimensional, os blocos precisam apresentar aspecto homogêneo, arestas regulares e ângulos retos, livres de rebarbas, defeitos, de laminação e descamação além de arestas regulares nas duas faces e paredes laterais. Quanto aos aspectos dimensionais os blocos têm tolerância dimensional de ± 3 mm no comprimento, na largura e na espessura em relação às medidas nominais (ABNT NBR 16416: 2015).

Devido a grande dificuldade no procedimento de desforma dos blocos, seja por inexperiência ou pela característica da mistura, muito seca e com vazios, nenhum dos traços atendeu aos requisitos de norma quanto à inspeção visual e avaliação dimensional pois apresentaram arestas irregulares e desprendimento dos grãos, sendo assim não foi possível realizar tais análises.

4.2.4 Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica

O ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica foi realizado nos corpos de prova cilíndricos, conforme a norma ABNT NBR 9778: 2009. A metodologia de realização do ensaio é descrita na Figura 19.

A absorção de água foi calculada conforme equação 1.

$$a = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \text{ x } 100 \quad (1)$$

Onde:

a= absorção de água

Msat = massa do corpo de prova saturado

Ms = massa do corpo de prova seco em estufa

O índice de vazios é calculado pela relação entre os volumes de poros permeáveis e o volume total da amostra, conforme equação 2.

$$e = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \text{ x } 100 \quad (2)$$

Onde:

e= índice de vazios

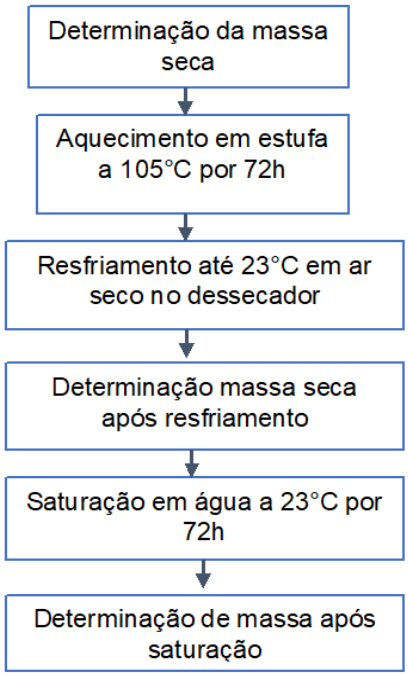
Mi = massa do bloco saturado, imerso em água.

A massa específica seca foi calculada conforme equação 3 e a massa específica da amostra saturada conforme equação 4.

$$\mu_{seca} = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \quad (3)$$

$$\mu_{sat} = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_i} \quad (4)$$

Figura 19 – Metodologia para a realização dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.2.5 Ensaio de resistência à compressão dos blocos

O ensaio de resistência à compressão dos blocos foi realizado segundo a norma ABNT NBR 9781:2013 aos 64 dias de cura. No momento do ensaio as peças estavam saturadas em água por 24h. A Figura 20 apresenta um bloco intertravado durante a realização do ensaio de resistência à compressão.

Figura 20 - Ensaio de resistência à compressão de um bloco intertravado.

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Foi aplicado um carregamento contínuo, com velocidade de 550KPa/s e variação de ± 220KPa/s, até a ruptura completa do bloco. O lote continha seis unidades de blocos para cada traço. Para o cálculo da resistência à compressão foram utilizadas as equações 5 e 6.

$$f_{ck,est} = f_p - t \text{ x } s \quad (5)$$

$$s = \sqrt{\frac{\Sigma(f_p - f_p^i)^2}{n-1}} \quad (6)$$

Onde:

fp = resistência média [Mpa]

fpi= resistência individual [Mpa]

fck, est = resistência característica [Mpa]

n= número de peças

s= desvio padrão

t= coeficiente de Student

4.2.6 Ensaio de permeabilidade

Para o ensaio de permeabilidade foi utilizado o procedimento descrito por Melo (2017). O autor utilizou um corpo de prova cilíndrico 10 x 20cm (diâmetro x altura), e mediu o tempo gasto pela água para percolar através do material. As medições foram realizadas utilizando 1 kg e 2 kg de água, sendo realizadas duas medições para cada peso de água, no mesmo corpo de prova. A Figura 21 apresenta o aparato utilizado para a realização do ensaio.

O coeficiente de permeabilidade (k) foi determinado pela equação 7:

$$k = \frac{c.m}{d^2.t} \quad (7)$$

Onde:
c= constante para conversão de unidade do sistema SI, com valor igual a 4.583.666.000

m= massa de água percolada (Kg)

t= tempo necessário para a infiltração da massa de água (s)

d= diâmetro do corpo de prova (mm)

k= taxa de infiltração (mm/h)

Figura 21 - Aparato para realização do ensaio de permeabilidade.

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.2.7 Análise da superfície de fratura dos blocos

Após o ensaio de resistência à compressão dos blocos, fragmentos dos mesmos foram preparados para análise das superfícies de fratura em escala macro, utilizando um estereoscópio, e em escala micro, utilizando um microscópio eletrônico de varredura. Para a análise no microscópio eletrônico de varredura as amostras foram recobertas com ouro e os fragmentos fixados na porta amostra. O microscópio eletrônico utilizado para a análise foi o JEOL/EO.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. Estes resultados estão ordenados e agrupados de forma a facilitar a leitura e compreensão.

5.1 DEFINIÇÃO DO TRAÇO DE REFERÊNCIA

Com objetivo de definir o traço de referência para a produção dos blocos intertravados, foram realizados ensaios em corpos de prova cilíndricos, sendo eles: resistência à compressão e ensaios de permeabilidade. Esses ensaios foram realizados em argamassas com diferentes traços em relação ao cimento: agregado, sendo eles 1:3 e 1:4 com relação água/cimento de 0,35.

Os resultados da resistência à compressão (Rc) dos corpos de prova cilíndricos, são apresentados nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 - Resultado do ensaio de resistência à compressão traço 1:3.

CP	Rc (MPa)	Rc médio (MPa)	Desvio padrão médio
1	15,99	18,14	1,31
2	18,92		
3	17,36		
4	19,31		

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Tabela 13- Resultado do ensaio de resistência à compressão traço 1:4.

CP	Rc (MPa)	Rc médio (MPa)	Desvio padrão médio
1	12,68	11,75	1,28
2	11,21		
3	9,36		
4	12,29		

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Conforme os resultados apresentados nas Tabelas 12 e 13 verificou-se que o desempenho do traço de referência 1:3 foi superior ao traço 1:4. Sendo assim o traço 1:3 foi selecionado para a continuidade do trabalho.

Os resultados do ensaio de permeabilidade são apresentados na Tabela 14. Os dois traços avaliados atenderam ao requisito de norma ABNT NBR 16416:2015, sendo, portanto, classificados como permeáveis.

Tabela 14 – Coeficiente de permeabilidade dos traços de referência.

Traço	**Coeficiente de permeabilidade (m/s)**
1:3	$6{,}17\ 10^{-3}$
1:4	$5{,}12\ 10^{-3}$

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

5.2 ENSAIOS DOS BLOCOS INTERTRAVADOS

Conforme descrito anteriormente, foi necessario fazer ajuste da relação a/c para moldagem dos blocos intertravados. A proposta inicial era de utilizar a relação a/c de 0,35, porém, esta não foi adequada para a moldagem dos blocos com RCD, pois este absorve mais água que o insumo virgem, resultando um material esfarelado como pode ser visto na Figura 22.

Para se atingir uma relação a/c satisfatória para a moldagem dos blocos, foi realizado o procedimento experimental conhecido como ponto de pelota. Durante a preparação da massa, foi adicionando água até que se atingisse uma massa homogênea, esse ponto é verificado ao comprimir parte da massa com os dedos na palma da mão. Se formar uma pelota coesa, essa quantidade de água é a adequada para a moldagem. A quantidade em massa de água adicionada foi convertida em percentual com relação a quantidade de cimento, sendo assim a relação a/c 0,40 foi definida para prosseguimento do trabalho. A Figura 23 apresenta um conjunto de blocos moldados com relação a/c de 0,40.

Figura 22 – Blocos intertravados moldados com relação a/c de 0,35.

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 23 – Blocos intertravados moldados com relação a/c de 0,40.

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Sendo assim, o traço 1:3 com relação a/c de 0,40 foi definido como traço de referência para a continuidade do trabalho e todos os blocos foram moldados nessa condição.

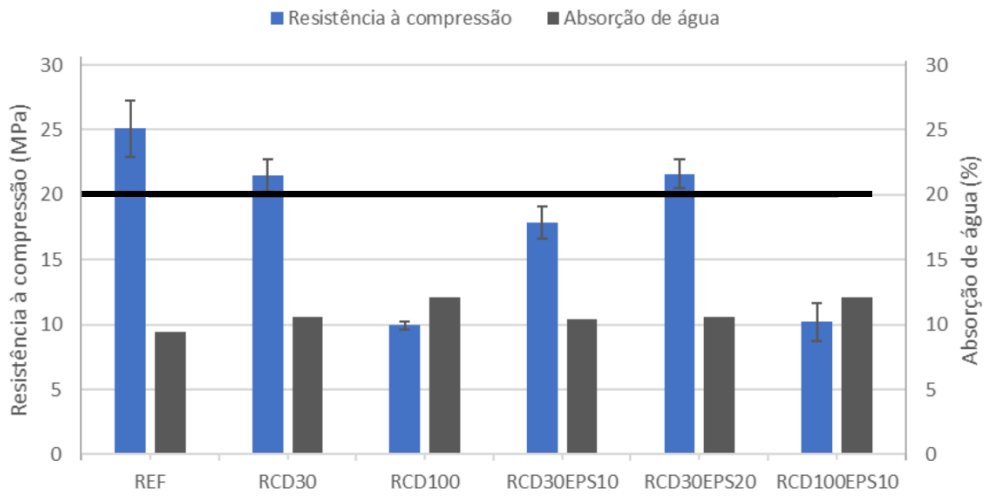
Os resultados dos ensaios de resistência à compressão, absorção de água e índice de vazios dos blocos são apresentados na Tabela 15. As Figuras 24 e 25 apresentam os resultados em forma de gráfico.

Tabela 15 - Resultado dos ensaios de resistência à compressão, absorção de água e índice de vazios dos blocos intertravados permeáveis.

Traço	Fpk,est médio (MPa)	Desvio Padrão	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)
REF	25,09	2,20	9,47	20,03
RCD30	21,50	1,22	10,61	21,70
RCD100	9,94	0,33	12,06	23,96
RCD30EPS10	17,86	1,23	10,44	21,41
RCD30EPS20	21,60	1,10	10,57	21,51
RCD100EPS10	10,19	1,48	12,10	23,58

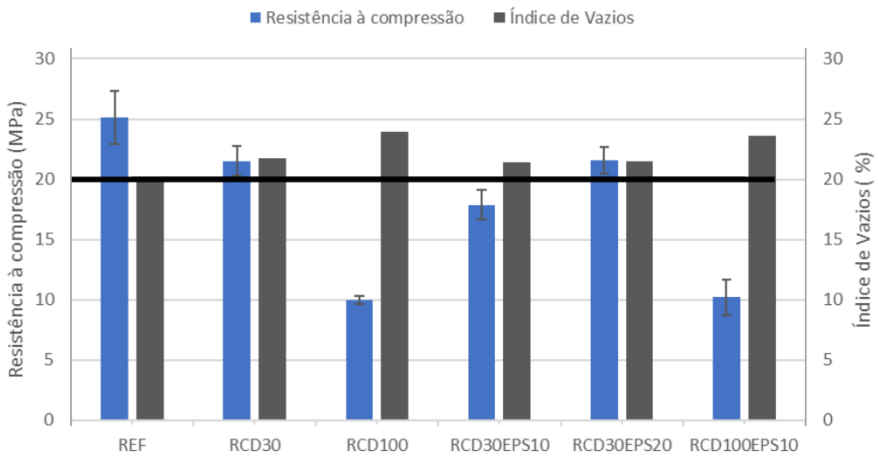
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 24 – Gráfico comparativo da resistência à compressão e da absorção de água dos blocos intertravados. Obs.: A linha horizontal no gráfico indica a resistência à compressão mínima conforme ABNT NBR 16416:2015.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 25 – Gráfico comparativo da resistência à compressão e do índice de vazios dos blocos intertravados. Obs.: A linha horizontal no gráfico indica a resistência à compressão mínima conforme ABNT NBR 16416:2015.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O traço de referência apresentou maior resistência à compressão, 25,0 MPa, sendo superior ao mínimo de 20,0 MPa exigido na norma de pavimentos permeáveis. Considerando o desvio padrão dos traços, observa se que os traços com 30% de RCD (RCD30, RCD30EPS10 e RCD30EPS20) ficaram abaixo do traço de referência, porém atingiram o valor mínimo exigido de norma.

Os traços com 100% de RCD apresentaram valores muito abaixo dos valores do traço de referência e ao mínimo exigido na norma, em torno de 10,0 MPa e, consequentemente inferiores aos traços com 30% de RCD. Vale citar que Favaretto (2017), obteve um produto compatível com os comerciais na utilização do RCD fino como substituto integral da areia natural e RCD grosso como agregado graúdo na confecção de blocos de concreto expandido. Ao analisar o traço de referência com os traços com 100% de RCD (RCD100 e RCD100EPS10), observa se que a redução da resistência à compressão está correlacionada diretamente a um maior porcentual de índice de vazios e de absorção de água.

Os traços com 30% de RCD resultaram em um acréscimo de 12% na absorção em comparação ao traço de referência, enquanto os traços com 100% de RCD resultaram em um acréscimo em torno 27,5%. Este resultado pode ser explicado pela maior

porosidade do RCD em comparação ao pedrisco. Assim como na absorção de água, o índice de vazios foi superior nos traços com 100% de RCD.

Observa-se que a utilização de 10% de EPS diminuiu a resistência à compressão do traço com 30% de RCD, mas o percentual de 20% de EPS contribuiu para o aumento da resistência à compressão, atingindo um valor próximo ao traço sem a incorporação do EPS, 21,6 MPa. De acordo com as referências bibliográficas utilizadas na presente pesquisa, argamassas e concretos produzidos com percentuais de até 15% de EPS apresentaram valores de resistência à compressão superiores ou equivalentes ao mínimo exigido pelas ABNT NBR 15498:2016[4] e ABNT 16055:2012 (JUNIOR, 2019; ALVES, 2020).

Analisando os dados da Tabela 15 percebe-se que a incorporação de EPS não apresentou influência na absorção de água e no índice de vazios.

O objetivo da incorporação do EPS nos blocos foi auxiliar na geração de vazios; esperava-se que, após o aquecimento em estufa, o EPS apresentasse uma redução significativa de volume no interior dos blocos deixando vazios na estrutura que contribuiriam com a permeabilidade do material, sendo esperado uma redução na resistência a compressão dos traços, pois acarretaria uma maior quantidade de vazios na estrutura do bloco. No entanto, o aquecimento dos blocos em estufa a temperatura de 100 °C por 24h não foi suficiente para eliminação do EPS, como foi constatado na análise da superfície de fratura dos blocos, apresentado no item 5.2.5, de modo que houve ganho de resistência com a adição do EPS.

Os resultados do ensaio de permeabilidade são apresentados na Tabela 16.

[4] Norma cancelada e substituída pela 15498:2021.

Tabela 16 - Coeficiente de permeabilidade do concreto de referência e do concreto contendo RCD e RCD/EPS.

Traço	Coeficiente de permeabilidade (m/s)
REF	$5{,}81\ 10^{-3}$
RCD30	$4{,}20\ 10^{-3}$
RCD100	$11{,}75\ 10^{-3}$
RCD30EPS10	$5{,}67\ 10^{-3}$
RCD30EPS20	$4{,}50\ 10^{-3}$
RCD100EPS10	$3{,}06\ 10^{-3}$

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Na Tabela 16 observa-se que o traço com 100% de RCD apresentou o maior valor de permeabilidade em comparação aos demais traços. Conforme dito anteriormente, o RCD apresenta maior porosidade, assim absorve maior quantidade de água, o que acarreta uma maior adesão da pasta de cimento em torno de seus grãos gerando maior número de vazios.

A permeabilidade do traço com 10% de EPS e 100% de RCD é muito abaixo do traço com 100% de RCD.

5.2.1 Análise estatística dos resultados do ensaio de resistência à compressão

O programa utilizado para as análises estatísticas foi o IBM SPSS Statistics version 24. A descrição foi apresentada pelos valores mínimo e máximo, medidas de tendência central e de variabilidade e, para verificar se o tipo de distribuição de probabilidade é a normal foi realizado análise pelo teste de Shapiro & Wilk. A ANOVA foi utilizada para medidas independentes e para comparar as compressões entre si, foi utilizado o teste de comparações múltiplas de Tukey. O nível alfa de significância foi de 5%.

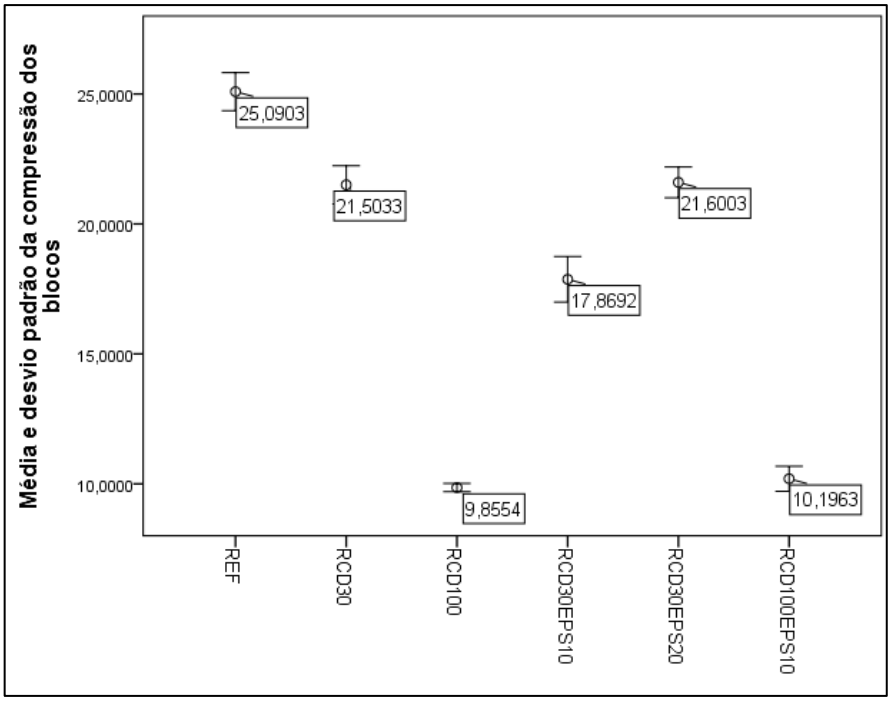
A descrição da resistência a compressão dos blocos é apresentada na Tabela 17. A Figura 26 apresenta o gráfico da média dos resultados com o desvio padrão.

Tabela 17 – Descrição da resistência a compressão dos blocos.

		Mínimo	Máximo	Mediana	Média	Desvio padrão
Resistência à compressão dos blocos (MPa)	REF	24,1923	25,9523	25,2878	25,0903	0,7311
	RCD30	20,4428	22,4492	21,3921	21,5033	0,7353
	RCD100	9,5963	10,0273	9,8426	9,8554	0,1574
	RCD30EPS10	17,0276	18,9878	17,6306	17,8692	0,8776
	RCD30EPS20	20,7434	22,3751	21,6183	21,6003	0,5928
	RCD100EPS10	9,4369	10,8839	10,2913	10,1963	0,4795

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 26- Média e desvio padrão da resistência a compressão dos blocos.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O teste não rejeitou a hipótese nula de distribuição de probabilidade normal, portanto, a técnica paramétrica é a mais robusta e os resultados estão descritos na Tabela 18.

Tabela 18 - Teste de normalidade.

		Estatística	gl	Valor p*
Compressão dos blocos	REF	0,892	6	0,327
	RCD30	0,954	6	0,772
	RCD100	0,911	6	0,446
	RCD30EPS10	0,836	6	0,120
	RCD30EPS20	0,985	6	0,973
	RCD100EPS10	0,945	6	0,703

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O teste acusou haver diferenças significativas entre as médias da resistência a compressão dos blocos, onde o traço de maior média foi a da REF e os de menores média foram os RCD100 e o RCD100EPS10 descritos na Tabela 19.

Tabela 19 – Comparação entre as compressões dos blocos.

		Média	Desvio padrão	Valor p*
Resistência à Compressão dos blocos (MPa)	REF	25,0903d	0,7311	< 0,001
	RCD30	21,5033c	0,7353	
	RCD100	9,8554a	0,1574	
	RCD30EPS10	17,8692b	0,8776	
	RCD30EPS20	21,6003c	0,5928	
	RCD100EPS10	10,1963a	0,4795	

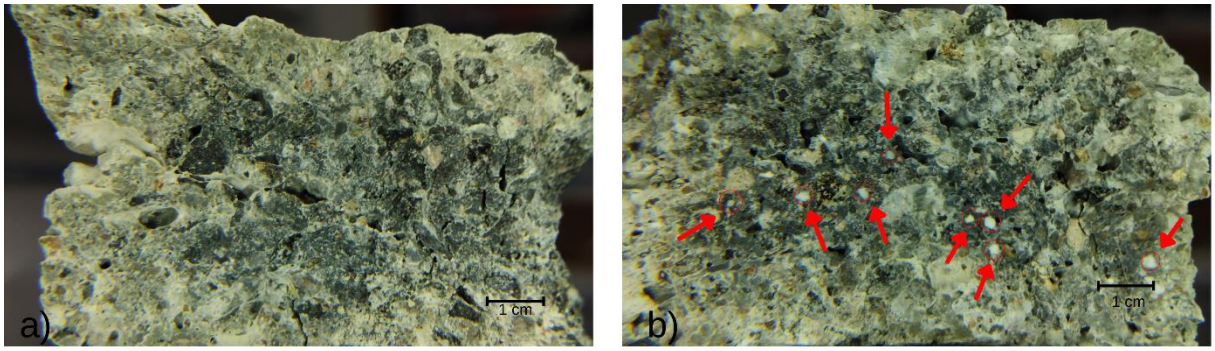
(*) ANOVA para medidas independentes; abcd - letras diferentes indicam diferenças entre as médias (teste de Tukey); significativo se p<0,050.

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

5.2.2 Análise da superfície de fratura dos blocos

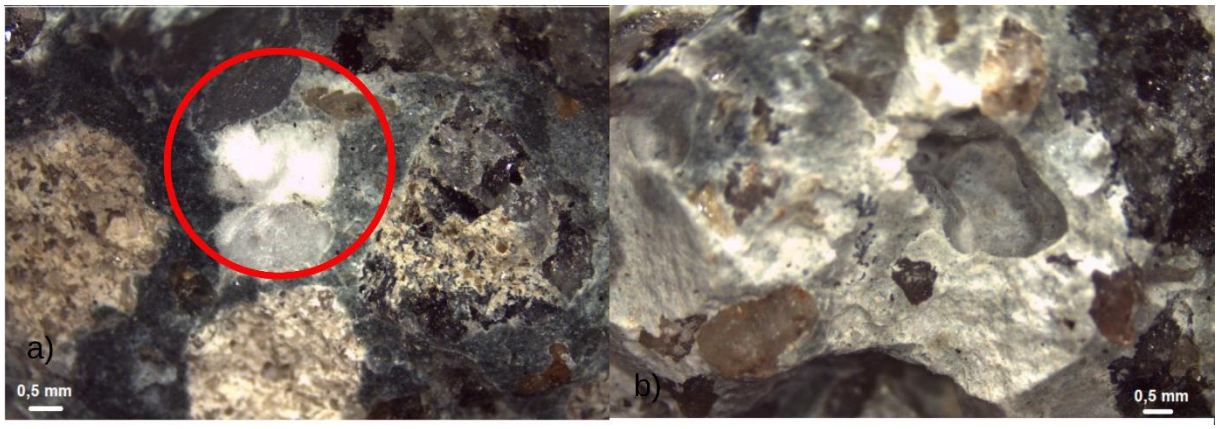
Para auxiliar na análise do efeito do EPS na geração de vazios no concreto foi realizada a análise da superfície de fratura dos blocos. Fotos de fragmentos dos blocos após ruptura em ensaio são apresentadas na Figura 27. Os pontos brancos indicados com as setas na Figura 27b são de EPS não degradados durante o aquecimento em estufa. A Figura 28a mostra em detalhe um grão de EPS presente no interior do bloco e a Figura 28b um vazio deixado pela degradação de um grão de EPS.

Figura 27 – Fragmentos de blocos após ruptura. a) REF, b) RCD30EPS20.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

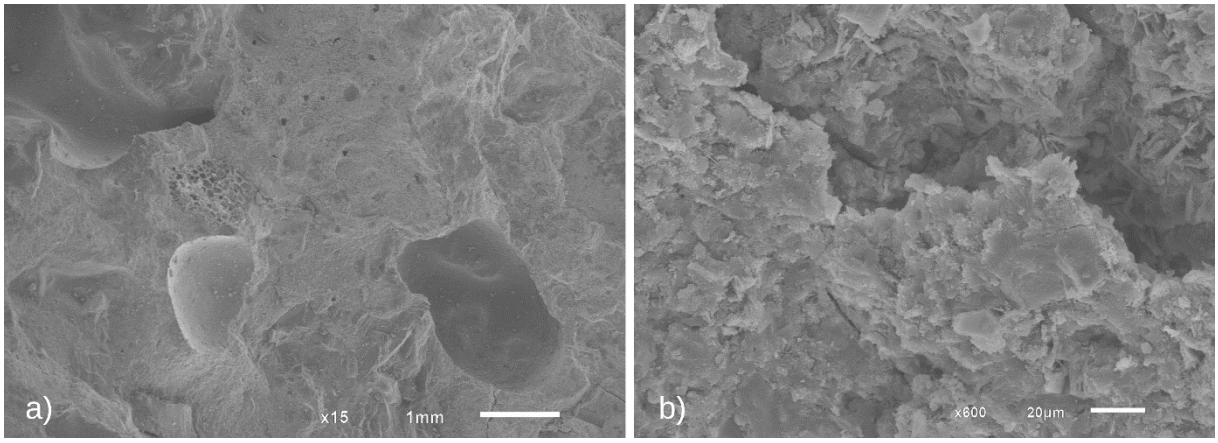
Figura 28- Fragmentos do bloco RCD30EPS20 após ruptura. a) grão de EPS não degradado, b) vazio deixado pela degradação do EPS.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

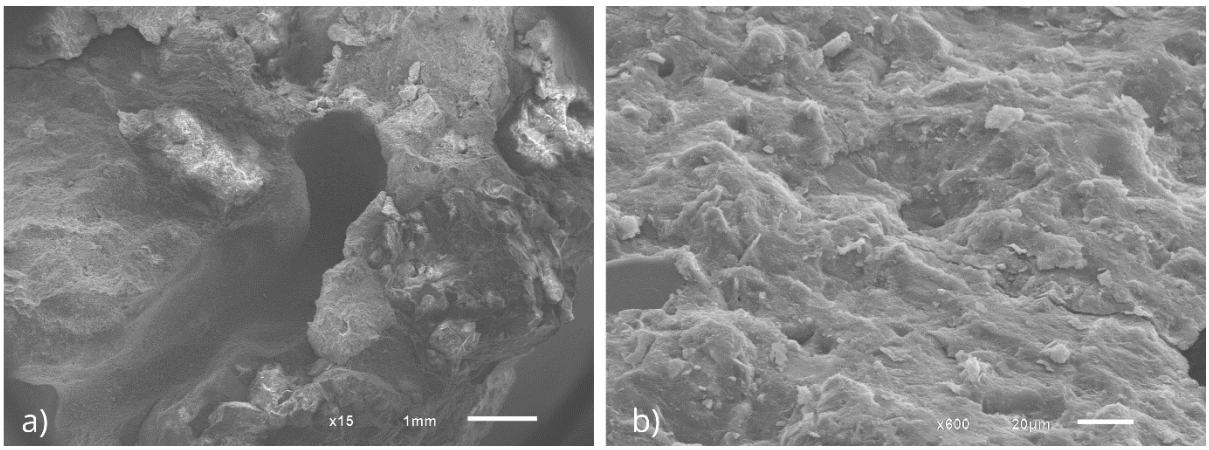
Observa se na Figura 27b que na periferia dos blocos ocorreu a redução dos grãos de EPS, sendo que no interior dos blocos os mesmos permaneceram intactos; isto indica que os blocos não foram aquecidos de maneira uniforme. Nas Figuras 29 e 30 são apresentadas as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura. Esta análise foi realizada apenas para o traço de referência e o traço RCD30EPS20. A técnica não se mostrou adequada para o objetivo em questão que foi identificar os vazios deixados pela redução do volume do EPS. Nas imagens não é possível distinguir os grãos de EPS ou a origem dos vazios observados.

Figura 29 – Superfície de fratura do bloco de referência observada no MEV. a) aumento de 15X e b) aumento de 600X.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 30 - Superfície de fratura do bloco RCD30EPS20 observada no MEV. a) aumento de 15X e b) aumento de 600X.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados dessa pesquisa mostram que o RCD e o EPS possuem potencial para serem utilizados como substituto parcial do agregado graúdo e agregado miúdo na produção de blocos intertravados de pavimento permeável, considerando seus aspectos mecânicos e físicos.

Com base nos resultados deste trabalho, podem ser extraídas as seguintes conclusões:

O traço 1:3 com faixas granulométricas # 1,2 - 2,4 mm (agregado miúdo) e #4,8 - 6,3 mm (agregado graúdo) atendeu ao objetivo de produzir um concreto permeável atendendo a norma ABN NBR 16416:2015 nos quesitos de resistência à compressão e permeabilidade.

A utilização do RCD como substituto do agregado graúdo no percentual de 30% foi adequada para confecção de blocos intertravados permeáveis.

O EPS não atuou como agente gerador de vazios, conforme hipótese inicial, pois a temperatura e/ou tempo de aquecimento dos blocos não foram suficientes para a redução significativa de volume do EPS no interior dos blocos, porém foi observado um aumento de resistência à compressão dos blocos com a incorporação do EPS.

A utilização de 30% de RCD com 10% e 20% de EPS na confecção dos blocos intertravados, foi satisfatória em comparação ao traço de referência, com valor compatível ao mínimo exigido pela ABNT NBR 16416:2016, tanto em resistência à compressão quanto a permeabilidade.

A partir das conclusões algumas sugestões de trabalhos futuros podem ser levantadas:

- Melhorar o procedimento de moldagem dos blocos.

- Elaborar traços com maior percentual de substituição do pedrisco por RCD, acima de 30%.

- Elaborar traços com maior percentual de EPS.

- Ajustar a temperatura ou período de permanência em estufa dos blocos para que ocorra uma redução significativa do volume de EPS e assim geração de poros.

REFERÊNCIAS

ADEWUMI, A. A.; OWOLABI, T. O.; ALABE, I. O.; OLATUNJI, S. O. Estimation of physical, mechanical and hydrological properties of permeable concrete using computational intelligence approach. **Applied Soft Computing**. Elsevier, v. 42, p. 342-350, 2016.

AGOPYAN, Vahan. Construção Civil consome até 75% da matéria prima do planeta. **Globo Ciência**. São Paulo, 28 jun. 2014. Disponível em: http://glo.bo/12yaSCY. Acesso em: 05 abr. 2022.

ALVES, Camila dos Reis. **Avaliação do comportamento higrotérmico de concretos produzidos com resíduos de borracha de pneu e poliestireno expandido para aplicação em paredes de concreto**. 2020. 201f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia: Uberlândia, 2020**.**

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI), Committe 522. **522R-10**: pervious Concrete. Farmington Hills, Michigan, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM **C1754 / C1754M**: standard test method for density and void content of hardened pervious concrete. West Conshohocken, PA, 2012.

___. **ASTM C1747 / C1747M**: standard test method for determining potential resistance to degradation of pervious concrete by impact and abrasion. West Conshohocken, PA, 2013.

___. **ASTM C1688 / C1688M:** standard test method for density and void content of freshly mixed pervious concrete. West Conshohocken, PA, 2014.

___. **ASTM C1701 / C1701M**: standard test method forInfiltration rate of in place pervious concrete. West Conshohocken, PA, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. COMITÊ BRASILEIRO DE CIMENTO, CONCRETO E AGREGADOS. **NM 27**: agregados: redução da amostra de campo para ensaios em laboratório. Rio de Janeiro, 2001. 7p.

___. **NM 52:** agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6p.

___. **NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. 9p.

___. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238p.

___. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009. 4p.

___. **NBR 9781**: peças de concreto para pavimentação: especificação e métodos de ensaio. ABNT, Rio de Janeiro, 2013. 21p.

___. **NBR 12655**: concreto de cimento Portland: preparo, controle, recebimento e aceitação: procedimento. Rio de Janeiro, 2022. 22p.

___. **NBR13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005. 9p.

___. **NBR 15498**: placa de fibrocimento sem amianto: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2016. 24p.

___. **NBR 15498**: chapas cimentícias reforçadas com fios, fibras, filamentos ou telas: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021. 27p.

___. **NBR 15116**: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2021. 16p.

___. **NBR 16055**: parede de concreto moldada no local para a construção de edificações: requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2012. 35p.

___. **NBR 16416**: pavimentos permeáveis de concreto: requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015. 25p.

___. **NBR 16915**: agregados: amostragem. Rio de Janeiro, 2021. 8p.

___. **NBR 16972**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2021. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Projeto Técnico: Pavimento Permeável. Soluções para cidades**. 2013. Disponível em: http://www.solucoesparacidades.com.br/wpcontent/uploads/2013/10/AF_Pav%20Permeavel_web.pdf . Acesso em: 22 de abr. de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (ABRECON). **Brasileiro produz por ano meia tonelada de resíduos de construção civil**. 2020. Disponível em: https://abrecon.org.br/brasileiro-produz-por-ano-meia-tonelada-de-residuos-de-construcao-civil/. Acesso em: 05 abr. de 2022.

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

BATEZINI, R. **Estudo das características hidráulicas e mecânicas de calçadas em concreto permeável em pista experimental**. 2019. 293f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

BHUTTA, M.A.R.; HASANAH, N.; FARHAYU, N.; HUSSIN, M.W.; TAHIR, M. B. M.; MIRZA, J. Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). **Construction and Building Materials**. Elsevier, v.47, p.1243-1248, 2013.

BOTELHO, D. N., AGUADO, R. A. Concreto permeável: análise de desempenho voltada para pavimentação, a fim de combater inundações em centros urbanos. **Brazilian Journals of Development**, v.6, n.4, p. 18300-18320, 2020.

BOTTEON, L. M. **Desenvolvimento e Caracterização de Concreto Permeável para Utilização em Blocos Intertravados para Estacionamentos.** 2017. 95f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2017. Disponível em: https://app.uff.br/riuff/handle/1/5255. Acesso em 19 jun. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, nº 136, 17 de jul. 2002. Seção 1, p. 95-96.

_____. Decreto n°. 35745, de 06 de junho de 2016. Cria a qualificação Qualiverde e estabelece critérios para a sua obtenção. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Rio de Janeiro, RJ, 11 jun. 2012. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/a1/rj/r/rio-de-janeiro/decreto/2012/3574/35745/decreto-n-35745-2012-cria-a-qualificacao-qualiverde-e-estabelece-criterios-para-sua-obtencao?r=p. Acesso em: 30 mar. 2021.

_____. Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010a.

CARDOSO, E. B., SHIMOSAKA, T. H., Filho, M. P., PAULAZZIi, M. Obtenção de concreto permeável produzido com Agregado. *In*: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2017, Belém, PA.

CARVALHO, C.H. R.; MOTTA, L. A. de C. Estudo de concreto com poliestireno expandido reciclado. Estruturas e Materiais. **IBRACON**, v. 12, n. 6, p. 9, 2019.

COORDENADORIA ESTUDAL DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL DO ESPÍRITO SANTO. **Informações Sobre as Chuvas no Espírito Santo**. Disponível em: http://eshoje.com.br/wp-content/uploads/2020/01/Release-22-01-2020-11h.pdf. Acessado em: 19 abr. 2022.

COSIC, K.; KORAT L.; DUCMAN, V.; NETINGER, I. Influence of aggregate type and size properties of pervious concrete. **Construction and Building Materials**. Elsevier, v. 78, p.69-76, 2015.

CURVO, F. DE O. **Estudo da drenabilidade de calçadas experimentais em concreto permeável no campus Armando Salles de Oliveira da USP**. 2017. 123f.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

FARIAS, M. M. de; PALMEIRA, E. M. Agregados para a construção civil. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1. p.481-523.
FAVARETTO, P.; HIDALGO, G. E. N.; SAMPAIO, C. H.; SILVA, R. A.; LERMEN, R. T. Characterization and Use of Construction and Demolition Waste from South of Brazil in the Production of Foamed Concrete Blocks. **Applied Science**, v.7, 2017.

FEBESTRAL. Les revêtements drainants em pavês de betón: durables, esthétiques, ecologiques, multifonctionnels, erainants, surs. Bruxelles, 2008.

FERNANDES, G. S. **Utilização de pavimento permeável de concreto com agregados de RCD na mitigação de alagamentos: estudo de caso do estacionamento do Instituto Central de Ciências da UnB.** 2020. 145f**.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. Poliestireno. **Brasil Escola**. Disponível em: https://brasilescola.uol.com.br/quimica/poliestireno.htm. Acesso em 28 de abr. de 2022.

GUERRA, Jonatan Luiz. **Estudo da influência de flocos de poliestireno expandido como agregado no concreto seco.** Monografia (Graduação em Engenharia Civil). 2015. 62f. Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Pato Branco, 2015. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/bitstream/1/14472/3/PB_COECI_2015_1_14.pdf. Acesso em: 10 fev. 2022.

GESOGLU, M.; GÜNEYISI, E; KHOSHNAW, G.; IPEK, S. Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers. **Construction and Building Materials**. Elsevier, v. 63, p. 206-213, 2014.

GHAFOORI, N.; DUTTA, S. Laboratory Investigation of Compacted No-fines concrete for Paving Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.7, n. 3, p. 183-191, 1995.

GRUBEŠA, I. N.; BARIŠIĆ, I.; DUCMAN, V.; KORAT, L. Draining capability of single-sized pervious concrete. **Construction and Building Materials**. Elsevier, v. 169, p.252-260, 2018.

HOLTZ, F. C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental.** 2011. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

INSTUTUTO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 3 ed. v.1 v.2. São Paulo, IBRACON, 2017.

IBRAHIM, H. A.; GOH, Y.; NG, Z. A.; YAP, S. P.; MO, K. H.; YUEN, C. W.; ABUTAHA, F. Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of construction and demolition waste as aggregates. **Construction and Building Materials**. Elsevier, v. 253, 2020.

JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; GALVÍN, A.P.; LÓPEZ, M.; AGRELA, F. Use of mixed recycled aggregates with a low embodied energy from non-selected CDW in unpaved rural roads. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 34, p.34-43, 2012.

JUNIOR, G. B. **Placa cimentícia com resíduos de poliestireno expandido (EPS): Estudo das propriedades físicas e mecânicas**. 2019. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

JUNIOR, R. O. M.; SANTOS, M.F.; FREITAS, M.S.; LAVOR, D. A. The technical feasibility of the use of rubber chips in the production of permeable concrete for urban paving – case study, **Journal of Engineering and Tecnology for Industrial Applications**. v.5, 19 ed, 2019.

LI, J. Mix Design of Pervious Recycled Concrete. Geo Hunan International Conference – **Material Design, Construction, Maintenance, and Testinf of Pavements**. v. 195, p. 103-108, 2009.

MARCHIONI, M.; SILVA, C. **O pavimento Intertravado Permeável – Melhores práticas**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 24 p. 2011.

MELO, Willian Weber. **Análise de diferentes ensaios de permeabilidade em concretos porosos**. 2017. 64f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) **-** Universidade Federal De Santa Maria, Santa Maria, 2017.

MERIGHI, J.; FORTES, R. M.; BANDEIRA, A. Estudo de propriedades do concreto poroso aplicado a pavimentação. *In*: IBRACON, 2006, Rio de Janeiro - RJ. **Anais do 48˚ Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo, 2006.

MONTEIRO, Anna Carolina Neves. **Concreto Poroso: Dosagem e Desempenho**. 2010. 35f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

MURRAY, C. A.; SNYDER, K. S.; MARION, B. A. Characterization of permeable pavement materials based on recycled rubber and chitosan. **Construction and Building Materials.** Elsevier, v.69, p.221–231, 2014.

Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas (CONPAR). 2017, Recife. **Anais da Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas**. Recife: CONPAR, 2017. p.13.

OLIVEIRA, L. S. **Reaproveitamento de resíduos de poliestireno expandido (ISOPOR) em compósitos cimentícios**. 2013. 75f. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação) - Universidade Federal de São João Del-Rei. São João Del Rei, 2013.

POLASTRE, B., SANTOS, L. D. Concreto Permeável: Impermeabilização do Solo e Drenagem Urbana. 2006. **AUT 221 – Arquitetura, Ambiente e Desenvolvimento Sustentável**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. USP, 2006.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO - PNUD. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: https://nacoesunidas.org/. Acesso em 17 de mar. 2020.

RAMOS, Gustavo Moreira. **Análise das Propriedades do Concreto Permeável com Adição de Agregado Miúdo e Resíduo de cinza de madeira**. 2018. 90f. Monografia (Graduação em Bacharelado em Engenharia Civil de Infraestrutura) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/191840?show=full. Acesso em: 20 abr. 2021.

RONES, J. N. **Uso de Parafina e EPS em Argamassa para Pavimentos Permeáveis**. 2020.55f. Monografia (Graduação em Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) – Instituto federal do Espirito Santo, Vitória, 2020.

ROSEEN, R.; BALELESTERO, T.; HOULE, J.; BRIGGS, J.; HOULE, K. Water Quality and Hydrologic Performance of a Porous Asphalt Pavement as a Storm-Water Treatment Strategy in a Cold Climate. **Journal of Environmental Engineering**, v. 138, 2012.

RUPP, Nicholas Henrique dos Santos. **Desenvolvimento e Caracterização de Compósito de Polipropileno e Resíduos de Construção e Demolição**. 2018. 58f. Monografia (Graduação em Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

SABNIS, G.M. **Green building with concrete. Sustainable design and construction**. Ed. Boca Raton, p. 320, 2012.

SACCANI, A. M.; BIGNOZZI, C.; SANDROLINI, F. New polymers mortars containing polymeric wastes. Part 1. Microestrure and mechanical properties. **Composites: Part A**, v. 31, p. 97-106, 2000.

SCHAEFER, V.; WANG, K.; SULEIMAN, M.; KEVERN, J. Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates. Final Report. **National Concrete Pavement Tecnology Center**, Iowa State University, Ames, IA, USA, 2006.

SILVA, F. B. Pavimento de concreto permeável. **Revista Téchne**, São Paulo, v. 190, 2012. Disponível em: <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/190artigo288015-1.aspx>. Acesso em: 28 de jul de 2020.

SULEIMAN, M. T.; KEVERN, J.; SCHAEFER, V. R.; WANG, K. Effect of Compaction Energy on Pervious Concrete Properties, Proceedings of Concrete Technology Forum: Focus on Pervious Concrete. **Research Gate**, 2006.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. Estudo da influência dos agregados de concreto reciclado em concretos permeáveis. Estruturas e Materiais. **IBRACON**, v. 9, p. 75, 2016.

TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. **Pervious concrete pavements**: Technical report. 302.02 ed. Maryland: Portland Cement Association and National Ready Mixed Concrete Association, 2004.

TESSARI, J. **Utilização de poliestireno expandido e potencial de aproveitamento de seus resíduos na construção civil**. 2006. Florianópolis. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

THOMAS, C. et al. Macro- and micro- properties of multi-recycled aggregate concrete. **Journal of Cleaner Production**. Elsevier, v. 245, p.118843, 2020.

TORRES, A.; HU, J.; RAMOS, A. The effect of the cementitios paste thickness on the performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**. Elsevier, v.95. p.850-859, 2015.