

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIA, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

JOSIAS FERRAZ COELHO

INCORPORAÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO EM
MISTURAS DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA A PRODUÇÃO DE PEÇAS DE
PAVIMENTAÇÃO

PONTA GROSSA
2023

JOSIAS FERRAZ COELHO

INCORPORAÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO EM
MISTURAS DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA A PRODUÇÃO DE PEÇAS DE
PAVIMENTAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil pela
Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Jansen Mikami

PONTA GROSSA

2023

JOSIAS FERRAZ COELHO

INCORPORAÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO EM
MISTURAS DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA A PRODUÇÃO DE PEÇAS DE
PAVIMENTAÇÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rafael Jansen Mikami

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. Dr. Eduardo Pereira

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. Dra. Patrícia Kruger

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Ponta Grossa, 13 de novembro de 2023

Dedico aos meus pais, Alice Ferraz Rosa e Odair Aparecido Coelho (*in memoriam*), pela compreensão e apoio em todos os momentos durante esses cinco anos.

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial ao professor Dr. Rafael Jansen Mikami, por todo apoio e orientação no desenvolvimento deste estudo. Sempre auxiliando e disposto a compartilhar seu conhecimento e nortear as decisões, sendo fundamental durante para elaboração desta pesquisa.

Também, um agradecimento especial à professora Dra. Patrícia Kruger, pela oportunidade de pesquisa, coorientação e compartilhamento de seu conhecimento técnico.

Agradecimento ao laboratorista Augusto Cesar Preidum e aos acadêmicos Amanda Sútil, Rafael Juncos e José Pedro pelo auxílio nas atividades laboratoriais. Aos meus colegas de curso Gabriela Maciel, Rafaela Bueno e Mateus Iago, pela amizade e companheirismo nos anos de graduação. Desejo a todos muitos sucessos em suas carreiras.

A minha família, em especial minha mãe Alice Ferraz, meu pai Odair Coelho (in memorian) e minha irmã Juliane Coelho dedico essa conquista e deixo meu agradecimento. Vocês foram meus pilares de apoio, exemplo para inspiração e amparo nos momentos difíceis, estando presentes nas conquistas. Foram fundamentais no trajeto realizado durante a graduação.

RESUMO

O avanço da urbanização provoca alterações e crescimento de setores nos centros urbanos. O desenvolvimento do setor da construção civil possibilita novos empreendimentos e implementação de infraestrutura. Com isso, ocorreu o aumento dos problemas envolvendo geração de resíduos sólidos, oriundo de novas construções e demolições, e aumento de áreas impermeabilizadas com a implantação de vias pavimentadas, reduzindo a percolação de água no solo. Nesse contexto, o concreto permeável é utilizado para a produção de estruturas drenantes, que são utilizadas para minimizar problemas ocasionado por inundações e acúmulo de água superficial. Para sua produção podem ser utilizados agregados naturais e agregados reciclados, oriundos de resíduos sólidos de construção civil. O objetivo principal desta pesquisa foi incorporar agregado reciclado de concreto em misturas de concreto permeável para produção de peças de pavimentação, analisando como o aumento da incorporação de ARCO afeta o desempenho de funcionalidade das peças permeáveis. Sete misturas foram desenvolvidas, sendo uma produzida com agregado natural e seis com agregado reciclado. Foram analisadas as propriedades físicas dos agregados e as propriedades das misturas de concreto poroso no estado fresco e endurecido, determinado o desempenho mecânico e hidráulico. A relação água/cimento foi adequada para as porcentagens de incorporação e tipo de densidade utilizada. O estudo demonstrou que a incorporação de ARCO afeta as propriedades, o aumento da porcentagem de resíduo beneficia a condutividade hidráulica, reduzindo o tempo de percolação. A resistência mecânica demonstrou ser afetada pela utilização de resíduos, mas sendo possível atender aos requisitos mínimos da normativa que rege pavimentos permeáveis. Foi possível incorporar 75% de ARCO no traço de concreto permeável com o uso da densidade seca e 100% de ARCO com o uso da densidade aparente no método de dosagem do Grau de Compactação.

Palavras-chave: Concreto permeável, resíduo de construção, porosidade, agregado reciclado.

ABSTRACT

The advance of urbanization has led to changes and growth in sectors in urban centers. The development of the construction sector has enabled new developments and the implementation of infrastructure. As a result, there has been an increase in problems involving the generation of solid waste from new construction and demolition, and an increase in waterproofed areas with the implementation of paved roads, reducing the percolation of water into the ground. In this context, pervious concrete is used to produce drainage structures, which are used to minimize problems caused by flooding and the accumulation of surface water. Natural aggregates and recycled aggregates from solid construction waste can be used in its production. The main objective of this research was to incorporate recycled concrete aggregate into permeable concrete mixtures to produce paving blocks. Analyzing how increasing the incorporation of ARCO affects the functional performance of pervious concrete. Seven mixtures were developed, one of which was produced with natural and recycled aggregate. The physical properties of the aggregates and the properties of the porous concrete mixtures in the fresh and hardened state were analyzed, and the mechanical and hydraulic performance was determined. The water/cement ratio was adequate for the incorporation percentages and type of density used. The study showed that the incorporation of ARCO affects the properties; increasing the percentage of solid waste benefits the hydraulic conductivity, reducing the percolation time. The mechanical strength was shown to be affected using solid waste, but it was possible to meet the minimum requirements of the regulations governing pervious pavements. It was possible to incorporate 75% ARCO into the pervious concrete mix using dry density and 100% ARCO using bulk density in the Degree of Compaction design method.

Keywords: Pervious concrete, construction waste, porosity, recycled aggregate.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teor de material pulverulento dos agregados	39
Tabela 2 - Caracterização dos agregados e propriedades obtidas	40
Tabela 3 - Nomenclatura das variáveis utilizadas no método do grau de compactação	46
Tabela 4 - Características da mistura P25 de concreto permeável	50
Tabela 5 - Relações água/cimento para as porcentagens de incorporação de ARCO	53
Tabela 6 - Relações água/cimento dos traços de concreto permeável	53
Tabela 7 - Dados de dosagem	54
Tabela 8 - Resultados obtidos na caracterização do estado fresco	55
Tabela 9 - Resultados obtidos com a caracterização no estado endurecido	58
Tabela 10 - Resultados de condutividade hidráulica	61
Tabela 11 - Resultados da resistência mecânica obtida dos traços.....	63
Tabela 12 - Comparação do consumo de cimento por teor de agregado reciclado incorporado	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pavimento de peças de concreto permeável intertravadas.....	17
Figura 2 - Esquema da infiltração da água por revestimento permeável	18
Figura 3 - Relações água/cimento presente na literatura.....	19
Figura 4 - Relações entre porosidade e a condutividade hidráulica de concretos permeáveis.....	23
Figura 5 - Relação porosidade e resistência mecânica de concretos permeáveis	25
Figura 6 - Amostra transversal de concreto permeável com excesso do volume de pasta de cimento	25
Figura 7 - Estrutura da primeira etapa, com utilização de agregado natural	35
Figura 8 - Estrutura da segunda etapa, com incorporação de agregado reciclado ...	35
Figura 9 - Fluxograma das hipóteses DA e DS	36
Figura 10 - Britador mandíbula.....	37
Figura 11 - Distribuição granulométrica dos agregados	38
Figura 12 - Moldes dos corpos de provas	42
Figura 13 - Corpo de prova capeado com pasta de cimento.....	43
Figura 14 - Anel de infiltração de 100 mm (a) e com a base vadada (b)	44
Figura 15 – Análise visual do fundo da peneira, relação a/c 0,30 a 0,34	49
Figura 16 - Análise visual do fundo da peneira, relação a/c 0,32 a 0,42	52
Figura 17 - Resultados da caracterização da densidade no estado fresco (Df)	56
Figura 18 - Resultados de caracterização da porosidade no estado fresco (Pf)	57
Figura 19 - Resultados da caracterização da densidade no estado endurecido (De)	58
Figura 20 - Resultados da caracterização da porosidade no estado endurecido	59
Figura 21 - Resultados da caracterização da condutividade hidráulica.....	62
Figura 22 - Resultados da caracterização da resistência mecânica.....	63
Figura 23 - Comparativo de resistência à compressão, com uso de densidade DA e DS	64
Figura 24 – Análise visual de peças de concreto com taxa de 50% de incorporação de ARCO, com uso da densidade aparente (a) e seca (b).....	65
Figura 25 - Índice de consumo de cimento por porcentagem de ARCO	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipologias de pavimentos permeáveis	16
Quadro 2 – Composição das misturas de concreto permeável desenvolvidas na literatura	20
Quadro 3 - Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável	24
Quadro 4 - Classificação dos resíduos da construção civil	29
Quadro 5 - Ensaio de caracterização	38
Quadro 6 - Características físico-químicas do aglomerante CP II F 32.....	41
Quadro 7 - Métodos de caracterização das propriedades de concreto permeável ...	42

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

ARCO – Agregado Reciclado de Concreto

ASTM - American Society for Testing and Materials

CP II-F-32 - Cimento Portland tipo II com fíler e Resistência Característica de 32

DS – Densidade seca

DA – Densidade Aparente

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

25ARDS - 25% Agregado Reciclado (Densidade Seca)

50ARDS - 50% Agregado Reciclado (Densidade Seca)

75ARDS - 70% Agregado Reciclado (Densidade Seca)

100ARDS - 100% Agregado Reciclado (Densidade Seca)

50ARDA - 50% Agregado Reciclado (Densidade Aparente)

100ARDA – 100% Agregado Reciclado (Densidade Aparente)

REF – Referecial (0% de agregado reciclado)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO.....	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivo específico	14
1.2	JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA CARACTERIZAÇÃO.	16
2.1	CONCRETO PERMEÁVEL	16
2.1.1	Porosidade	21
2.1.2	Permeabilidade	22
2.1.3	Resistência Mecânica	23
2.2	MÉTODOS DE DOSAGEM	26
2.2.1	Método do American Concrete Institute (ACI).....	26
2.2.2	Método de Nguyen <i>et al.</i> (2014).....	27
2.2.3	Método de Mikami (2022).....	27
2.3	RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO	28
2.3.1	Classificação dos Resíduos de Construção e critérios de normas.....	29
2.3.2	Características do ARCO	30
2.3.3	Pré-molhagem.....	31
2.3.4	Aplicação de agregados reciclados e seu uso em concretos permeáveis ...	32
3	METODOLOGIA	34
3.1	MATERIAIS	37
3.1.1	Caracterização de granulometria dos agregados graúdos.....	38
3.1.2	Teor de material pulverulento.....	39
3.1.3	Caracterização das propriedades físicas	40
3.1.4	Aglomerante	41
3.2	MOLDAGEM E ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	41

3.3	DOSAGEM DE CONCRETO PERMEÁVEL PELO MÉTODO DE GRAU DE COMPACTAÇÃO	44
3.3.1	Método do grau de compactação	45
3.4	TRAÇO REFERÊNCIA COM UTILIZAÇÃO DE AGREGADO NATURAL	48
3.4.1	Teste da relação água cimento para agregado natural	48
3.4.2	Traço piloto e teste de compactação.....	49
3.5	TRAÇOS COM AGREGADO RECICLADO.....	50
3.5.1	Teste da relação água/cimento para misturas com agregado reciclado	51
3.5.2	Traço com incorporação de ARCO e teste de compactação	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1	DENSIDADE E POROSIDADE NO ESTADO FRESCO	55
4.2	DENSIDADE E POROSIDADE NO ESTADO ENDURECIDO	57
4.3	CONDUTIVIDADE HIDRAÚLICA	60
4.4	RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	62
4.5	CONSUMO DE CIMENTO	66
4.6	CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO DE DOSAGEM	67
5	CONCLUSÕES	70
	REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da urbanização, o setor da construção civil obteve crescimento. Com isso a geração de resíduos através de novos empreendimentos, reformas e demolições aumenta com os anos, que de maneira significativa impacta e gera mudanças no meio ambiente (NUCCI, 2008).

O setor da construção civil é responsável pela produção de grandes volumes de resíduos sólidos e a maior parte do material gerado não possui destinação, solução ou tratamento adequado, ocasionando impactos ao meio ambiente, criando a necessidade de implementação de medidas que reduzam as quantidades destinadas a aterros especiais. Uma medida de intervenção desse problema é através de reaproveitamento e/ou reutilização de resíduos gerados, podendo ser incorporado em misturas de concretos (PEREIRA; BARBOSA, 2015).

Outro efeito da urbanização é a impermeabilização das áreas, que diretamente afeta o escoamento e infiltração de águas pluviais no solo (PINTO; SANTOS; OLIVEIRA, 2021). O desenvolvimento urbanístico das cidades, com a implementações de revestimentos asfálticos e calçamentos, é uma das causas de sobrecarregamento das sarjetas, bocas de lobos, galerias que compõem os sistemas de drenagem e aumento das vazões dos rios e arroios, ocasionando enchentes e inundações (PILZ *et al.*, 2019).

O pavimento permeável é um dispositivo que pode ser inserido em vias de baixo tráfego, possui o aspecto de drenante, sendo uma opção para minimizar e mitigar enchentes e inundações, manejando águas pluviais, que são efeitos da urbanização (XIE, X. *et al.*, 2018).

Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), o concreto permeável é um dos principais materiais empregados como revestimento de pavimentos drenantes. A capacidade drenante do concreto é devido a rede de vazios, pois a mistura após solidificada apresenta poros permeáveis interligados capazes de conduzir em seu interior, drenar ou infiltrar água no solo. A percolação de água pelo interior, é devido o concreto possuir uma porosidade entre 15 a 30%, característica esta que torna a peça de concreto permeável (ZHONG; LENG; POON, 2018). Para produção de concretos permeáveis são utilizados usualmente agregados naturais. Com interferência direta, o tamanho médio dos grãos afeta a compactação e interligação dos poros que formam uma rede vazios permitida condutividade hidráulica e

permeabilidade. Os tipos de distribuição afetam a mistura com diferentes resultados. Utilizando a uniforme é obtido concretos mais permeáveis e a distribuição continua ou descontinua deve ser controlada para não prejudicar a porosidade (MIKAMI, 2022).

O uso do agregado reciclado de concreto em substituição ao agregado natural na produção de pisos drenantes pode ser uma alternativa com boa viabilidade técnica, porém deve ser dada a correta atenção às particularidades do agregado reciclado para que a produção do material drenante de resíduo mantenha a qualidade das propriedades do material drenante de referência.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a incorporação parcial e total de agregado graúdo reciclado de concreto na mistura de concreto permeável e os efeitos causados nas propriedades mecânicas, físicas e hidráulicas.

1.1.2 Objetivo específico

- Analisar o comportamento das propriedades físicas de amostras de concreto permeável, com a utilização de agregados graúdos reciclados de concreto.
- Desenvolver misturas de concreto permeável com substituição em diferentes níveis (25%, 50%, 75% e 100%) do agregado natural por agregado reciclado por meio do método do grau de compactação;
- Avaliar a influência da substituição de agregado natural por RCD no desempenho das propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável em diferentes teores de incorporação;
- Analisar qual teor de incorporação de agregado reciclado apresenta melhor desempenho técnico, comparando com as amostras de agregado natural;

1.2 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO CIENTIFICA

Com a intensificação da urbanização e o crescimento do setor da construção civil está ocorrendo alterações no meio ambiente de maneira significativa. Extração e exploração de recursos naturais para atender os sistemas construtivos,

impermeabilização da superfície com a implementação de revestimentos e geração de resíduos através de demolições e novos empreendimentos são consequência do avanço do desenvolvimento dos centros urbanos (XIE *et al.*, 2018).

Para atender o progresso da indústria da construção é preciso intensificar a extração de materiais em jazidas minerais. No Brasil, 80% das minas exploradas são voltadas para obtenção de minérios usados na construção civil (SANTOS *et al.*, 2014). Porém, a exploração para obter insumos provoca impactos ambientais e os mais comuns observados são a remoção da vegetação, modificação da paisagem e destinação inadequada de rejeitos, depositando grandes volumes em lugar inadequados (SANTOS *et al.*, 2014). Com o alto impacto ao meio ambiente, cria-se a necessidade de buscar meios para diminuir os prejuízos, reduzindo o consumo da matéria prima, com a substituição por materiais beneficiados e reutilizáveis (THOMAS; COSTA, 2017).

O crescimento da produção de resíduos sólidos de RCD, ocasiona uma busca maior por soluções e alternativas que viabilizem a reutilização (BARBOZA; SOUZA, 2022). Os materiais gerados são alocados em aterros temporários, aonde ficam aguardando por uma nova aplicação (MEIRELES; RASSI, 2022). Porém, a implementação de grandes quantidades de resíduos sólidos é dificultada pelas suas próprias características físicas, que afetam o comportamento das misturas de concreto e argamassas nos estados fresco e endurecido (AGRELA *et al.*, 2021).

O aumento de áreas impermeabilizadas nas cidades, ocasionou uma maior ocupação do solo afetando a drenagem urbana, devido à baixa permeabilidade e infiltração de água nos solos (JUNIOR *et al.*, 2023). A falta de permeabilidade e ineficiências dos sistemas de drenagem tem ocasionados enchentes, inundações e enxurradas nos centros urbanos, causando transtornos para população (SARTORE; PAULINO; TORALLES, 2020).

O desenvolvimento deste estudo visa demonstrar o desempenho misturas de concreto permeáveis com a incorporação de RCD em diferentes teores, desta forma, sendo uma contramedida para a intensa produção de resíduos oriundos do desenvolvimento urbano com o avanço do setor da construção civil. A incorporação será uma opção para reutilização de resíduos sólidos de concreto em peças drenantes, que contribuem para o aumento da percolação de superfícies, minimizando problemas urbanos envolvendo inundações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO PERMEÁVEL

O concreto permeável é definido como uma mistura especial de concreto capaz de conduzir águas superficiais pelo seu interior no estado endurecido. A percolação de fluídos ocorre pela ação da gravidade até as camadas inferiores, conforme definido pela NBR 16416 (ABNT, 2015). A mistura possui uma porosidade macroscópica que permite que o material seja permeável. Quando um líquido incide sobre a superfície do concreto a sua condução ocorre por uma rede de vazios interligados, formada pelos poros (MIKAMI, 2022). A NBR 16416 (ABNT, 2015) propõe que os pavimentos permeáveis podem possuir diferentes tipologias de revestimentos, conforme mostra o Quadro 1.

Quadro 1 - Tipologias de pavimentos permeáveis

Tipologia de revestimentos		Percolação d'água
Revestimento de pavimento intertravado permeável	Peças de concreto com juntas alargadas	Ocorre por juntas entre as peças de concreto
	Peças de concreto com áreas vazadas	Ocorre por áreas vazadas das peças de concreto
	Peças de concreto permeável	Ocorre por peças de concreto permeável
Revestimento de pavimento de placas de concreto permeável		Ocorre pelo concreto da placa
Revestimento de pavimento de concreto permeável		Ocorre pelo concreto permeável moldado no local

Fonte: Adaptado da NBR 16416 (ABNT, 2015).

O concreto permeável pode ser utilizado para fabricação de peças de pavimentação ou moldado *in loco* como camada de revestimento, sua utilização favorece a infiltração de água nas camadas do subsolo reabastecendo o volume de aquíferos, retarda o escoamento de água que incide sobre a superfícies impermeabilizadas (BIZÃO, 2021).

Segundo o relatório ACI 522R (CÔMITE ACI 522, 2010), é descrito que o concreto poroso possui vantagens em comparação ao concreto convencional, pois sua composição contribui para o controle da poluição de águas pluviais, possibilita ter áreas de estacionamentos maiores com sistemas de drenagem e retenção de água

menores, reduzir o risco de hidroplanagem de veículos. A Figura 1 demonstra um tipo de pavimento permeável utilizado para vias de tráfego leve.

Figura 1 - Pavimento de peças de concreto permeável intertravadas

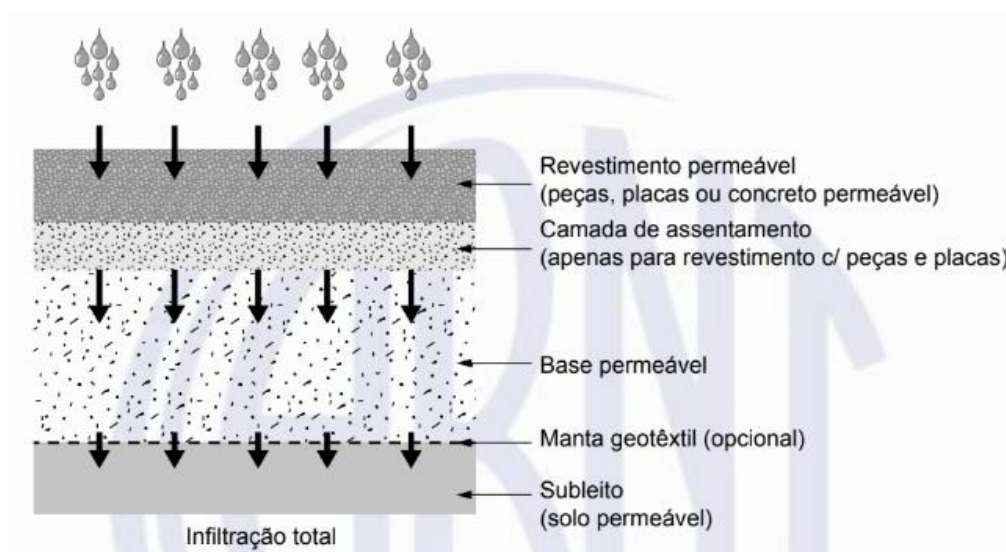


Fonte: (SALVADOR PRÉ - MOLDADOS, 2023)

Nos grandes centros urbanos, que possuem uma quantidade maior de áreas impermeabilizadas, a incidência de águas pluviais em grandes quantidades concentram e sobrecarregam os sistemas de drenagem urbana, desta forma o concreto permeável atua como contramedida para minimizar problemas como inundações (PINTO; SANTOS; OLIVEIRA, 2021). A permeabilidade possibilita reduzir o volume de água pluviais sobre os pavimentos, e quando dimensionado corretamente pode ser incorporado em sistemas de drenagem urbana, para captação e condução ao solo (BECKER; CONEGERO; PINHEIRO, 2022).

No entanto, a infiltração de água só será eficiente, se forem atendidas as características hidráulicas, sendo preciso que a porosidade da mistura possua valores entre 15 a 30% (ZHONG; LENG; POON, 2018). A eficiência hidráulica é diretamente proporcional a porosidade do concreto permeável, sendo que esses poros interligados permitem o escoamento da água pelo seu interior. Com base nisso, a aplicação de revestimentos permeáveis em regiões de grandes áreas impermeabilizadas, atendendo a porosidade recomendada, permite que a infiltração e percolação de água no solo contribua para o reabastecimento de lençóis freáticos. Na Figura 2 é ilustrado o esquema de um pavimento com revestimento permeável.

Figura 2 - Esquema da infiltração da água por revestimento permeável



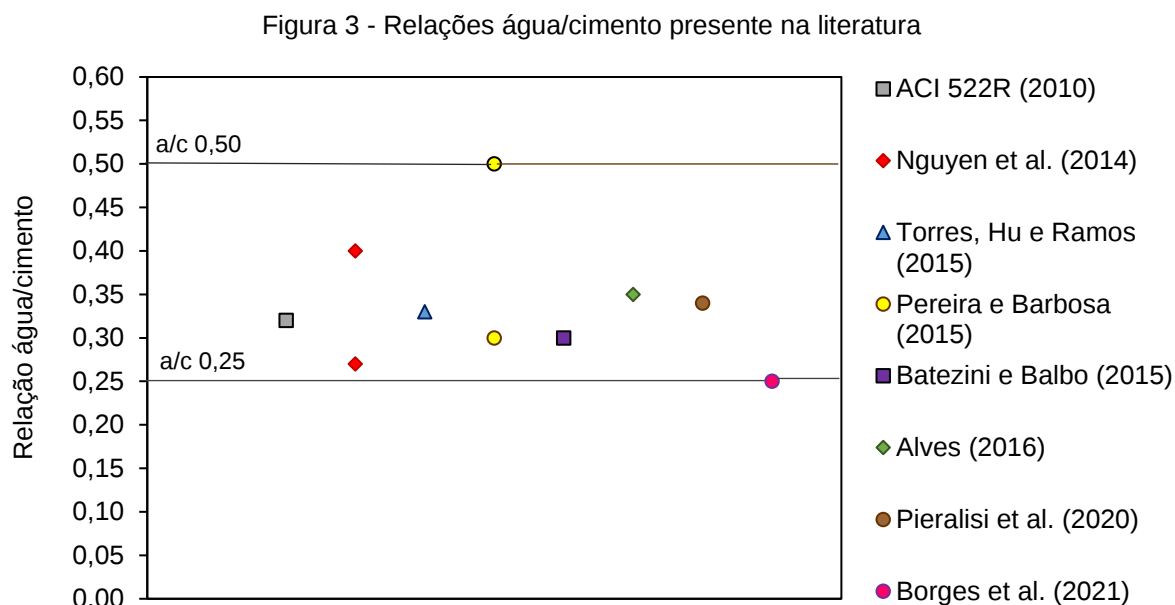
Fonte: NBR 16416 (ABNT, 2015).

A composição do traço do concreto permeável é muito semelhante a concretos convencionais. Sua constituição é composta pelos mesmos materiais – água, cimento e agregado miúdo e graúdo. A utilização de areia como agregado miúdo na mistura é realizada com atenção, tendo em vista que sua incorporação pode reduzir a porosidade da mistura com o melhoramento do empacotamento das partículas de agregados. Entretanto, a proporção dos materiais é determinada de maneira que seja mantido a capacidade de percolação de água pelo seu interior, com a baixa relação/água cimento e menor teor de agregado miúdo, conforme descrito na ACI 522R (CÔMITE ACI 522, 2010).

O cimento Portland, é o aglomerante mais utilizado para produção de concreto poroso. Seu uso é devido as suas propriedades adesivas e coesivas que possibilitam a união de agregados minerais na forma de uma unidade compacta (NIVELLE; BROOKS, 2016). Na literatura existe relatos de uso de diferentes tipos de cimentos Portland como CP-II E 32, (BORGES *et al.*, 2021), CP-II F 40 (NANYA; FERREIRA; CAPUZZO, 2021) e, CP-V ARI (COELHO; ROCHA, 2019), CP-II F 32 (MIKAMI, 2022). Adições na matriz cimentícia são utilizadas para aprimorar as propriedades mecânicas e hidráulicas de misturas de concreto permeável.

Ainda não existe uma normativa que estabeleça as relações entre a proporção de água e o desempenho das propriedades do concreto permeável. Mas, de acordo com a resistência esperada e agregado utilizado a relação a/c pode variar entre 0,25

a 0,50 (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; PEREIRA; BARBOSA, 2015; BORGES *et al.*, 2021). A Figura 3 demonstra graficamente os diferentes teores da relação água/cimento utilizadas para produção de concreto permeável, que em sua maioria foram fixadas num valor ideal e em alguns foi realizado ajustes.



Fonte: O autor.

O controle da relação água/cimento é fundamental para obter pavimentos permeáveis com desempenho das propriedades mecânicas e hidráulicas dentro do requisitado pela NBR 16416 (ABNT, 2015). A espessura e consistência da pasta de cimento alteram o desempenho do concreto permeável. Se aplicado in loco ou utilizado para fabricação de peças de concreto sem controle tecnológico pode ocasionar o aumento da resistência mecânica com o tamponamento dos poros e reduzindo a condutividade hidráulica do pavimentos, ocasionando falhas na funcionalidade da via (XIE *et al.*, 2018).

Com base nisso, é proposto que a quantidade da relação água/cimento seja determinada controlando a consistência da pasta, sendo o valor ideal aquele em que a pasta de cimento recobre todos os agregados sem que haja escoamento (NGUYEN *et al.*, 2014; XIE *et al.*, 2018; MIKAMI, 2022).

Os agregados graúdos convencionais são utilizados para compor o esqueleto mineral de misturas de concreto poroso. Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015) é recomendado que os agregados utilizados apresentem distribuição granulométrica

entre a faixa 1,16 a 9,5 mm, com a maior porcentagem de material retido até na peneira de abertura de 4,75 mm. Já, o relatório ACI 522R (CÔMITE ACI 522, 2010) propõe que a dimensão dos grãos do agregados varie de 9,5 a 19,0 mm. A utilização de agregados com tamanho maior e distribuição granulométrica uniforme, propicia a redução do consumo de pasta de cimento (COELHO; ROCHA, 2019).

O traço de concreto permeável é composto por cimento, agregado graúdo e água, sendo usualmente representado pela relação agregado graúdo e cimento (relação g/c), expressa em massa. De acordo, com Tennis, Leming, Akers (2004), a relação agregado graúdo/cimento (g/c) pode variar de 1,9 e 7,6. Mas, usualmente a produção de concreto permeável ocorre com a utilização de relações g/c 4,0 e 4,5.

No Quadro 2 é mostrado composições de misturas de concreto permeável propostas por diferentes autores e publicadas entre 2010 e 2021, sendo analisado a utilização de diferentes faixas granulométricas de agregado graúdo, sendo observado que a dimensão dos grãos não ultrapassou 1,16 e 19 mm.

Quadro 2 – Composição das misturas de concreto permeável desenvolvidas na literatura

Autor	Distribuição granulométrica (mm)	Relação g/c	Relação a/c	Agregado reciclado (%)
ACI 522R (2010)	9,5 – 19,0	-	0,32	-
Nguyen <i>et al.</i> (2014)	4,0 – 6,3	3,7 – 4,5	0,27 – 0,40	-
ABNT NBR 16416 (2015)	1,16 – 9,5	-	-	-
Torres, Hu e Ramos (2015)	6,3 – 9,5	3,6 – 6,5	0,33	-
Pereira e Barbosa (2015)	4,8 – 9,5	4,15	0,30 – 0,50	5 – 50
Batezini e Balbo (2015)	4,75 – 9,5	4,4	0,30	-
Alves (2016)	4,75 – 9,5	3,0	0,35	5 - 15
Coelho e Rocha (2019)	4,75 – 9,5	4,4	0,30	-
Pieralisi <i>et al.</i> (2020)	2,36 – 9,5	2,79 – 3,53	0,34	-
Borges <i>et al.</i> (2021)	4,75 – 12,5	3,0	0,25	10 - 30
Juniot <i>et al.</i> (2023)	4,75	2,78	0,33	-

Nota: g/c – Relação agregado graúdo/cimento; a/c – Relação água/cimento.

Fonte: O autor.

Autores como Pereira e Barbosa (2015), Alves (2016) e Borges *et al.* (2021) utilizaram na composição de seus traços o agregado reciclado, com a taxa de incorporação entre 5 a 50%. Mesmo com o uso de materiais reciclados, seus valores de composição dentro dos parâmetros da literatura.

2.1.1 Porosidade

A porosidade macroscópica interligada, presente nos concretos permeáveis, é a principal característica que diferencia do concreto convencional. Através do grau de compactação e da quantidade de pasta de cimento é possível controlar e manter a porosidade de projeto entre 15 e 35%, desta forma permitindo a existência da rede de vazios entre agregados (CÔMITE ACI 522, 2010; IBRAHIM *et al.*, 2014).

Os espaços vazios estão presentes na pasta de cimento, na porosidade aberta ou fechada, sendo a soma desses grupos considerada a porosidade total da mistura. Segundo Mehta e Monteiro (2008), durante o processo de hidratação do cimento ocorre a incorporação de ar, o que proporciona a formação de poros na pasta de cimento com seu endurecimento.

A porosidade aberta influencia e contribui nos resultados do concreto permeável, pois forma um sistema de vazios com a interligação dos poros, pelo qual conduz água por seu interior. A porosidade fechada não acarreta em contribuições nos resultados e desempenho das misturas permeáveis, poros vazios atuam de maneira isolada, o que não permite a interligação entre poros, não beneficiando a infiltração de água (JOSHAGHANI *et al.*, 2015). A porosidade total do concreto permeável é composta pelos vazios presentes na porosidade aberta, fechada e vazios de pasta. Sua compreensão é de grande importância na produção de concreto poroso, pois interfere na permeabilidade e resistência mecânica do material (MIKAMI, 2022).

A quantificação da porosidade total e efetiva pode ser obtida por diferentes métodos, dependendo do autor e normativa. A norma ASTM C1754 (ASTM, 2012) fornece um procedimento para determinar a porosidade e quantificar os vazios presentes em concretos permeáveis. O método foi padronizado com base no teste proposto por Montes, Valavala e Haselbach (2005), que consiste em realizar a pesagem hidrostática de amostras de concreto poroso.

A porosidade afeta diretamente a permeabilidade e resistência mecânica do concreto drenante. Sendo diretamente proporcional a permeabilidade, quanto maior for a porosidade melhor será o desempenho hidráulico do concreto. Porém, em contrapartida e sendo inversamente proporcional à resistência mecânica, que apresenta redução com o aumento da porosidade. O aumento da porosidade proporciona benefícios às propriedades hidráulicas, porém os prejuízos causados as

propriedades mecânicas podem impossibilitar a utilização de misturas em pavimentos, por não atingirem o mínimo recomendado (MIKAMI, 2021).

2.1.2 Permeabilidade

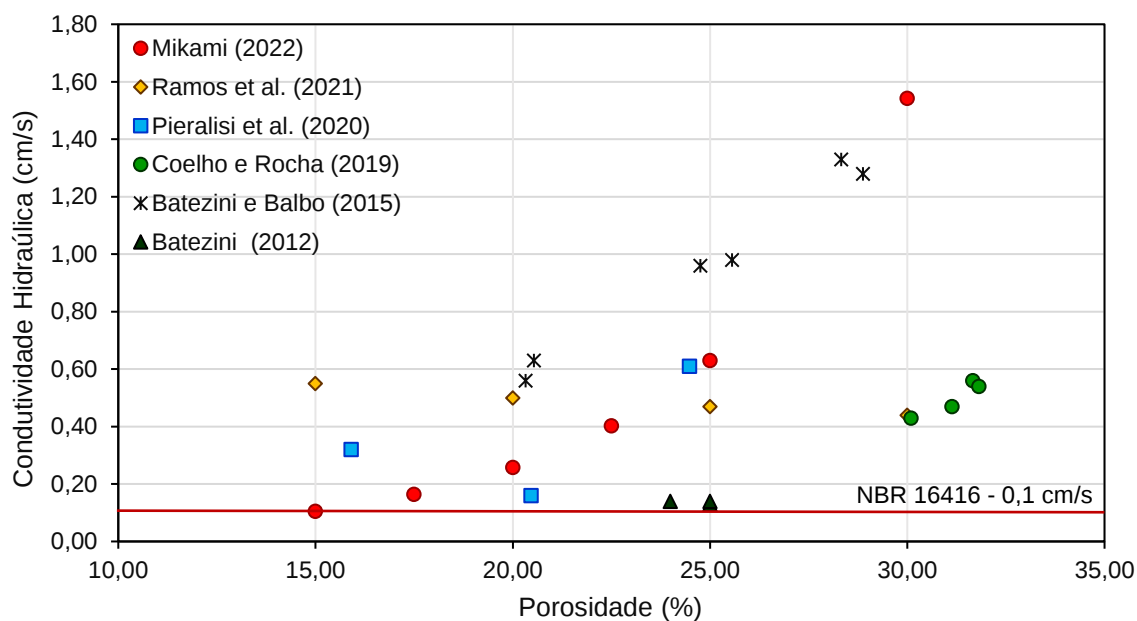
A permeabilidade é definida como a capacidade de drenagem do material, sendo uma das principais características para produção de concreto permeável, que provém da rede de vazios formada pelos espaços presentes entre os agregados graúdos (FURTADO *et al.*, 2020). A eficiência de um pavimento drenante é quantificada pelo coeficiente de permeabilidade também denominado condutividade hidráulica.

Os materiais utilizados para produção de misturas permeáveis interferem diretamente nos resultados de coeficiente de permeabilidade quando não existe padrão de controle da porosidade, o tipo, proporção de materiais, a dimensão máxima característica dos agregados influencia o desempenho hidráulico de pavimentos permeáveis. Devido a esta interferência, a porosidade é calculada e projetada para cada tipo de pavimento e método de dosagem (GONÇALVES; LIBARDI, 2013).

A composição granulométrica dos agregados não afeta significativamente os resultados da permeabilidade, pois a diferença da dimensão máxima característica apresenta pequena diferença de resultados, se utilizado mesmo parâmetros e valores de porosidade (BATEZINI; BALBO, 2015). Se a porosidade não for um parâmetro constante e controlado, a dimensão do diâmetro dos grãos diminui a permeabilidade de misturas porosas, devido a melhor compactação de agregados graúdos, assim reduzindo o índice de vazios e percolação do água pelo material (COELHO; ROCHA, 2019).

A NBR 16416 (ABNT, 2015) propõe que revestimentos permeáveis, independentemente do tipo, devem possuir coeficiente de permeabilidade superior a 0,1 cm/s. Estudos já desenvolvidos, demonstram que os autores utilizaram valores variando de 0,2 a 1,2 cm/s (IBRAHIM *et al.*, 2014; MIKAMI, 2022; TENNIS; LEMING; AKERS, 2004). Com base nisso, é demonstrado na Figura 4 os valores de condutividade hidráulica relacionados a porosidade de projeto.

Figura 4 - Relações entre porosidade e a condutividade hidráulica de concretos permeáveis



Fonte: O autor.

Aumentar a porosidade viabiliza o desenvolvimento de concretos permeáveis com melhor desempenho hidráulico. Esse fato é notado na Figura 4, para os autores Mikami (2022) e Batezini e Balbo (2015) a utilização de valores crescentes para porosidade possibilitou reduzir o tempo de percolação da água sobre a superfície, assim aumentando a condutividade hidráulica. Sendo o mínimo normativo de 0,1 cm/s requisitado para condutividade, existe a margem de adequação da porosidade, para que haja eficiência hidráulica e a resistência mecânica simultaneamente. Sendo possível desenvolver pavimentos permeáveis que atendam os dois parâmetros, com valores assim dos mínimos requisitados.

2.1.3 Resistência Mecânica

A NBR 16416 (ABNT, 2015) especifica a resistência mecânica mínima que os diferentes tipos de pavimentos permeáveis devem possuir, para conseguir suportar as tensões aplicadas pelo tráfego leve de veículos ou de pedestres, e junto disto, determina a espessura mínima que o pavimento pode possuir devido ao seu tipo de solicitação. Para calçamentos com tráfego de pedestres o pavimento deve possuir espessura mínima de 60 mm, vias para tráfego leve de veículos a espessura mínima deve ser 80 mm e resistência mecânica característica maior igual a 20 MPa. No

Quadro 3 é demonstrado a resistência mecânica e espessura requisitados pela NBR 16416 (ABNT, 2015).

Quadro 3 - Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência mecânica característica (MPa)
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60	$\geq 35,0$
	Tráfego leve	80	
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	$\geq 20,0$
	Tráfego leve	80	
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	$\geq 2,0$
	Tráfego leve	80	
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60	$\geq 1,0$
	Tráfego leve	100	$\geq 1,0$

Fonte: Adaptado da NBR 16416 (ABNT, 2015)

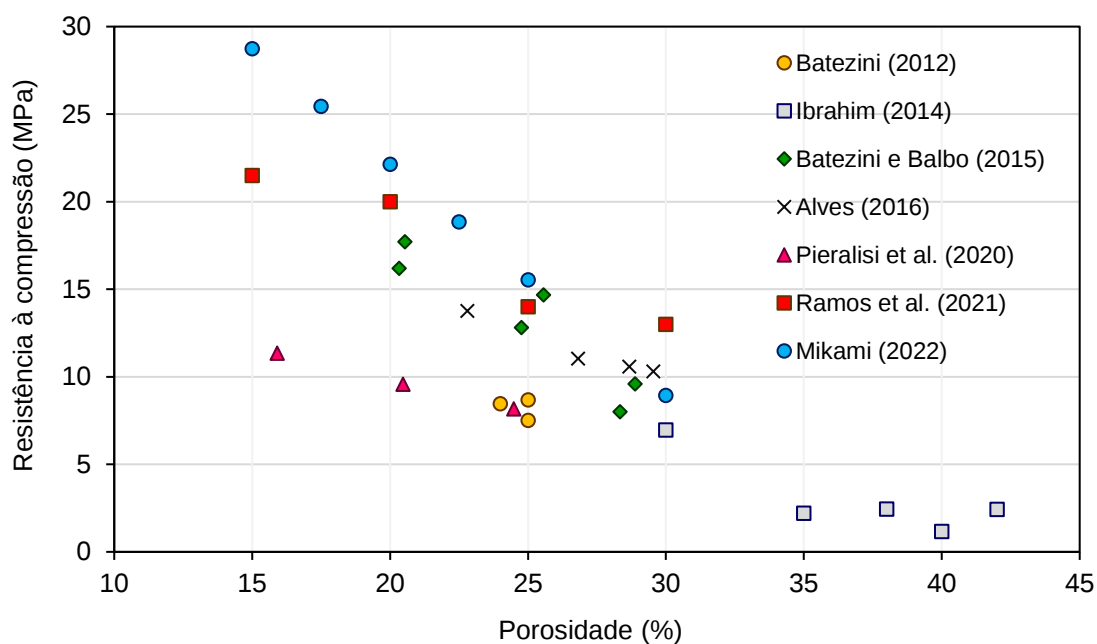
A resistência mecânica é considerada uma propriedade fundamental para o pavimento permeável, estando atrelada a porosidade. Essa propriedade é inversamente proporcional a porosidade, e tendo isto em vista, é necessário que ocorra o controle do volume de poros para que concreto seja funcional e tenha comportamento adequado quando solicitado por tensões de deformação. A

Figura 5 exemplifica o comportamento da resistência mecânica comparando a porosidade estabelecida, por diferentes autores. A aplicação de concreto poroso em pavimentos é limitada por essa propriedade, o índice de vazios inviabiliza a obtenção de valores maiores de resistência, sendo necessário controle da compactação para preservar todas as propriedades de funcionalidade (DINIZ *et al.*, 2021).

Na

Figura 5, observa-se que a adoção de elevados valores para porosidade reduzem a resistência ao ponto de não atender o mínimo de 20 MPa, estipulado pela NBR 16416 (ABNT, 2015). Pavimentos permeáveis, apenas são considerados funcionais se atenderem ao mínimo de resistência para suportar as tensões aplicadas na superfície pelo tráfego. Com base nos valores presentes na literatura, utilizar porcentagens menores permite melhor desempenho mecânico. Essa propriedade pode ser ajustada linearmente através de regressões simples, sendo recomendados a utilização de uma quantidade adequada de amostragem para determinar o valor ideal para porosidade e obter resultados que atendam a resistência mínima.

Figura 5 - Relação porosidade e resistência mecânica de concretos permeáveis



Fonte: O autor.

A proporção de aglomerante utilizado no preparo de concreto permeável interfere nos resultados de resistência, pois é necessário que a mistura possua uma quantidade mínima de pasta para envolver o agregado e garantir que o desempenho mecânico na sua aplicação e utilização, conforme ACI 522R (CÔMITE ACI 522, 2010). Diferente da porosidade, a proporção de aglomerante é diretamente proporcional ao desempenho da propriedade mecânica. Na Figura 6 é demonstrado o preenchimento dos poros devido ao volume de pasta de cimento em excesso, assim prejudicando a permeabilidade do concreto.

Figura 6 - Amostra transversal de concreto permeável com excesso do volume de pasta de cimento



Fonte: (TORRES; HU; RAMOS, 2015).

Apesar de o volume de pasta de cimento contribuir para melhorar a resistência do concreto, recobrando os agregados, sua proporção em excesso prejudica o desempenho hidráulico. O volume de pasta deve ser calculado buscando melhorar a resistência, sem preencher a rede de vazios interligados presente entre os grãos de agregados (TORRES; HU; RAMOS, 2015).

2.2 MÉTODOS DE DOSAGEM

As metodologias de dosagem de concreto permeável possuem objetivos diferentes, variando de acordo com o autor proponente. A maioria dos métodos consistem em determinar um objetivo a ser alcançado ou fixado. Na maioria dos métodos propostos, os autores focam em fixar a porosidade de projeto, para controlar as características e propriedades das misturas (MIKAMI, 2022).

As diferenças entre os métodos de dosagem implicam em restrições nos materiais que são viáveis de utilizar, sendo assim necessário realizar ajustes para aplicar os diferentes materiais na composição de concretos porosos. Os principais estudos presentes na literatura buscam estabelecer ou fixar uma porosidade, relação água/cimento, relação agregado grão/cimento para controlar propriedades hidráulicas ou mecânicas (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016; MIKAMI, 2022).

2.2.1 Método do American Concrete Institute (ACI)

O American Concrete Institute, desenvolveu uma metodologia de dosagem utilizando relações de volumes entre os componentes do concreto, que publicou na ACI 522R (COMITÊ ACI 522, 2010). O desenvolvimento das relações volumétricas depende diretamente do tamanho e distribuição granulométrica dos agregados, pois essas características afetam a compacidade do material. Sabendo a compacidade do material é possível quantificar o volume de agregado na mistura de concreto poroso. Porém, não é possível aplicar essa metodologia para diferentes tipos de agregados, somente aqueles que se enquadram dentro dos limites estipulados pela ASTM C33 (ASTM, 2018).

A quantificação do volume de pasta de cimento é determinada utilizando um ábaco, no qual é feita uma correlação entre a porosidade fixada de projeto e o grau

de compactação aplicado. O foco deste método é obter misturas de concreto permeável com porosidade e massa específica projetadas.

2.2.2 Método de Nguyen *et al.* (2014)

A metodologia desenvolvida por Nguyen *et al.* (2014), consiste num processo de dosagem que foca na quantidade pasta de cimento que recobre o agregado gráúdo, especificando a espessura de recobrimento que forneça bom intertravamento entre agregados. Esse procedimento de dosagem de concreto permeável permite realizar a determinação da relação/cimento que melhor recubra os agregados gráúdos. Esse modelo possibilita evitar o tamponamento dos vazios intergranulares, através do controle do volume da pasta de cimento.

O cálculo da quantidade dos materiais que compõem o concreto permeável, por este método, baseia-se em coeficientes “k” e na porosidade de projeto. Esse coeficiente relaciona o tamanho do agregado gráúdo e a espessura de pasta de cimento que o recobre.

Os autores propõem que a relação a/c seja determinada realizando um ensaio, misturando uma quantidade de concreto permeável que seja suficiente para preencher uma peneira e realizar vibrações mecânica durante 15 segundos. Após esse procedimento é analisado se ocorreu escoamento de pasta de cimento no fundo da peneira. O ensaio é repetido para diferentes valores da relação água/cimento até que seja percebível escoamento, assim utiliza-se a relação a/c anterior a qual apresentou pasta de cimento no fundo da peneira.

A vantagem desse método é que pode ser aplicado para qualquer tipo de agregado, desta forma sendo possível utilizar materiais de diferentes composições, sendo possível utilizar agregados reciclados com diferentes teores de substituição. Porém, como é um método destinado a produção de peças de pavimentação, tem como limitação a necessidade de ajustar a energia de compactação para adequar a porosidade.

2.2.3 Método de Mikami (2022)

O método do grau de compactação, proposto por Mikami (2022), consiste num processo de dosagem que relaciona as propriedades dos materiais que compõem a

mistura permeável, sendo desta forma, possível fixar a porosidade para o preparo de concretos porosos. Esse método foi elaborado utilizando as relações volumétricas dos materiais que compõem o traço do concreto.

Para esse método é necessário realizar o teste de drenagem da pasta de cimento, pelo procedimento proposto por Nguyen *et al.* (2014). Nele são selecionados os valores iniciais para relações g/c e a/c, com os quais são utilizados para selecionar a quantidade de material para preencher uma peneira e realizar o teste de escoamento de pasta de cimento. Determinada a relação a/c ideal para que haja o encobrimento adequado do agregado graúdos pela pasta de cimento.

Na sequência do procedimento é definido o traço piloto, utilizando os dados de caracterização dos materiais constituintes, com isso é calculado o volume efetivo de agregado. Com isso, é determinado o grau de compactação, pelo teste de compactação que analisa o concreto no estado fresco, que fornece as informações de massa específica aparente e porosidade. Através das relações volumétricas é calculado a quantidade de cada material necessário para produzir misturas de concreto permeável, com o traço corrigido.

2.3 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO

A construção civil faz parte dos setores industriais que movem a economia brasileira, com a execução de diversos serviços e projetos (HALPIN; WOODHEAD, 2017). O avanço do setor é consequência da evolução ao longo da história, com a transformação e adequação do ambiente urbano em cada época, em busca de inovação e desenvolvimento de novos empreendimentos. Entretanto, o desenvolvimento da construção civil ocasiona impactos na urbanização das cidades, através de novos empreendimentos e geração de novos empregos (MARTINS; MELO, 2019).

Em contrapartida, por mais que o desenvolvimento urbano seja algo positivo para a sociedade, seu crescimento descontrolado e desorganizado com os anos causa preocupação com a produção em média de 15 a 30% de resíduos do total produzido no mundo oriundos da construção civil. Além, da alta demanda de extração de recursos naturais não renováveis, que são insumos para essenciais as atividades construtivas do setor (WAHI *et al.*, 2016).

2.3.1 Classificação dos Resíduos de Construção e critérios de normas

Conforme a NBR 15116 (ABNT, 2021a), resíduos de construção são definidos como materiais oriundos da execução de construções, reformas, demolições de serviços da construção civil. Tais resíduos podem ser beneficiados para produção de novos produtos ou materiais, como agregado reciclado que consiste num material granular que é aplicado na realização de serviços de pavimentação e em peças de concreto sem função estrutural.

A Resolução CONAMA N° 307 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002) estabelece diretrizes e critérios para o gerenciamento de resíduos de construção civil e demolição, classifica os materiais de acordo com sua origem e destinação e/ou disposição final. Na resolução os resíduos são divididos em quatro classes, de acordo com a viabilidade de sua reciclagem ou reutilização, conforme mostra o Quadro 4.

Quadro 4 - Classificação dos resíduos da construção civil

Classe A	São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados.
Classe B	São os resíduos recicláveis para outras destinações.
Classe C	São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação.
Classe D	São resíduos perigosos oriundos do processo de construção.

Fonte: Adaptado da Resolução 307 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002).

Conforme, a Resolução CONAMA N° 307 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2002) somente os resíduos que se enquadram na classe A podem ser beneficiados, reciclados e reutilizados com agregados:

- a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.

De acordo, com NBR 15116 (ABNT, 2021), o beneficiamento do resíduo classe A pode produzir agregado reciclado, que é dividido em subcategorias, sendo elas agregado reciclado de cimento (ARCI), agregado reciclado de concreto (ARCO)

e o agregado de reciclado misto (ARM). O ARCO é constituído de materiais com predominância de resíduos de concretos, o ARCI consiste num material com predominância de materiais cimentícios diversos, o ARM é constituído por materiais cimentícios e cerâmicos. A mistura de diferentes teores de agregados reciclados e naturais resulta num agregado composto, que ajusta a curva granulométrica com base nas características. Já os agregados totais reciclado possuem toda a sua composição de material reciclado de resíduo classe A.

O agregado reciclado de concreto (ARCO) precisa seguir requisitos estipulados pela NBR 15116 (ABNT, 2021a), para controlar a absorção do material que precisa ser inferior a 7%, seguindo os procedimentos de ensaio propostos pela NBR 16917 (ABNT, 2021b). O teor de material finos ($<0,075$ mm) possui o limite estipulado de 10% da massa total do agregado graúdo, em caso de lavagem esse teor não pode ultrapassar o limite 1% da massa total, conforme propõem a NBR 7211 (ABNT, 2022).

Os resíduos da construção, no seu estado bruto, não podem ser utilizados. Tendo em vista isso, é necessário realizar processos de beneficiamentos que viabilizem sua aplicabilidade em outros processos. Para o beneficiamento de resíduo de concreto é necessário realizar a britagem do material, sendo com isso possível obter agregados ARCO e ARM. A escolha do tipo de britador é feita pelo tipo de equipamento disponível e analisando o formato de agregado que se espera obter com o processo de britagem. O tipo de equipamento utilizado influencia as características e propriedades do agregado reciclado produzido, pois o processo de produção pode preservar a camada de pasta de cimento que envolve o agregado ou removê-la. A camada que envolve o agregado reciclado afeta o comportamento da mistura, pois influencia na absorção e porosidade do material (KRUGER, 2021; SALESA *et al.*, 2017).

2.3.2 Características do ARCO

Devido a sua composição, o ARCO apresenta em sua maioria uma camada de pasta de cimento que envolve o agregado. Com isso, o material produzido por beneficiamento de resíduo de concreto apresenta porosidade, absorção e densidade diferentes em comparação ao agregado natural. O aumento do índice de vazios pode ser prejudicial para trabalhabilidade de misturas de concreto, sendo necessário um

incremento maior de água para obter consistência e coesão, assim reduzindo a resistência mecânica devido ao aumento da relação a/c.

A absorção do agregado está atrelada a sua composição. Como já visto, é comum que ARCO apresentem uma camada envoltória de pasta de cimento o que aumenta consideravelmente a porosidade da mistura (DI DOMENICO *et al.*, 2018). Com base nisso, são implementadas medidas de mitigação, a fim de contornar o efeito na trabalhabilidade da mistura e reduzir a proporção de água incorporada para obter consistência apropriado para executar o espalhamento e adensamento correto.

O beneficiamento de resíduos de concretos ocasiona a produção de agregado com uma maior quantidade de finos e a NBR 15116 (ABNT, 2021a) estipula limites no teores que o ARCO pode possuir em sua composição granulométrica. A quantidade excessiva de material passante na peneira de 75 micrometros prejudica a consistência e a trabalhabilidade de misturas de concreto, pois para preservar essas propriedades é necessário aumento da relação a/c. A quantidade de água adicionada a mais reduz consideravelmente a resistência mecânica de concretos. A NBR 15116 (ABNT, 2021a) estipula que o a composição granulométrica de ARCO não pode possuir 10% de teor de finos ($<0,075$ mm).

Materiais pulverulentos influenciam diretamente as características dos agregados reciclados, pois o teor de finos afeta as propriedades de misturas de concretos e argamassas. O teor de finos prejudica as propriedades no estado fresco, reduzindo a consistência e coesão de concretos, tornando a mistura menos trabalhável e dificultando sua aplicação e adensamento (KRUGER *et al.*, 2020).

2.3.3 Pré-molhagem

A NBR 15116 (ABNT, 2021a), recomenda que o agregado reciclado passe por um processo de pré-molhagem para poder ajustar as propriedades das misturas de argamassas e concretos, podendo citar entre elas, a trabalhabilidade, consistência, coesão e perda de abatimento. A norma permite a utilização de agregados sem a saturação prévia desde que haja correção da quantidade de água da mistura, porém a adição não pode ser acrescida na relação a/c que compõem o traço de concretos. Então, a água absorvida pelo ARCO deve ser desconsiderada para o cálculo da mistura.

O processo de pré-molhagem ameniza a absorção de água, que ocorre devido ao ARCO possuir um teor maior de material pulverulento e é um material mais poroso, em comparação a agregados naturais, sendo assim processos de saturação prévia são aplicadas para amenizar os efeitos nas propriedades das misturas de concretos (PADOVAN, 2013). Os autores Poon, Shui e Lam (2004), Etxberria *et al.*, (2007), Padovan (2013) recomendam que haja a pré-molhagem de agregado reciclados para reduzir a água que é absorvida, que foi calculada no traço para realizar a hidratação do cimento, tornar a mistura homogênea e trabalhável.

O processo de pré-molhagem de imersão dos agregados, consiste em deixar o agregado submerso em água de modo que a sua superfície fique saturada, reduzindo o sequestro de água de hidratação da mistura. O tempo de imersão varia de acordo com o pesquisador, pode variar de 10 minutos a 24 horas, essa variação ocorre em função da redução da absorção do agregado reciclado, para que seja amenizado os prejuízos as propriedades da mistura de concretos (SILVA; CAPUZZO, 2020).

2.3.4 Aplicação de agregados reciclados e seu uso em concretos permeáveis

Os agregados reciclados possuem diferentes finalidades e aplicações, pode ser utilizado nas camadas granulares de pavimentos, em misturas de argamassas e concretos. Mas, a utilização desses materiais requerem cautela devido a influência nas propriedades das misturas, provocando diversos comportamentos no estado fresco e endurecido que devem ser analisados (KRUGER, 2021). O ARCO também pode ser aplicado como camada de cobertura de aterros sanitários, realizando a combinação com solo argiloso compactado para evitar a saída de gases (NASCIMENTO *et al.*, 2021).

O agregado reciclado tem sua utilização direcionada para peças de pavimentação, podendo incorporar teores do material na mistura para produção de blocos de concreto convencional ou permeável (BRASILEIRO *et al.*, 2020). É viável a substituição do agregado natural pelo reciclado para produção deste tipo de pavimento, com o controle do método de dosagem é obtido misturas com bom desempenho para a resistência mecânica e condutividade hidráulica. Para condutividade hidráulica quanto maior for a relação a/c menor será o desempenho da mistura (PEREIRA; BARBOSA, 2015). Pode ser realizada a substituição total ou

parcial do agregado natural pelo reciclado, desde que ocorra o controle do desempenho das propriedades do concreto permeável (STRIEDER, 2021).

A utilização de agregado reciclado em pavimentos permeáveis é viável, porém o processo de dosagem deve ser realizado com cautela, as características do ARCO causam alterações nas propriedades de misturas do concreto permeável (TAVARES; KAZMIERCZAK, 2016). Pois a substituição do agregado natural por reciclado pode implicar na redução da resistência mecânica. A diminuição do desempenho estrutural pode ser atrelada a zona de transição do agregado ou a penetração de pasta de cimento nos poros presentes no agregado reciclado (TAVARES; KAZMIERCZAK, 2016).

3 METODOLOGIA

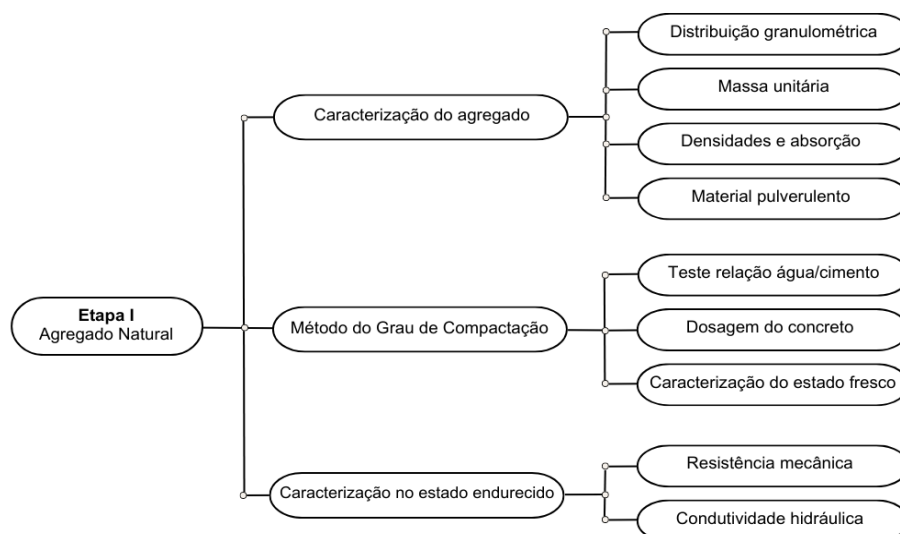
O objetivo deste estudo foi determinar como a incorporação de agregado reciclado de concreto, em diferentes teores, interfere nas propriedades de concretos permeáveis, utilizando o método de dosagem proposto por Mikami (2022). Para isso, foi analisada a funcionalidade das peças de concreto poroso, verificando-se os parâmetros mínimos de resistência mecânica e o desempenho hidráulico requisitado pela NBR 16416 (ABNT, 2015).

Para produção de concreto permeável usualmente utiliza-se os mesmos materiais que são utilizados para o preparo de concretos convencionais. Nesta pesquisa foi introduzido um resíduo de construção e demolição na forma de ARCO nas misturas de concreto poroso.

O uso de agregado natural proporciona um desempenho mecânico e hidráulico específico. Com a introdução de diferentes teores ARCO, as características das misturas são alteradas, interferindo no desempenho de suas propriedades. Com isso, neste estudo foram realizadas as incorporações de quatro diferentes teores de agregado reciclado de concreto (25, 50, 75 e 100%) na mistura de concreto permeável e verificado quais obtiveram melhores resultados nos ensaios.

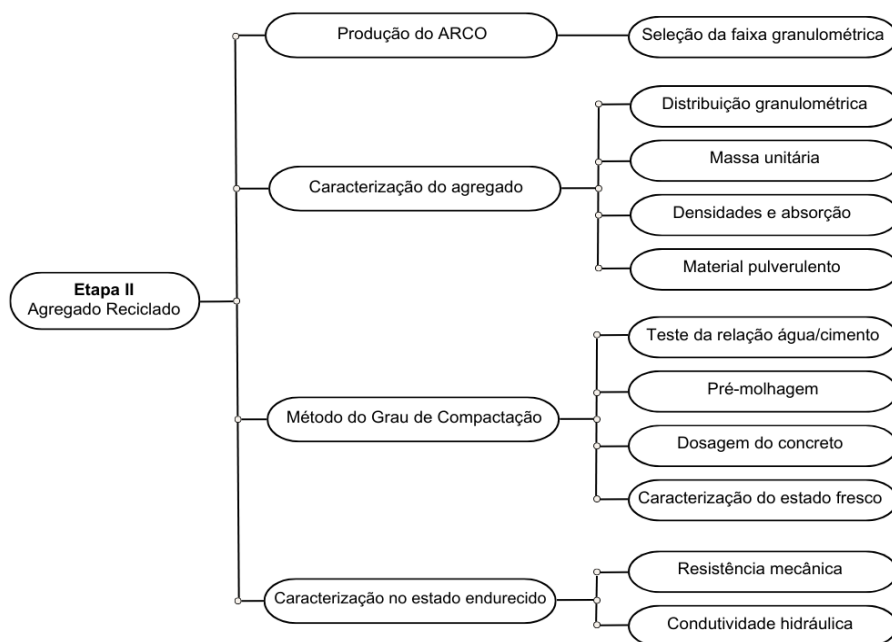
Como o agregado reciclado possui uma porosidade superior à de agregados naturais, torna-se mais notável a diferença entre as densidades aparente e seca. Dessa forma, o método de dosagem de concretos permeáveis deve ser ajustado para considerar essas particularidades dos materiais reciclados. Dessa forma, foram realizados três traços utilizando a densidade aparente (REF, 50ARDA e 100ARDA) e quatro traços utilizando a densidade seca (25ARDS, 50ARDS, 75ARDS e 100ARDS). A execução da pesquisa seguiu os fluxogramas demonstrados nas Figura 7 e Figura 8.

Figura 7 - Estrutura da primeira etapa, com utilização de agregado natural



Fonte: O autor.

Figura 8 - Estrutura da segunda etapa, com incorporação de agregado reciclado



Fonte: O autor.

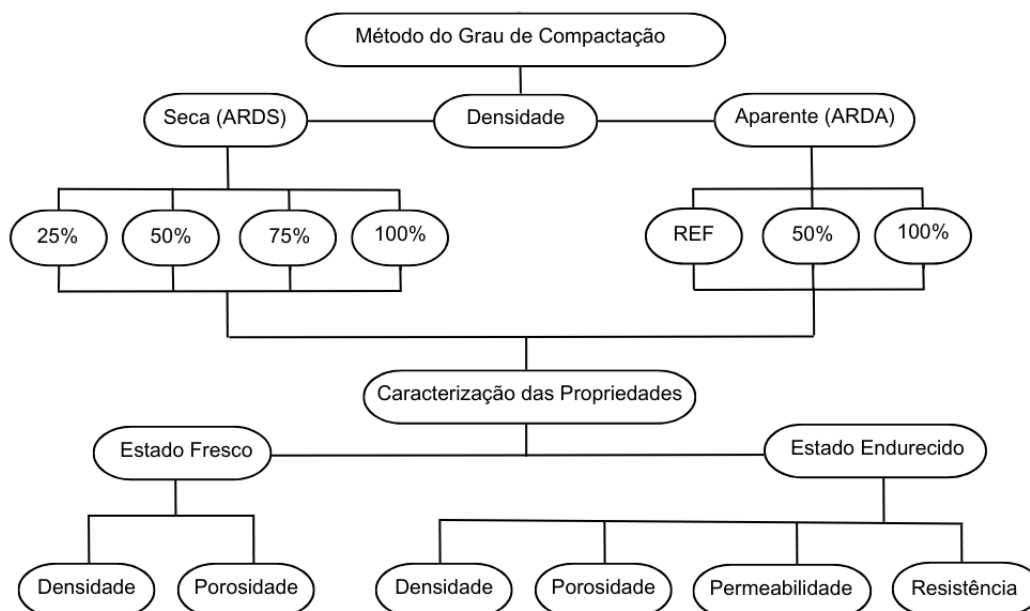
A elaboração deste estudo foi dividida em duas etapas. A Etapa I (Figura 7) teve por objetivo caracterizar o agregado natural, analisando seu comportamento nos ensaios, para compreender como suas características físicas afetam no processo de dosagem de concretos permeáveis. Na Etapa II (Figura 8) o objetivo foi produzir, caracterizar e analisar o comportamento do agregado reciclado de concreto. A

caracterização ocorreu repetindo os ensaios da Etapa I, para analisar o comportamento de suas propriedades e comparar com os resultados do agregado natural, determinando a porcentagem incorporada que conseguiu obter melhor desempenho.

O método do grau de compactação (MIKAMI, 2022) foi a base para dosagem do concreto permeável. Através desse método foram definidos os procedimentos e métodos de caracterização dos materiais utilizados, para a elaboração desta pesquisa. O concreto permeável produzido foi utilizado para fabricação de peças de pavimentação, as quais foram caracterizadas no estado endurecido para determinar seus desempenhos mecânico e hidráulico.

As incorporações de ARCO ocorreram nas seguintes porcentagens: 0 (Concreto Referência), 25, 50, 75 e 100%. Devido ao agregado reciclado possuir elevada porosidade, que provoca o aumento da absorção, é necessário considerar que a composição do material pode provocar mudanças no comportamento das misturas permeáveis. Tendo isto, a Figura 9 demonstra para quais traços foram usadas as duas hipóteses de densidade.

Figura 9 - Fluxograma das hipóteses DA e DS



Fonte: O autor.

Foram levantadas duas hipóteses devido ao aumento da porosidade afetar a dosagem do concreto permeável. Sendo considerados duas situações diferentes envolvendo a incorporação de ARCO:

- a) Densidade seca (DS): O uso da pré-molhagem satura os poros presentes nos agregados grãos, evitando o sequestro da água de mistura. Preservando a porosidade intergranular constante;
- b) Densidade aparente (DA): Os poros dos agregados são parcialmente preenchidos pela pasta de cimento, durante o processo de dosagem.

3.1 MATERIAIS

Para a produção da mistura do concreto permeável, é necessário a caracterização dos materiais constituintes, sendo eles cimento, agregado natural e reciclado. Para esta pesquisa foi decidido pela utilização do pedrisco (brita 0) como agregado natural. O pedrisco apresenta menor variabilidade experimental, pois sua dimensão é compatível ao molde e não é necessário ajustes em sua composição granulométrica. Já, o ARCO foi produzido através da britagem de corpos de prova de concreto convencional, em um britador do tipo mandíbula (Figura 10), usando a menor abertura por produzir mais material na faixa granulométrica 4,75/12,5 mm, mesma dimensão do pedrisco, agregado natural utilizado nesta pesquisa. O material produzido foi quarteado antes da realização dos ensaios de caracterização.

Figura 10 - Britador mandíbula



Fonte: O Autor.

Os ensaios desenvolvidos nesta pesquisa e suas normatizações estão dispostos na Quadro 5, sendo que foram realizadas as caracterizações para os dois tipos de agregados.

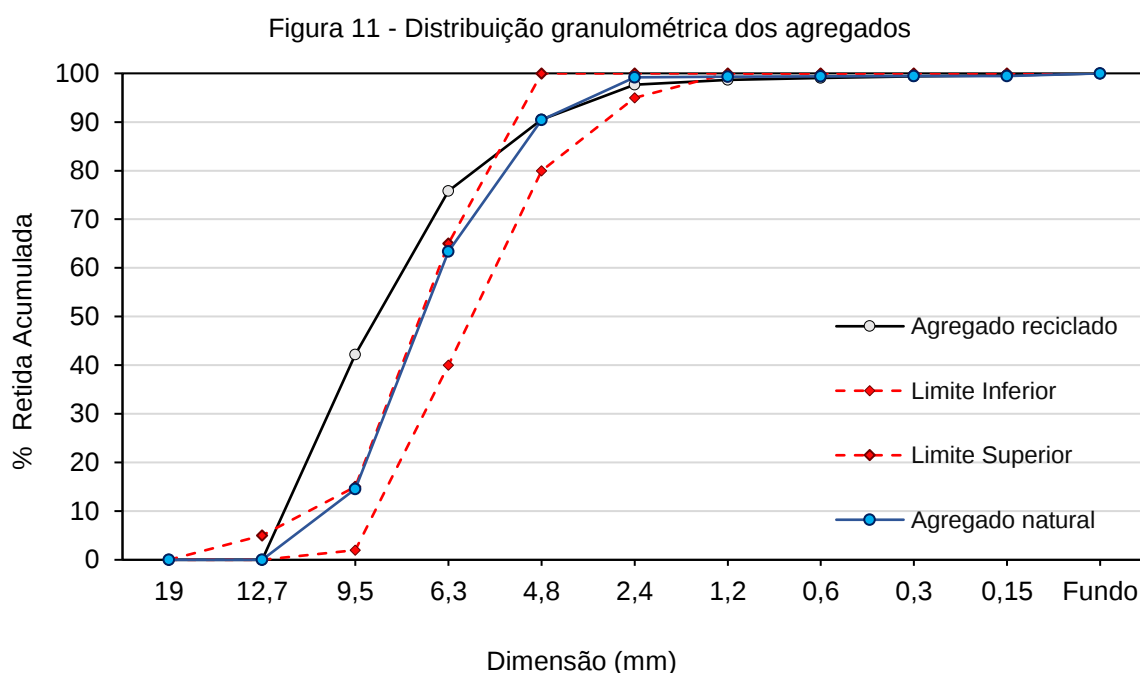
Quadro 5 - Ensaios de caracterização

Propriedade	Métodos
Distribuição granulométrica	NBR 7211 (ABNT, 2022)
Massa Unitária	NBR 16972 (ABNT, 2021c)
Densidade	NBR 16917 (ABNT, 2021b)
Absorção	
Material pulverulento	NBR 16973 (ABNT, 2021d)

Fonte: O autor.

3.1.1 Caracterização de granulometria dos agregados graúdos

O ensaio de caracterização da distribuição granulométrica do agregado natural foi realizado com o peneiramento de uma amostra de 5 kg. Para produção de misturas de concreto permeável, como já mencionado, foi decidido pela utilização de pedrisco (brita 0) para estudo do comportamento do agregado graúdo natural. A NBR 7211 (ABNT, 2022) especifica que o material deve possuir limites de composição dentro da zona granulométrica 4,75/12,5 mm. Com base nisso, foi verificado a distribuição granulométrica dos agregados, que são ilustradas na Figura 11.



Fonte: O autor.

Analisando os resultados do ensaio de granulometria, o agregado utilizado possui composição dentro da zona granulométrica de 4,75/12,5 mm, sendo apropriado para confeccionar concretos permeáveis. Na análise da granulometria, 10% do material experimentado apresentou dimensão inferior a 4,75 mm, sendo enquadrado na faixa de distribuição de agregado miúdo, também conforme NBR 7211 (ABNT, 2022). Embora tenha apresentado quantidades de agregado miúdo, a pequena porcentagem não inviabilizou a produção de peças de concreto permeável, por ser quantidade insuficiente para afetar as propriedades do concreto.

Comparando os resultados do ensaio de granulometria, o agregado reciclado apresentou 9,48% de material miúdo. Sendo assim, uma porcentagem maior que o resultado do agregado natural, que pode ser justificada através do processo de beneficiamento de resíduo. Essa porcentagem maior de agregado miúdo, implica numa absorção maior, fazendo-se necessário o aumento da proporção de água da mistura (BATISTA *et al.*, 2022).

3.1.2 Teor de material pulverulento

A determinação de material pulverulento ocorreu com base na NBR 16973 (ABNT, 2021d), para o agregado natural e reciclado, para ser possível ponderar a necessidade de correções da relação água/cimento. Para o ensaio, três amostras foram lavadas, sobre fluxo de água contínuo, cada uma contendo 1000 gramas de material. Com os valores obtidos após secagem em estufa, foi calculada a média aritmética, para obter o teor de materiais finos. Os resultados do ensaio são demonstrados na Tabela 1, junto dos limites estipulados pela NBR 7211 (ABNT, 2022) para cada tipo de material.

Tabela 1 - Teor de material pulverulento dos agregados

Agregado	Limite (%)	Teor de finos (<0,075 mm)
ARCO	< 10	2,86
Natural	1	0,85

Fonte: O autor.

O teor de partículas finas ficou a baixo do limite estipulado pela NBR 7211 (ABNT, 2022). Assim, ambos os agregados são adequados para produção de

misturas do concreto permeável, quanto a proporção de grãos menores que 0,075 mm.

3.1.3 Caracterização das propriedades físicas

Na Tabela 2 são demonstradas as características físicas obtidas após ensaios de caracterização do pedrisco e do ARCO. Na Tabela 2 são descritos os valores da absorção e as densidades aparente, superfície saturada e seca, que foram ensaiadas e obtidas conforme a NBR 16917 (ABNT, 2021b). Também é descrita a massa unitária nos estados solto e compactado, e índice de vazios, obtidos conforme NBR 19672 (ABNT, 2021).

Tabela 2 - Caracterização dos agregados e propriedades obtidas

Agregado	Densidade				Massa Unitária		Índice de Volume de Vazios	
	AB	A	SS	S	ES	EC	ES	EC
	(%)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	(%)
Natural	1,27	2,90	2,93	3,01	1,52	1,65	35,47	32,68
ARCO	7,65	2,25	2,42	2,71	1,26	1,37	42,95	39,25

Nota: AB – Absorção; A – Aparente; SS – Superfície saturada; S – Seca; ES -Estado solto; EC – Estado compactado.

Fonte: O autor.

Percebe-se, comparando as densidades e massa unitárias presentes na Tabela 2, que o agregado reciclado apresentou valores inferiores aos resultados do agregado natural. O fato de o agregado reciclado possuir densidade e massa unitária menor em comparação ao agregado natural, resulta na redução do consumo de cimento e em contraposição ocorre o aumento da absorção (SILVA; LUNA DE MELO, 2020).

Sendo assim, é necessário aplicar métodos que minimizem a absorção, como o processo de molhagem inicial, para a preservação de valores da relação água/cimento. Com o aumento do índice de vazios e absorção a relação/água cimento pode apresentar grande variação, quando as características físicas do agregado reciclado não são mitigadas (FROTTE *et al.*, 2017). O aumento da quantidade de

vazios implica na redução da resistência, pois os poros presentes nos agregados podem afetar a mistura de concreto permeáveis de maneiras diferentes. Neste caso, seu preenchimento pode ocorrer pela água de mistura ou pela pasta de cimento, prejudicando o recobrimento dos grãos (MIKAMI, 2021).

A densidade e massa unitária possuem um impacto direto na dosagem do concreto permeável. Pelo método de dosagem de grau de compactação, proposto por Mikami (2022), esses dados afetam a quantidade de material utilizado no traço. Por isso, é necessário correlacionar essas informações dos dois agregados utilizados, no traço de uma mistura.

Para as misturas de concreto permeável com incorporação de ARCO, é realizado a mistura dos materiais para obter informações sobre massa unitária e densidade, ponderada de acordo com as proporções de cada material. Esse procedimento é repetido para os quatro teores de incorporação de ARCO.

3.1.4 Aglomerante

O aglomerante empregado para produção do concreto permeável foi o cimento CP II F 32. Esse cimento é de uso geral, suas características físico-química, são fornecidas pelo fabricante e demonstradas na Quadro 6.

Quadro 6 - Características físico-químicas do aglomerante CP II F 32

Finura		Tempo de Pega			Caracterização Química		
Blaine	Retido #200	Retido #325	Início de Pega	Fim de Pega	MgO	SO ₃	Perda ao Fogo
(cm ² /s)	(%)	(%)	(min)	(min)	(%)	(%)	(%)
4280	3,3	11,9	313	374	4	2,6	11,5

3.2 MOLDAGEM E ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os moldes dos corpos de prova, utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa possuem dimensões de 15x15x6 cm (Figura 12), com volume igual a 1350 cm³ e classificado como peça de pavimentação, conforme a NBR 9781 (ABNT, 2013). O molde possui a espessura mínima requisita pela NBR 16416 (ABNT, 2015), para peças de concreto permeável.

Para assegurar a confiabilidade dos resultados dos ensaios, para cada traço foram moldadas 10 amostras de concreto permeável, das quais cinco foram para o ensaio de resistência mecânica e as outras cinco para o ensaio da taxa de infiltração. A moldagem foi realizada com o preenchimento dos moldes com concreto permeável e compactados a fim de possuírem o grau de compactação calculado.

Figura 12 - Moldes dos corpos de provas



Fonte: O autor.

O grau de compactação estipulado para o traço referencial, serviu de base para os traços subsequentes. Para buscar manter os valores com pouca divergência do referencial.

Para esta pesquisa foi utilizada a cura úmida com plástico filme. O procedimento consistiu em desmoldar após 24 horas, umedecer as amostras mergulhando-as em um recipiente com água e em seguida armazená-las envolvidas por um plástico para preservar e prevenir a perda acelerada de umidade para o ambiente. A caracterização das amostras ocorreu pelos métodos descritos no Quadro 7.

Quadro 7 - Métodos de caracterização das propriedades de concreto permeável

Propriedade	Normativa	Ensaio
Resistência mecânica	NBR 9781 (ABNT, 2013)	Compressão axial
	NBR 16416 (ABNT, 2015)	
Taxa de infiltração	NBR 16416 (ABNT, 2015)	Taxa de infiltração
Porosidade	ASTM C1754 (2012)	Porosidade
Densidade no estado fresco	ASTM C1754 (2012)	Densidade
Densidade no estado endurecido	ASTM C1754 (2012)	Densidade

Fonte: O autor.

A resistência mecânica das amostras foi caracterizada através do procedimento proposto pela NBR 9781 (ABNT, 2013), a qual recomenda a utilização de uma máquina de compressão para o ensaio. Foi utilizada uma prensa mecânica manual para o ensaio de compressão, que permitiu o posicionamento do corpo de prova no centro para aplicação de força controlada até a ruptura por compressão.

A NBR 9781 (ABNT, 2013) permite que seja realizado o capeamento desde que não haja grandes alterações nas superfícies. Com isso, as amostras do concreto permeável foram capeadas (Figura 13) com pasta de cimento para nivelamento das faces das amostras para realização do ensaio de compressão axial e determinar a resistência mecânica.

Figura 13 - Corpo de prova capeado com pasta de cimento



Fonte: O autor.

O ensaio ocorreu 28 dias após a moldagem, ao fim do período de cura do concreto. Os resultados obtidos são validados com base nos valores de resistência mínima requerida para pavimentos permeáveis, indicados pela NBR 16416 (ABNT, 2015).

A NBR 16416 (ABNT, 2015) solicita que peça de concreto de pavimento permeável possuam coeficiente de permeabilidade superior a 0,1 cm/s. Para garantir que o pavimento atende ao requisitado é necessário caracterizar o concreto poroso enquanto sua permeabilidade. A caracterização da permeabilidade ocorreu pelo ensaio de taxa de infiltração, que utiliza o anel de infiltração. Assim, desta maneira é determinada a velocidade de percolação de água pela peça de concreto poroso (Figura 14).

Figura 14 - Anel de infiltração de 100 mm (a) e com a base vadada (b)



Nota: O Anel de infiltração deve ter sua parte inferior vedada, para evitar a passagem de água do ensaio, afim de evitar que o resultado seja afetado

Fonte: O autor.

O ensaio utiliza um cilindro vazado de 100 mm e altura de 60 mm, com duas linhas marcadas na parte interna, espaçadas em 20 mm, para controlar o volume de água, o qual deve permanecer entre as duas marcações. O procedimento do ensaio consiste em realizar o despejo controlado de 2 litros de água, cronometrando o tempo necessário para o líquido escoar pelo interior do material. O ensaio é repetido para as cinco amostras de cada traço. O tempo cronometrado é aplicado na Equação 1, que considerando

$$I = \frac{V}{t \times A} \quad (1)$$

3.3 DOSAGEM DE CONCRETO PERMEÁVEL PELO MÉTODO DE GRAU DE COMPACTAÇÃO

As propriedades dos agregados e aglomerantes afetam o comportamento e desempenho das misturas de concreto permeável. Assim, a escolha criteriosa é necessária para assegurar que a aplicabilidade do concreto poroso seja satisfatória e funcional para sua utilização em pavimentos drenantes. Outros procedimentos, como processo de cura e método de compactação interferem nas características da mistura, ambas implicando na resistência mecânica e condutividade hidráulica in loco.

Para esse tipo de concreto, a porosidade interfere na aplicação de misturas e funcionalidade *in loco* do concreto no estado endurecido. A porosidade fixa viabiliza o controle dos parâmetros de dosagem, correlacionando as propriedades dos materiais que compõem o traço. A escolha do método foi baseada pelo processo permitir que ocorra a alteração de agregado. Neste estudo houve a substituição total e parciais do agregado natural pelo reciclado. O método de grau de compactação desenvolvido por Mikami (2022) relaciona os estados de compactação do agregado graúdo e da mistura de concreto permeável. Desta forma, neste estudo ocorreu uma adaptação para possibilitar a incorporação de ARCO.

3.3.1 Método do grau de compactação

O método do grau de compactação, utilizado para a elaboração deste estudo, é um processo que permite associar as propriedades dos materiais que compõem o concreto poroso, fixando a porosidade num valor para produzir misturas. Fixando o valor da porosidade, é possível controlar esse parâmetro no estado fresco e endurecido, utilizando o método de compactação.

A metodologia de dosagem é baseada nos métodos da ACI 522R (CÔMITE ACI 522, 2010) e Nguyen *et al.* (2014), no qual a dosagem é realizada através de relações volumétricas entre agregados, aglomerante e água. Mesmo o processo sendo desenvolvido para concreto permeáveis convencionais, pode ser utilizado para misturas que visem a incorporação de agregado reciclado oriundo de resíduo de construção e demolição, sendo misto ou em sua maior totalidade de concreto.

O desenvolvimento do traço para produção de concreto permeável pelo método do grau de compactação é realizado seguindo uma sequência de equações. Hipoteticamente, a pasta de cimento irá envolver os grãos de agregados durante a produção de concreto permeável, desse modo, além de ocupar irá reduzir os espaços vazios existentes. Entretanto, numa situação real a compactação do concreto permeável é dificultada pela presença de pasta de cimento nos espaços vazios entre o contato de agregados (TORRES; HU; RAMOS, 2015).

A sequência de cálculos para a dosagem de misturas de concreto permeável, é expressa na sequência. Na Tabela 3, são descritas as variáveis utilizadas nas equações.

Tabela 3 - Nomenclatura das variáveis utilizadas no método do grau de compactação

Variável	Unidade	Descrição
a/c	-	Relação em massa água/cimento
Cagg	g/cm ³	Consumo de agregado graúdo por volume de concreto
Ccim	g/cm ³	Consumo de cimento por volume de concreto
dagg	g/cm ³	Densidade do agregado graúdo
dcim	g/cm ³	Densidade do cimento
Gc	-	Grau de compactação do agregado graúdo
Muc	g/cm ³	Massa unitária do agregado graúdo no estado compactado
Pd	%	Porosidade de projeto
Vp	%	Volume de pasta de cimento de projeto
Vv,ef	%	Volume de vazios efetivo do agregado graúdo
Pf,est	g/cm ³	Massa específica estimada no estado fresco
Mm	g	Massa do molde característico
Mc	g	Massa do molde contendo o concreto compactado
Vm	Cm ³	Volume do molde característico

Fonte: O autor.

O grau de compactação depende de fatores como, tipo e nível de compactação, distribuição granulométrica do agregado e volume de pasta. Analisando essas características é determinado o grau de compactação inicial dentro da faixa de valores usuais de 0,91 a 0,94. Relacionando os valores da densidade do agregado graúdo (dagg) e da massa unitária do agregado no estado compactado (Muc), obtidos na etapa de caracterização dos materiais, e o grau de compactação inicial escolhido é calculado o índice de vazios efetivos, como mostra a Equação 2.

$$V_{v,ef} = \frac{d_{agg} - M_{uc} \times G_c}{d_{agg}} \quad (2)$$

O volume de pasta de cimento (Vp) é calculado subtraindo a porosidade de projeto (Pd) do volume efetivo de vazios (Vv,ef), conforme a Equação 3.

$$V_p = V_{v,ef} - P_d \quad (3)$$

O consumo de cimento (C_{cim}) é calculado através da Equação 4. Partindo do princípio que o volume de pasta de cimento (V_p) no concreto é constituído por cimento e água

$$C_{cim} = \left(\frac{V_p/100}{\frac{1}{d_{cim}} + a/c} \right) \quad (4)$$

Utilizando o grau de compactação é estimado o consumo de agregado gráudo (C_{agg}) por metro cúbico, conforme descreve a Equação 5.

$$C_{agg} = G_c \cdot MU_c \quad (5)$$

Relacionando o consumo de cimento com o de agregado é obtido a relação g/c, em massa, conforme mostra a Equação 6.

$$g/c = \frac{C_{agg}}{C_{cim}} \quad (6)$$

Por fim, para estimar a massa específica aparente do concreto ($P_{f,est}$) é necessário a realizar relações com as proporções a/c e g/c, conforme a Equação 7.

$$\rho_f = \left(1 + \frac{1}{g/c} + \frac{a/c}{g/c} + \frac{m/c}{g/c} \right) \times MU_c \cdot G_c \quad (7)$$

Seguindo esta sequência de equações é determinado o traço piloto para misturas do concreto permeável, no qual é calculado a quantidade de materiais necessária para preencher um molde e realizar o teste de compactação, pois é preciso analisar a massa específica do concreto no estado fresco, para poder realizar os ajustes necessários para o traço final. O teste consiste em preencher o molde de corpo de prova com concreto permeável, compactá-lo com a energia recomendada e pesá-lo. O valor obtido para massa da amostra é dividido pelo volume do molde, assim é obtido a massa específica do concreto no estado fresco, conforme mostra a Equação 8.

$$\rho_f = \frac{M_c - M_m}{V_m} \quad (8)$$

Para o traço final o grau de compactação é corrigido, correlacionando o consumo de cimento e a massa unitária do agregado no estado compactado, conforme a Equação 9.

$$G_c = \frac{C_{agg}}{MU_c} \quad (9)$$

Com esses novos valores é corrigido o traço, e assim é obtido o traço final e consumo de materiais necessário para produção das misturas de concreto permeável.

3.4 TRAÇO REFERÊNCIA COM UTILIZAÇÃO DE AGREGADO NATURAL

Para entender o comportamento de misturas do concreto permeável e aplicar o método, foi desenvolvido uma mistura referencial (REF), com porosidade de projeto fixada em 25%, utilizando somente agregado natural. A porosidade de projeto foi fixada em 25% (P25) para que o material produzido possuísse eficiência hidráulica e desempenho adequado para resistência mecânica. A mistura referencial é a base para os demais traços de concreto permeável desenvolvidos, pois não possui ARCO. Com isso, foram adotados os valores de densidade aparente para utilização no método de dosagem, por não ser necessário realizar molhagem inicial do material, para mitigar a absorção.

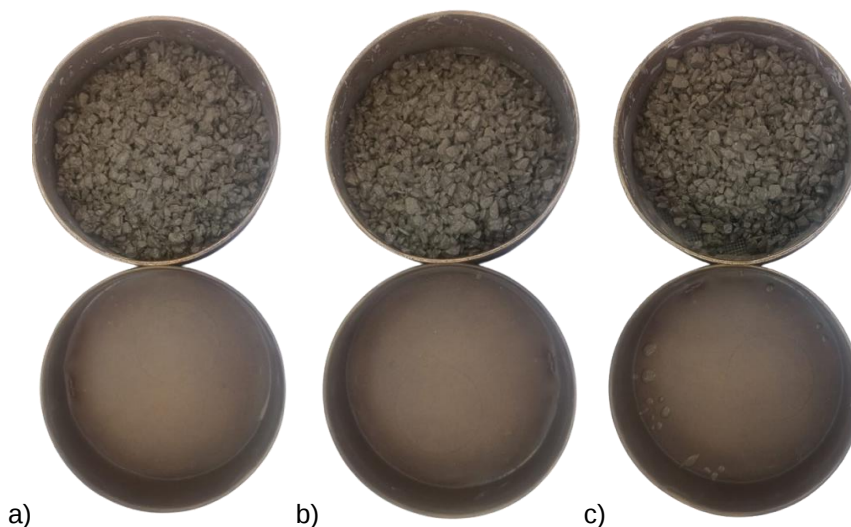
3.4.1 Teste da relação água cimento para agregado natural

Para início do processo de dosagem, é determinada a relação a/c com base no teste de drenagem da pasta, proposto por Nguyen *et al.* (2014). A análise para o agregado natural foi iniciada pela relação a/c de 0,30 e g/c de 4,0. Foi realizada a mistura manual do concreto permeável e enchido uma peneira com abertura de 1,18 mm, para analisar o escoamento de pasta. Realizando o processo de vibração mecânica do concreto na peneira, durante 15 segundos, e analisando em seguida, não foi constatado escoamento de pasta de cimento pela malha no fundo da peneira (Figura 15a).

Em seguida, a relação a/c foi aumentada para 0,32, mas não foi constatado o escoamento da pasta de cimento (Figura 15b). Realizando o ensaio de escoamento

com a relação 0,34 foi possível averiguar no fundo da peneira respingos de pasta de cimento (Figura 15c). Dessa forma, determinando que a relação água/cimento ideal para promover a mistura correta do concreto permeável seria de 0,32.

Figura 15 – Análise visual do fundo da peneira, relação a/c 0,30 a 0,34



Fonte: O autor.

A relação a/c de 0,32 consiste na proporção de água necessária para que a pasta de cimento da mistura possua consistência, permitindo o recobrimento dos agregados de forma homogênea sem ocasionar o tamponamento dos poros da rede de vazios.

3.4.2 Traço piloto e teste de compactação

O traço piloto foi desenvolvido para analisar o comportamento inicial do concreto, foi desenvolvido utilizando os dados da caracterização do agregado graúdo natural (Tabela 2), do cimento CP II F 32 (Quadro 6), utilizando a porosidade P25 e adotando o grau de compactação de 0,94. Com a porosidade fixada foi possível calcular o volume de pasta de cimento necessária para recobrir o agregado graúdo. Os valores do traço piloto executado são demonstrados na Tabela 4.

Com a execução do traço piloto, foi realizado o teste de compactação, que consistiu em compactar a mistura do molde para determina a massa específica no estado fresco, assim corrigir o traço piloto. Realizando o teste, foi obtido o valor de 2,019 g/cm³ para massa específica, e com isso é notado uma pequena redução do

grau de compactação. Os valores do traço final, após a correção são demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Características da mistura P25 de concreto permeável

Parâmetro		TP	TPC
Grau de compactação	Gc	0,94	0,93
Relação água/cimento	a/c	0,32	0,32
Volume de vazios efetivo (%)	Vv,ef	48,42	48,76
Volume de pasta (%)	Vp	23,42	23,76
Consumo de cimento (kg/m³)	Ccim	364,5	369,7
Consumo de agregado (kg/m³)	Cagg	1551,0	1540,8
Relação agregado/cimento	g/c	4,26	4,17
Traço piloto	-	1:4,26:0,32	1:4,17:0,32

Nota: TP – Traço piloto; TPC – Traço piloto corrigido.

Fonte: O Autor.

Dessa forma, utilizando o traço final foram moldados os corpos de prova. No processo de moldagem já se procedeu a medida da massa de cada amostra, que foi utilizado para verificar a porosidade e densidade no estado fresco. Buscando assim, analisar se a porosidade no estado fresco foi preservada em torno de 25%.

3.5 TRAÇOS COM AGREGADO RECICLADO

Para a realização de misturas do concreto permeável com incorporação de ARCO, é necessário realizar ajuste nos dados de caracterização. Como foram desenvolvidas quatro incorporações com teores diferentes é necessário refazer a caracterização da massa unitária com a misturas dos materiais e adequar a densidade, ponderando os valores. Mantendo a mesma porosidade fixa de 25% (P25), serão produzidas misturas incorporando o ARCO em 25%, 50%, 75% e 100% no traço do concreto permeável. A porosidade é a mesma para preservar os valores de eficiência hidráulica e analisar o efeito do agregado reciclado no desenvolvimento da resistência mecânica.

Para cada mistura foi realizado o procedimento de dosagem pelo método do Grau de Compactação. Com o traço piloto foi realizado teste de compactação para realizar correções e ajustes para o obter o traço final.

Na primeira hipótese, considerando a densidade seca, o processo de molhagem inicial foi aplicado para minimizar o efeito de absorção do agregado reciclado. O procedimento foi realizado adicionando a água de pré-molhagem, misturando com o agregado durante dois minutos e deixando em descanso por oito minutos. O procedimento durou no total 10 minutos, para então iniciar a execução dos concretos, repedindo esse passo a passo para os quatros traços da densidade seca.

Na segunda hipótese, considerando a densidade aparente do agregado reciclado, o processo de produção do concreto seguiu de maneira direta. Mesmo procedimento do traço referencial. Nessa hipótese não foi considerado medidas para contornar a absorção e considerado a quantidade maior de poros presentes nos agregados reciclados seriam preenchidos pela pasta de cimento.

O uso da densidade aparente para o procedimento de dosagem, permitiu aumentar o fator água/cimento para a proporção ideal para realizar a mistura do concreto. Também aumento a quantidade de cimento, permitindo maior volume de pasta envolvendo o agregado reciclado.

A execução dos traços ocorreu de maneira direta, mesmo processo que foi aplicado para o traço referencial. Sendo o procedimento de pré-molhagem. Reduzindo o tempo de preparo das misturas permeáveis. Foram produzidos dois traços com a incorporação de teores de agregado reciclado, com o uso da segunda hipótese.

3.5.1 Teste da relação água/cimento para misturas com agregado reciclado

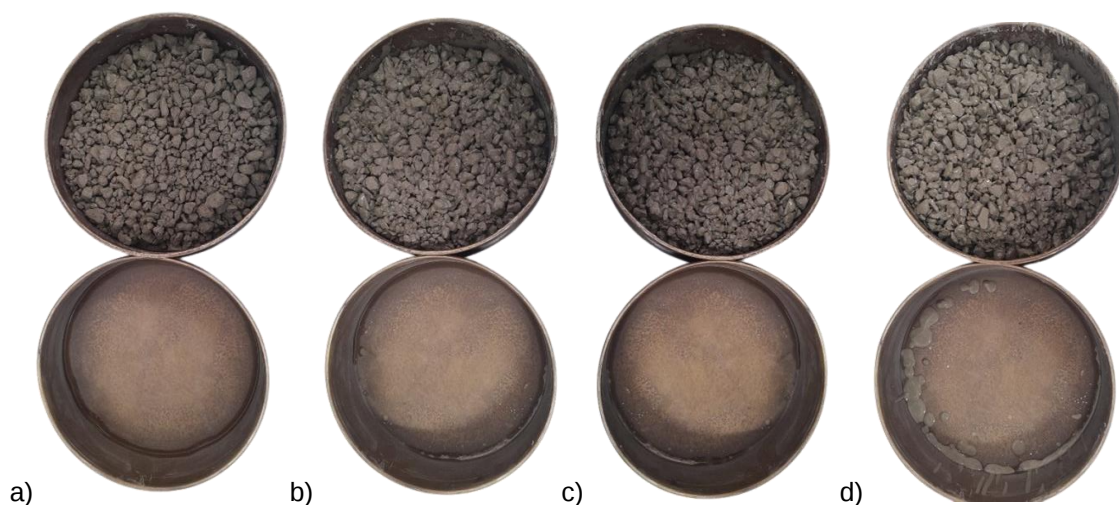
Para determinar a relação água/cimento, foi escolhido realizar o teste de escoamento de pasta de cimento utilizando somente agregado reciclado. Sendo a situação de incorporação de 100% de ARCO, traço que possui maior absorção de água pelos materiais que compõem o concreto. Desta forma, a relação água/cimento determinada foi o maior valor possível de utilização, parâmetro para os traços subsequentes.

Repetindo o processo realizado para mistura de agregado natural, a determinação a relação a/c foi realizada com base no teste de drenagem da pasta, proposto por Nguyen *et al.* (2014). Começando a análise pela relação a/c de 0,32, que

para o agregado natural apresentou ser a proporção ideal de pasta de cimento, e g/c de 4,0, foi realizado a mistura manual do concreto permeável e enchido uma peneira com abertura de 1,18 mm, para analisar o escoamento de pasta. Realizando o processo de vibração mecânica do concreto na peneira, durante 15 segundos, e analisando em seguida, não foi constatado escoamento de pasta de cimento pela malha no fundo da peneira (Figura 16a).

Como a mistura de concreto apresentava pouca coesão entre os materiais, a relação a/c foi aumentada para 0,38 (Figura 16b), porém não apresentou escoamento. Em seguida, foi realizado o teste com a relação a/c 0,40 (Figura 16c), mas não apresentou escoamento. Então, foi aumentado a relação água/cimento para 0,42 (Figura 16d), quando averiguado a peneira após vibração mecânica foi constatado o escoamento de pasta de cimento no fundo da peneira. Desta forma, a proporção de água ideal para promover a mistura do concreto foi de 0,40.

Figura 16 - Análise visual do fundo da peneira, relação a/c 0,32 a 0,42



Fonte: O autor.

O ensaio de escoamento foi repetido para o traço com 50% de ARCO o escoamento de pasta de cimento foi constatado na relação 0,38. Assim, relação 0,36 é a proporção ideal de água para o traço na qual a relação g/c é composta parcialmente por agregado reciclado. Os valores obtidos com o ensaio de escoamento são demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Relações água/cimento para as porcentagens de incorporação de ARCO

Teor de Incorporação	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42
0% de ARCO (Referencial)		A/C	E				
50% de ARCO (Parcial)				A/C	E		
100% de ARCO (Total)						A/C	E

Nota: A/C – Relação a/c ideal; E – Relação a/c que ocorreu escoamento de pasta.

Fonte: O autor.

O estabelecimento da relação água/cimento foi fundamental para o cálculo da proporção de água necessária para realizar a molhagem inicial dos agregados reciclados. Considerando a primeira hipótese, foi realizado a etapa de molhagem inicial, para saturar os poros dos agregados uma quantidade de água.

Essa quantidade de água consistiu na diferença da relação a/c 0,32 e a proporção ideal para mistura do concreto permeável. Na Tabela 6 são demonstrados os valores ideais e utilizados para preparo dos traços.

Tabela 6 - Relações água/cimento dos traços de concreto permeável

Hipóteses	Taxa de incorporação ARCO	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42
Densidade Seca	25%		RAC	A/C				
	50%		RAC		A/C			
	75%		RAC			A/C		
	100%		RAC				A/C	
Densidade Aparente	Referencial		ACIU					
	50%				ACIU			
	100%						ACIU	

Nota: RAC – Relação a/c utilizada; A/C – Relação a/c ideal para mistura; ACIU – Relação a/c ideal e utilizada para mistura.

Fonte: O autor.

3.5.2 Traço com incorporação de ARCO e teste de compactação

Repetindo o mesmo processo do traço referencial, foram determinados os diferentes traços para cada porcentagem de incorporação de ARCO. A porosidade foi mantida fixa em 25% e evitado grande variação do grau de compactação. Os valores determinados para cada teor de agregado reciclado são expostos da Tabela 7.

Tabela 7 - Dados de dosagem

Parâmetro	0AR	25AR	50AR	50AR	100AR	50ARDA	100ARDA
Porosidade (%)	25	25	25	25	25	25	25
Grau de compactação	0,9338	0,9205	0,9204	0,9220	0,9199	0,9312	0,9390
Relação água/cimento total	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,36	0,40
Relação água/cimento efetiva	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,36	0,40
Volume de vazios efetivo (%)	48,76	47,76	46,85	45,87	45,08	50,47	51,08
Volume de pasta (%)	23,76	22,76	21,85	20,87	20,08	25,47	26,08
Consumo de cimento (kg/m ³)	369,7	354,2	340,0	324,8	312,6	373,1	361,0
Consumo total de agregado (kg/m ³)	1540,8	1435,9	1380,7	1324,1	1260,3	1396,7	1286,5
Consumo de agregado reciclado (kg/m ³)	0	358,98	690,33	993,09	1260,3	698,37	1286,5
Relação agregado/cimento	4,17	4,05	4,06	4,08	4,03	3,74	3,56
Massa específica estimada (g/cm ³)	2,029	1,903	1,829	1,753	1,673	1,904	1,792
Traço Final	1:4,17	1:4,05	1:4,06	1:4,08	1:4,03	1:3,74	1:3,56
	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,36	0,40

Fonte: O autor.

Ao término do processo de dosagem, foram executados os traços de concretos permeáveis. O processo de caracterização iniciou no estado fresco e no endurecido, foi finalizado após o período de cura. Com a caracterização das propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas no estado endurecido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste estudo foram consideradas duas hipóteses, alternando o uso da densidade aparente e seca no método de dosagem. A primeira hipótese (densidade seca) considerava que os poros seriam saturados por água, durante a pré molhagem e estariam preenchidos durante o processo de dosagem. Na segunda hipótese (densidade aparente), os poros dos agregados estariam livres e abertos para serem preenchidos durante o processo de execução dos concretos, pela pasta de cimento. Tendo isso em vista, ao fim dos processos de caracterização das propriedades foram obtidos os seguintes resultados, ocorreu a comparação de valores das duas hipóteses levantadas na metodologia.

4.1 DENSIDADE E POROSIDADE NO ESTADO FRESCO

A densidade e porosidade no estado fresco foram determinadas para os sete traços de concreto permeáveis desenvolvidos neste estudo, utilizando o método proposto pela ASTM C1754 (ASTM, 2012). Os valores médios e desvios padrões encontrados são demonstrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados obtidos na caracterização do estado fresco

Propriedades		Incorporações de ARCO						
		REF	25 ARDS	50 ARDS	75 ARDS	100 ARDS	50 ARDA	100 ARDA
Densidade no Estado Fresco (g/cm³)	Df	2,03	1,90	1,83	1,75	1,67	1,91	1,79
		(0,002)	(0,002)	(0,003)	(0,002)	(0,001)	(0,003)	(0,004)
Porosidade no Estado Fresco (%)	Pf	24,89	25,02	25,00	25,04	25,01	24,96	25,03
		(0,07	(0,07)	(0,11)	(0,10)	(0,03)	(0,13)	(0,16)

Fonte: O autor.

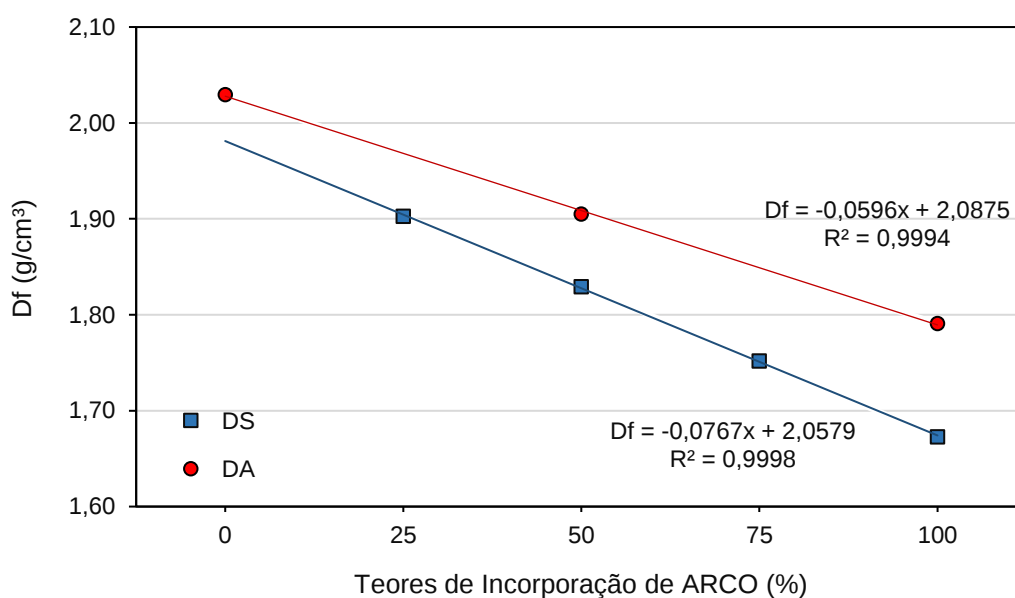
A densidade no estado fresco apresentou variação de 1,67 a 1,90 g/cm³ para as amostras que foi aplicado o uso da densidade seca dos agregados. Já, as demais amostras com uso da densidade aparente apresentaram variação entre 1,79 a 2,03 g/cm³. Os valores encontrados são ilustrados na Figura 17.

Nota-se que o aumento da proporção de agregado reciclado ocasionou a redução linear da densidade nas amostras no estado fresco. Devido ao agregado

reciclado possuir diferentes componentes em seus grãos, ocorreu a redução de densidade que foi refletido no estado fresco e endurecido.

Analisando as densidades seca (DS) e aparente (DA), a diferença de valores está atrelado a relação água/cimento. A densidade seca considerou que no uso da pré-molhagem, à água adicionada inicialmente ocupou os poros abertos do agregado reciclado, ficando preenchidos durante a produção das misturas de concreto, não sendo preenchidos por pasta de cimento. A densidade aparente considerou a hipótese que, os poros do agregado reciclado serão preenchidos pela pasta de cimento diretamente.

Figura 17 - Resultados da caracterização da densidade no estado fresco (Df)



Nota: DS – Densidade Seca; DA – Densidade Aparente.

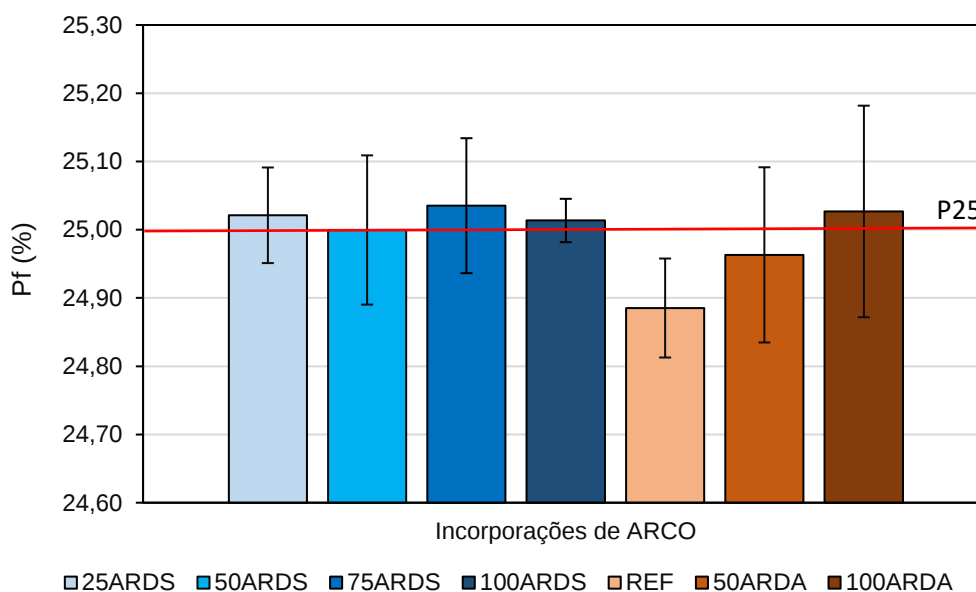
Fonte: O autor.

A realização da pré-molhagem e a hipótese de considerar os poros preenchidos por água, justifica a redução e a diferença entre as densidades. As amostras DS apresentam uma maior alteração de valores em comparação a amostras DA.

A NBR 16416 (ABNT, 2015) solicita a densidade mínima de 1,60 g/cm³, e mesmo com a redução apresentada nos traços, foi possível atender ao requisitado. Segundo Tennis *et al.* (2004), é recomendado que as amostras de concreto permeável possuam a densidade variando entre 1,60 e 2,20 g/cm³, sendo que todas as amostras ensaiadas apresentaram valores dentro da margem estabelecida pelo autor.

A porosidade de projeto foi fixada em 25%, e com a caracterização no estado fresco foram obtidos os resultados demonstrados na Tabela 8. Observa-se que os valores apresentaram variação mínima do valor de projeto, variando entre 24,9 e 25,0%, o desvio-padrão das amostras não foi superior a 0,2% (Figura 18).

Figura 18 - Resultados de caracterização da porosidade no estado fresco (Pf)



Nota: P25 – Porosidade referencial de 25%.

Fonte: O autor.

Na Figura 18, é ilustrado graficamente os resultados da porosidade no estado fresco (intragranular). A menor variabilidade na porcentagem da porosidade ocorreu para as misturas com uso da densidade seca. Já, com a densidade aparente apresentou uma variabilidade crescente com o aumento da porcentagem de incorporação de ARCO.

4.2 DENSIDADE E POROSIDADE NO ESTADO ENDURECIDO

A densidade e porosidade foram caracterizadas de acordo com os ensaios descritos no Quadro 7. Os resultados encontrados com a caracterização estão dispostos na

Tabela 9, juntos de seus desvios-padrões.

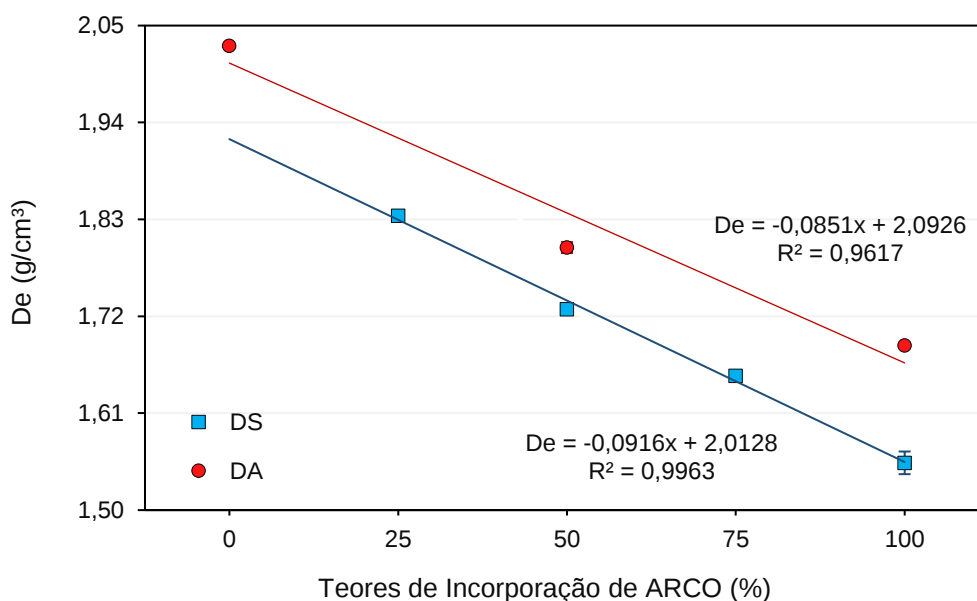
Tabela 9 - Resultados obtidos com a caracterização no estado endurecido

Propriedades		Incorporações de ARCO					
		REF	25 ARDS	50 ARDS	75 ARDS	100 ARDS	100 ARDA
Densidade no Estado Endurecido (g/cm ³)	De	2,03 (0,01)	1,83 (0,02)	1,73 (0,01)	1,65 (0,00)	1,55 (0,00)	1,80 (0,01)
Porosidade no Estado Endurecido (%)	Pe	22,94 (1,18)	32,96 (2,84)	34,00 (0,72)	37,00 (1,19)	40,09 (0,17)	29,75 (0,87)

Fonte: O autor.

No estado endurecido ocorreu a redução da densidade das amostras (Figura 19). O decréscimo linear das densidades pode ser vinculado ao aumento da proporção de agregado graúdo reciclado, que em quantidades maiores aumenta o volume de vazios.

Figura 19 - Resultados da caracterização da densidade no estado endurecido (De)



Nota: DS – Densidade Seca; DA – Densidade Aparente.

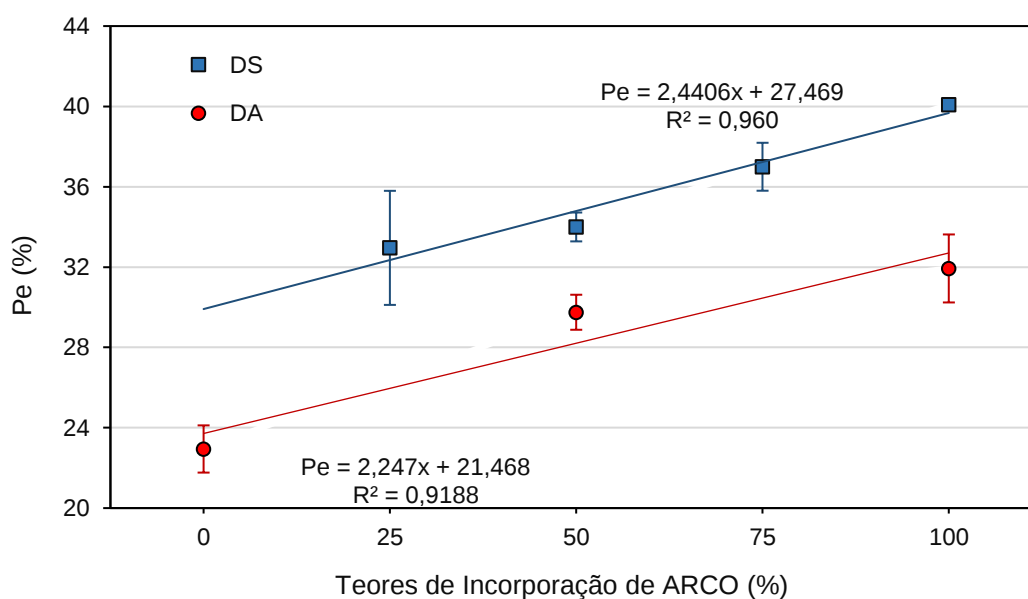
Fonte: O autor.

Diferente do estado fresco, a porosidade efetiva apresentou grande variabilidade em comparação ao projeto. O aumento da proporção de ARCO e a densidade utilizada impactaram diretamente a porosidade, influenciando o desempenho mecânico e hidráulico. Observa-se que o aumento da porosidade ocorreu linearmente, acompanhando o aumento da proporção de ARCO.

Devido ao agregado reciclado ser um material com uma presença maior de poros, acaba influenciando na porosidade no estado endurecido. Com o uso da DS, os poros presentes nos agregados reciclados inicialmente foram considerados que estavam preenchidos pela água da pré-molhagem. Com o processo de cura, a água presente nos poros evaporou, ficando apenas os vazios, reduzindo a densidade no estado endurecido. Já, com o uso da DA, foi considerado que os poros presentes nos agregados reciclados foram preenchidos pela pasta de cimento, que permaneceu ocupando os vazios após o processo de cura, assim obtidos valores maiores para densidade no estado endurecido.

Dessa forma, a rede de vazios aumentou nas amostras proporcionalmente a porosidade efetiva refletindo na redução do tempo de percolação no ensaio do anel de infiltração. A Figura 20 demonstra graficamente a porosidade no estado endurecido.

Figura 20 - Resultados da caracterização da porosidade no estado endurecido



Nota: DS – Densidade Seca; DA – Densidade Aparente.

Fonte: O autor.

O agregado reciclado já possui uma porosidade própria maior em comparação ao agregado natural, e esse fato atrelado a porosidade de projeto possibilitou obter valores variando de 30 a 40% no estado endurecido. Em contrapartida, o aumento da porosidade no estado endurecido ocasionou redução do desempenho mecânico.

Como já mencionado, o aumento a porosidade intragranular para a efetiva, está teoricamente relacionado a evaporação de água dos poros dos agregados e da mistura e endurecimento da pasta de cimento. A diferenças das amostras DS para a DA é devido a utilização de uma relação a/c constante com ajuste da água de pré-molhagem e menor consumo de cimento. Por isso, apresentaram valores maiores para porosidade efetiva.

Aumentar o consumo de cimento, possibilita que ocorra o tamponamento dos poros interconectados da rede de vazios. O maior volume de pasta de cimento recobrando os grãos das amostras ARDA, refletiu na redução da porosidade. Nos resultados é observado que a porosidade reduziu linearmente com o aumento do consumo do aglomerante.

Para Torres, Hu e Ramos (2015), a espessura de pasta de cimento que recobre os grãos provoca variação direta nas propriedades de concreto permeáveis. O aumento do volume de pasta de cimento provoca o tamponamento dos poros sendo favorável para um melhor desempenho mecânico. Com isso, supõem que as zonas de contato entre os agregados foram ampliadas com a maior utilização de cimento para dosagem, diminuindo os espaços vazios entre os grãos.

O traço referencial apresentou porosidade efetiva menor que a de projeto, reduzindo a porosidade calculada, que teoricamente deveria ser fixa, apenas com o uso de agregado natural. Esse fato, demonstrou que o excesso do consumo de cimento ou energia de compactação, ofereceu ganhos mecânicos e prejudicou a permeabilidade. Todavia, a porosidade efetiva (estado endurecido) foi inferior a porosidade intergranular (estado fresco).

4.3 CONDUTIVIDADE HIDRAÚLICA

A NBR 16416 (2015) solicita que peças de pavimentos permeáveis possuam no mínimo 0,1 cm/s de permeabilidade. Com a execução dos ensaios, observa-se que as amostras demonstraram desempenho satisfatório em comparação ao solicitado pela normativa. Os resultados obtidos são demonstrados na Tabela 10 e ilustrados na Figura 21.

Tabela 10 - Resultados de condutividade hidráulica

Propriedades		Incorporações de ARCO						
		REF	25 ARDS	50 ARDS	75 ARDS	100 ARDS	50 ARDA	100 ARDA
Condutividade Hidráulica (cm/s)	k	1,61	2,30	2,42	2,51	2,62	1,74	2,00
		(0,18)	(0,29)	(0,15)	(0,16)	(0,20)	(0,10)	(0,31)

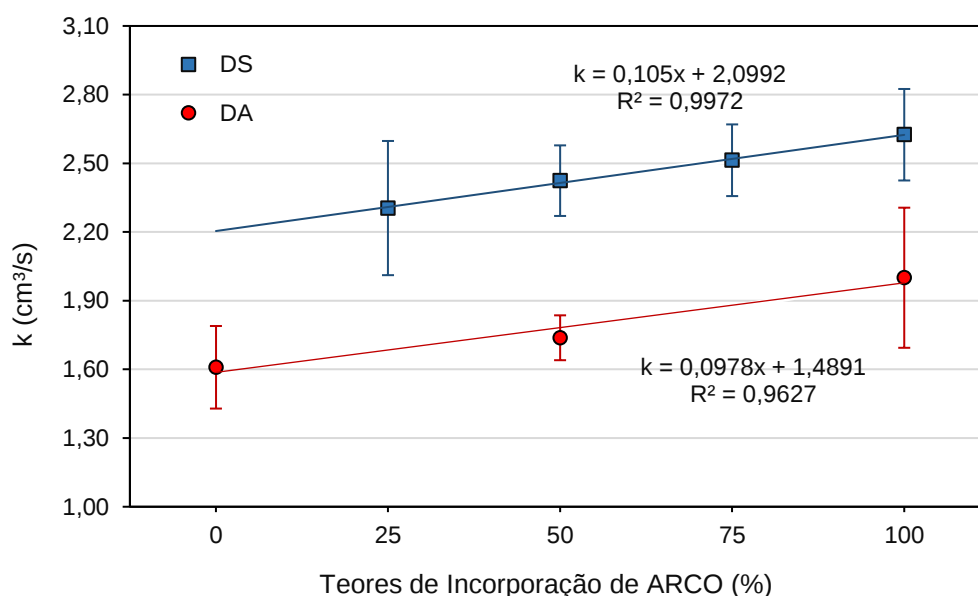
Fonte: O autor.

A incorporação de agregado reciclado demonstrou contribuir para a eficiência drenante das peças permeáveis. Reduzindo o tempo de percolação com o aumento gradativo de ARCO, ocorrendo um aumento linear da permeabilidade.

Comparando as incorporações totais, o 100ARDS apresentou elevado aumento da permeabilidade, devido ao grande desvio da porosidade efetiva, em análise a porosidade de projeto. Porém, o 100ARDA apresentou desempenho menor para permeabilidade, devido a sua porosidade efetiva ter apresentado menor variação (Figura 21). Em contrapartida, o desempenho mecânico foi inverso para os dois traços.

Os valores de condutividade hidráulica variaram entre 1,74 e 2,62 cm/s. Sendo 8,1 a 62,7% mais eficiente que o concreto referencial. Os autores Ibrahim *et al.* (2014), Tennis, Leming, Akers (2004) obtiveram resultados variando entre 0,2 a 1,2 cm/s, com uso de agregados naturais. Com uso de RCD, Pereira e Barbosa (2015) obtiveram 0,104 a 0,125 cm/s (10, 20 a 40% de RCD), Mikami *et al.* (2018) encontraram valores de 0,819 a 0,879 cm/s (10, 25, 50 e 100% de RCD cerâmico) e Brasileiro *et al.* (2020) com melhor desempenho, variando entre 2,46 a 2,53 cm/s (0, 20, 30 e 50% RCD). Os resultados encontrados neste estudo superaram os valores com uso de agregados naturais e ficaram dentro do intervalo, verificado na literatura com o uso de RCD.

Figura 21 - Resultados da caracterização da condutividade hidráulica



Nota: DS – Densidade Seca; DA – Densidade Aparente.

Fonte: O Autor.

O agregado reciclado, na caracterização da composição granulométrica (Figura 11) demonstrou possuir grãos com dimensão superiores a zona granulométrica 4,75/ 12,5 mm. A presença de grão maiores e uniforme possibilitou o aumento do volume de vazios, contribuindo para a melhoria da eficiência hidráulica.

Segundo Mikami (2022), a utilização de agregados com dimensão granulométrica maior e uniforme, possibilita a formação de poros maiores, aumentando a rede de vazios e contribuindo para o melhor desempenho da condutividade hidráulica. A granulometria do agregado combinada à densidade seca, permitiu atingir uma porcentagem maior para porosidade efetiva.

Tendo em vista que, as misturas obtiveram resultados com grande sobressalência do mínimo requisitado pela normativa de pavimentos drenantes, abrindo uma margem de adequação do traço, é possível adequar a mistura com a redução da porosidade. A mudança a porosidade ou no consumo de cimento iria provocar alteração na eficiência hidráulica para melhoria da eficiência mecânica para peças de concreto permeável.

4.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA

A NBR 16416 (2015) solicita que peças de pavimentos drenantes atendam a solicitações mínimas de 20 Mpa. As amostras permeáveis demonstraram bom

desempenho mecânico, apenas o traço 100ARDS não conseguiu atingir ao requisitado. A Tabela 11 exhibe os resultados encontrados com o ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.

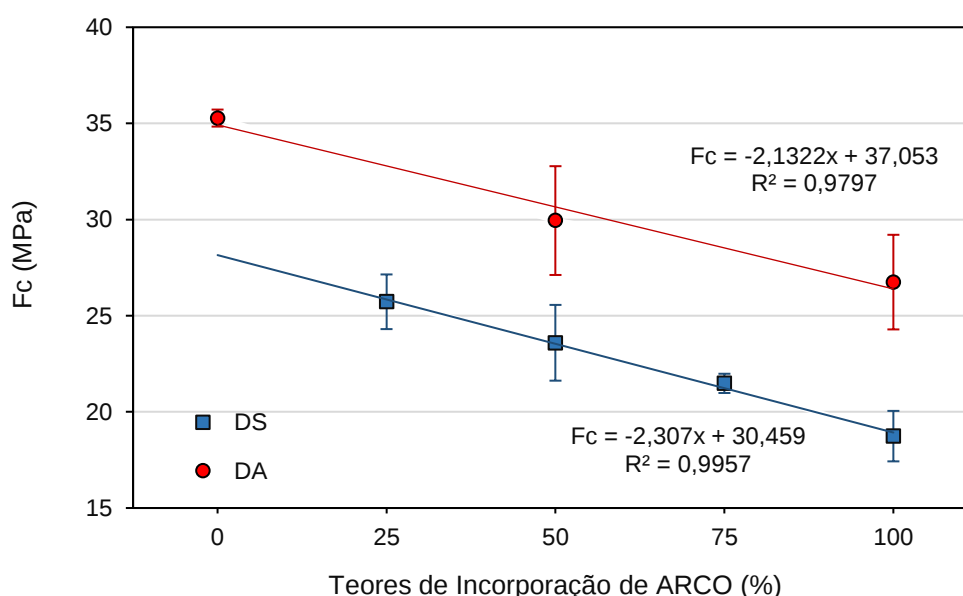
Tabela 11 - Resultados da resistência mecânica obtida dos traços

Propriedades		Incorporações de ARCO						
		REF	25 ARDS	50 ARDS	75 ARDS	100 ARDS	50 ARDA	100 ARDA
Resistência Mecânica (MPa)	Fc	35,28	25,73	23,89	21,48	18,74	29,95	26,75
		(0,44)	(1,42)	(1,97)	(0,50)	(1,31)	(2,83)	(2,46)

Fonte: O autor.

O desempenho mecânico foi inversamente proporcional a porosidade, onde o aumento da porcentagem de incorporação de agregado reciclado demonstrou ocasionar a redução da resistência. Tendo em vista, que quanto maior a utilização de ARCO, maior foi o aumento da porosidade, menor foram as resistências obtida. A Figura 22, ilustra o desempenho mecânico das amostras.

Figura 22 - Resultados da caracterização da resistência mecânica



Nota: DS – Densidade Seca; DA – Densidade Aparente.

Fonte: O autor.

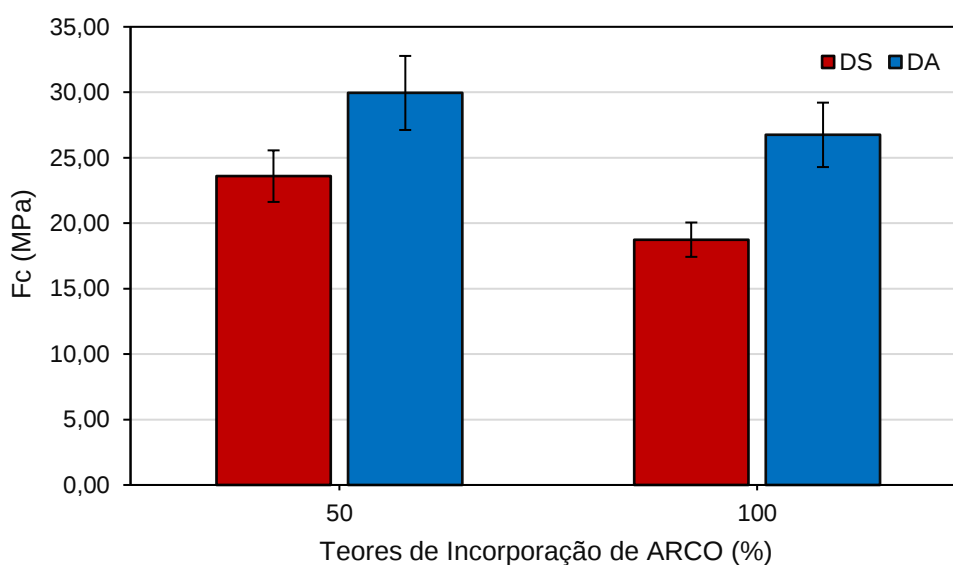
Implementar ARCO em concreto permeáveis, resultou na redução de 27,07% (25ARDS) a 46,88% (100ARDS) da resistência mecânica, comparando à misturas referencial. A densidade seca demonstrou ineficácia para o uso total de ARCO, mas

alcançou 93,7% da resistência mínima requisita pela NBR 16416 (2015). A adequação da porosidade fixa é uma possibilidade para melhorar os resultados.

Foi notado que a utilização da densidade aparente do agregado favorece o desempenho mecânico de concretos permeáveis. As vantagens pela escolha da densidade aparente são demonstradas na Figura 23. A mudança de um parâmetro de dosagem permitiu as peças drenantes fossem mais funcionais quando solicitadas por tensões de deformação. Os resultados comprovaram que o uso da densidade seca favorece a permeabilidade e a densidade aparente favorece a resistência mecânica.

O 100ARDA apresentou maior consumo de cimento comparativamente aos traços ARDS. Sua resistência foi superior a todos os traços, sendo possível dessa forma utilizar ARCO integralmente e atender a todos os parâmetros normativos de funcionalidade.

Figura 23 - Comparativo de resistência à compressão, com uso de densidade DA e DS



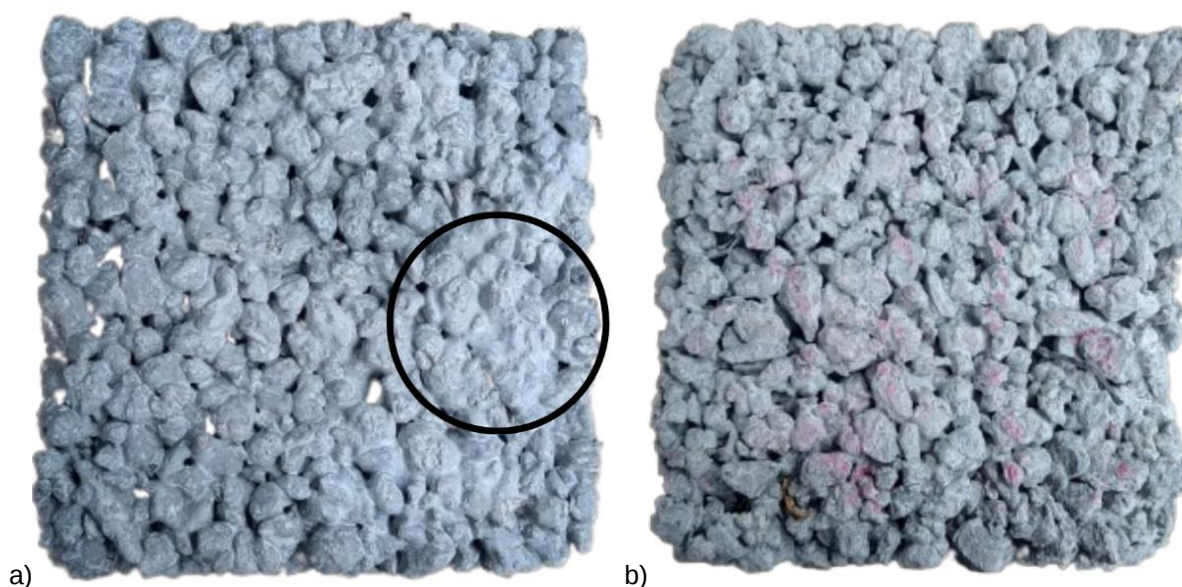
Nota: DS – Densidade Seca; DA – Densidade Aparente.

Fonte: O autor.

Hipoteticamente, obter melhor empacotamentos dos grãos beneficia a resistência mecânica, aumentando o contato entre os agregados. Segundo Xie *et al.* (2020), aumentar as zonas de contatos dos agregados possibilita o aumento do desempenho mecânico. Esse fato somado ao aumento do volume de pasta de cimento permitiu que as zonas de contato entre grãos fossem aumentadas e reduzindo reduziu os espaços vazios, conforme mostra a Figura 24. A distribuição

granulométrica do agregado reciclado apresentou dimensão granulométrica superior a faixa 4,75/19 mm, favorecendo o aumento da rede de vazios.

Figura 24 – Análise visual de peças de concreto com taxa de 50% de incorporação de ARCO, com uso da densidade aparente (a) e seca (b).



Fonte: O Autor.

Na Figura 24a, é destacado uma região da peça de concreto permeável, onde o excesso de pasta de cimento promoveu o preenchimento da rede de poros interconectados. A proporção maior de pasta recobrindo o agregado, foi favorável a resistência mecânica com o aumento da zona de contato entre os agregados e redução da porosidade. Já, na Figura 24b percebe-se que a pasta de cimento está exclusivamente recobrindo o agregado, sem ser notado regiões da peça que haja excesso e tamponamento dos

A resistência mecânica variou de 18,7 a 35,3 MPa com a porosidade efetiva variando de 22,9 a 40,1%. Alves (2016) obteve resistência de 11,6 a 15,2 MPa e porosidade entre 26 a 29%, empregando o uso de resíduos sólido. Ramos *et al* (2021) utilizando agregado natural, alcançaram resultados para resistência de 13,6 a 21,6 MPa, com porosidade entre 15 a 30%.

As amostras referenciais, apenas utilizando agregado natural, obtiveram resistência à compressão média de 35,28 MPa, atendendo a resistência 35 MPa estipulada pela NBR 9781 (2013), para produção de pisos intertravados. Com o uso de agregado reciclado isto não foi possível, mas adequando os valores de dosagem

cria-se a possibilidade de atingir resistência próxima a solicitada para *pavers*, que são peças sólidas utilizadas para pavimentação de vias de tráfego.

O 100ARDS não atingiu a resistência mínima de 20 MPa, solicitado pela NBR 16416 (ABNT, 2015), mas existe a possibilidade de viabilizar que a mistura seja funcional a resistência mecânica. Reduzindo a porosidade de projeto, já que no estado endurecido houve maior disparidade, é uma maneira de tornar o traço funcional, permitindo-se assim a utilização total de ARCO, com melhor desempenho permeável e menor consumo de cimento.

4.5 CONSUMO DE CIMENTO

O consumo de cimento apresentou variação acompanhando a alteração de porcentagem de utilização de agregado reciclado. Foi observado que o aumento da proporção de ARCO, reduzia o consumo de cimento. A densidade escolhida para o método de dosagem também demonstrou influência, com uma menor redução gradual para amostras DA.

Tecnicamente o consumo deveria ser o mesmo com a porosidade fixa, mas a misturas de dois materiais diferentes influenciou a proporção de cimento. Com as proporções e as características físicas dos agregados, esse consumo variou entre 312,60 e 367,70 g/cm³ (Tabela 12).

Tabela 12 - Comparação do consumo de cimento por teor de agregado reciclado incorporado

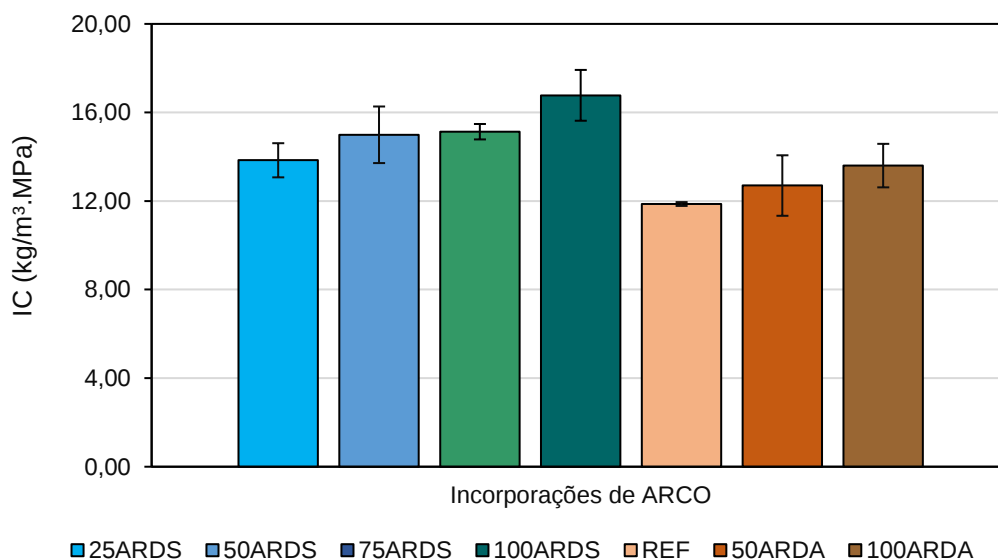
Propriedades	Incorporações de ARCO						
	REF	25 ARDS	50 ARDS	75 ARDS	100 ARDS	50 ARDA	100 ARDA
Consumo de Cimento (g/cm ³)	370	354,2	350	324,8	312,6	373,1	361

Fonte : O autor.

O índice de consumo dos concretos permeáveis variou entre 11,86 a 16,77 kg/m³.MPa (Figura 25). Quanto maior foi a incorporação de agregado graúdo reciclado, de acordo com a densidade, maior foi a redução do consumo de cimento, sendo obtido menores valores para resistência do concreto à compressão. O 100ARDS apresentou menor consumo de cimento, porém sua resistência não atingiu o mínimo de 20 MPa, para são considerados capaz de suporta os esforços mecânicos de tráfego.

O índice de consumo de cimento refere-se à quantidade de aglomerante necessário para obter uma unidade de resistência. Sendo assim, o traço 100ARS apresentou maior índice, para obter desempenho equivalente das demais amostras demandará de uma maior quantidade de cimento.

Figura 25 - Índice de consumo de cimento por porcentagem de ARCO



Fonte: O autor.

As amostras da hipótese da densidade aparente demonstraram melhor desempenho mecânico obtiveram menor índice de consumo, sendo assim, demandaram uma quantidade menor de cimento para obter melhor resultado para resistência.

Comparando o consumo com os valores presentes na literatura, o autor Mikami (2022), através do mesmo método de dosagem, apresentou valores similares, variando 264 até 431,1 kg/m³. Já, Jansen e Camacho (2022) apresentaram consumo de 224,0 a 423,70 kg/m³ de cimento, no desenvolvimento de seus estudos. Desta forma, a mudança de agregado afetou o volume de pasta de cimento, influenciando para a redução do desempenho mecânico.

4.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO DE DOSAGEM

O método de dosagem do Grau de Compactação demonstrou eficiência para a produção de concretos com a incorporação de agregado graúdo reciclado. Foi

necessário adequar os dados de dosagem com a utilização de dois materiais graúdos, considerando suas características físicas na adequação da massa unitária e massa específica.

A porosidade constante no estado fresco é preservada, porém no estado endurecido apresenta acréscimo devido a particularidades do ARCO. Ajustar esse valor possibilita a otimização da mistura para obter melhor desempenho. Sendo necessário ponderar a proporção de ARCO e o aumento na porosidade que pode ocasionar. A porosidade intragranular deve ser ajustada, considerando que os agregados já possuem uma quantidade de poros próprios em sua superfície. Assim, reduzindo a porcentagem da porosidade no estado fresco para buscar obter o mesmo resultado esperado no estado endurecido ou próximo sem que ocorra grande divergência do valor de projeto.

A determinação da densidade do agregado que será utilizada para o processo de dosagem é fundamental para a melhor desempenho da propriedade necessária para a aplicação. A densidade seca possibilita a utilização da pré-molhagem, sendo uma maneira para mitigar a maior absorção do material reciclado. Todavia, sua escolha implica num aumento considerável da porosidade, beneficiando a permeabilidade. A utilização da molhagem inicial, reduz o desempenho mecânico e a relação a/c é preservada para os diferentes teores, o que diminui o consumo de cimento. A realização da molhagem inicial, se analisada com desempenho geral, não demonstra ser um procedimento vantajoso e funcional.

A densidade aparente apresentou melhor eficiência, sendo mais efetiva para a produção de concreto permeável com uso de ARCO, possibilitou atingir valor maiores para resistência mecânica e garantir que o desempenho hidráulico, seja superior ao requisitado pela NBR 16416 (2014). Não foi necessário realizar o procedimento da molhagem inicial, tornando a execução das misturas permeáveis mais ágeis.

Os altos valores obtidos para taxa de infiltração permitem que ocorra adaptações do método. Utilizar valores menores para porosidade permite tornar as peças mais eficazes para resistir as tensões de tráfego, com o aumento da resistência a compressão.

Abordagem futuras podem buscar adaptar o processo de dosagem refinando o consumo de material com as características dos agregados utilizados. Sendo

utilizando apenas a parcela graúda ou implementado agregado miúdo que pode auxiliar no empacotamento dos grãos, para promover o ganho de resistência.

Para estudos subsequentes, existe a possibilidade de desenvolver misturas com porosidade de projeto menores, até mesmo com valores inferiores aos recomendados pela literatura. Pois, com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, ocorre o aumento considerável da porosidade efetiva.

Refinar o consumo de cimento, melhorando a eficiência, proporciona maneiras de tornar a produção de concreto permeável com menor custo monetário e aumenta o ganho ambiental, com a maior reutilização de resíduos sólidos. No estudo foram utilizados corpos de prova de concreto, que pode ser considerado um resíduo nobre, por não apresentar em sua composição outros componentes como cerâmicas ou gesso. Para pesquisa futuras, abordar a aplicação de resíduos sólidos com diferentes componentes em sua composição atribui novos desafios e ganhos a pesquisa, com uma nova caracterização de material e determinação de funcionalidade para materiais reutilizados.

5 CONCLUSÕES

A principal contribuição deste estudo foi a proposta de incorporação de agregado reciclado em misturas de concreto permeável. O 50ARDA apresentou melhor desempenho, atendendo os requisitos da NBR 16416 (ABNT, 2015). A alteração e utilizando de diferentes agregados resultou em mudanças nas propriedades mecânicas e hidráulicas dos concretos permeáveis.

O coeficiente de permeabilidade e porosidade aumentaram com o uso da densidade seca, e, a resistência mecânica melhorou com o uso da densidade aparente. Para a dosagem de concretos permeáveis, a escolha da densidade deve ser ponderada com base na propriedade que se espera melhor desempenho. O consumo de cimento deve ser analisado, para verificar a rentabilidade de cada traço.

A porosidade efetiva aumenta consideravelmente, devido as particularidades do agregado reciclado, contribuindo para o maior ganho de desempenho hidráulico. A redução da porosidade de projeto no processo de dosagem, permite obter menor porosidade efetiva. A elevada porosidade obtida no estado endurecido confirma a suposição, sendo diretamente proporcional a condutividade hidráulica e inversamente proporcional a resistência.

A preferência pela densidade aparente possibilita margem para melhores resultados, garantindo melhor funcionalidade para as peças drenantes, com melhor controle sobre o aumento de vazios no concreto permeável, para atender os parâmetros da NBR 16416 (2014). Isto torna viável a utilização total de agregado reciclado para confecção de concreto poroso e redução de consumo de matéria prima natural.

A metodologia é adequada e eficiente para produção de concreto permeável, sendo uma opção para redução de impactos ambientais e medida contraventora para aplicar uma nova utilidade para resíduos sólidos e ainda reduzir as áreas de baixa permeabilidade. Esta é uma forma de contribuir com os sistemas de drenagem urbana e reduzir a incidência de inundações. O método apresenta margem de adequações para estudos futuros, para aumento do consumo de agregado reciclado com menor consumo de cimento, aumentando a rentabilidade da mistura.

REFERÊNCIAS

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

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

ABNT. **NBR 15116 - Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021a. . Acesso em: 22 abr. 2023.

ABNT. **NBR 16917 - Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021b.

ABNT. **NBR 16972 - Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021c.

ABNT. **NBR 16973 - Agregados - Determinação do material fino que passa de 75 μm por lavagem**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021d. . Acesso em: 6 maio. 2023.

ABNT. **NBR 7211 - Agregados para concreto**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2022.

AGRELA, F. *et al.* Environmental assessment, mechanical behavior and new leaching impact proposal of mixed recycled aggregates to be used in road construction. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124362, jan. 2021.

ALVES, P. B. **Concreto permeável para pavimentação urbana com uso de resíduos de construção e demolição produzidos na usina de reciclagem de São José do Rio Preto**. 2016. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016.

ASTM. **ASTM C1754: Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete**1. West Conshohocken: ASMT, 2012.

BARBOZA, D. D. S. M.; SOUZA, G. D. S. M. Reutilização e gestão de resíduos sólidos da construção civil / Reuse and management of solid waste from civil construction. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 5, p. 41404–41426, 27 maio 2022.

BATEZINI, R.; BALBO, J. T. Estudo da condutividade hidráulica com carga constante e variável em concretos permeáveis. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 3, p. 248–259, jun. 2015.

BATISTA, B. C. C. *et al.* Influência da adição de RCD misto na resistência à compressão e na porosidade de argamassa. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, v. 59, n. 3, p. 934, 30 set. 2022.

BECKER, N.; CONEGERO, M. G.; PINHEIRO, I. G. Qualidade da água do escoamento superficial percolado em pavimento de concreto permeável dosado de diferentes métodos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 19, n. 2, p. 17, 2022.

BIZÃO, Á. H. N. **Concreto permeável com agregado reciclado: otimização de traço com análise multiparamétrica**. 2021. Dissertação de Mestrado – Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 2021.

BORGES, B. R. *et al.* Concreto permeável com a utilização de resíduos da construção civil como agregado. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 13, n. 1, p. 167–179, mar. 2021.

BRASILEIRO, K. P. T. V. *et al.* Concreto permeável com agregado da reciclagem de resíduos da construção e demolição: Revisão bibliográfica. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 73169–73180, 2020.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 262–274, maio 2016.

COELHO, M. W. F.; ROCHA, CAMILA A. A. Influência do tamanho do agregado na permeabilidade e na resistência do concreto permeável. 2019, Fortaleza. **61º Congresso Brasileiro do Concreto [...]** Fortaleza: IBRACON, 2019.

CÔMITE ACI 522. **ACI 522R - 10 Report on pervious concrete**. [s.l.] AMRECIAN CONCRETE INSTITUTE, 2010.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. 307. RESOLUÇÃO 307, DE 5 DE JULHO DE 2002. **Diário Oficial da União**, n. 136, 2002, p. 95–96.

DI DOMENICO, P. *et al.* Influência do agregado miúdo reciclado na resistência à compressão e porosidade do concreto. **Revista Internacional de Ciências**, v. 8, n. 1, p. 129–147, 21 jun. 2018.

DINIZ, M. I. L. *et al.* Estudo da eficiência de pavimentos permeáveis: análise da permeabilidade e das propriedades mecânicas. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 3, p. 398–407, 2021.

ETXEBERRIA, M. *et al.* Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 5, p. 735–742, maio 2007.

FROTTÉ, C. *et al.* Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 2, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762017000200419&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 22 abr. 2023

FURTADO, L. *et al.* Eficiência de drenagem de um modelo de pavimento de concreto permeável sob chuva natural. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 8, n. 1, p. 128–144, 2020.

GONÇALVES, A. D. M. DE A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1174–1184, out. 2013.

HALPIN, D. W.; WOODHEAD, R. W. **Administração da Construção Civil**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

IBRAHIM, A. *et al.* Construction and Building Materials. **Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties**, v. 50, p. 524–529, 2014.

JANSEN, B. E. M.; CAMACHO, F. M. **Desenvolvimento de traço de concreto poroso para a produção de lajotas permeáveis por controle de porosidade**. 2022. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta grossa/PR, 2022.

JOSHAGHANI, A. *et al.* Optimizing pervious concrete pavement mixture desing by using the taguchi method. **Construction and Building Materials**, v. v. 101, p. 317–325, 2015.

JUNIOR, A. J. S. A. *et al.* Desenvolvimento de pavimento drenante como sistema alternativo de drenagem urbana. **DELOS: DESARROLLO LOCAL SOSTENIBLE**, v. 16, n. 48, p. 3041–3055, 19 out. 2023.

KRUGER, P. *et al.* Influência do teor de material pulverulento (<75 µm) do agregado miúdo de resíduos de construção e demolição em argamassas de cimento Portland. **Cerâmica**, v. 66, n. 380, p. 507–515, dez. 2020.

KRUGER, P. **Efeito de diferentes teores de resíduo de gesso sobre o ataque interior por sulfatos em argamassas incorporando agregados reciclados de concreto (ARC) ou misto (ARM)**. 2021. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta grossa/PR, 2021.

MARTINS, D. F.; MELO, N. A. DE. Resíduo de construção civil em Paracatu (MG): análises do sistema de gerenciamento e estimativas de geração. **Revista Caminhos da Geografia**, v. 20, n. 72, p. 522–836, dez. 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto - Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEIRELES, J. R.; RASSI, K. C. A. Revisão da literatura sobre Reciclagem de Resíduos Sólidos da Construção Civil em parâmetro mundial. **PUC Goiás**, p. 1–16, 2022.

MIKAMI, R. J. Técnicas de caracterização de porosidade para o controle de misturas de concreto permeável. *In*: XVI CONGRESO LATINO AMERICANO DE PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN, 2021, Brasil. **Anais [...]** Brasil: ALCONPAT, 2021.

MIKAMI, R. J. **Dosagem e otimização de misturas de concreto permeável por controle de porosidade pelo método do grau de compactação**. 2022. Tese (Doutorado) – Universidade estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2022.

NANYA, C. S.; FERREIRA, F. G. D. S.; CAPUZZO, V. M. D. S. Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 4, p. e13073, 2021.

NASCIMENTO, E. C. D. *et al.* Avaliação do uso do agregado reciclado da construção civil como barreira hidráulica em camadas de coberturas de aterros sanitários. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, p. e547101019158, 18 ago. 2021.

NGUYEN, D. H. *et al.* A modified method for the design of pervious concrete mix. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 271–282, dez. 2014.

NIVELLE, A.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. São Paulo: BOOKMAN EDITORA LTDA., 2016.

NUCCI, J. C. **Qualidade Ambiental e Adensamento Urbano**. Curitiba: Edição do autor, 2008. v. 1

PADOVAN, R. G. **Influência da pré-molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto**. 2013. Dissertação de Mestrado – UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS, Rio Grande do Sul, 2013.

PEREIRA, K. K.; BARBOSA, M. P. Desenvolvimento de composição de concreto permeável com agregados oriundos de resíduos de construção civil da região de Campinas. *In*: ANAIS DO XX ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2015, Campinas/SP. **Anais do V Encontro de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação [...]** Campinas/SP: PUC Campinas, 22 set. 2015.

PILZ, S. E. *et al.* Concretos drenantes: estudo de dosagem e adição de fibras de polipropileno. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, p. 101–121, 1 fev. 2019.

PINTO, J. T.; SANTOS, L. F. U. DOS; OLIVEIRA, S. R. C. DE. Pesquisa bibliométrica sobre a avaliação das propriedades físico-mecânicas do concreto permeável com agregado reciclado. 2021, Rio de Janeiro. **Anais do VII Seminário Regional sobre Gestão de Recursos Hídricos [...]** Rio de Janeiro: Essentia Editora Iffluminense, 2021.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 18, n. 6, p. 461–468, jul. 2004.

SALESA, Á. *et al.* Physico – mechanical properties of multi – recycled concrete from precast concrete industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 248–255, jan. 2017.

SANTOS, D. A. *et al.* Extração mineral de quartzito e sua aplicabilidade na construção civil na cidade de Várzea – PB. **HOLOS**, v. 4, p. 89–100, 2 ago. 2014.

SARTORE, IGOR C.; PAULINO, R. S.; TORALLES, B. M. Utilização de piso grama fabricado com agregados de RCD em calçamentos: uma alternativa para drenagem urbana. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 12, n. 4, p. 269–278, dez. 2020.

SILVA, D. A.; LUNA DE MELO, C. E. Processo de britagem e sua influência nas características físicas do agregado graúdo para concreto. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**, n. 26, p. 36–47, 28 maio 2020.

SILVA, C. M. M. DE A. E; CAPUZZO, V. M. S. Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados de resíduo de concreto utilizando a abordagem de mistura dois estágios. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 1, p. e-12557, 2020.

STRIEDER, H. L. **Estudo do uso de agregados de concreto reciclado em concreto permeável para pavimentos**. 2021. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. Estudo da influência dos agregados de concreto reciclado em concretos permeáveis. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 1, p. 75–89, fev. 2016.

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

THOMAS, N. I. R.; COSTA, D. B. Adoption of environmental practices on construction sites. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 9–24, dez. 2017.

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

WAHI, N. *et al.* Critical Review on Construction Waste Control Practices: Legislative and Waste Management Perspective. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 224, p. 276–283, jun. 2016.

XIE, X. ET AL. Construction and Building Materials. **Maximum paste coating thickness without voids clogging of pervious concrete and its relationship to the rheological properties of cement paste**, v. 168, p. 732–746, abr. 2018.

XIE, X. *et al.* Maximum paste coating thickness without voids clogging of pervious concrete and its relationship to the rheological properties of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 732–746, abr. 2018.

XIE, X. *et al.* Mixture proportion design of pervious concrete based on the relationships between fundamental properties and skeleton structures. **Cement and Concrete Composites**, v. 113, p. 103693, out. 2020.

ZHONG, R.; LENG, Z.; POON, C. Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review. **Construction and Building Materials**, Elsevier. n. 183, p. 544–553, 15 jun. 2018.