

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS

RAFAEL JANSEN MIKAMI

DOSAGEM E OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS DE CONCRETO PERMEÁVEL POR
CONTROLE DE POROSIDADE PELO MÉTODO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO

PONTA GROSSA
2022

RAFAEL JANSEN MIKAMI

DOSAGEM E OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS DE CONCRETO PERMEÁVEL POR
CONTROLE DE POROSIDADE PELO MÉTODO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO

Tese apresentada como requisito parcial
para a obtenção do título de Doutor em
Engenharia e Ciência de Materiais, na
Universidade Estadual de Ponta Grossa,
área de Desenvolvimento e Caracterização
de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Pereira

PONTA GROSSA

2022

Mikami, Rafael Jansen
M636 Dosagem e otimização de misturas de concreto permeável por controle de porosidade pelo método do grau de compactação / Rafael Jansen Mikami. Ponta Grossa, 2022.
224 f.

Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais - Área de Concentração: Desenvolvimento e Caracterização de Materiais), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Pereira.

1. Dosagem. 2. Pavimento permeável. 3. Compactação. 4. Agregado. 5. Pasta de cimento. I. Pereira, Eduardo. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Desenvolvimento e Caracterização de Materiais. III.T.

CDD: 620.11

RAFAEL JANSEN MIKAMI

DOSAGEM E OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS DE CONCRETO PERMEÁVEL POR
CONTROLE DE POROSIDADE PELO MÉTODO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO

Tese apresentada para obtenção do título de doutor em Engenharia e Ciência de
Materiais na Universidade Estadual de Ponta Grossa, Área de Desenvolvimento e
Caracterização de Materiais.

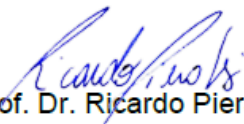
Ponta Grossa, 13 de junho de 2022.



Prof. Dr. Eduardo Pereira
Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais
Universidade Estadual de Ponta Grossa



Prof. Dr. Adilson Luiz Chinelatto
Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais
Universidade Estadual de Ponta Grossa



Prof. Dr. Ricardo Pieralisi
Doutor em Engenharia da Construção
Universidade Federal do Paraná



Prof^a. Dr^a. Andressa Gobbi
Doutora em Engenharia da Construção
Universidade Federal do Paraná



Prof. Dr. Sidnei Antonio Pianaro
Doutor em Química
Universidade Estadual de Ponta Grossa

Dedico aos meus pais, Hilda Jansen Mikami e Nelson Mikami, pela compreensão e apoio em todos os momentos deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me guiado e sustentado durante todos esses anos e me proporcionar oportunidades muito além do que eu imaginava alcançar.

Ao meu orientador, professor Dr. Eduardo Pereira, por ter proporcionado a oportunidade de desenvolver esta pesquisa. Sou muito grato pela orientação, confiança e por ter compartilhado seus conhecimentos e ensinamentos, que me proporcionaram um grande crescimento profissional e como pesquisador.

Ao professor Dr. Adilson Luiz Chinelatto, que possibilitou o meu ingresso no programa. Ao professor Dr. Ricardo Pieralisi por toda a colaboração com seu conhecimento e experiência.

À professora Dr^a. Patrícia Krüger, por todo o apoio, incentivo e por sempre estar disposta a ajudar. Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da UEPG, em especial: Fernanda Brekailo, Elias Pereira e Letícia Col Debella Santos.

Ao laboratorista Paulo Ubirajara dos Santos e aos acadêmicos Marina Mateus Misga, Igor Matheus Pastuch e Brian Willians Paulino Mendes Israel, por todo o auxílio na fase experimental desta pesquisa. Aos colegas de pós-graduação Marcelo Miranda Farias e Jadiel Matias de Almeida.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. À empresa MC-Bauchemie pelo apoio com insumos necessários para esta pesquisa. A todos que direta ou indiretamente fizeram parte deste projeto.

O importante é nunca parar de questionar. A curiosidade tem sua própria razão de existir. Não se pode deixar de ficar admirado quando se contemplam os mistérios da eternidade, da vida, da maravilhosa estrutura da realidade. Basta que se busque compreender um pouco desse mistério a cada dia.

(Albert Einstein)

RESUMO

O concreto permeável é um material com potencial aplicação em pavimentos permeáveis para a mitigação de inundações urbanas. A dosagem do concreto permeável é uma das etapas fundamentais para o desenvolvimento de misturas com propriedades adequadas a sua utilização. Métodos de dosagem já foram propostos na literatura, porém com aplicação ainda limitada. Neste estudo o objetivo principal foi propor uma metodologia de dosagem adaptável a diferentes distribuições granulométricas de agregado graúdo e energia de compactação variável. O método de dosagem proposto foi embasado no estado de compactação do agregado graúdo, permitindo o desenvolvimento de misturas com controle de porosidade pelo grau de compactação. Essa metodologia foi aplicada na elaboração de 48 misturas de concreto permeável com porosidades de 20, 25 e 30%, sendo avaliadas diferentes composições granulométricas do agregado graúdo, inclusão de agregado miúdo e utilização de aditivos superplastificantes. Por meio do método do grau de compactação foi possível sistematizar um processo de dosagem de concreto permeável para controlar as suas propriedades hidráulicas e mecânicas pelo controle de porosidade. Para aplicação da metodologia foram desenvolvidas misturas de concreto permeável com porosidade entre 15 e 30%. Modelos de resistência à compressão, condutividade hidráulica e consumo de cimento foram desenvolvidos em função da porosidade para permitir a dosagem de misturas. Para a faixa de porosidade analisada foi possível atingir resistências entre 9,5 e 29,4 MPa e condutividades hidráulicas entre 0,07 e 1,55 cm/s. Uma segunda etapa de dosagem foi proposta para otimizar as misturas de concreto permeável para uma porosidade fixa. Foram apresentadas metodologias para alterar a relação a/c e incluir agregado miúdo com o objetivo de aprimorar a resistência mecânica e reduzir o consumo de cimento do concreto permeável. A partir da redução da relação a/c de 0,28 para 0,20 foi possível obter acréscimos na resistência à compressão entre 17 e 37% sem ocasionar prejuízo ao desempenho hidráulico da mistura. A inclusão de 20% de agregado miúdo na mistura de concreto permeável possibilitou reduzir o consumo de cimento em aproximadamente 10%, havendo manutenção da resistência à compressão e condutividade hidráulica. Para misturas de 20% de porosidade a inclusão de 40% de agregado miúdo ainda proporcionaria uma redução de cimento de 17% sem prejudicar suas propriedades. Dessa forma, para os materiais avaliados neste estudo a metodologia de dosagem proposta permitiu o desenvolvimento de misturas com porosidade controlada, possibilitando também o controle de suas propriedades mecânicas e hidráulicas. O método proposto também possibilitou o controle da relação a/c e do teor de agregado miúdo na mistura, sendo possível ainda otimizar o concreto permeável visando uma maior eficiência no consumo de cimento.

Palavras-chave: Dosagem. Pavimento Permeável. Compactação. Agregado. Pasta de Cimento.

ABSTRACT

Pervious concrete is a material with potential application in pervious pavements to mitigate urban flooding. The mixture design of pervious concrete is one of the fundamental steps for the development of mixtures with properties suitable for its application. Mixture design methods have been proposed in the literature, but their application is still limited. In this study the main objective was to propose a mixture design method adaptable to different coarse aggregate gradations and variable compaction energy. The proposed mixture design method was based on the coarse aggregate compaction state, allowing the development of mixtures with porosity control by the degree of compaction. This methodology was applied in the development of 48 mixtures of pervious concrete with porosities of 20, 25 and 30%, evaluating different coarse aggregate gradations, inclusion of fine aggregate and use of superplasticizer admixtures. Based on the degree of compaction method, it was possible to systematize a design process for pervious concrete to control its hydraulic and mechanical properties by porosity control. To apply the methodology, pervious concrete mixtures with porosity between 15 and 30% were developed. Models of compressive strength, hydraulic conductivity and cement consumption were developed as a function of porosity to allow the design of mixtures. For the porosity range analyzed it was possible to achieve strengths between 9.5 and 29.4 MPa and hydraulic conductivities between 0.07 and 1.55 cm/s. A second stage in the mixture design was proposed to optimize the pervious concrete mixtures for a target porosity. Methodologies were presented to change the w/c ratio and include fine aggregate with the objective of improving the mechanical strength and reducing the cement consumption of pervious concrete. By reducing the w/c ratio from 0.28 to 0.20 it was possible to obtain increases in compressive strength between 17 and 37% without harming the hydraulic performance of the mixture. The inclusion of 20% fine aggregate in the pervious concrete mixture made it possible to reduce cement consumption by approximately 10%, while maintaining the compressive strength and hydraulic conductivity. For mixtures with 20% porosity, the inclusion of 40% fine aggregate would still provide a 17% cement reduction without affecting its properties. Thus, for the materials evaluated in this study, the proposed design method allowed the development of mixtures with controlled porosity, also enabling the control of their mechanical and hydraulic properties. The proposed method also allowed the control of the w/c ratio and fine aggregate content in the mixture, being also possible to optimize the pervious concrete aiming a higher efficiency in cement consumption.

Keywords: Mixture Design. Pervious Pavement. Compaction. Aggregate. Cement Paste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Infiltração de água em uma peça pré-moldada de concreto permeável	23
Figura 2	– Representação das porosidades aberta, fechada e vazios da pasta de cimento.....	26
Figura 3	– Relações entre a porosidade e a condutividade hidráulica de concretos permeáveis, por meio do permeâmetro de carga variável ...	30
Figura 4	– Representação da variação da porosidade do concreto permeável em função da profundidade em relação à superfície.....	31
Figura 5	– Modelos de permeâmetro de carga variável com extravasor (a) e saída direta (b)	33
Figura 6	– Modelos de permeâmetro de (a) carga constante com reservatório de nível constante e (b) com extravasor	34
Figura 7	– Anel de infiltração instalado em peça de concreto permeável e execução do ensaio para determinação da taxa de infiltração.....	36
Figura 8	– Vedação lateral da amostra de concreto permeável e execução do ensaio para determinação da taxa de infiltração	37
Figura 9	– Compactação (a) em campo e (b) soquetes de compactação Proctor e (c) Marshall	44
Figura 10	– Descrição das principais etapas desenvolvidas nesta pesquisa	55
Figura 11	– Distribuição granulométrica do pedrisco utilizado na confecção dos concretos permeáveis	59
Figura 12	– Distribuição <i>boxplot</i> dos dados de porosidade no estado fresco dos concretos permeáveis	63
Figura 13	– Resultados médios da resistência à compressão das amostras de concreto P20 e P30.....	63
Figura 14	– Comparação entre os modelos ACI 209R e CEB/FIP para as amostras submetidas a cura mista.....	67
Figura 15	– Comparação entre os modelos ACI 209R e CEB/FIP para as amostras em cura úmida.....	67
Figura 16	– Resultados de resistência à tração indireta das misturas P20 e P30...	69
Figura 17	– Porosidade no estado fresco das séries g/c-3,10 e g/c-4,68.....	72

Figura 18 – Porosidade no estado endurecido das séries g/c-3,10 e g/c-4,68.....	73
Figura 19 – Porosidade aberta das séries g/c-3,10 e g/c-4,68 com diferentes níveis de compactação.....	74
Figura 20 – Representação do modelo de porosidade no estado fresco em função da energia de compactação e relação g/c para N = 2	75
Figura 21 – Resultados médios de resistência à compressão dos concretos g/c-3,10 e g/c-4,68	76
Figura 22 – Resultados médios de resistência à tração indireta das misturas g/c-3,10 e g/c-4,68	77
Figura 23 – Representação gráfica dos modelos de resistência mecânica em função da relação g/c e energia de compactação	78
Figura 24 – Intensidade de consumo de cimento das misturas g/c-3,10 e g/c-4,68	79
Figura 25 – Condutividade hidráulica média das misturas de concreto permeável g/c-3,10 e g/c-4,68	80
Figura 26 – Modelos de condutividade hidráulica das misturas (a) g/c-3,10 e (b) g/c-4,68	82
Figura 27 – Aspecto visual das faces inferior e superior das amostras de concreto P20	83
Figura 28 – Modo de ruptura à tração indireta e seção de fratura do concreto g/c-3,10 compactado com 2 camadas.....	84
Figura 29 – Distribuição vertical da massa específica, porosidade e resistência à compressão do concreto g/c-3,10-2c	84
Figura 30 – Distribuição vertical da massa específica, porosidade e resistência à compressão do concreto g/c-4,68-2c	86
Figura 31 – Distribuição vertical da massa específica, porosidade e resistência à compressão do concreto g/c-3,10-3c	86
Figura 32 – Modo de ruptura à tração por compressão diametral das amostras compactadas com 3 camadas.....	87
Figura 33 – Distribuição vertical da massa específica, porosidade e resistência à compressão do concreto g/c-4,68-3c	88
Figura 34 – Amostra utilizada no ensaio de determinação da absorção da pasta de cimento.....	93
Figura 35 – Porosidade média obtida por cada metodologia de caracterização	95

Figura 36 – Comparação entre as porosidades no estado fresco, (a) porosidade no estado endurecido e (b) porosidade intergranular	96
Figura 37 – Comparação entre a porosidade no estado endurecido e porosidade aberta.....	97
Figura 38 – Representação esquemática dos permeâmetros de carga constante com saída por (a) reservatório e por (b) extravasor.....	100
Figura 39 – Representação esquemática e foto do permeâmetro de carga variável.....	101
Figura 40 – Representação esquemática do ensaio para determinação da taxa de infiltração.....	102
Figura 41 – Variação da permeabilidade das amostras de concreto permeável dos grupos A, B, C e D em função da carga hidráulica nos permeâmetros de carga constante.....	104
Figura 42 – Variação da permeabilidade das amostras de concreto permeável dos grupos A, B, C e D em função da carga hidráulica inicial no permeâmetro de carga variável.....	104
Figura 43 – Comparação entre os coeficientes de permeabilidade obtidos nos permeâmetros de carga constante para as carga hidráulicas de 10, 20, 30 e 40 cm.....	106
Figura 44 – Comparação entre os coeficientes de permeabilidade obtidos nos permeâmetros de carga constante independentemente da carga hidráulica.....	107
Figura 45 – Comparação entre os coeficientes de permeabilidade obtidos nos permeâmetros de carga constante e de carga variável independentemente da carga hidráulica	108
Figura 46 – Perfil de velocidade da água em função da carga hidráulica no permeâmetro de carga variável.....	109
Figura 47 – Comparação entre a taxa de infiltração na camada superior e inferior das amostras.....	111
Figura 48 – Comparação entre a taxa de infiltração e a condutividade hidráulica medida pelo permeâmetro de carga variável com carga inicial de 50 cm	112
Figura 49 – Distribuição granulométrica do pedrisco, brita 1 e mistura P/B	115
Figura 50 – Porosidades no estado fresco, endurecido e porosidade aberta dos concretos permeáveis Série U4, U6 e U9	119

Figura 51 – Resultados médios de resistência à compressão e à tração indireta para as amostras de concreto P20 e P30 produzidas com agregados de diferentes tamanhos	120
Figura 52 – Falha na compactação da amostra de concreto P20 confeccionada com a fração 9,5 mm.....	121
Figura 53 – Distribuição da pasta de cimento no agregado para diferentes consistências.....	122
Figura 54 – Resultados médios de condutividade hidráulica dos concretos da série P20 e P30, obtidos pelo permeâmetro de carga variável	123
Figura 55 – Porosidade aberta, porosidade no estado fresco e endurecido das amostras série P20	125
Figura 56 – Porosidade aberta, porosidade no estado fresco e endurecido das amostras série P30	126
Figura 57 – Resultados médios de resistência à compressão e consumo de cimento dos concretos permeáveis da série P20 confeccionados com composições binárias do agregado	127
Figura 58 – Resultados médios de resistência à compressão e consumo de cimento dos concretos permeáveis da série P30 confeccionados com composições binárias do agregado	128
Figura 59 – Resultados médios de resistência à tração indireta dos concretos das séries P20 e P30	129
Figura 60 – Resultados médios de condutividade hidráulica e porosidade aberta dos concretos permeáveis da série P20	130
Figura 61 – Resultados médios de condutividade hidráulica e porosidade aberta dos concretos permeáveis da série P30	131
Figura 62 – Resultados médios de porosidade aberta, porosidade no estado fresco e endurecido dos concretos série P20 e P30	133
Figura 63 – Resultados médios de resistência à compressão e à tração das misturas P20 e P30.....	134
Figura 64 – Resultados médios de condutividade hidráulica das misturas P20 e P30	136
Figura 65 – Intensidade de consumo de cimento das misturas produzidas com agregados de distribuição uniforme, descontínua e contínua	137
Figura 66 – Comparação entre o desempenho mecânico e hidráulicos dos concretos permeáveis produzidos com agregados série U, D e C.....	139

Figura 67 – Representação gráfica do modelo de regressão de condutividade hidráulica em função dos parâmetros E_v/S_u e V_p/S_u	143
Figura 68 – Comparação entre condutividade hidráulica estimada e medida para o conjunto de dados utilizado no modelo de regressão	144
Figura 69 – Relações volumétricas entre o agregado, pasta de cimento e porosidade no concreto permeável	149
Figura 70 – Efeito da energia e método de compactação no índice G_c	153
Figura 71 – Grau de compactação médio em função do volume de pasta de cimento em concretos produzidos com pedrisco	154
Figura 72 – Grau de compactação médio em função da área superficial do agregado graúdo	155
Figura 73 – Principais etapas para a aplicação do método proposto	160
Figura 74 – Fundo da peneira e aspecto visual do concreto com relação a/c de 0,28 após vibração	161
Figura 75 – Fundo da peneira e aspecto visual dos concretos permeáveis com relação a/c de 0,30 e 0,32 após vibração.....	162
Figura 76 – Resultados de (a) porosidade no estado fresco e (b) massa específica no estado fresco comparados aos valores de projeto	164
Figura 77 – Porosidade média de concretos permeáveis série (a) P20, (b) P25 e (c) P30	165
Figura 78 – (a) Volume de pasta de cimento e (b) massa específica no estado fresco em comparação a valores estimados	166
Figura 79 – Principais etapas do método de dosagem proposto	168
Figura 80 – Comparação entre (a) porosidade de projeto e porosidade medida no estado fresco e (b) massa específica estimada e medida no estado fresco.....	176
Figura 81 – Curvas de resistência à compressão, condutividade hidráulica e consumo de cimento em função da porosidade	177
Figura 82 – Corpo de prova troncocônico (a) após moldagem e (b) após abatimento	185
Figura 83 – Índice de consistência para pastas de cimento com a/c de 0,20 a 0,26	186
Figura 84 – Aspecto visual das bases dos corpos de prova com relação a/c de 0,20 a 0,28	187

Figura 85 – Porosidade e massa específica no estado fresco das misturas com relação a/c variável	188
Figura 86 – Corpo de prova troncocônico da pasta contendo agregado miúdo (a) após moldagem e (b) após abatimento.....	189
Figura 87 – Índice de consistência para pastas de cimento com m/c variando de 0,0 a 0,4	189
Figura 88 – Aspecto visual da base dos corpos de prova produzidos com teor variável de agregado miúdo (m/c).....	190
Figura 89 – Porosidade e massa específica no estado fresco das misturas produzidas com relação m/c variável	191
Figura 90 – Principais etapas da otimização de misturas de concreto permeável	192
Figura 91 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo e miúdo	199
Figura 92 – (a) Porosidade no estado fresco e (b) condutividade hidráulica das misturas com relação a/c variável	201
Figura 93 – Curvas de resistência à compressão e consumo de cimento em função da relação a/c	202
Figura 94 – Intensidade de consumo de cimento das misturas em função da resistência à compressão.....	203
Figura 95 – (a) Porosidade no estado fresco e (b) condutividade hidráulica das misturas com relação m/c variável	205
Figura 96 – Curvas de resistência à compressão e consumo de cimento em função da relação m/c	206
Figura 97 – Intensidade no consumo de cimento das misturas contendo adição de agregado miúdo	207

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Composição das misturas de concreto permeável desenvolvidas na literatura	25
Quadro 2 – Comparação entre os tipos de permeâmetro e carga hidráulica adotados na determinação da permeabilidade de concretos permeáveis.....	35
Quadro 3 – Comparação entre os métodos de compactação utilizados em diferentes estudos a respeito do concreto permeável	45
Quadro 4 – Comparação entre os principais aspectos dos métodos de dosagem de concreto permeável.....	53
Quadro 5 – Metodologias utilizadas na caracterização física dos agregados.....	57
Quadro 6 – Metodologias utilizadas na caracterização física e mecânica do concreto permeável.....	57
Quadro 7 – Metodologias utilizadas na caracterização da porosidade do concreto permeável.....	91
Quadro 8 – Especificação dos permeâmetros utilizados nesta pesquisa	99
Quadro 9 – Composições granulométricas do agregado graúdo utilizadas nesta etapa	115
Quadro 10 – Dados de entrada no método do grau de compactação.....	156

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos estruturais para pavimentos permeáveis em função da tipologia do revestimento e intensidade do tráfego de projeto	41
Tabela 2 – Propriedades físicas obtidas na caracterização do pedrisco	60
Tabela 3 – Caracterização físico-química do cimento CII-F 32	60
Tabela 4 – Características das misturas de concreto permeável P20 e P30	61
Tabela 5 – Coeficientes obtidos no ajuste dos modelos de evolução da resistência à compressão	66
Tabela 6 – Número de golpes por camada correspondente a cada energia de compactação.....	71
Tabela 7 – Resumo do teste ANOVA de medidas repetidas dos diferentes métodos de caracterização de porosidade	94
Tabela 8 – Propriedades físicas obtidas na caracterização do pedrisco	116
Tabela 9 – Área superficial dos agregados utilizados na Etapa II.....	117
Tabela 10 – Relação agregado/cimento empregada em cada mistura de concreto permeável.....	118
Tabela 11 – Relação agregado/cimento empregada em cada mistura de concreto permeável.....	125
Tabela 12 – Relação agregado/cimento empregada em cada mistura de concreto permeável.....	132
Tabela 13 – Valores médios de condutividade hidráulica e dos parâmetros de entrada do modelo de regressão	142
Tabela 14 – Nomenclatura dos parâmetros utilizados no método do grau de compactação.....	149
Tabela 15 – Parâmetros de entrada e traço piloto das misturas P20, P25 e P30...	162
Tabela 16 – Resultados do teste de compactação das misturas P20, P25 e P30 ..	163
Tabela 17 – Propriedades físicas obtidas na caracterização do agregado graúdo	174
Tabela 18 – Traço piloto utilizado para execução do teste de compactação de cada mistura	175
Tabela 19 – Resultados do teste de compactação das misturas	175

Tabela 20 – Resultados do teste de compactação das misturas com relação a/c variável.....	187
Tabela 21 – Resultados do teste de compactação das misturas com relação m/c variável.....	190
Tabela 22 – Traços corrigidos pelo método do grau de compactação e parâmetros de dosagem	200
Tabela 23 – Traços corrigidos e parâmetros de dosagem em função do teor de agregado miúdo	205

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 OBJETIVO GERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 PROPRIEDADES	26
2.1.1 Porosidade	26
2.1.2 Permeabilidade	29
2.1.3 Resistência Mecânica.....	38
2.2 PREPARO DO CONCRETO PERMEÁVEL	42
2.2.1 Mistura dos Materiais Constituintes.....	42
2.2.2 Compactação	43
2.2.3 Cura.....	46
2.3 MÉTODOS DE DOSAGEM	47
2.3.1 Método do National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA)	48
2.3.2 Método do American Concrete Institute (ACI)	49
2.3.3 Método de Nguyen <i>et al.</i> (2014).....	50
2.3.4 Outros Métodos de Dosagem.....	51
2.3.5 Eficiência dos Métodos de Dosagem	53
3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	55
3.1 ESTRUTURA DA TESE	55
3.2 METODOLOGIAS DE CARACTERIZAÇÃO	57
4 ETAPA I – ESTUDO DE MÉTODOS DE PREPARO DE MISTURAS DE CONCRETO PERMEÁVEL.....	59
4.1 MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
4.2 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE CURA	62
4.3 METODOLOGIA DE COMPACTAÇÃO.....	70
4.3.1 Influência da Compactação na Porosidade	72
4.3.2 Efeito da Compactação no Desempenho Mecânico.....	75
4.3.3 Impacto da Compactação na Condutividade Hidráulica.....	80
4.3.4 Caracterização do Perfil Vertical de Porosidade	82

4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PREPARO DO CONCRETO PERMEÁVEL.....	89
5 ETAPA II – AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE CARACTERIZAÇÃO	91
5.1 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DA POROSIDADE.....	91
5.2 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA.....	97
5.2.1 Métodos de Caracterização Hidráulica.....	98
5.2.2 Comparação entre os Modelos de Permeâmetros	103
5.2.3 Avaliação do Método do Anel de Infiltração	110
5.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS METODOLOGIAS DE CARACTERIZAÇÃO ..	113
6 ETAPA III – INFLUÊNCIA DO AGREGADO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL.....	114
6.1 MATERIAIS E MÉTODOS.....	114
6.2 INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO AGREGADO	118
6.3 ESTUDO DE COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS	124
6.4 ANÁLISE DE AGREGADOS CONVENCIONAIS	132
6.5 EFICIÊNCIA MECÂNICA E HIDRÁULICA DAS MISTURAS.....	137
6.6 INFLUÊNCIA DO AGREGADO NA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	140
6.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE A SELEÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO	145
7 ETAPA IV – DOSAGEM DE CONCRETO PERMEÁVEL PELO MÉTODO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO	147
7.1 MÉTODO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO	147
7.1.1 Descrição do Método	148
7.1.2 Grau de Compactação	153
7.1.3 Teste de Compactação e Aplicação do Método	155
7.1.4 Aplicação do Método do Grau de Compactação	161
7.2 PROCEDIMENTO PARA DOSAGEM DE CONCRETOS PERMEÁVEIS	167
7.2.1 Seleção do Agregado e Energia de Compactação.....	169
7.2.2 Seleção da Porosidade de Projeto	170
7.2.3 Aplicação do Método de Dosagem.....	174
7.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO	178
8 ETAPA V – MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS DE CONCRETO PERMEÁVEL	180
8.1 AJUSTE DE CONSISTÊNCIA DA PASTA DE CIMENTO.....	181

8.1.1 Descrição da Metodologia	182
8.1.2 Ajuste para Relação a/c Variável	185
8.1.3 Ajuste para Adição de Areia Variável	188
8.2 PROCEDIMENTO DE OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS.....	192
8.2.1 Controle da Relação a/c	193
8.2.2 Inclusão de Agregado Miúdo.....	196
8.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS	199
8.3.1 Controle da Relação a/c	200
8.3.2 Inclusão de Agregado Miúdo.....	204
8.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS	208
9 CONCLUSÕES	210
9.1 CONCLUSÃO GERAL	210
9.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS.....	210
9.3 PERSPECTIVAS FUTURAS	213
REFERÊNCIAS.....	214

1 INTRODUÇÃO

O concreto permeável, também denominado de concreto poroso, é um material caracterizado por uma estrutura contendo poros interconectados que são capazes de conduzir água. A sua produção é feita pela mistura de cimento, água e agregado graúdo, se distinguindo do concreto convencional pela pequena quantidade ou até mesmo a ausência de agregado miúdo em sua composição (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; ACI, 2010).

Com um índice de volume de vazios que usualmente varia de 15 a 35% (concretos convencionais têm índices de vazios na ordem de 10%; CRUZ; CAMPO; COLORADO, 2015), o concreto poroso permite um escoamento de água que viabiliza a sua utilização em pavimentos permeáveis. Entre as vantagens da utilização desse sistema de drenagem estão: a redução do escoamento superficial de águas pluviais, a recarga do lençol freático, o armazenamento de água (como reservatório de detenção ou para posterior reutilização), a redução do fenômeno de ilhas de calor e ainda o aumento da qualidade das águas pluviais de centros urbanos (IBRAHIM *et al.*, 2014; CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016a; GRUBEŠA *et al.*, 2018; KOVÁČ; SIČÁKOVÁ, 2018; XIE *et al.*, 2018). Essas características tornam o concreto permeável um material alternativo para diversas aplicações como calçadas, estacionamentos, pavimentos para tráfego leve de veículos e pisos externos.

Embora não seja um material novo, o concreto permeável foi amplamente estudado nos últimos anos devido a sua capacidade de reduzir o escoamento superficial de águas pluviais. Em função disso, os pavimentos permeáveis podem ser utilizados como sistemas auxiliares de drenagem urbana, visando à mitigação dos efeitos causados pela impermeabilização do solo, como as inundações urbanas (GRUBEŠA *et al.*, 2018; XIE *et al.*, 2018).

A existência de pelo menos 15% de volume de poros é necessária para que o material conduza água pelo seu interior (ACI, 2010). A remoção do agregado miúdo da composição do concreto geralmente é suficiente para garantir um desempenho hidráulico significativo ao material. Porém, fatores como a compactação excessiva ou o excesso de pasta de cimento podem comprometer a condutividade hidráulica do concreto permeável. A dificuldade no projeto de misturas de concreto permeável, no entanto, é alcançar o equilíbrio entre a resistência mecânica e o desempenho hidráulico (BONICELLI *et al.*, 2013; GAEDICKE; MARINES; MIANKODILA, 2014).

Métodos de dosagem já foram propostos na literatura, porém ainda existem limitações na sua aplicação. Entre as limitações podem ser citadas a restrição do método a agregados com tamanho e distribuição granulométricas específicas, necessidade do ajuste da energia de compactação e a utilização de modelos restritos aos materiais empregados na proposta de dosagem. Essas restrições se devem principalmente às particularidades do material, que dificultam a correlação da resistência mecânica com os parâmetros usuais de dosagem. Além disso, o concreto permeável apresenta processos diferentes do convencional desde a etapa de preparo da mistura, sendo fundamental considerá-los em um estudo de dosagem. A porosidade é um dos parâmetros que se torna relevante na elaboração de misturas de concreto permeável, uma vez que está associada tanto ao desempenho mecânico como hidráulico do material. Porém, é uma propriedade de difícil controle por depender de fatores como as características do agregado gráudo e do adensamento do concreto. Ainda que a relação água/cimento tenha uma importância no desenvolvimento da resistência mecânica do concreto permeável, a consistência da pasta de cimento afeta o comportamento do concreto poroso de uma forma mais evidente (KIM; LEE, 2010; XIE *et al.*, 2018). Entretanto, poucos estudos contemplam a influência das características da pasta de cimento no desenvolvimento das propriedades do material. Dessa forma, ainda é necessário compreender a relação entre os parâmetros de dosagem do concreto permeável e o seu desempenho mecânico e hidráulico.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma metodologia para a dosagem de concreto permeável relacionando as principais características dos materiais constituintes e as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas do material.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estabelecer um procedimento de preparo, compactação e cura do concreto permeável;
- Comparar diferentes técnicas de caracterização de porosidade e condutividade hidráulica;

- Avaliar a influência do tamanho e distribuição granulométrica do agregado na dosagem do concreto permeável;
- Desenvolver um método para sistematizar a produção de concretos com porosidade fixa;
- Propor uma metodologia para controlar a consistência da pasta de cimento do concreto permeável;
- Avaliar a relação água/cimento como parâmetro de controle do comportamento mecânico do concreto permeável;
- Propor uma metodologia de dosagem de agregado miúdo para otimizar as misturas de concreto;
- Estabelecer um método de dosagem para relacionar a porosidade, relação água/cimento e teor de agregado miúdo com as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O concreto permeável é um tipo especial de concreto que se destaca pela capacidade de conduzir água pelo seu interior. A sua principal aplicação é na construção de pavimentos drenantes, uma vez que as águas superficiais que incidem sobre o material são rapidamente infiltradas e direcionadas para camadas inferiores do pavimento, conforme ilustrado na Figura 1. Para que isso seja possível, o material deve apresentar uma eficiência hidráulica elevada aliada a uma resistência mecânica compatível com os esforços esperados no pavimento. Como consequência, o concreto poroso se distingue do convencional em diversos aspectos, possuindo particularidades na sua dosagem, produção e caracterização.

Figura 1 – Infiltração de água em uma peça pré-moldada de concreto permeável



Fonte: O autor.

A constituição do concreto permeável envolve os mesmos componentes de um concreto convencional – água, cimento, agregado graúdo e eventualmente agregado miúdo. No entanto, a proporção entre os materiais constituintes (traço) deve ser determinada cautelosamente para garantir a capacidade de infiltração de água pelo seu interior. Isso geralmente é obtido com uma relação água/cimento baixa em conjunto com uma quantidade reduzida ou até mesmo nula de agregado miúdo na mistura (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; ACI, 2010).

O cimento Portland geralmente é o aglomerante principal utilizado na confecção do concreto permeável. Conforme o relatório ACI 522R (ACI, 2010), adições também podem ser utilizadas com o objetivo de aprimorar a resistência da

matriz cimentícia do material. Na literatura já existem relatos do uso de adições como cinza volante (HWANG; CORTÉS, 2021), sílica ativa (ADIL; KEVERN; MANN, 2020; BILAL *et al.*, 2021) e nano-sílica (MOHAMMED *et al.*, 2018). Nos estudos citados, o uso de adições implicou em aprimoramento mecânico do concreto permeável, justificado pela densificação microestrutural da matriz cimentícia. No entanto, os autores destacam que as adições alteram consideravelmente a reologia e trabalhabilidade do material, o que pode afetar características como a porosidade e permeabilidade.

Em geral, os agregados graúdos convencionais podem ser utilizados na produção de concretos permeáveis. Segundo o relatório ACI 522R (ACI, 2010) os agregados usualmente apresentam grãos de dimensão variando de 9,5 a 19,0 mm. No entanto, Tennis, Leming e Akers (2004) citam que agregados com grãos de dimensões variando de 1,18 a 9,5 mm também são comumente empregados. Os autores também relatam que para aplicações como calçadas, estacionamentos e pavimentos de tráfego leve, agregados de menor dimensão são preferíveis por resultar em um melhor acabamento superficial. No desenvolvimento de misturas de concreto permeável também é comum a utilização de agregados com tamanho uniforme, sendo estes geralmente associados a um índice de vazios superior (CROUCH; PITT; HEWITT, 2007; KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017).

Embora tenha se originado como um concreto sem agregado miúdo em sua composição, a adição de areia pode ser realizada de forma controlada. Na literatura já foram testados teores de areia variando de 5 a 15% em relação a massa total de agregados, sendo usualmente constatado um aperfeiçoamento mecânico e aumento da durabilidade do material (LIAN; ZHUGE, 2010; BONICELLI; GIUSTOZZI; CRISPINO, 2015; SAHDEO *et al.*, 2020; ELANGO *et al.*, 2021). No entanto, nas pesquisas reportadas na literatura, a adição de agregado miúdo geralmente é realizada sem o controle da porosidade ou reologia da mistura, ocasionando um prejuízo à permeabilidade do concreto. Dessa forma, ainda é necessário avaliar o potencial da adição de agregado miúdo com controle de porosidade e consistência da matriz cimentícia.

O traço do concreto permeável é representado principalmente pela relação em massa entre agregado graúdo e cimento (relação g/c). De acordo com Tennis, Leming e Akers (2004), o concreto permeável usualmente é produzido com relações g/c entre 4,0 e 4,5. Como consequência, o consumo de cimento geralmente se encontra entre

270 e 415 kg/m³ (ACI, 2010). No entanto, a proporção agregado/cimento deve ser ajustada para cada agregado, sendo uma função do volume de pasta necessário na mistura. A relação água/cimento (a/c) é mantida na faixa de 0,25 a 0,40, sendo selecionada de forma que a pasta de cimento proporcione uma cobertura uniforme dos agregados (DEBNATH; SARKAR, 2018). Relações a/c baixas podem ocasionar uma distribuição heterogênea da pasta de cimento, prejudicando a ligação entre os agregados. Por outro lado, o excesso de água na mistura pode gerar o escoamento da pasta de cimento. Isso pode levar ao tamponamento dos poros, comprometendo assim o desempenho hidráulico do concreto (XIE *et al.*, 2018; COSTA *et al.*, 2021). No Quadro 1 estão relacionadas composições de misturas de concreto permeável retiradas de estudos publicados entre 2015 e 2022.

Quadro 1 – Composição das misturas de concreto permeável desenvolvidas na literatura

Autor	Dmax^a (mm)	g/c	a/c	Areia^b
Joshaghani <i>et al.</i> (2015)	9,5 - 19,0	3,1 – 7,6	0,25 – 0,35	-
Torres, Hu e Ramos (2015)	6,3 - 9,5	3,6 – 6,5	0,33	-
Bonicelli, Giustozzi e Crispino (2015)	10,0	5,0	0,27 – 0,35	5 – 10%
Zhong e Wille (2016)	1,19 - 4,75	2,5 – 3,5	0,22 – 0,55	-
Xu <i>et al.</i> (2018)	26,5	8 – 10	0,38 – 0,45	15%
Yu <i>et al.</i> (2019a)	4,75 – 15,0	4,5	0,31	-
Zhang, Y. <i>et al.</i> (2020)	4,75 - 13,2	3,8 – 4,5	0,30	-
AlShareedah, Haider e Nassiri (2020)	9,5	4,3 – 5,7	0,34	-
Huang, Luo e Khan (2020)	10,0 - 15,0	1,9 – 3,7	0,20 – 0,30	-
Sahdeo, Ransinchung e Debbarma (2020)	6,7 - 19,0	4,0	0,30 – 0,38	5 – 10%
Adil, Kevern e Mann (2021)	9,5	3,9 – 4,4	0,27 – 0,32	-
Bittencourt, Magalhães e Tavares (2021)	19,0	4,0	0,37	-
Shan <i>et al.</i> (2022)	9,5	4,1 – 5,4	0,30	-

Notas: ^a Dimensão máxima do agregado; ^b Teor de areia em relação a massa de agregado gráudo.

Conforme o Quadro 1, estudos já foram desenvolvidos utilizando-se agregados de diferentes dimensões. Em geral não foram observados materiais com dimensão superior a 19,0 mm, sendo frequente o emprego de agregados de até 9,5 mm. Entre os estudos relacionados, houve uma grande variação na relação g/c, sendo observados valores de 1,9 a 10,0. Essa variação é esperada, uma vez que para produzir misturas com porosidades distintas é necessário ajustar o volume de pasta de cimento. Além disso, o volume de pasta exigido para cada agregado será diferente, uma vez que dependerá do seu índice de volume de vazios. Na maioria dos estudos a relação a/c ficou contida no intervalo sugerido pela literatura, de 0,25 a 0,40. Dos

estudos relacionados no Quadro 1, apenas três empregaram areia na composição do concreto permeável, com teores de até 15% em relação à massa de agregado graúdo. Isso reforça que a dosagem de areia em concretos permeáveis ainda não foi completamente desenvolvida.

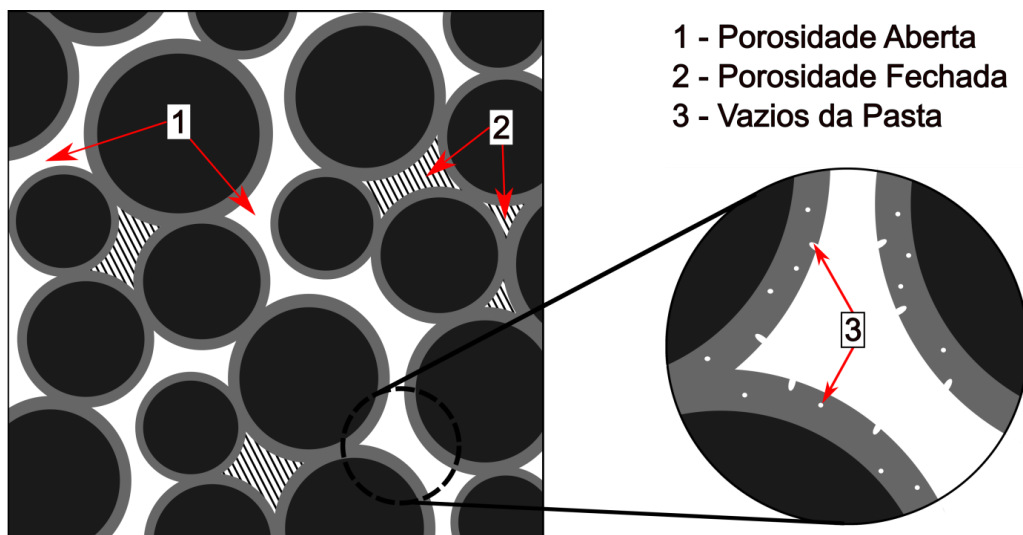
As propriedades do concreto permeável são diretamente influenciadas pelas variáveis apresentadas no Quadro 1. Dessa forma, é essencial compreender como cada um desses parâmetros afeta o material para desenvolver misturas que satisfaçam os critérios para a sua aplicação. Nesse contexto, as principais propriedades do concreto permeável a serem analisadas são a porosidade, permeabilidade e resistência mecânica, conforme será abordado a seguir.

2.1 PROPRIEDADES

2.1.1 Porosidade

Um dos principais aspectos que diferencia o concreto permeável do concreto convencional é a existência de uma porosidade macroscópica conectada. Em geral, o concreto permeável é projetado com porosidade compreendida entre 15 e 35%, sendo controlada pelo grau de compactação da mistura ou pela quantidade de pasta de cimento empregada (ACI, 2010; IBRAHIM *et al.*, 2014). Embora muitas vezes não seja feita nenhuma distinção, o total de vazios do concreto pode ser subdividido em três grupos, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Representação das porosidades aberta, fechada e vazios da pasta de cimento



Fonte: O autor.

- a) Vazios da pasta de cimento: correspondem aos poros do interior da pasta de cimento, formados nos processos de hidratação do cimento. Os vazios capilares, o ar incorporado e os espaços interlamelares nos cristais de C-S-H compõem essa parcela de vazios (MEHTA; MONTEIRO, 2008);
- b) Porosidade aberta ou efetiva: é a parcela de poros que estão interligados, formando o sistema de vazios que efetivamente transporta água pelo interior do concreto. São formados pelos espaços entre os agregados que não foram preenchidos pela pasta de cimento (MONTES; VALAVALA; HASELBACH, 2005; JOSHAGHANI *et al.*, 2015);
- c) Porosidade fechada ou isolada: consistem nos vazios que estão isolados do sistema interligado de poros e, dessa forma, não contribuem ao escoamento de água (MONTES; VALAVALA; HASELBACH, 2005; JOSHAGHANI *et al.*, 2015; TORRES; HU, 2016).

A soma das três parcelas geralmente é denominada de porosidade total do concreto permeável. Neste estudo a soma das porosidades aberta e isolada será denominada de porosidade intergranular, desconsiderando assim os vazios da pasta. A porosidade ou índice de volume de vazios é um parâmetro fundamental na dosagem de concretos permeáveis. Essa propriedade afeta significativamente a permeabilidade e a resistência mecânica do material, porém nem sempre é possível estabelecer uma relação direta entre os três parâmetros. Isso ocorre, em parte, pela dificuldade na determinação da porosidade efetiva e na compreensão de como esta irá afetar o comportamento do concreto.

O método para determinação do volume de vazios de concretos convencionais, estabelecido pela NBR 9778 (ABNT, 2005), não pode ser aplicado diretamente ao estudo do concreto permeável. Diferentes metodologias já foram propostas para a determinação da porosidade total e efetiva do material. Uma metodologia simples utilizada por Deo e Neithalath (2010) consistia em vedar a lateral e a base de um cilindro de concreto permeável e determinar a massa de água necessária para preencher todos os poros do material. O volume de água utilizado no teste representava o volume de vazios da amostra.

Montes, Valavala e Haselbach (2005) desenvolveram um teste baseado no método da pesagem hidrostática, no qual a porosidade é determinada pela relação entre a massa da amostra seca e imersa em água. Essa metodologia foi padronizada

posteriormente pela norma ASTM C1754 (ASTM, 2012b), sendo uma técnica simples de determinar a porosidade total de concretos porosos. Uma crítica a esse método é que os vazios da pasta de cimento são incluídos na porosidade total, gerando uma imprecisão na determinação da propriedade. Em decorrência disso, as porosidades medidas no estado endurecido usualmente serão maiores que a porosidade no estado fresco. Porém, a norma recomenda a saturação da amostra por um período de apenas 30 minutos. De acordo com Montes, Valavala e Haselbach (2005), esse intervalo de tempo é suficiente para o preenchimento dos poros responsáveis por condução da água. No entanto, esse período pode não ser suficiente para a saturação da matriz cimentícia, ocasionando uma imprecisão na determinação da porosidade total (DEO; NEITHALATH, 2010; TORRES; HU, 2016).

Deo e Neitalath (2010), por sua vez, utilizaram outro método na determinação da porosidade das amostras de concreto permeável. Os autores imergiram as amostras em água por um período de 24 h para garantir a saturação da pasta de cimento, realizando a secagem superficial na sequência. Após isso, a amostra foi completamente vedada, com exceção da face superior. Água foi adicionada na superfície da amostra até a saturação completa do corpo de prova, indicando que todos os poros interconectados haviam sido preenchidos. A massa de água necessária para atingir essa condição foi então utilizada para determinar o volume de vazios da amostra.

Torres e Hu (2016) propuseram a utilização de um sistema de ar comprimido para submeter o concreto ao estado de superfície saturada seca. Dessa forma foi possível desconsiderar os vazios da pasta no cálculo da porosidade total. Os autores verificaram que o uso dessa metodologia resultou em valores inferiores ao método descrito pela ASTM C1754 (ASTM, 2012b), confirmando a interferência da absorção de água pela pasta de cimento.

Outra forma de determinar o volume de vazios do concreto poroso é por meio da relação entre a massa específica teórica e a massa específica aparente no estado fresco, conforme estabelecido pela ASTM C1688 (ASTM, 2014a). Embora essa metodologia forneça um procedimento padronizado e criterioso, a compactação empregada no ensaio difere da utilizada na produção das amostras de concreto permeável. Assim, os valores obtidos por meio desse teste podem divergir da porosidade das amostras utilizadas na caracterização mecânica ou hidráulica do

material. Os procedimentos descritos na ASTM C1754 (ASTM, 2012b) e ASTM C1688 também foram padronizados posteriormente na norma ISO 17785-2 (ISO, 2018).

Estudos recentes têm realizado o processamento de imagens obtidas por tomografia computadorizada como uma forma de caracterizar a estrutura dos poros do concreto permeável (KAYHANIAN *et al.*, 2012; MEULENYZER; STORA; PEREZ, 2012; AKAND; YANG; GAO, 2016; ZHANG *et al.*, 2018). Essa técnica, além de determinar a porosidade média com precisão, permite caracterizações como a distribuição vertical da porosidade, a distribuição do tamanho dos poros e a sua tortuosidade. Os dados gerados pela tomografia computadorizada podem ser utilizados na geração de modelos com o intuito de explicar o comportamento mecânico e hidráulico do concreto permeável.

2.1.2 Permeabilidade

A permeabilidade é uma das principais características na produção de pavimentos porosos. A capacidade de drenagem do material provém dos vazios interligados capazes de conduzir água pelo seu interior. Da mesma forma que nos meios porosos, a permeabilidade pode ser avaliada por meio da condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade. A condutividade hidráulica representa a facilidade na condução de água pelo interior de um material poroso, sendo um parâmetro proveniente da Lei de Darcy (GONÇALVES; LIBARDI, 2013). Os valores usuais de condutividade hidráulica para o concreto permeável variam de 0,2 a 1,2 cm/s, no entanto, valores superiores a 2,0 cm/s já foram reportados (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; IBRAHIM *et al.*, 2014; GRUBEŠA *et al.*, 2018; YAP *et al.*, 2018).

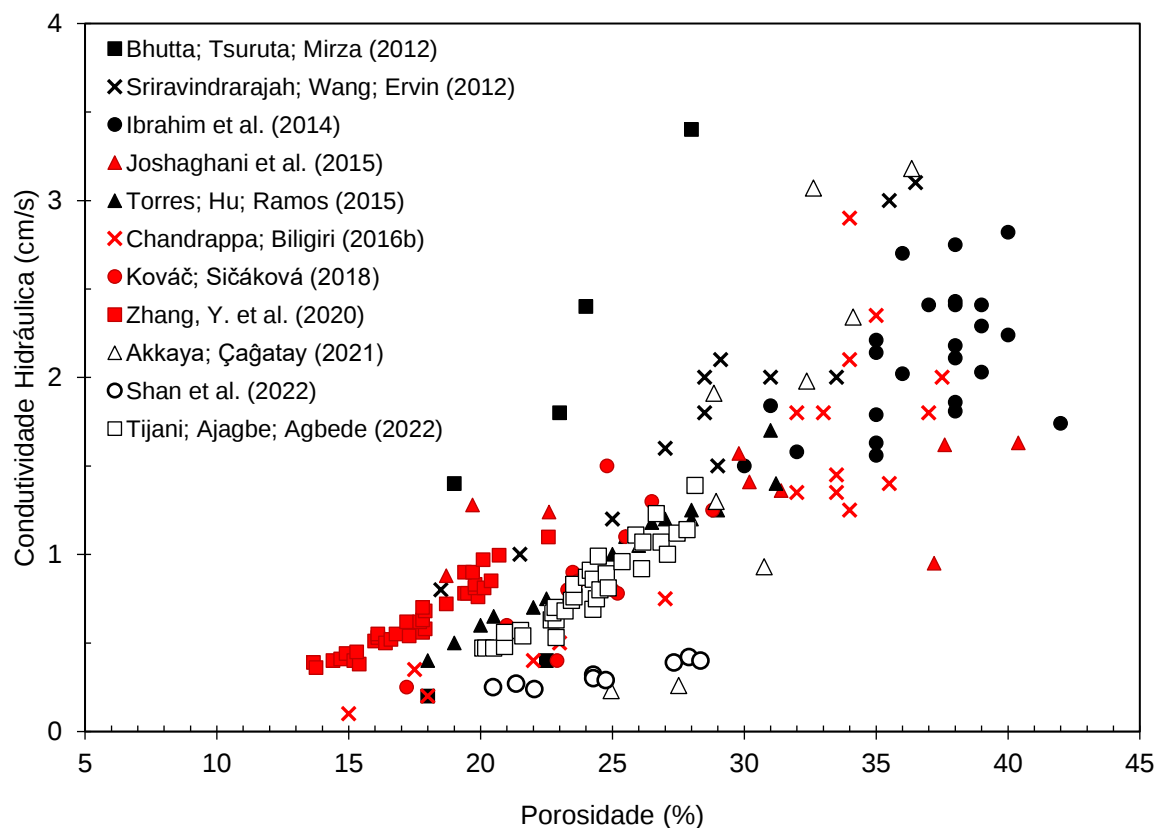
De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015a), o coeficiente de permeabilidade mínimo de um pavimento permeável deve ser de 0,1 cm/s. Embora esse requisito seja alcançado com facilidade pela remoção da areia na composição do concreto, é fundamental considerar também a colmatagem dos poros. Ao longo da vida útil de um pavimento poroso as partículas sólidas presentes nas águas pluviais podem se acumular nos poros do material, resultando em uma perda de permeabilidade (KIA; WONG; CHEESEMAN, 2017). Entretanto, existem relatos de pavimentos com idade entre 10 e 15 anos que, mesmo sem nenhuma manutenção, apresentaram colmatagem mínima (ACI, 2010). Dessa forma, o projeto, execução e manutenção

adequadas do sistema permeável são fatores que podem aumentar a sua vida útil, preservando assim a sua funcionalidade.

A porosidade do concreto é um dos principais parâmetros que influencia na condutividade hidráulica. Em um dos primeiros estudos desenvolvidos com o concreto permeável para aplicações na pavimentação (MEININGER, 1988) foi concluído que era necessário em torno de 15% de vazios para que o material apresentasse uma permeabilidade significativa.

Na Figura 3 foram reunidos dados de condutividade hidráulica em função da porosidade do concreto permeável, coletados em estudos selecionados. Observa-se que nos estudos de Zhang, Y. *et al.* (2020) e Chandrappa e Biligiri (2016b) os autores desenvolveram misturas com porosidade em torno de 15% e obtiveram concretos que ainda mantinham um desempenho hidráulico mínimo. No entanto, a maioria das pesquisas foi desenvolvida com concretos permeáveis com porosidade superior a 20%.

Figura 3 – Relações entre a porosidade e a condutividade hidráulica de concretos permeáveis, por meio do permeâmetro de carga variável



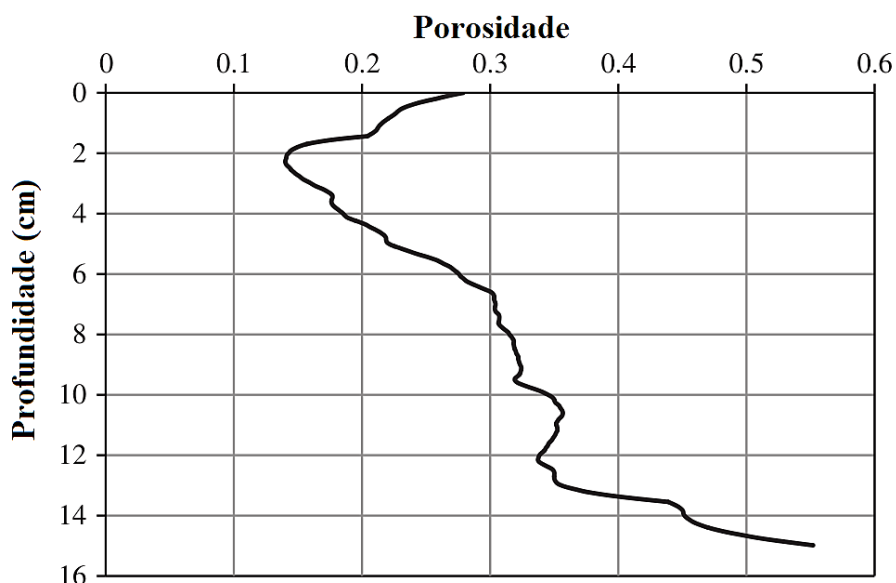
Fonte: O autor.

Embora seja um consenso que a condutividade hidráulica cresça proporcionalmente com o aumento do volume de vazios, é difícil estabelecer uma relação direta entre as duas propriedades. Na Figura 3 é possível identificar a tendência de o coeficiente de permeabilidade aumentar nos concretos com maior porosidade. Porém, há uma amplitude grande nos valores de condutividade hidráulica para uma mesma porosidade. Características como o tamanho, tortuosidade e conectividade dos poros também influenciam nas características do escoamento da água no interior do material, dificultando a estimativa da condutividade hidráulica (NEITHALATH; SUMANASOORIYA; DEO, 2010; ZHONG *et al.*, 2016).

Outro aspecto a ser considerado é a distribuição vertical da porosidade. Devido à compactação do concreto poroso, dificilmente haverá uma uniformidade da porosidade verticalmente (HASELBACH; FREEMAN, 2006; MARTIN III; KAYE; PUTMAN, 2013). A região mais superficial tende a possuir menor porosidade, enquanto as camadas inferiores são mais porosas, conforme pode ser observado no perfil de distribuição de porosidades, ilustrado na Figura 4.

Martin III; Kaye e Putman (2014) determinaram indiretamente a condutividade hidráulica de camadas de uma amostra de concreto permeável e constataram uma variação na propriedade em função da profundidade da camada. Os autores observaram que a distribuição vertical da condutividade hidráulica de amostras de concreto permeável segue uma tendência similar à da porosidade.

Figura 4 – Representação da variação da porosidade do concreto permeável em função da profundidade em relação à superfície



Fonte: Martin III; Kaye e Putman (2014)

Embora a porosidade total seja um dos principais parâmetros associados à condutividade hidráulica, ela não é suficiente para descrever completamente essa propriedade. Conforme citado anteriormente, as características dos poros do material, como tamanho e tortuosidade também afetam o desempenho hidráulico do concreto permeável, sendo controlados por fatores como o tamanho e a distribuição dos grãos do agregado. Nesse aspecto, agregados com partículas de tamanho uniforme já foram recomendados na confecção de concretos permeáveis por apresentarem maior volume de vazios e, conseqüentemente, resultarem em concretos com maior eficiência hidráulica (CROUCH; PITT; HEWITT, 2007; ACI, 2010; PUTMAN; NEPTUNE, 2011).

Debnath e Sarkar (2019) compararam o desempenho hidráulico de concretos permeáveis produzidos com frações uniformes e agregados de distribuição contínua. Os autores verificaram que, para um mesmo traço (relação g/c), os agregados uniformes resultaram em porosidades e condutividades hidráulicas superiores, resultado coerente com os dados apresentados na literatura. Huang, Luo e Khan (2020) compararam o desempenho de duas frações uniformes com uma mistura binária entre estas. Foi verificado no estudo que a mistura de agregados gerou concretos permeáveis com menor desempenho hidráulico quando comparado às frações uniformes. Conforme abordado por Debnath e Sarkar (2019), nos agregados com distribuição granulométrica contínua os grãos de menor dimensão ocupam os vazios intergranulares dos grãos maiores, reduzindo a disponibilidade de poros no concreto permeável. Como consequência, a condutividade hidráulica do concreto é prejudicada.

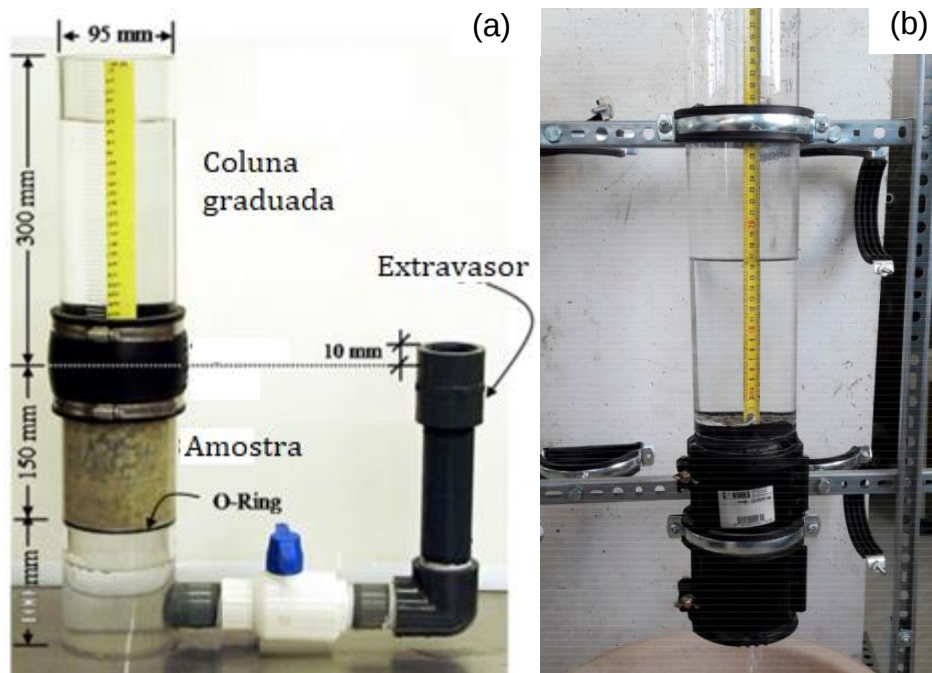
Além da distribuição granulométrica do agregado, a dimensão dos grãos também interfere na eficiência hidráulica do material. Os agregados com grãos de maior dimensão tendem a formar poros maiores, facilitando a condução de água no interior do concreto permeável (NEITHALATH; SUMANASOORIYA; DEO, 2010). Zhong *et al.* (2016) também citam que os agregados de maior dimensão favorecem a conectividade dos poros, levando a um desempenho hidráulico superior. Grubeša *et al.* (2018) compararam concretos permeáveis confeccionados com agregados uniformes de dimensões distintas. Os autores constataram que, para uma mesma porosidade total, as frações uniformes de maior dimensão resultaram no desempenho hidráulico máximo. Dessa forma, o uso de agregados uniformes e com maior dimensão tende a potencializar a condutividade hidráulica do concreto permeável. No

entanto, outros fatores também devem ser levados em consideração, como o desempenho mecânico do material.

A determinação da condutividade hidráulica é feita pela mesma metodologia empregada no estudo da permeabilidade de solos. Amostras produzidas em laboratório podem ser analisadas por meio do permeâmetro de carga constante, recomendado pela NBR 16416 (ABNT, 2015a) ou pelo permeâmetro de carga variável, recomendado pela ACI 522R (ACI, 2010). Na Figura 5 e 6 estão ilustrados os principais modelos de permeâmetro de carga variável e carga constante, respectivamente.

Nos modelos de carga variável a condutividade hidráulica é determinada por meio de medidas do tempo necessário para a água escoar de um nível inicial até um nível final dentro de uma coluna de carga. Geralmente são utilizadas amostras de concreto permeável cilíndricas, sendo possível a adaptação do permeâmetro à corpos de prova com dimensões padronizadas por norma. A saída da água pode ocorrer tanto por meio de um extravasor (Figura 5a) ou diretamente pelo fundo da amostra (Figura 5b).

Figura 5 – Modelos de permeâmetro de carga variável com extravasor (a) e saída direta (b)

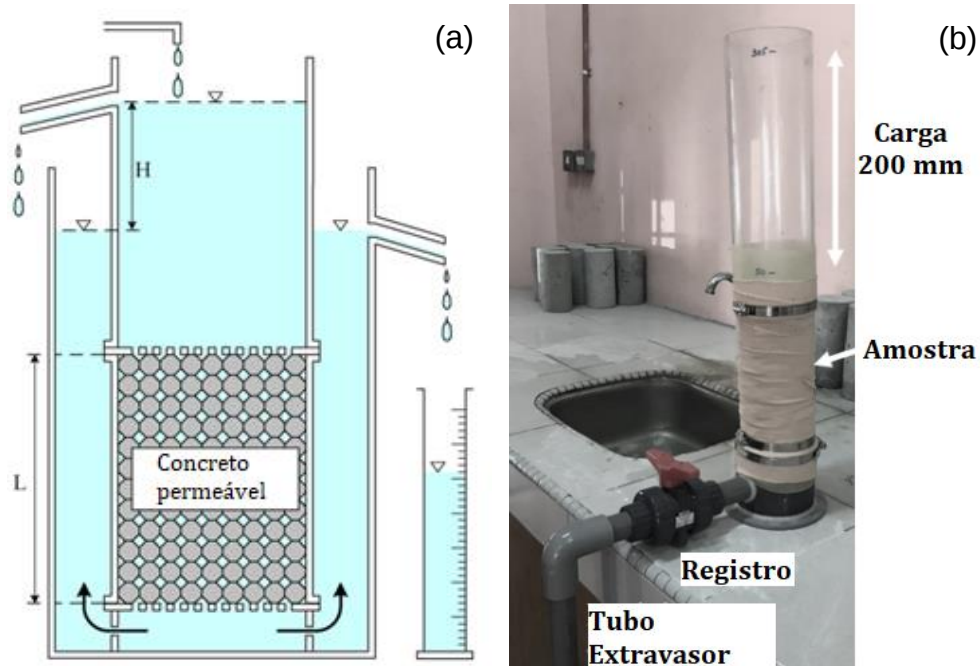


Fonte: (a) Neithalath, Sumanasooriya e Deo (2010); (b) Kováč e Sičáková (2018)

O permeâmetro de carga constante, por sua vez, permite a determinação do coeficiente de permeabilidade por meio de uma carga hidráulica constante, garantindo

assim o escoamento de uma vazão constante pelo concreto permeável. Os principais modelos estão ilustrados na Figura 6.

Figura 6 – Modelos de permeâmetro de (a) carga constante com reservatório de nível constante e (b) com extravasor



Fonte: (a) Park *et al.* (2010); (b) Yap *et al.* (2018)

Nesse permeâmetro a carga hidráulica usualmente é mantida por meio da utilização de reservatórios de nível constante (Figura 6a), porém existem modelos que utilizam extravasores como um dos níveis de referência (Figura 6b). A condutividade hidráulica do concreto é determinada medindo-se a quantidade de água escoada em um determinado intervalo de tempo. É importante notar que pode haver uma variação nos resultados de coeficiente de permeabilidade em cada um dos métodos (LAMB, 2014; BATEZINI; BALBO, 2015; GRUBEŠA *et al.*, 2018). Outra questão a ser abordada é a falta de uma padronização nos equipamentos para medir a condutividade hidráulica. Parte da dispersão dos valores encontrados na literatura (Figura 3) pode estar associada às variações dimensionais e construtivas de cada permeâmetro, como a altura de carga hidráulica, a dimensão do extravasor e as características geométricas das amostras de concreto. No Quadro 2 estão relacionados os principais tipos de permeâmetro e as correspondentes cargas hidráulicas adotadas em estudos selecionados.

Quadro 2 – Comparação entre os tipos de permeâmetro e carga hidráulica adotados na determinação da permeabilidade de concretos permeáveis

Tipo de Carga	Modelo	Estudo	Carga ^a (cm)	Condutividade Hidráulica (mm/s)
Carga Variável	Saída por extravasor (Figura 5a)	Yahia e Kabagire (2014) Batezini e Balbo (2015) Chandrappa e Biligiri (2018a) Costa <i>et al.</i> (2018) Kia, Wong e Cheeseman (2018) Zhang, G. <i>et al.</i> (2020) Sahdeo <i>et al.</i> (2021) Tijani, Ajagbe e Agbede (2022)	30 – 5 25 - 5 47 – 3 24 – 5 110 – 25 30,5 - 5 45 – 5 n.e.	1 – 16 4 – 8 15 – 30 5 – 20 1 – 35 3 - 28 22 – 32 4,5 - 14
	Saída direta (Figura 5b)	Sriravindrarajah, Wang e Ervin (2012) Güneyisi e Gesoğlu (2016) Elango e Revathi (2017) Kováč e Sičáková (2018) Zhang, Y. <i>et al.</i> (2020) Akkaya e Çağatay (2021)	50 - 20 40 – 30 n.e. 35 – 5 15 – 0 n.e.	5 – 27 5 – 13 10 – 30 8 – 16 4 - 13 2 - 32
Carga Constante	Reservatório de nível constante (Figura 6a)	Bhutta <i>et al.</i> (2013) Brake, Allahdadi e Adam (2016) Zhang <i>et al.</i> (2017) Oni, Xia e Liu (2020) Shen <i>et al.</i> (2021)	20 n.e. n.e. n.e. n.e.	20 – 45 2 – 9 3 – 4 8 – 5,6 0,2 – 5,3
	Saída por extravasor (Figura 6b)	Ibrahim <i>et al.</i> (2014) Zhong e Wille (2015) Yap <i>et al.</i> (2018)	n.e. 26/31 20	15 – 28 0,2 – 6 1 – 3
	Fluxo ascendente	Cui <i>et al.</i> (2017)	n.e.	2 - 16

Nota: n.e. – Valor não especificado

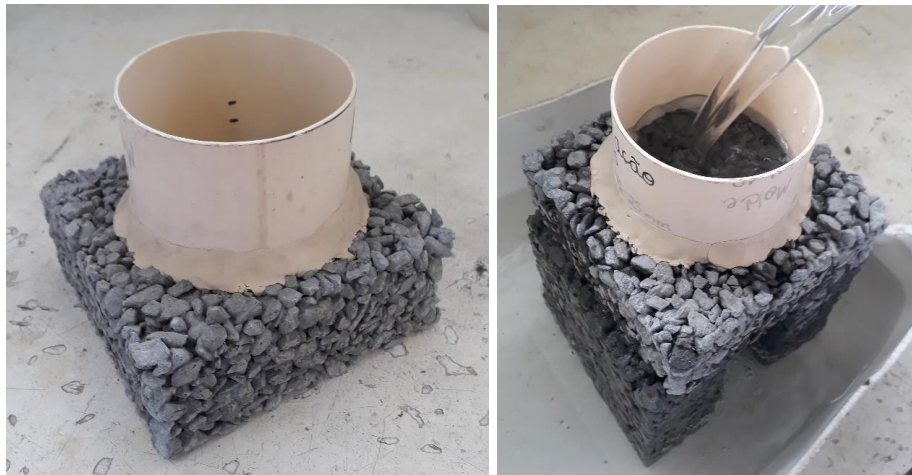
^aCarga inicial e final para permeâmetro de carga variável e carga total para permeâmetro de carga constante.

Conforme o Quadro 2, tanto o permeâmetro de carga constante como o de carga variável ainda são empregados na caracterização de concretos permeáveis. Devido à inexistência de normas padronizando os equipamentos e procedimentos de ensaio, nota-se que há uma variação nas cargas hidráulicas adotadas em cada estudo desenvolvido. A faixa usual de cargas hidráulicas está compreendida entre 20 e 50 cm, geralmente sendo limitada pelas características do equipamento ou o limite de fornecimento de vazão, no caso do permeâmetro de carga constante. Embora em muitos estudos os valores de carga não sejam especificados, esse parâmetro irá impactar diretamente da condutividade hidráulica medida. Chandrappa e Biligiri (2016b) constataram uma redução no coeficiente de permeabilidade com o acréscimo do valor de carga hidráulica. No entanto, os autores apontam que existe uma tendência de a condutividade hidráulica assumir um valor constante para valores de carga maiores. Sriravindrarajah, Wang e Ervin (2012) também verificaram variações

da condutividade hidráulica para diferentes cargas, no entanto, essa variação foi mais acentuada nos concretos com maior porosidade. Desta forma, reforça-se a necessidade de estabelecer um procedimento padrão na caracterização de condutividades hidráulicas de concretos permeáveis em laboratório.

Para pavimentos permeáveis já instalados, a utilização de permeâmetros para avaliar a condutividade hidráulica seria possível somente com a extração de testemunhos. No entanto, esse procedimento é oneroso e seria inviável para o monitoramento periódico da capacidade hidráulica de um pavimento. Nessas situações, o desempenho hidráulico pode ser analisado pela propriedade denominada de taxa de infiltração. Essa propriedade avalia a velocidade com que a água entra no meio poroso pela sua superfície (DINGMAN, 2014). A taxa de infiltração pode ser determinada pela metodologia proposta pela ASTM C1701 (ASTM, 2014b), utilizando-se um anel de infiltração, conforme exposto na Figura 7.

Figura 7 – Anel de infiltração instalado em peça de concreto permeável e execução do ensaio para determinação da taxa de infiltração



Fonte: O autor.

Esse método avalia o tempo necessário para um volume de água pré-determinado escoar pela superfície do concreto permeável. O escoamento da água é confinado ao interior do anel de infiltração, que deve possuir diâmetro de 300 mm. Durante o ensaio, o nível d'água deve ser mantido com altura de 10 a 15 mm acima da superfície do pavimento. Conforme a norma, inicialmente deve ser realizada a pré-molhagem do pavimento com um volume de 3,6 L. Na sequência, o teste final deve ser realizado com um volume de água que deve ser ajustado de acordo com o tempo de escoamento do volume de pré-molhagem (3,6 ou 18 L).

Como uma alternativa aos permeâmetros tradicionais, a ISO 17785-1 (ISO, 2016) apresenta um método para avaliar em laboratório a taxa de infiltração de amostras cilíndricas de concreto permeável. No ensaio proposto pela norma a amostra deve ser vedada lateralmente com filme plástico, sendo mantida uma borda de pelo menos 50 mm acima da face superior do cilindro (Figura 8).

Figura 8 – Vedação lateral da amostra de concreto permeável e execução do ensaio para determinação da taxa de infiltração



Fonte: O autor.

O ensaio ocorre de forma similar ao anel de infiltração, sendo medido o tempo necessário para um volume pré-definido de água escoar pela superfície do concreto permeável. Para cilindros de 100 mm de diâmetro, a norma recomenda que o nível d'água seja mantido entre 15 e 25 mm. Para a execução do teste utiliza-se 1 L de água na etapa de pré-molhagem e 2 L no teste final.

Embora tanto a condutividade hidráulica como a taxa de infiltração sejam parâmetros que descrevam a movimentação da água em um meio poroso, as duas propriedades são distintas. Segundo Srivastava e Jain (2017), a condutividade hidráulica representa as características do escoamento da água no interior do meio poroso, quando este está sujeito a um gradiente hidráulico. Essa propriedade pode ser avaliada tanto em meios saturados como não saturados. Já a taxa de infiltração representa o fenômeno de entrada da água no meio poroso pela sua superfície, quando sujeita a uma lâmina d'água decorrente de um evento de precipitação. Conforme abordado por Dingman (2014), a condutividade hidráulica é um dos

parâmetros que afeta a taxa de infiltração de um meio poroso. Dessa forma, as duas propriedades estão relacionadas, mas não devem ser utilizadas de forma indistinta.

Ainda que a condutividade hidráulica seja o parâmetro tradicionalmente utilizado na caracterização hidráulica do concreto permeável, ela estará sujeita a variações provenientes das condições experimentais (principalmente a carga hidráulica) e o tipo de permeâmetro empregado. A taxa de infiltração obtida pela metodologia descrita na ISO 17785-1 (ISO, 2016) tem um grande potencial na padronização da caracterização hidráulica do concreto permeável. Essa metodologia consiste em um procedimento simples e que não necessita de um equipamento específico para ser executado, contribuindo assim para a reprodutibilidade do ensaio. Além disso, é um método que se aproxima da metodologia descrita na ASTM C1701 (ASTM, 2014b) e das condições de escoamento de água que ocorrem em campo. No entanto, o método ISO 17785-1 (ISO, 2016) foi pouco utilizado na literatura, sendo necessário ainda analisar a sua eficiência na caracterização hidráulica do concreto permeável.

2.1.3 Resistência Mecânica

Ainda que o desempenho hidráulico seja fundamental para garantir a funcionalidade de um pavimento permeável, a resistência mecânica se mantém como uma das principais propriedades do concreto poroso e, muitas vezes, é o fator limitante para a aplicação do material. Há uma dificuldade em se estabelecer uma relação coerente entre a resistência mecânica do concreto permeável e os parâmetros usuais de dosagem. Isso ocorre em função das características particulares do material, como o elevado volume de vazios, a influência da consistência da pasta de cimento no recobrimento dos agregados e o grau de compactação da mistura.

A quantidade de cimento utilizada na mistura é um dos parâmetros que mais influencia a estrutura e porosidade do concreto permeável. É necessário que haja uma quantidade mínima de pasta de cimento para cobrir efetivamente os agregados. Embora a resistência mecânica aumente com o volume de pasta, o excesso do material irá preencher os vazios da estrutura granular, prejudicando assim a permeabilidade (ACI, 2010). Torres, Hu e Ramos (2015) verificaram que a resistência do concreto permeável está diretamente relacionada com a espessura da pasta de cimento ao redor do agregado. Segundo os autores a resistência do concreto é maior

quando os agregados estão envoltos por uma camada mais espessa de pasta. Isso pode ser alcançado com uma quantidade de cimento maior em conjunto com a compactação da mistura, que auxilia também no intertravamento dos agregados.

Para o concreto permeável ainda não foram estabelecidas relações diretas entre a resistência e a quantidade de água na mistura. Os valores da relação água/cimento usualmente variam entre 0,26 e 0,40 (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; ACI, 2010; CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016b). A relação a/c interfere nas propriedades do concreto poroso pela alteração da consistência da pasta de cimento. De acordo com Xie *et al.* (2018), uma pasta muito viscosa pode gerar falhas no recobrimento do agregado, enquanto pastas mais fluídas podem escoar e preencher os poros do concreto. Essas duas falhas podem afetar tanto a resistência mecânica do material como o seu desempenho hidráulico. Dessa forma, a relação entre a resistência mecânica e a relação a/c não é bem definida como para o concreto convencional. Nesse contexto, Lian e Zhuge (2010), Sonebi e Bassuoni (2013) e Ibrahim *et al.* (2014) constataram aumentos na resistência à compressão do concreto permeável com o acréscimo de água na mistura. Esse fenômeno pode estar associado às características reológicas da pasta de cimento e a cobertura dos agregados.

Assim, o valor ideal da relação água/cimento é aquele em que a pasta de cimento cobre totalmente os grãos do agregado sem a ocorrência do escoamento da mesma (NGUYEN *et al.*, 2014; XIE *et al.*, 2018). O emprego de aditivos superplastificantes é uma prática comum na produção de concretos permeáveis para ajustar a consistência da pasta de cimento ou ainda tornar possível a redução da relação água/cimento. Porém, existem poucos relatos sobre a influência da relação água/cimento para uma consistência de pasta constante. Isso só é possível a partir de estudos de dosagem de aditivos superplastificantes e o seu impacto na reologia da pasta de cimento.

As características do agregado gráudo também interferem na resistência mecânica do concreto permeável, porém não há consenso na literatura sobre esse efeito. Isso ocorre principalmente pelo fato de que o agregado gráudo também interfere em outros fatores relacionados à resistência mecânica, como a porosidade total, as características da matriz cimentícia e a compactação do concreto. A dimensão dos grãos do agregado é um dos parâmetros que interfere diretamente no desempenho mecânico. Crouch, Pitt e Hewitt (2007), Bhutta, Tsuruta e Mirza (2012) e Fu *et al.* (2014) constataram em seus estudos que os agregados de menor dimensão

apresentaram uma maior resistência à compressão. De acordo com os autores, uma das hipóteses é a maior área de contato nos grãos de menor dimensão, produzindo uma matriz granular com melhores propriedades mecânicas. No entanto, nos estudos citados a porosidade também variou para cada mistura, havendo uma influência significativa desta propriedade. Agar-Ozbek *et al.* (2013) e Zhong e Wille (2016) ainda concluíram que, mesmo com porosidades similares, concretos produzidos com agregados de menor dimensão apresentam melhor desempenho da resistência à compressão. Por outro lado, Yu *et al.* (2019a) constataram que para uma porosidade mantida constante, o aumento do tamanho do agregado elevou a resistência à compressão do concreto permeável. Porém, isso ocorreu apenas para agregados com tamanho de até 7 mm, a partir do qual a resistência à compressão não apresentou mais variação significativa. Nas pesquisas de Neptune e Putman (2010) e Ćosić *et al.* (2015), os autores não constataram uma relação clara entre o tamanho do agregado e a resistência mecânica do material.

Essa divergência encontrada na literatura pode ser atribuída, em parte, à interação entre o agregado graúdo e a matriz cimentícia. Torres, Hu e Ramos (2015) e Yu *et al.* (2019a) constataram que a resistência à compressão do concreto permeável depende diretamente da espessura de pasta de cimento nas zonas de contato entre agregados. Os autores observaram que para um volume de pasta de cimento constante, o aumento da dimensão dos grãos do agregado resultou em pontos de contato com maior espessura da matriz cimentícia e, conseqüentemente, maior desempenho mecânico. Porém, esse efeito foi limitado a uma espessura de pasta máxima, a partir da qual não foi constatada influência na resistência do concreto. Xie *et al.* (2020) verificaram em sua pesquisa que o desempenho mecânico do concreto permeável envolve não apenas a espessura da pasta de cimento, mas um conjunto de variáveis relacionadas às zonas de contato entre os grãos do agregado. Segundo os autores, a resistência à compressão pode ser descrita pela relação entre o número de pontos de contato, a largura das zonas de contato e a espessura de pasta de cimento. Essas variáveis são controladas tanto pela dimensão do agregado como pela dosagem de pasta de cimento.

Além da resistência à compressão e à tração, outra propriedade importante no desenvolvimento de misturas para pavimentos é a resistência à degradação por abrasão. A perda de massa por abrasão é esperada em pavimentos em função dos esforços causados pelo tráfego de veículos. A resistência à abrasão é influenciada

por fatores como a condição de cura, compactação, consistência da pasta de cimento, tamanho do agregado e a porosidade do concreto (TARNAL *et al.*, 2003; KEVERN; SCHAEFER; WANG, 2009; ASTM, 2013).

Uma das formas de avaliar a potencial resistência à degradação por impacto e abrasão é pelo teste de Cantabro, normalizado pela ASTM C1747M (ASTM, 2013). No ensaio, três amostras cilíndricas são colocadas no equipamento Los Angeles (sem carregamento de esferas de aço) e após 500 revoluções a perda de massa é calculada. Esta metodologia, no entanto, fornece apenas resultados qualitativos com o intuito de comparar o desempenho de diferentes misturas. Outro método adotado por alguns estudos (KEVERN; SCHAEFER; WANG, 2009; RANGELOV *et al.*, 2016; IBRAHIM; RAZAK; ABUTAHA, 2017) é a abrasão superficial utilizando um equipamento de desgaste rotativo, conforme especificado pela ASTM C944 (ASTM, 2012a). Rangelov *et al.* (2016) compararam as duas metodologias para verificar a resistência à degradação do concreto permeável. Os autores constataram divergências dos resultados obtidos por cada ensaio quando diferentes misturas foram analisadas, sendo possível estabelecer uma correlação entre a degradação e a resistência à compressão apenas para o teste de Cantabro.

Com relação ao dimensionamento dos pavimentos, a NBR 16416 (ABNT, 2015a) estabelece critérios distintos de resistência mecânica para peças de concreto permeável, placas de concreto permeável e concreto permeável moldado no local, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Requisitos estruturais para pavimentos permeáveis em função da tipologia do revestimento e intensidade do tráfego de projeto

Tipologia ^a	Tráfego	Espessura Mínima (mm)	Resistência Mecânica Característica (MPa)	
Peça de Concreto Permeável	Pedestre	60,0	Compressão Axial	20,0
	Leve	80,0		
Placa de Concreto Permeável	Pedestre	60,0	Flexão	2,0
	Leve	80,0		
Concreto Permeável Moldado no Local	Pedestre	60,0	Tração na Flexão	1,0
	Leve	100,0		2,0

Fonte: Adaptado de NBR 16416 (ABNT, 2015a).

^a Peças são elementos cujo índice de forma (razão entre o comprimento e a espessura do elemento) é igual ou inferior a 4, enquanto placas são caracterizadas por um índice superior a 4.

As peças são avaliadas quanto à resistência à compressão axial, devendo atingir um valor mínimo de 20,0 MPa. Quando o pavimento permeável é moldado no local, deve-se considerar como parâmetro estrutural a resistência à tração na flexão, devendo esta ser superior a 2,0 MPa para tráfego leve de veículos. A espessura da camada de revestimento é delimitada apenas pelo tipo de solicitação – tráfego leve de veículos ou tráfego exclusivo de pedestres.

Os critérios apresentados pela NBR 16416 (ABNT, 2015a) são simplificados em relação a um dimensionamento estrutural de pavimentos de concreto, visto que não há consideração sobre a intensidade do tráfego de veículos nem sobre as condições do subleito. Segundo Delatte (2008) os concretos permeáveis devem apresentar resistência à flexão entre 2,1 e 3,1 MPa. De acordo com o autor, a espessura de revestimento permeável é uma função da capacidade de suporte do subleito, do volume de tráfego diário e da resistência mecânica do concreto.

O desenvolvimento de concretos porosos com resistência mecânica elevada é uma necessidade para viabilizar o seu emprego em pavimentos com tráfego de veículos mais intenso ou mesmo reduzir a espessura da camada de revestimento e, conseqüentemente, o seu custo. Dessa forma, o estudo da dosagem de concreto permeável e a compreensão do comportamento mecânico do material são fundamentais para ampliar a sua utilização e garantir a produção de pavimentos com qualidade e duráveis.

2.2 PREPARO DO CONCRETO PERMEÁVEL

O procedimento de preparo do concreto permeável é uma etapa fundamental para o desenvolvimento das propriedades mecânicas e hidráulicas. Embora ainda não exista uma metodologia padronizada, cada etapa do processo produtivo (seleção dos materiais constituintes, mistura, compactação e cura) influencia diretamente as propriedades do material.

2.2.1 Mistura dos Materiais Constituintes

Embora não exista um procedimento normalizado para realizar a mistura dos componentes, estudos sobre concreto permeável (KEVERN, BIDDLE; CAO, 2015; TORRES; HU; RAMOS, 2015; BRAKE; ALLAHADADI; ADAM, 2016; RANGELOV *et al.*,

2016; ÖZ, 2018) têm adotado o mesmo processo utilizado para o concreto convencional, conforme a ASTM C192M (ASTM, 2016). Nesse procedimento o agregado graúdo e parte da água são misturados em um misturador mecânico até completo umedecimento do material granular. Na sequência é adicionado o cimento e, após homogeneização da mistura, é adicionada a água restante. O concreto é misturado por 3 minutos, seguido de um período em repouso de 3 minutos e uma mistura final de 2 minutos.

Schaefer *et al.* (2006) propuseram um procedimento alternativo para a mistura do concreto permeável com o intuito de proporcionar uma distribuição homogênea da pasta de cimento e aprimorar a aderência ao agregado. No estudo os autores utilizaram um processo no qual o agregado graúdo e uma pequena quantidade de cimento (em torno de 5% em massa) foram misturados a seco até o recobrimento dos grãos do agregado (aproximadamente 1 minuto). Na sequência, o cimento e água restantes foram adicionados e misturados por 3 minutos, com um repouso de 3 minutos e mistura adicional por 2 minutos. Neste procedimento os autores verificaram que os concretos permeáveis, que inicialmente rompiam na interface pasta-agregado, passaram a apresentar fratura dos agregados. Embora a resistência à tração não tenha sido avaliada, há relato de pesquisas que adotaram esse procedimento de mistura (KABAGIRE; YAHIA, 2016; KHANKHAJE *et al.*, 2017; KEVERN *et al.*, 2008; AKAND; YANG; GAO, 2016; LUND *et al.*, 2018).

Chindaprasirt *et al.* (2008) utilizaram um processo alternativo para a produção do concreto permeável, no qual a pasta de cimento é misturada previamente, adicionando-se o agregado apenas após a homogeneização do cimento com a água. Esse procedimento foi posteriormente adotado nos estudos de Agar-Ozbek *et al.* (2013) e Zaetang *et al.* (2017), porém não há informações se essa metodologia promove algum benefício no desempenho mecânico.

2.2.2 Compactação

A compactação do concreto poroso tem sido objeto de pesquisas (PUTMAN; NEPTUNE, 2011; BONICELLI; GIUSTOZZI; CRISPINO, 2015; GAEDICKE *et al.*, 2016) e uma das principais questões abordadas é a forma de replicar em laboratório as condições de consolidação do material em campo. A compactação de pavimentos de concreto permeável é realizada por meio de rolos metálicos com peso suficiente

para atingir o grau de compactação projetado (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; ACI, 2010), conforme ilustrado na Figura 9a.

Figura 9 – Compactação (a) em campo e (b) soquetes de compactação Proctor e (c) Marshall



Fonte: (a) Tennis; Leming; Akers (2004); (b) e (c) O autor.

Uma das práticas adotadas em laboratório é a utilização de soquetes de compactação Proctor e Marshall (Figura 9b e c), padronizados para ensaios de compactação de solos e misturas asfálticas. As normas ASTM C1688M (ASTM, 2014a) e ASTM C1747M (ASTM, 2013) adotam esse equipamento na conformação de amostras para os ensaios de determinação da massa específica no estado fresco e da resistência à degradação por abrasão e impacto. A NBR 16416 (ABNT, 2015a) também estabelece a compactação com soquete Marshall para a verificação da massa específica no estado fresco. A utilização dos soquetes de compactação tem proporcionado menores desvios nas propriedades testadas, o que favorece também a reprodutibilidade dos experimentos (PUTMAN; NEPTUNE, 2011; ASTM, 2014a). No entanto, não há uma normalização no que se refere ao número de camadas e de golpes aplicados para a moldagem das amostras.

Os estudos desenvolvidos têm adotado dois procedimentos para padronizar a produção das amostras de concreto. O primeiro consiste em estabelecer um número determinado de golpes com o soquete Proctor ou Marshall, produzindo assim uma energia constante. No segundo método a amostra é compactada até atingir o valor de massa específica de projeto. Neste caso o número de golpes com o soquete é ajustado para cada mistura. No Quadro 3 foram relacionados diferentes procedimentos de compactação e suas respectivas energias de compactação.

Quadro 3 – Comparação entre os métodos de compactação utilizados em diferentes estudos a respeito do concreto permeável

Método de Compactação	Estudo	Nº de Camadas Nº Golpes / Camada	Energia (kJ/m³) ^c
Soquete Proctor Massa = 2,5 kg Altura = 305 mm	Gaedicke <i>et al.</i> (2016)	2 Camadas 5 Golpes 10 Golpes 20 Golpes 30 Golpes	47,6 95,2 190,5 285,7
	Martin III, Kaye e Putman (2014)	1 Camada ^b 20 Golpes	54,2
	Torres, Hu e Ramos (2015)	3 Camadas 10 Golpes	142,9
	Zhong e Wille (2016)	3 Camadas ^a 3 Golpes	97,6
	Mulligan (2005)	3 Camadas 25 Golpes	357,1
Soquete Marshall Massa = 4,5 kg Altura = 450 mm	Crouch, Pitt e Hewitt (2007)	1 Camada 2 Golpes 5 Golpes 16 Golpes	25,3 63,2 202,3
Haste de Compactação + Soquete Proctor Massa = 2,5 kg Altura = 305 mm	Akand, Yang e Wang (2018)	3 Camadas 25 Golpes Haste 5 Golpes Soquete	71,4
	Khankhaje <i>et al.</i> (2017)	3 Camadas 25 Golpes Haste 10 Golpes Soquete	142,9
Haste de Compactação + Soquete Marshall Massa = 4,5 kg Altura = 450 mm	Crouch, Pitt e Hewitt (2007)	4 Camadas 25 Golpes Haste 5 Golpes Soquete 10 Golpes Soquete 20 Golpes Soquete	252,9 505,9 1011,7

Notas: As amostras cilíndricas com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, exceto quando especificado outras dimensões.

^aDimensões do molde: 76 mm de diâmetro e 152 mm de altura.

^bDimensões do molde: 152 mm de diâmetro e 152 mm de altura.

^cEnergia correspondente à compactação com a haste metálica não considerada no cálculo.

Conforme pode ser observado, há uma variedade nos métodos de compactação adotados por cada autor, resultando assim em diferentes energias de compactação. Os valores de energia de compactação encontrados na literatura variaram de 25,3 a 1011,7 kJ/m³, sendo que a faixa mais usual está compreendida entre 50 e 200 kJ/m³. A compactação das amostras de concreto permeável geralmente é realizada distribuindo-se o número de golpes de soquete em camadas. Nos estudos selecionados no Quadro 3 foram empregadas de 1 a 4 camadas de compactação. Outras formas de preparo de amostras já foram utilizadas, como a compactação com haste de adensamento, vibração, impacto no molde (produzido pela queda do mesmo em determinada altura) e até mesmo a conformação sem compactação. O uso da haste de adensamento, além de produzir amostras com uma

variação maior nas propriedades testadas, pode provocar defeitos no concreto permeável (buracos não preenchidos pelo concreto em função de sua consistência), conforme reportado por Putman e Neptune (2011).

Um mesmo traço de concreto pode apresentar diferentes características e propriedades quando submetido a compactações distintas. O aumento da energia de compactação geralmente provoca reduções consideráveis na porosidade do concreto permeável e, como consequência, há um aumento na resistência mecânica e redução da condutividade hidráulica (BONICELLI *et al.*, 2013; BONICELLI; GIUSTOZZI; CRISPINO, 2015; TORRES; HU; RAMOS, 2015; GIUSTOZZI, 2016). Um mínimo de compactação é necessário para evitar a desagregação superficial do concreto permeável, porém energias de compactação elevadas podem levar ao tamponamento dos vazios interligados e à consequente perda de permeabilidade (CROUCH *et al.*, 2012; BONICELLI; GIUSTOZZI; CRISPINO, 2015).

2.2.3 Cura

O processo de cura do concreto permeável é essencial para garantir a sua integridade e desenvolver a resistência na ligação entre a pasta de cimento e a superfície dos agregados. Devido a sua estrutura com grandes vazios interligados, o concreto poroso possui uma maior área superficial exposta ao ambiente quando comparado ao concreto convencional. Dessa forma, há uma maior suscetibilidade à evaporação de água, o que torna a cura uma etapa crítica na produção do material (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

Na execução de pavimentos de concreto permeável recomenda-se que a cura inicie em até 20 minutos após a compactação (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004). Lonas de polietileno são utilizadas para cobrir as superfícies do pavimento expostas ao ambiente, prevenindo assim a perda de umidade. Segundo a ACI 522-R (2010), em condições ambientes adversas, como temperaturas elevadas, baixa umidade e ventos intensos, podem ser aplicados superficialmente aditivos redutores de evaporação para garantir uma proteção adicional ao concreto. A cobertura de polietileno pode ser removida após 7 dias de cura, no mínimo (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; OBLA, 2010). Segundo a ACI 522-R (2010) o tráfego de veículos e pedestres pode ser liberado apenas após esse tempo mínimo de cura.

Para ensaios laboratoriais, as pesquisas costumam utilizar a metodologia proposta na ASTM C192M (ASTM, 2016), referente ao preparo de amostras de concreto convencional, como procedimento para realizar a cura do concreto poroso. O processo é equivalente ao proposto pela norma NBR 5738 (ABNT, 2015b), ocorrendo por meio de tanques de solução saturada de hidróxido de cálcio (LÓPEZ-CARRASQUILLO; HWANG, 2017; YAP *et al.*, 2018) ou em câmara úmida com umidade relativa do ar mínima de 95% (KHANKHAJE *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2017).

Ibrahim, Razak e Abutaha (2017) testaram três métodos de cura para o concreto permeável, avaliando a influência nas propriedades mecânicas do material. As amostras produzidas pelos autores foram submetidas à cura ao ar, imersão em tanque de solução saturada de hidróxido de cálcio durante todo o período de cura e imersão durante 3 dias. A resistência à compressão foi máxima nas amostras que passaram pela imersão em tanque e mínima nos concretos curados ao ar. Isso reforça a importância da cura do concreto permeável, visto que a insuficiência de água na hidratação do cimento (causada pela evaporação excessiva) pode ocasionar redução nos valores de resistência mecânica (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; SONEBI; BASSUONI; YAHIA, 2016).

A cura parcial em água também já foi avaliada como método de cura para concretos permeáveis (BHUTTA *et al.*, 2013; AKAND; YANG; WANG, 2018). Nesse procedimento as amostras permaneceram e imersão em água entre 5 e 7 dias, sendo expostas ao ar livre até o momento dos ensaios mecânicos. Embora os valores de resistência possam ser inferiores quando comparados à cura completa em água (IBRAHIM; RAZAK; ABUTAHA, 2017), esse procedimento se aproxima das condições de campo, em que a cura é realizada durante ao menos 7 dias (ACI, 2010).

2.3 MÉTODOS DE DOSAGEM

Os principais métodos de dosagem do concreto permeável se baseiam no desenvolvimento de misturas com o objetivo de atingir uma porosidade de projeto. Ainda que propostas já tenham sido apresentadas na literatura, uma das limitações observadas é a restrição quanto aos materiais que podem ser utilizados no método de dosagem. Estudos já foram desenvolvidos com modelos estatísticos de previsão de porosidade, permeabilidade e resistência mecânica (ZHENG; CHEN; WANG, 2012;

KABAGIRE; YAHIA, 2016; CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2018b), porém esses modelos são provenientes dos dados experimentais obtidos por cada autor, dificultando a aplicabilidade a materiais, equipamentos e metodologias diferentes. Assim, adaptações e correções das misturas acabam sendo necessárias para adequar os métodos para cada processo de dosagem. As principais metodologias para o desenvolvimento de misturas de concreto permeável estão descritas a seguir.

2.3.1 Método do National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA)

O método de dosagem indicado pelo National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA, 2019) é um procedimento de relações volumétricas com o objetivo de produzir concretos permeáveis com uma porosidade de projeto. A metodologia empregada pelo NRMCA consiste em determinar o índice de volume de vazios do agregado no estado compactado e calcular o volume de pasta necessário para preencher estes vazios e atingir a porosidade desejada. Como a presença da pasta de cimento dificulta a compactação do agregado, foi introduzido um índice de compactação “CI” para compensar esse efeito. Esse índice representa a diferença entre a porosidade de uma mistura de concreto permeável compactada em condições reais e a porosidade na condição de compactação máxima. Esse parâmetro, no entanto, é um valor empírico que deve ser adotado em função da compactação da mistura. De acordo com o NRMCA, o índice de compactação varia entre 1 e 8%, dependendo da energia de compactação empregada.

Uma vez determinado o volume de pasta de cimento, deve ser selecionada uma relação água/cimento para permitir o cálculo do volume de cimento e agregado para manter a porosidade de projeto. Na metodologia não há nenhum critério para a seleção da relação a/c, sendo recomendada apenas uma faixa de 0,25 a 0,36. Dessa forma, por meio de testes experimentais devem ser ajustados os parâmetros de dosagem iniciais em função do volume e consistência da pasta.

Embora esse método forneça uma metodologia simples para atingir porosidades de projeto, tanto o índice de compactação como a relação a/c são definidos por meio de tentativas experimentais. Dessa forma, os parâmetros devem ser ajustados para cada mistura e método de compactação empregado na confecção do concreto permeável. Essa metodologia é aplicável a qualquer agregado, não se restringindo a um material específico, sendo um aspecto positivo do procedimento.

2.3.2 Método do American Concrete Institute (ACI)

A metodologia do American Concrete Institute, publicada na ACI 522R (ACI, 2010) utiliza conceitos semelhantes ao método NRMCA, no entanto existem considerações técnicas a respeito dos agregados, sua compactação e da quantidade de água. O documento reúne os principais aspectos a serem considerados na dosagem de concretos permeáveis, porém ainda existem fatores pouco explorados que dificultam a aplicação da metodologia a qualquer material.

O método de dosagem do ACI, abordado inicialmente por Meininger (1988), também utiliza relações volumétricas entre os materiais constituintes do concreto. Nesse caso é utilizado o método “ b/b_o ”, que relaciona o volume de agregado no concreto “ b ” e a compacidade do agregado “ b_o ”. Ou seja, conhecendo-se a relação “ b/b_o ” é possível estimar o volume de agregado na mistura de concreto permeável. Esse parâmetro depende tanto do tamanho e distribuição do agregado graúdo como da quantidade de agregado miúdo utilizado na mistura. No entanto, a ACI 522R (ACI, 2010) apenas fornece valores para os agregados nº 8 e nº 67 da ASTM C33 (ASTM, 2018), similares às distribuições 4,75/12,5 e 9,5/25 conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009), respectivamente. Além disso, não são considerados o nível de compactação e o volume de pasta na escolha da relação “ b/b_o ”. Adotando-se ou determinando-se experimentalmente o valor “ b/b_o ” é possível estimar o consumo de agregado por volume unitário de concreto.

Na sequência, a determinação do volume de pasta é feita por meio de um ábaco que relaciona a porosidade de projeto e o nível de compactação empregado. Esse procedimento dificulta a aplicação do método quando se utilizam outros tipos de agregado, visto que o ábaco fornecido é exclusivo da distribuição nº 8 da ASTM C33 (ASTM, 2018). A partir da definição do volume de pasta e da relação água/cimento são calculadas as quantidades de cimento e água na mistura. As propriedades do concreto permeável, então, devem ser verificadas por meio de testes experimentais e ajustes à mistura.

O procedimento de dosagem do ACI também possui como objetivo projetar misturas de concreto permeável para atingir uma determinada porosidade ou massa específica. Nesse método é incluído o parâmetro “ b/b_o ” para correlacionar a compacidade do agregado e o volume de agregado na mistura. Porém, tanto a determinação desse parâmetro como a do volume de pasta é feita por meio de valores

e ábacos limitados a um tipo de material. No que se refere à compactação do concreto são estabelecidos dois níveis distintos, porém estes não são especificados. Assim como no método do NRMCA, não há critério para a escolha da relação a/c ou para o aprimoramento do desempenho mecânico das misturas.

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

Nguyen *et al.* (2014) desenvolveram um método de dosagem de concretos permeáveis baseando-se na espessura da camada de pasta de cimento que recobre o agregado graúdo. Uma das maiores contribuições do método está na proposta de um procedimento para a escolha da relação água/cimento para cada mistura de concreto permeável.

Na metodologia proposta pelos autores são consideradas diferentes hipóteses a respeito dos agregados e do comportamento da pasta de cimento. Os agregados são considerados partículas esféricas que são cobertas por uma camada de pasta com espessura proporcional ao seu tamanho. Dessa suposição pode ser deduzido um coeficiente “k” que relaciona o tamanho de cada partícula e a espessura da camada de pasta. O volume de agregado no concreto pode ser calculado por meio desse coeficiente em conjunto com dois outros parâmetros “a” e “b”. O parâmetro “a” define a fração de partículas superiores a 80 µm, enquanto que “b” descreve a quantidade de água retida no agregado.

O modelo proposto também considera que a estrutura ideal do concreto permeável é aquela em que a pasta de cimento recobre a superfície do agregado sem confinamento da mesma nos vazios intergranulares. O cálculo do volume de pasta também se baseia no coeficiente “k” e na porosidade de projeto. A determinação da relação a/c é realizada por um procedimento proposto pelos autores, que permite selecionar a máxima quantidade de água sem ocorrência de escoamento da pasta pelos poros do concreto. Esse método consiste em misturar uma quantidade de concreto permeável suficiente para preencher uma peneira e vibrar o conjunto por 15 segundos. Os autores utilizaram mesa vibratória, porém não apresentaram maiores especificações quanto ao equipamento. Após a vibração é verificado visualmente se houve escoamento da pasta pela malha da peneira. O teste é repetido para diferentes relações a/c, permitindo assim a escolha da quantidade de água ideal por meio de um critério padronizado.

Além da dosagem dos materiais, a metodologia proposta permite a estimativa da porosidade total por meio da previsão da porosidade da pasta de cimento. Com os parâmetros definidos, são realizados testes experimentais e, se necessários, realizam-se ajustes no nível de compactação do concreto.

Comparando-se os métodos apresentados, o procedimento elaborado por Nguyen *et al.* (2014) é o único que apresenta um ensaio para seleção da relação a/c e critérios para realizar essa escolha. Outro aspecto positivo está na utilização das características do agregado, independentemente da sua distribuição granulométrica. Tanto o cálculo do volume de agregado como a determinação do volume de pasta de cimento são realizados com o coeficiente “ k ”. Segundo os autores, o valor desse parâmetro se relaciona diretamente com o consumo de cimento da mistura de concreto permeável, impactando nas propriedades físicas e mecânicas do material. No entanto, Nguyen *et al.* (2014) recomendam a utilização de um valor proveniente de testes experimentais realizados pelos autores, não havendo consideração ou critério para a escolha de diferentes valores do coeficiente.

O coeficiente “ k ” deduzido pelos autores se assemelha à relação “ b/b_0 ” do método do ACI, visto que relaciona as características do agregado no estado compactado e seu comportamento dentro do concreto. Dessa forma, esse parâmetro também é influenciado pela compressibilidade do agregado, a energia de compactação e a consistência do concreto. Porém, não há consideração sobre como esses procedimentos de dosagem afetam a resistência mecânica do concreto, sendo justificado apenas que esse procedimento resulta em um material com propriedades adequadas na produção de peças pré-moldadas.

2.3.4 Outros Métodos de Dosagem

Além dos métodos apresentados, outras pesquisas também propuseram metodologias para o desenvolvimento de misturas de concreto permeável. Nesses estudos foram explorados parâmetros com potencial aplicação na dosagem do material. Em geral, foram empregados parâmetros relativos ao estado de compactação dos agregados no concreto permeável e informações sobre o volume de pasta de cimento na mistura. A seguir estão descritos os métodos recentemente propostos na literatura.

Yahia e Kabagire (2014) apresentaram um procedimento para desenvolver misturas de concreto permeável baseado no empacotamento dos grãos do agregado. Os autores utilizaram o índice de vazios intergranulares como um parâmetro característico do agregado graúdo. Nesse estudo foi proposto utilizar o percentual de vazios intergranulares ocupados pela pasta de cimento como um parâmetro de dosagem do concreto. Segundo os autores esse parâmetro pode ser utilizado para estabelecer um equilíbrio entre as propriedades mecânicas e hidráulicas do material.

Xie *et al.* (2020) propuseram um método de dosagem baseado em relações da matriz granular do concreto permeável. Os autores correlacionaram as propriedades mecânicas do material com a área de pasta de cimento nas regiões de contato entre agregados. Isto permitiu selecionar o volume de pasta a partir de informações como o número de contatos entre agregados, a espessura da pasta de cimento e a largura das regiões de contato. Embora o estudo tenha apresentado bons resultados na previsão de resistência mecânica, o método se baseia em uma série de modelos estatísticos desenvolvidos para o agregado utilizado pelos autores. A aplicação do método para outro tipo de agregado demandaria um estudo de validação, sendo necessária a caracterização da matriz granular do concreto permeável.

Yu *et al.* (2021) estudaram a influência do consumo de agregado na dosagem de misturas de concreto permeável. Os autores apresentaram o coeficiente “ACC” que relaciona a quantidade de agregado por volume unitário de concreto. Verificou-se no estudo que esse coeficiente controla a quantidade de pasta de cimento na mistura, bem como as propriedades mecânicas e hidráulicas. A dosagem de concreto permeável foi proposta pela seleção de coeficientes “ACC” variando dentro de uma faixa, optando-se pelo valor que otimiza as propriedades do concreto. Os autores também avaliaram o padrão de falha mecânica do material como critério de dosagem.

Costa *et al.* (2021) apresentaram um método de dosagem baseado na metodologia IPT-EPUSP, utilizada para concretos convencionais. Na metodologia os consumos de cimento e agregado por volume unitário de concreto permeável são definidos por equações volumétricas desenvolvidas com base na porosidade de projeto. Embora seja um procedimento prático, a relação agregado/cimento não é obtida na metodologia, mas deve ser previamente selecionada. Como consequência, determinadas porosidades não podem ser atingidas com uma energia de compactação fixa, conforme reportado pelos autores.

2.3.5 Eficiência dos Métodos de Dosagem

Os três principais métodos de dosagem de concretos permeáveis apresentados têm o mesmo objetivo, que é desenvolver misturas com porosidade próxima ao valor de projeto. Cada uma das metodologias possui princípios de dosagem distintos, porém são todas baseadas em relações volumétricas entre a pasta de cimento, o agregado graúdo e os vazios intergranulares. No Quadro 4 estão relacionados os principais aspectos e características de cada método.

Quadro 4 – Comparação entre os principais aspectos dos métodos de dosagem de concreto permeável

Método de Dosagem	NRMCA (2019)	ACI (2010)	Nguyen <i>et al.</i> (2014)
Objetivo	Porosidade de projeto	Porosidade de projeto Condutividade Hidráulica	Porosidade de projeto Volume de pasta mínimo
Princípio	Vazios do agregado	Método “b/b _o ”	Camada de pasta de cimento
Aplicabilidade	Qualquer agregado	Agregados nº 8 e nº 67 (ASTM C33)	Qualquer agregado
Método para seleção da relação a/c	Não	Não	Método da drenagem da pasta
Quantidade de cimento	Relações volumétricas	Ábaco	Coeficiente “k”
Compactação	Não especificada	Não especificada	Ajustada
Previsão de Resistência	Não	Não	Não
Previsão de Condutividade Hidráulica	Não	Ábaco	Não
Vantagens	- Método simples; - Aplicável a qualquer agregado.	- Método simples; - Consideração sobre a compressibilidade do agregado.	- Método de seleção da relação a/c; - Previsão da porosidade da pasta de cimento.
Desvantagens	- Compactação baseada em coeficiente empírico; - Ausência de método de seleção da relação a/c.	- Forma de compactação não informada no método; - Restrito a agregados utilizados no método; - Ábacos restritos aos materiais do método.	- Coeficiente “k” não é explícito; - Compactação deve ser ajustada experimentalmente.

Conforme apresentado, tanto o método NRMCA como o ACI utilizam a compressibilidade dos agregados na determinação da quantidade de cimento na mistura. Enquanto o NRMCA estabelece um índice empírico, o ACI utiliza o coeficiente “b/b_o”, disponibilizando informações restritas a faixas de agregado. O método proposto por Nguyen *et al.* (2014), embora apresente uma sequência metodológica deduzida a partir de relações entre a camada de pasta e os respectivos grãos do agregado,

resumem sua metodologia a um coeficiente k constante, a partir dos seus dados experimentais. Uma das principais carências no estudo de concretos permeáveis é uma metodologia que permita relacionar a compressibilidade dos agregados e a sua interação com a pasta de cimento, sendo aplicável a qualquer tamanho e distribuição granulométrica.

Com relação à seleção da relação a/c , Nguyen *et al.* (2014) estabeleceram uma metodologia simples para a escolha da consistência da pasta de cimento. Embora o método ofereça um critério para definir a quantidade de água na mistura, não foi explorado como as características da pasta de cimento podem interferir no comportamento do material. Uma deficiência dos estudos sobre o material é falta da análise da relação a/c e da consistência da pasta de cimento de forma independente, possibilitando assim compreender a influência de cada parâmetro.

Observa-se que nos três métodos o processo de compactação ainda é impreciso. Nos métodos do NRMCA e ACI não há menção a respeito da forma de compactação das amostras e sua correspondência com as propriedades do concreto permeável. Nguyen *et al.* (2014) estabeleceram um procedimento inicial de compactação em mesa vibratória, porém o nível de compactação não é considerado no procedimento de dosagem. Essa compactação deve, ainda, ser ajustada para regular as propriedades físicas do concreto permeável. No entanto, a inclusão da compactação na dosagem do material é necessária, uma vez que a consolidação influencia tanto o comportamento mecânico como o hidráulico do concreto poroso. Além disso, esse processo pode ser utilizado como uma forma de controlar a porosidade dos concretos sem alterar a proporção agregado/cimento (SULEIMAN *et al.*, 2006; IBRAHIM *et al.*, 2014; BONICELLI; PÉREZ-OSORIO; FUENTES, 2019).

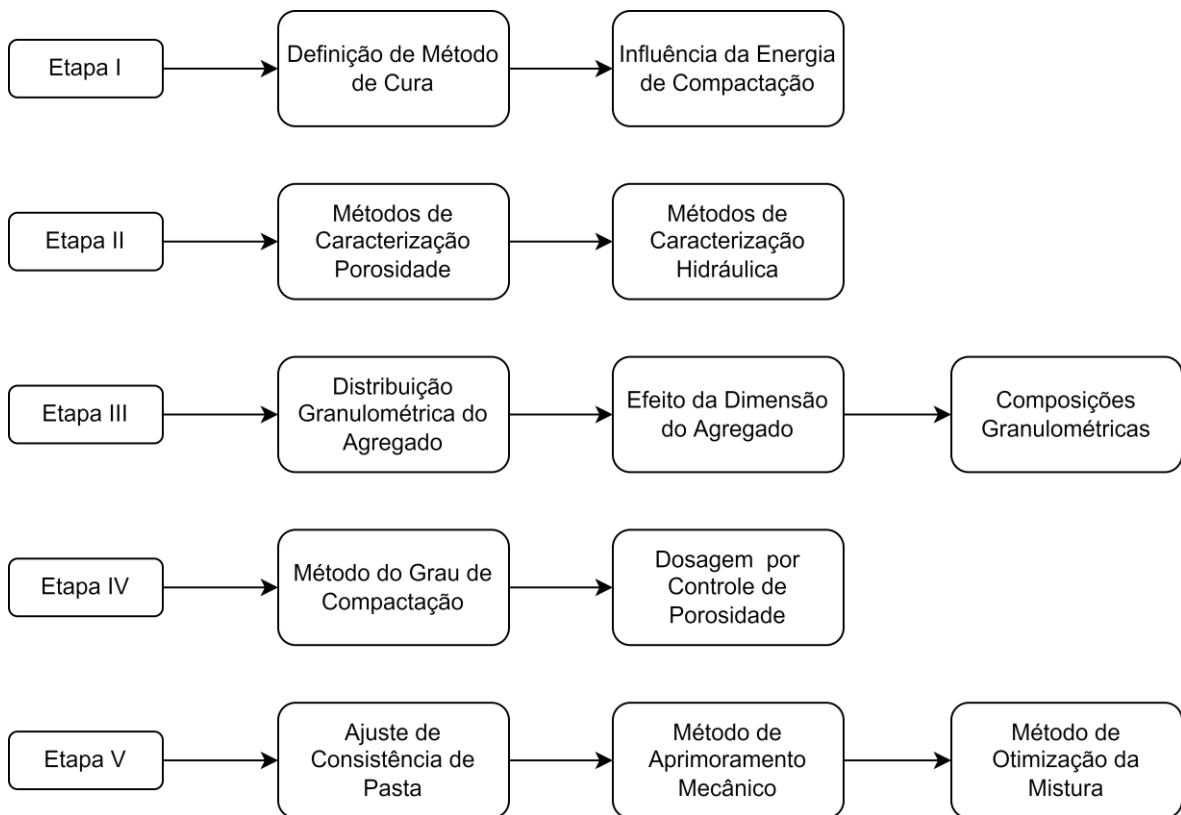
Nos métodos avaliados a relação entre os parâmetros de dosagem e a resistência mecânica do material ainda não é totalmente compreendida. O comportamento mecânico do concreto permeável é um dos principais fatores a ser considerado na sua aplicação em pavimentos permeáveis e irá interferir diretamente no dimensionamento estrutural dos mesmos (DELATTE, 2008; ABNT, 2015a). Dessa forma, ainda é necessário aprimorar as metodologias de dosagem de concretos permeáveis para o desenvolvimento de misturas com resistência mecânica e permeabilidade compatíveis com a sua aplicação em campo.

3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

3.1 ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho foi dividido em capítulos experimentais, sendo abordado em cada um deles os principais fatores e processos envolvidos na dosagem do concreto permeável. Dessa forma, neste estudo foram apresentadas cinco etapas experimentais, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Descrição das principais etapas desenvolvidas nesta pesquisa



Na Etapa I foram analisados os processos de produção de concreto permeável e a sua influência no procedimento de dosagem do material. Embora compartilhe muitos conceitos com o concreto convencional, a produção do concreto poroso ainda não é consolidada. Inicialmente foram avaliadas diferentes condições de cura do concreto, identificando-se o impacto nas suas propriedades mecânicas. Na sequência foi estudada a influência da energia de compactação nas características do concreto permeável, sendo avaliado como a variável pode ser incorporada no processo de dosagem do material.

Na Etapa II foram avaliadas diferentes técnicas de caracterização empregadas na análise de concretos permeáveis. Estudou-se as metodologias para determinar a porosidade no estado fresco e endurecido, estabelecendo-se uma relação entre ambas. Também foram analisados os métodos de caracterização hidráulica do concreto permeável, identificando-se a relação entre as metodologias.

A Etapa III teve como objetivo compreender como as características dos agregados interferem nas propriedades do concreto permeável e no processo de dosagem do material. Para isso, foram avaliadas as principais distribuições granulométricas do agregado graúdo (contínua, uniforme e descontínua). Foi analisado o efeito de cada distribuição na composição da mistura de concreto permeável e nas suas propriedades mecânicas e hidráulicas. Também foi estudado o efeito da dimensão do agregado e a utilização de composições granulométricas obtidas a partir da mistura de agregados.

O método de dosagem de concreto permeável proposto neste estudo foi dividido em duas fases, sendo apresentadas em etapas distintas. Na Etapa IV apresentou-se uma metodologia para desenvolvimento de misturas de porosidade de projeto fixa. Esse procedimento, denominado de método do grau de compactação, fornece um processo sistematizado para a elaboração de traços de concreto permeável, sendo adaptável às características do agregado e ao método de compactação empregado. A partir dessa metodologia, uma relação entre a porosidade e as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável pode ser estabelecida.

Na Etapa V foi apresentado o método de otimização de misturas de concreto permeável, complementando a dosagem do material. Para isso, um ajuste de consistência da matriz cimentícia foi proposto para permitir modificações como a alteração da relação água/cimento ou a inclusão de agregado miúdo. Para o aprimoramento mecânico do concreto permeável foi apresentado um método de controle da relação água/cimento para produzir concretos com uma matriz cimentícia com desempenho superior. Além do critério mecânico, as misturas de concreto permeável devem ter sua eficiência no consumo de cimento aprimorada. Portanto, um método para avaliar a inclusão de agregado miúdo foi proposto com o intuito de reduzir o consumo de aglomerante sem prejudicar o desempenho do concreto. Ao final do capítulo os métodos propostos foram aplicados para misturas com porosidades compreendidas na faixa usual de dosagem.

3.2 METODOLOGIAS DE CARACTERIZAÇÃO

No decorrer das etapas experimentais deste estudo foram utilizados diferentes agregados para compor a mistura de concreto permeável. As propriedades físicas dos agregados foram caracterizadas em cada etapa, seguindo as metodologias descritas no Quadro 5.

Quadro 5 – Metodologias utilizadas na caracterização física dos agregados

Parâmetro	Metodologia
Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Densidade Densidade aparente Absorção de água	NBR 16916 (ABNT, 2021a) NBR 16917 (ABNT, 2021b) ASTM C127 (ASTM, 2015)
Massa unitária Volume de vazios	NBR 16972 (ABNT, 2021c)

Fonte: O autor.

Os concretos permeáveis produzidos nas campanhas experimentais foram submetidos a uma caracterização física, mecânica e hidráulica. Para isso, foram utilizadas as metodologias descritas no Quadro 6.

Quadro 6 – Metodologias utilizadas na caracterização física e mecânica do concreto permeável

Parâmetro	Metodologia
Massa específica e porosidade no estado fresco	ASTM C1688M (ASTM, 2014a)
Massa específica e porosidade no estado endurecido	ASTM C1754M (ASTM, 2012b)
Porosidade aberta	Adaptado de Deo e Neithalath (2010)
Condutividade hidráulica	Permeâmetro de Carga Variável (ACI, 2010)
Resistência à compressão	NBR 5739 (ABNT, 2018)
Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222 (ABNT, 2011)

Fonte: O autor.

Outras metodologias de caracterização de porosidade e de condutividade hidráulica também foram avaliadas por meio de um estudo comparativo na Etapa II. Esses métodos foram descritos e detalhados no capítulo experimental correspondente, uma vez que foram utilizados exclusivamente nesse estudo comparativo.

Os resultados da caracterização mecânica, física e hidráulica do concreto permeável foram avaliados por meio de testes estatísticos para auxiliar na sua análise e interpretação. Devido à variação usualmente obtida na caracterização mecânica do concreto permeável optou-se inicialmente pela utilização de 5 repetições na determinação da resistência à compressão axial e da resistência à tração indireta. Após a consolidação do método de preparo e cura do material, o número de repetições foi reduzido para 4. Para a caracterização das propriedades físicas no estado endurecido e da condutividade hidráulica também foram utilizadas 4 repetições. As propriedades no estado fresco foram avaliadas para todas as amostras produzidas.

As inferências sobre diferenças significativas foram realizadas a partir de testes de análise de variância (ANOVA), sendo as médias comparadas pelo Teste de Tukey. A verificação da aplicabilidade do teste de ANOVA foi realizada por meio da verificação da normalidade dos resíduos, com o teste de Ryan-Joiner e a análise de igualdade das variâncias, pelo teste de Levene. Em todos os casos foi adotado um nível de significância de 5%.

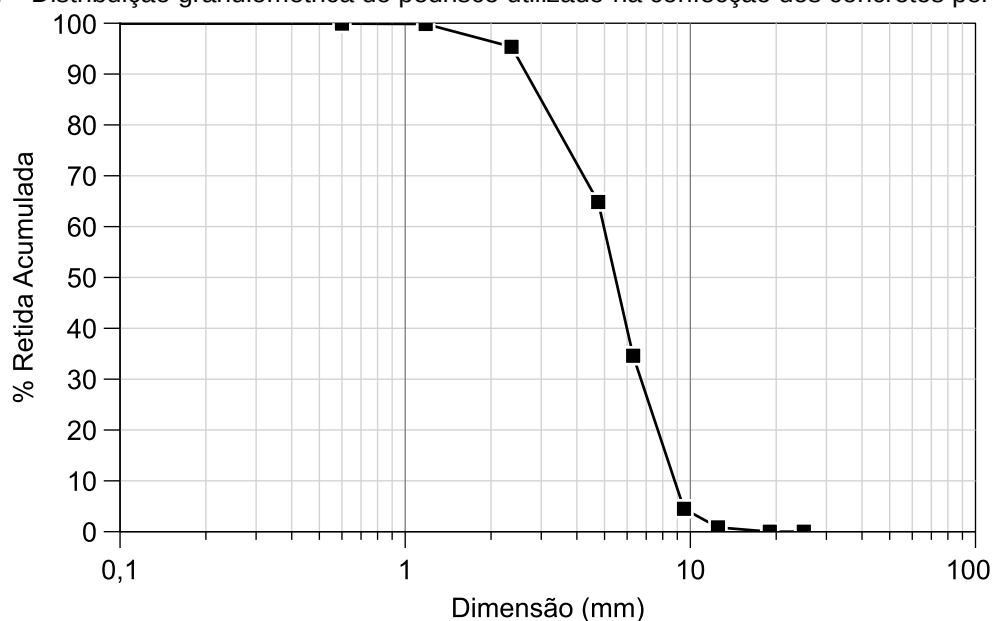
4 ETAPA I – ESTUDO DE MÉTODOS DE PREPARO DE MISTURAS DE CONCRETO PERMEÁVEL

Nesta etapa inicial o objetivo foi definir o procedimento padrão de preparo do concreto permeável para integrar o método de dosagem proposto neste estudo. Uma vez que o processo de produção do concreto poroso interfere diretamente nas propriedades mecânicas e hidráulicas, é fundamental selecionar o método que proporcione o melhor desempenho do material. Dessa forma, nesta pesquisa duas misturas de concreto permeável com porosidades de 20 e 30% foram submetidas a diferentes condições de cura e compactação para avaliar o procedimento de preparo mais eficiente.

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento dos concretos permeáveis desta etapa optou-se pela utilização de materiais usualmente empregados na confecção de concretos convencionais. Baseado em testes exploratórios desta pesquisa, os concretos produzidos com agregado de menor dimensão tendem a apresentar menor variabilidade experimental. Desta forma, optou-se pela utilização de pedrisco (Brita 0, com dimensão máxima característica de 12,5 mm) na confecção das misturas de concreto permeável. A distribuição granulométrica do agregado utilizado está ilustrada na Figura 11.

Figura 11 – Distribuição granulométrica do pedrisco utilizado na confecção dos concretos permeáveis



Embora o agregado não se enquadre na distribuição 4,75/12,5 da NBR 7211 (ABNT, 2009), ele está compreendido na faixa ASTM nº 89 (ASTM, 2018), que é uma das distribuições recomendada para a produção de concretos permeáveis, conforme a ACI 522R (ACI, 2010). As características físicas do agregado estão relacionadas na Tabela 2. Além da densidade seca do agregado gráudo também foi caracterizada a densidade aparente, conforme definido pela ASTM C127 (ASTM, 2015). A densidade aparente exclui os poros permeáveis a água, sendo importante a sua caracterização para a determinação correta da porosidade do concreto permeável.

Tabela 2 – Propriedades físicas obtidas na caracterização do pedrisco

Absorção (%)	Aparente* (g/cm ³)	Densidade		Massa Unitária		Índice de Volume de Vazios	
		Superfície Saturada (g/cm ³)	Seca (g/cm ³)	Estado Solto (g/cm ³)	Estado Compactado (g/cm ³)	Estado Solto (%)	Estado Compactado (%)
1,15	3,05	2,98	2,94	1,52	1,67	50,16	45,29

Nota: *Densidade aparente excluindo-se poros permeáveis a água, calculada conforme ASTM C127 (ASTM, 2015).

O cimento empregado neste estudo foi o CII-F 32, aglomerante de uso geral. A caracterização físico-química do cimento, fornecida pelo fabricante, está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Caracterização físico-química do cimento CII-F 32

Finura			Tempo de Pega		Caracterização Química		
Blaine (cm ² /s)	Retido #200 (%)	Retido #325 (%)	Início de Pega (min)	Fim de Pega (min)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Perda ao Fogo (%)
4280	3,3	11,9	313	374	4,0	2,6	11,5

Duas misturas foram utilizadas no desenvolvimento desta etapa, sendo projetadas para resultar em porosidades no estado fresco de 20 e 30%. O traço do concreto permeável, representado pela relação agregado/cimento (g/c), foi ajustado em cada mistura para gerar as porosidades desejadas quando compactadas em 2 camadas e 10 golpes de soquete Proctor. A relação a/c foi determinada pelo método de drenagem da pasta de cimento, desenvolvido por Nguyen *et al.* (2014). A relação de 0,28 foi a que proporcionou uma consistência da pasta de cimento suficiente para

promover cobertura homogênea do agregado, porém sem escoamento da pasta. As características de cada mistura estão relacionadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características das misturas de concreto permeável P20 e P30

Mistura	P (%)	g/c	a/c	C _{cim} (kg/m ³)	C _{agg} (kg/m ³)	dt (g/cm ³)
P20	20,0	3,10	0,28	485,5	1504,9	2,71
P30	30,0	4,68	0,28	322,6	1509,7	2,80

Nota: C_{cim} - Consumo de cimento por volume de unitário de concreto; C_{agg} - consumo de agregado graúdo por volume unitário de concreto; dt – densidade teórica.

A mistura dos materiais foi realizada conforme o preparo de concretos convencionais, descrito na ASTM C192M (ASTM, 2016). A moldagem das amostras foi realizada por meio da compactação da mistura em moldes cilíndricos metálicos com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm. A compactação das amostras foi realizada com um soquete Proctor padrão. Na fase inicial desta etapa (estudo de condições de cura), as amostras foram compactadas em duas camadas, aplicando-se 10 golpes em cada camada. Essa compactação foi escolhida para gerar uma energia de compactação de 95,2 kJ/m³, valor intermediário na faixa de valores encontrados na literatura (CROUCH; PITT; HEWITT, 2007; MARTIN III; KAYE; PUTMAN, 2014; TORRES; HU; RAMOS, 2015; GAEDICKE *et al.*, 2016). Na segunda fase (estudo da energia de compactação) o número de camadas e de golpes foi variado para produzir diferentes energias de compactação.

Para realizar a compactação, o molde foi preenchido até aproximadamente 2/3 de sua altura, sendo os 10 golpes distribuídos regularmente na superfície da camada. Com auxílio de um funil preencheu-se o molde totalmente, aplicando-se os 10 golpes restantes. Devido à dificuldade em se atingir a altura correta ao fim da compactação, foi mantida uma camada de concreto permeável excedendo em 3 mm o nível superior do molde, conforme o procedimento da ASTM C1688M (ASTM, 2014a). A superfície foi regularizada com auxílio de uma placa metálica por meio de impactos, evitando-se assim a remoção da pasta de cimento dos agregados superficiais.

Logo após a moldagem dos corpos de prova foi realizada a caracterização da porosidade e massa específica no estado fresco. Apesar de o procedimento descrito na ASTM C1688M (ASTM, 2014a) indicar o uso de um recipiente padrão para aferição da porosidade no estado fresco, neste estudo foi realizada a caracterização individual de cada amostra no próprio molde (10 cm x 20 cm). Essa adaptação foi realizada

devido à dificuldade em reproduzir a compactação do concreto permeável no recipiente padrão e nos moldes utilizados para a produção das amostras. Após a moldagem dos corpos de prova, estes foram submetidos ao processo de cura, sendo mantidos nessa condição até o momento da caracterização da resistência mecânica.

4.2 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE CURA

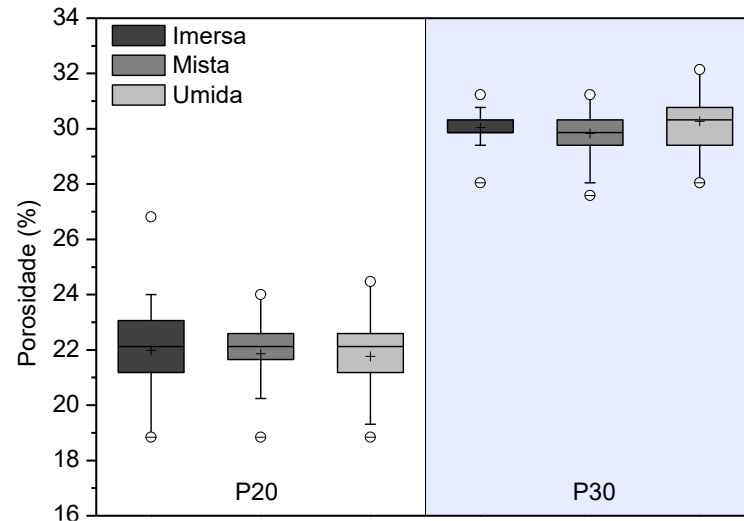
Uma vez que a etapa de cura de concretos possui influência direta no desenvolvimento da sua resistência mecânica, foi realizado um estudo comparando-se diferentes condições de cura do material. Foram adotadas três condições distintas: (a) imersão em água, conforme o procedimento adotado para concretos convencionais; (b) cura mista com imersão em água por 7 dias seguida de exposição ao ar livre até a data de ensaio e (c) cura úmida com filme plástico. Esta última condição foi analisada para simular a condição real de pavimentos, em que a cura é realizada umedecendo-se o pavimento e cobrindo-o com uma película plástica. A cura úmida foi realizada umedecendo-se as amostras de concreto e mantendo-as envolvidas por um filme plástico em grupos de 10 amostras até a data de ensaio. A cura mista foi realizada com o intuito de verificar a influência da cura nos primeiros 7 dias, que corresponde ao período mínimo recomendado para o concreto de cimento Portland (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Para o desenvolvimento desta etapa foram utilizadas as duas misturas de concreto permeável desenvolvidas (P20 e P30). As amostras utilizadas nesta etapa foram produzidas de acordo com o método de mistura e compactação definidas anteriormente. Os corpos de prova foram desmoldados após 24 h, sendo submetidos a cada um dos procedimentos de cura. Para comparar as três situações de cura foram avaliadas a resistência à tração indireta e resistência à compressão axial de amostras de concreto permeável com 7, 14 e 28 dias de idade. Cada resistência mecânica foi avaliada por meio de 5 repetições, totalizando 80 amostras para cada traço.

Todas as amostras foram caracterizadas no estado fresco como forma de controle da porosidade total, sendo os resultados apresentados na Figura 12. Conforme apresentado, foi possível produzir amostras de concreto com porosidades distintas. Para o traço P20, as amostras apresentaram uma porosidade média de 22,01%, enquanto no traço P30 a média geral foi equivalente a 30,05%. Neste caso, o maior volume de pasta de cimento pode ter afetado a compactação do concreto

permeável P20, resultando em uma porosidade média 2,01% acima do valor projetado. Não houve, no entanto, variação significativa entre as porosidades das amostras utilizadas em cada condição de cura. Desta forma, a variabilidade da resistência pode ser atribuída às condições de cura utilizadas.

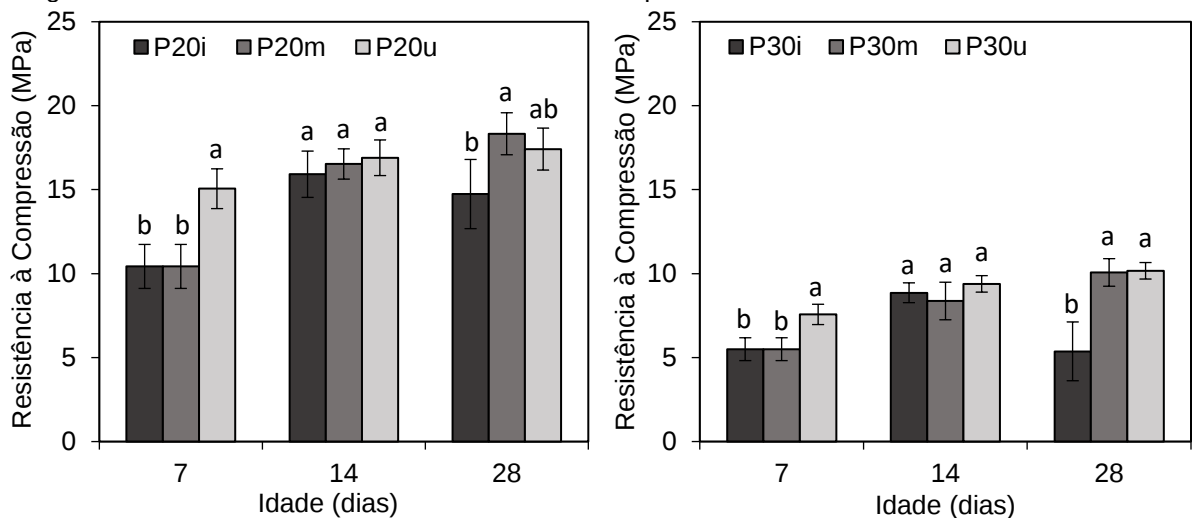
Figura 12 – Distribuição *boxplot* dos dados de porosidade no estado fresco dos concretos permeáveis



Nota: Cada caixa representa a distribuição de porosidade de 30 repetições

A resistência à compressão média do concreto permeável apresentou diferenças estatísticas entre as diferentes condições de cura analisadas. Na Figura 13 estão ilustrados os resultados de resistência à compressão das amostras de concreto P20 e P30 em função da idade analisada.

Figura 13 – Resultados médios da resistência à compressão das amostras de concreto P20 e P30



Notas: i – cura imersa; m – cura mista; u – cura úmida. Barras referentes a mesma idade seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente no Teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

Pode-se observar na Figura 13 que o comportamento mecânico do concreto permeável variou em função da condição de cura empregada, havendo também interação estatística com a idade analisada. Na idade de 7 dias pode-se observar que a resistência à compressão média das amostras P20 submetidas à cura úmida foi 44% superior em relação à cura por imersão. Para a série P30 esse ganho foi de 38%, demonstrando comportamento similar.

Uma das hipóteses que pode ser levantada é a lixiviação da pasta de cimento das amostras que permaneceram imersas em água. Em uma matriz cimentícia, o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) é o constituinte mais suscetível à lixiviação, possuindo alta solubilidade em água pura (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A lixiviação desse composto ocasiona o aumento da porosidade da pasta de cimento, afetando assim as características mecânicas do concreto (ROZIÈRE *et al.*, 2009; JEBLI *et al.*, 2016). Esse fenômeno pode ser ainda mais crítico no concreto permeável, visto que toda a superfície dos poros estará sujeita à lixiviação. Além disso, os agregados são cobertos por uma fina camada de pasta de cimento e qualquer alteração na matriz cimentícia pode interferir no desempenho mecânico do material. As amostras submetidas à cura úmida, por outro lado, entraram em contato com uma quantidade de água suficiente para umedecer toda a superfície do concreto, sem prejuízo ao processo de hidratação da pasta de cimento.

Aos 14 dias houve um incremento na propriedade em relação aos 7 dias que pode ser atribuído às reações de hidratação dos compostos do cimento e, consequentemente, à densificação da pasta de cimento. A variação entre a resistência média das três condições de cura, no entanto, foi desprezível para as duas misturas. Tanto a cura mista como a cura úmida apresentaram evolução na resistência à compressão, demonstrando que essas condições garantiram disponibilidade de água para a hidratação do cimento sem prejuízo em relação à cura por imersão.

Na idade de 28 dias as amostras em imersão apresentaram a menor resistência à compressão média, o que pode estar associado ao processo contínuo de lixiviação da pasta de cimento. Na série P30 a queda de resistência foi mais significativa, resultando em valores similares à resistência aos 7 dias. Isso pode demonstrar uma maior suscetibilidade dos concretos P30 ao efeito de lixiviação. Uma vez que essas amostras possuíam maior porosidade, havia maior disponibilidade de área de pasta de cimento em contato com a água, intensificando o processo de dissolução do hidróxido de cálcio. Como nessas misturas havia um volume inferior de

pasta de cimento, as alterações físicas oriundas da lixiviação comprometeram o desenvolvimento mecânico do concreto permeável. Os concretos sujeitos à cura mista e úmida, por outro lado, ainda apresentaram aumento na resistência, demonstrando continuidade das reações de hidratação do cimento.

De forma geral, tanto para o concreto P20 como para o P30, a cura por imersão em água foi a condição que apresentou menor resistência à compressão aos 7 e 28 dias. A mistura P30, no entanto, foi mais influenciada pelo procedimento de cura, demonstrando decréscimo na resistência aos 28 dias. Raj e Chockalingam (2019) constataram em seu estudo que na cura por imersão as amostras de concreto permeável apresentavam dissolução da pasta de cimento, sendo coerente com a hipótese de lixiviação da pasta de cimento do concreto permeável. Embora os autores não tenham abordado a comparação entre as condições de cura, eles adotaram um procedimento similar à cura úmida empregada neste estudo. No entanto, Ibrahim, Razak e Abutaha (2017) verificaram em seu estudo que as amostras de concreto curadas por imersão em água apresentaram resistência à compressão média superior às amostras que passaram por cura úmida. Entretanto, as diferenças foram inferiores a 5%. Yeih e Chang (2019), por sua vez, observaram que a cura do concreto permeável por imersão em solução saturada de hidróxido de sódio foi mais eficiente do que a cura ao ar. Os autores verificaram também que as diferenças foram maiores nas amostras com maior porosidade.

Neste estudo não houve diferença entre as condições de cura mista e úmida aos 14 e 28 dias. Desta forma, foi possível constatar que a cura úmida garante condições suficientes para o desenvolvimento da resistência mecânica do concreto, não havendo benefício na imersão em água nos 7 primeiros dias. Além disso, por meio dessa condição de cura não há risco de lixiviação da pasta de cimento, que pode comprometer a microestrutura da matriz cimentícia.

A evolução da resistência das amostras de concreto P20 e P30 em função do tempo também foi influenciada pela condição de cura empregada. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a evolução da resistência à compressão de concretos convencionais pode ser estimada pelo modelo descrito na norma ACI 209R (ACI, 1992) ou pelo modelo CEB/FIP Model Code (FIB, 1999). Esses modelos permitem a estimativa da resistência à compressão do concreto na idade t , considerando a resistência média aos 28 dias. As expressões sugeridas pela ACI 209R (ACI, 1992) e pelo CEB/FIP (FIB, 1999) estão apresentadas nas Equações 1 e 2, respectivamente.

$$f_{c,t} = \frac{t}{a + \beta t} f_{c,28} \quad (1)$$

$$f_{c,t} = \exp \left(s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right) f_{c,28} \quad (2)$$

Em que:

$f_{c,t}$ – resistência à compressão na idade t (MPa);

t – idade do concreto (dias);

a , β e s – constantes definidas pelo tipo de cimento e condições de cura;

$f_{c,28}$ – resistência à compressão aos 28 dias.

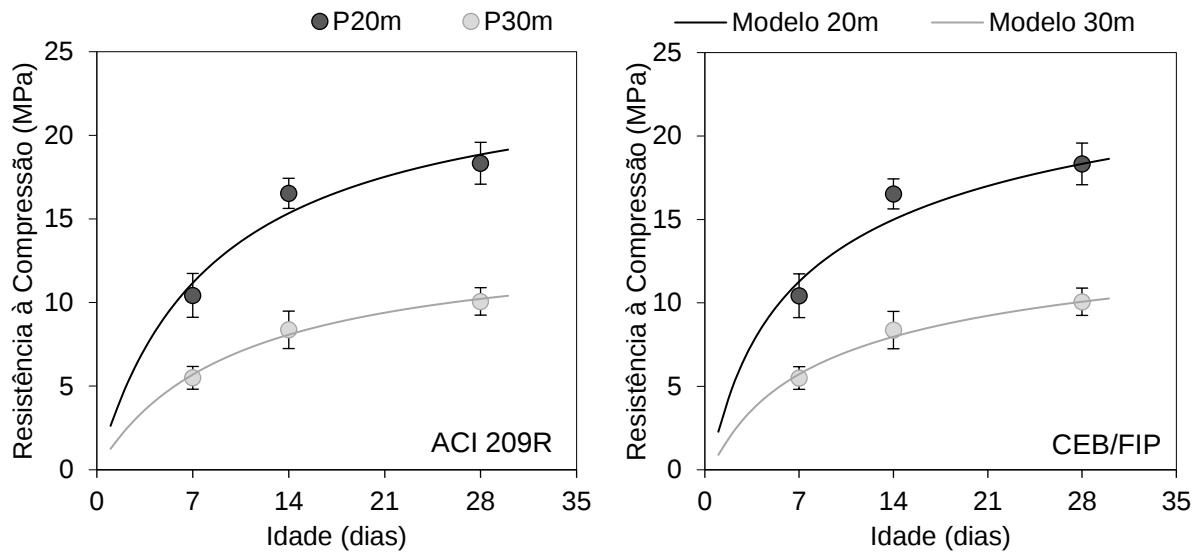
Para o concreto convencional, os coeficientes a , β e s são influenciados pelo tipo de cimento e pelas condições de cura das amostras. Embora existam valores recomendados para cada constante, esses valores não se aplicam, necessariamente, ao concreto permeável. Neste estudo foi realizado o ajuste dos modelos ACI 209R (ACI, 1992) e CEB/FIP (FIB, 1999) aos dados experimentais, com exceção da cura por imersão, que apresentou comportamento mecânico adverso aos 28 dias. Os coeficientes definidos no ajuste de ambos os modelos e o respectivo erro padrão estão expostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Coeficientes obtidos no ajuste dos modelos de evolução da resistência à compressão

Concreto	Modelo ACI 209R			Modelo CEB/FIP	
	a	β	Erro Padrão	s	Erro Padrão
P20m	6,23	0,75	1,45	0,49	1,51
P30m	7,32	0,72	0,89	0,56	0,87
P20u	1,47	0,94	1,14	0,13	1,12
P30u	3,16	0,88	1,07	0,28	1,04

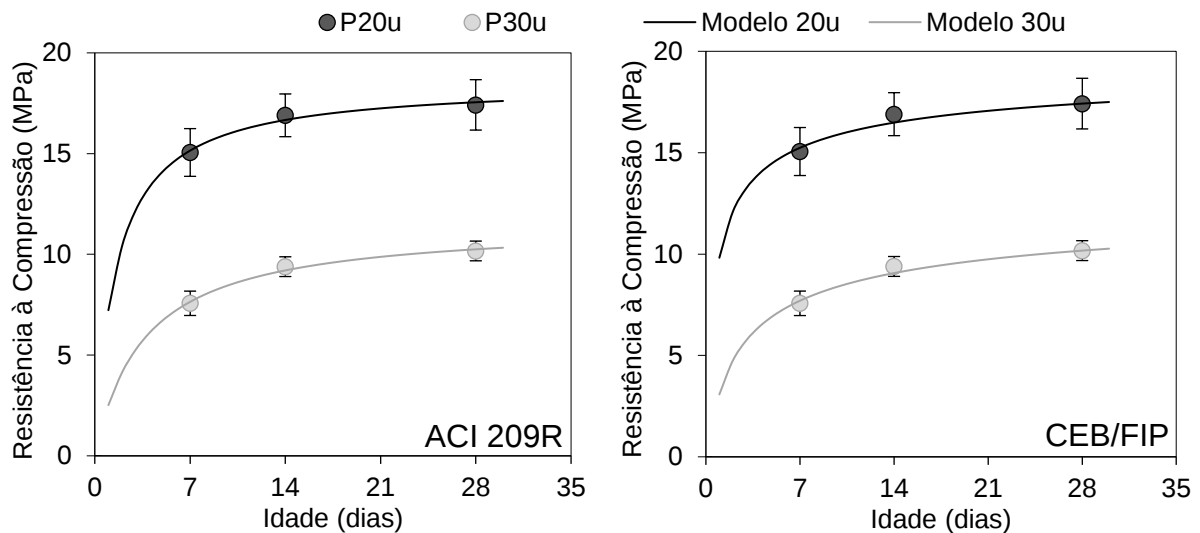
Na cura mista foi possível identificar uma evolução da resistência em relação ao tempo, sendo detectada diferença estatística entre as idades de 7 e 28 dias nos dois traços analisados. Os dados experimentais e ajustes dos modelos ACI 209R e CEB/FIP podem ser observados na Figura 14.

Figura 14 – Comparação entre os modelos ACI 209R e CEB/FIP para as amostras submetidas a cura mista



Ainda que tenha ocorrido um ajuste dos modelos aos dados experimentais, a evolução da resistência do concreto P20 não pôde ser explicada totalmente, resultando em erros padrões da ordem de 1,50 MPa. No entanto, deve-se considerar que nessa condição de cura, as amostras permaneceram apenas 7 dias em imersão em água. Desta forma, a hidratação do cimento e os possíveis efeitos de lixiviação nos primeiros 7 dias ocorreu de forma distinta em relação às demais idades. Na Figura 15 estão representados os ajustes dos modelos ACI 209R e CEB/FIP para os concretos submetidos à cura úmida.

Figura 15 – Comparação entre os modelos ACI 209R e CEB/FIP para as amostras em cura úmida



Na cura úmida foi possível estabelecer os modelos da ACI 209R e CEB/FIP, não sendo detectada falta de ajuste aos dados experimentais. Além disso, o erro padrão da estimativa se situou entre 1,0 e 1,1 MPa, compatível com o desvio padrão da análise de resistência à compressão das amostras. A cura úmida se demonstrou como a condição mais regular para as amostras de concreto permeável. Os dois modelos apresentaram comportamento coerente da evolução da resistência à compressão, no entanto os coeficientes determinados no ajuste foram distintos para cada porosidade projetada.

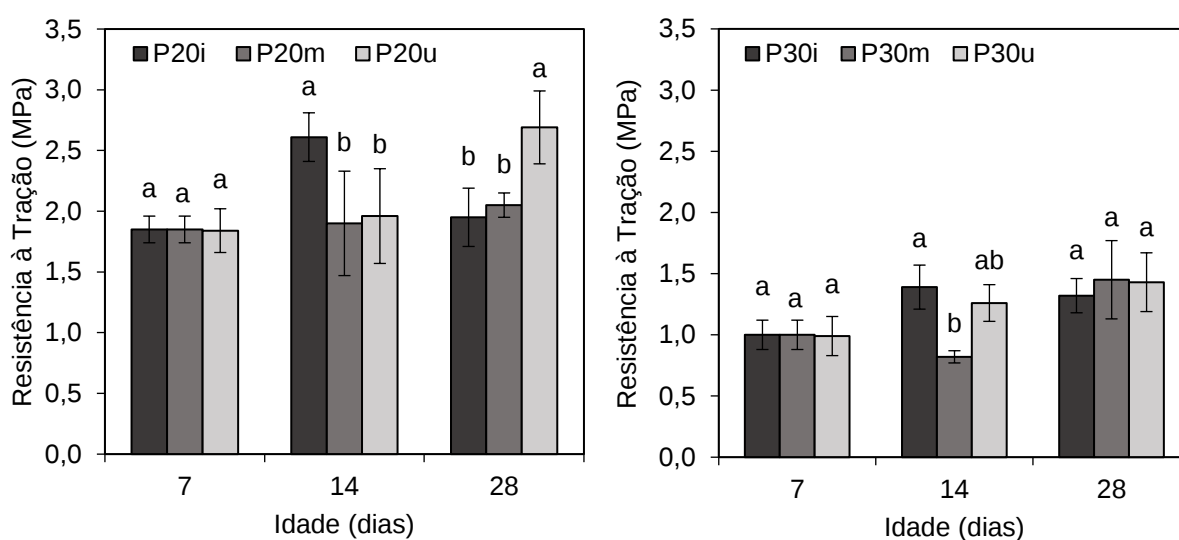
De acordo com o relatório ACI 209R (ACI, 1992) os coeficientes do modelo dependem tanto do tipo de cimento como da condição de cura. Para o concreto convencional submetido à cura úmida, os coeficientes α e β assumem valores de 4,00 e 0,85 para o cimento tipo I (cimento de uso geral) e 2,30 e 0,92 para o cimento tipo III (cimento de alta resistência inicial), respectivamente. No entanto, esses valores são referentes aos cimentos conforme a classificação ASTM C150M (ASTM, 2021), não sendo necessariamente válidos para os cimentos brasileiros ou o método de cura empregado neste estudo. A combinação dos coeficientes α e β está associada ao percentual da resistência atingida em cada idade do concreto. Para os coeficientes citados anteriormente, a resistência à compressão aos 7 e 14 dias corresponde a 70 e 88% da resistência desenvolvida aos 28 dias, respectivamente.

Nos concretos submetidos a cura mista o coeficiente α resultou em 6,23 e 7,32 para as misturas P20 e P30. Esses coeficientes elevados estão associados ao efeito de lixiviação nos 7 primeiros dias de cura das amostras de concreto. Nessa idade, a resistência à compressão foi de aproximadamente 55% da resistência aos 28 dias, justificando os coeficientes encontrados no ajuste. Para a cura úmida o coeficiente resultou em 1,47 e 3,16 para as misturas P20 e P30. Os valores encontrados foram intermediários aos valores recomendados pela ACI 209R (ACI, 1992), sendo mais coerentes com o comportamento de concretos convencionais. Aos 7 dias a resistência das misturas P20 e P30 atingiu 75 e 86% da resistência esperada aos 28 dias, respectivamente. Dessa forma, os coeficientes demonstram que a maior parte da resistência foi desenvolvida nos primeiros 7 dias de idade do concreto permeável. Isso pode estar associado tanto ao processo de cura utilizado neste estudo como a disponibilidade de pasta de cimento. Como os concretos permeáveis desenvolvidos neste estudo possuíam entre 20 e 30% de pasta de cimento, a potencial evolução de resistência foi menor do que comparado ao concreto convencional.

Para o modelo CEB/FIP (FIB, 1999), a constante s também está relacionada ao tipo de cimento utilizado. A NBR 6118 (ABNT, 2014) também sugere a utilização da Equação 2 na análise da resistência à compressão com idade inferior a 28 dias. Na norma são recomendados valores de s de 0,25 para cimentos CPI e CII e 0,20 para cimento CPV-ARI. No entanto, não há orientações em relação ao processo de cura empregado. Para as amostras de concreto permeável desenvolvidas neste estudo os coeficientes foram 0,13 e 0,28 para os traços P20 e P30, respectivamente. Nota-se que, ainda que o mesmo tipo de cimento (CII F 32) tenha sido utilizado para as duas misturas, os coeficientes de ambos os modelos não corresponderam aos valores indicados para o concreto convencional e variaram em função da porosidade projetada. As variações encontradas nos coeficientes também podem estar associadas ao processo de cura empregado neste estudo e a variação do volume de pasta de cimento nas misturas.

Na resistência à tração indireta não foi possível estabelecer uma relação direta entre as diferentes condições de cura. No entanto, foi detectada diferença na resistência à tração indireta entre as amostras P20 e P30 em todas as idades analisadas. Na Figura 16 estão apresentados os resultados médios do ensaio de determinação da tração por compressão diametral para as amostras P20 e P30, submetidas a diferentes condições de cura.

Figura 16 – Resultados de resistência à tração indireta das misturas P20 e P30



Conforme apresentado, aos 7 dias não houve distinção na resistência à tração das amostras submetidas às diferentes condições de cura. Os valores médios obtidos

para os concretos P20 e P30 foram 1,85 e 1,00 MPa, respectivamente. Na idade de 14 dias houve um aumento da resistência à tração média, sendo observada uma evolução mais significativa nas amostras submetidas à cura por imersão. Para essa condição de cura houve um aumento de aproximadamente 40% na resistência à tração média para as duas misturas. Aos 28 dias, no entanto, constatou-se um comportamento similar ao da resistência à compressão. Nas amostras P20i e P30i a resistência à tração indireta sofreu uma redução em relação à idade anterior, que pode estar relacionada também ao fenômeno de lixiviação da pasta de cimento e, consequentemente, à redução da resistência da matriz cimentícia. Para as amostras submetidas às curas mista e úmida, por outro lado, ainda houve evolução da resistência à tração. Enquanto no traço P30 não houve diferença estatística entre as duas condições, para o traço P20 a cura úmida se destacou, resultando na maior média aos 28 dias.

Os resultados obtidos para cada condição de cura foram consistentes tanto para a resistência à compressão como para a resistência à tração. As amostras submetidas à cura por imersão em água foram as que apresentaram resultados mais irregulares. Conforme discutido nesta etapa, o concreto permeável pode ser mais suscetível a lixiviação da pasta de cimento, tornando o processo de cura uma fase crítica na produção do material. Embora a cura mista tenha apresentado melhor desempenho nas idades mais avançadas, a lixiviação nos 7 primeiros dias ainda pode ser prejudicial no desenvolvimento da resistência mecânica. A cura úmida foi o procedimento mais consistente entre as metodologias testadas neste estudo. Em todas as idades foi a condição de cura que garantiu evolução da resistência e apresentou maior resistência à compressão aos 28 dias em conjunto com a cura mista. Essa condição também é a que mais se aproxima do processo de cura de concretos permeáveis moldados no local, sendo possível replicá-la na produção de peças pré-moldadas. Dessa forma, neste estudo foi adotada a cura úmida como procedimento padrão para a análise do concreto permeável em laboratório, evitando-se assim qualquer interferência no desenvolvimento da resistência do material.

4.3 METODOLOGIA DE COMPACTAÇÃO

A compactação do concreto permeável é um processo que interfere diretamente na matriz granular do material, influenciando as suas propriedades

mecânicas e hidráulicas. Como consequência, a dosagem do concreto poroso é afetada pelo nível de compactação empregado, devendo este ser otimizado para cada agregado. Na proposta de dosagem apresentada neste estudo, uma das premissas foi possibilitar o desenvolvimento de misturas para qualquer energia de compactação, garantindo maior abrangência da metodologia.

Outro aspecto que também deve ser considerado na dosagem do concreto permeável é a heterogeneidade da distribuição de porosidade. Conforme constatado por Martin III, Kaye e Putman (2013), a distribuição vertical da porosidade é uma característica da compactação de concretos permeáveis. A variabilidade da porosidade afeta não apenas a condutividade hidráulica, mas também a resistência mecânica do material. Desta forma, para embasar a seleção da energia de compactação e do procedimento de adensamento do concreto permeável foi conduzida uma campanha experimental. Amostras foram produzidas com três diferentes níveis de compactação, compactadas com duas e três camadas. O número de golpes aplicado em cada camada foi ajustado em função do número de camadas e do nível da energia de compactação. Neste estudo selecionaram-se valores de energia entre 90 e 200 kJ/m³, dentro da faixa de valores usualmente empregada na compactação do concreto permeável (Quadro 3). Na Tabela 6 está relacionado o número de golpes por camada para produzir uma energia de compactação equivalente entre as amostras produzidas com 2 e 3 camadas.

Tabela 6 – Número de golpes por camada correspondente a cada energia de compactação

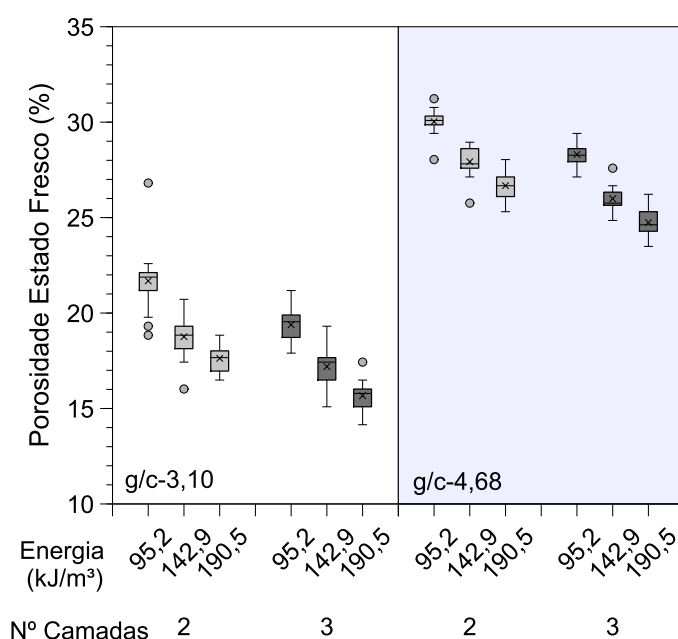
Nº Camadas	Energia de Compactação (kJ/m ³)		
	95,2	142,9	190,5
2	10	15	20
3	6	10	14

As seis condições de compactação descritas na Tabela 6 foram utilizadas para ambas as misturas (P20 e P30) empregadas anteriormente. Uma vez que a compactação interfere diretamente na porosidade do concreto, as misturas foram identificadas pela relação em massa agregado/cimento (g/c), conforme definido na Tabela 4. Para cada condição foram avaliadas as resistências à compressão e à tração indireta, porosidade no estado fresco e endurecido, porosidade aberta e condutividade hidráulica.

4.3.1 Influência da Compactação na Porosidade

As duas misturas de concreto permeável, g/c-3,10 e g/c-4,68, compactadas com as seis condições (3 energias e 2 métodos) foram caracterizadas no estado fresco e endurecido. Na Figura 17 estão representados os resultados de porosidades no estado fresco de cada mistura para os diferentes níveis energéticos utilizados. Conforme a figura, é possível notar que tanto a energia de compactação como o número de camadas utilizado foram significativos nas propriedades físicas das amostras de concreto permeável.

Figura 17 – Porosidade no estado fresco das séries g/c-3,10 e g/c-4,68



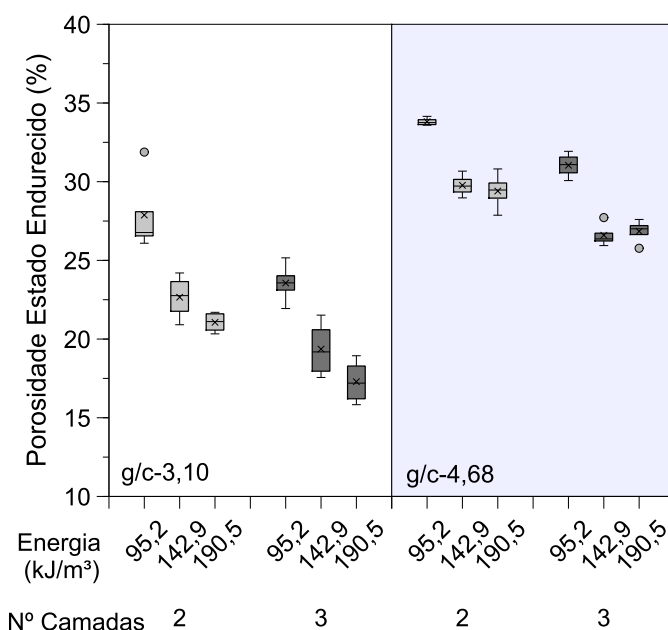
Notas: Distribuições *boxplot* referentes a 12 amostras. Pontos representam *outliers* afastados 1,5 vezes a distância interquartil a partir do primeiro ou terceiro quartil.

Ainda que todas as amostras tenham sido produzidas com o mesmo traço, a redução na porosidade foi possível pela aproximação entre os grãos do agregado. Na mistura g/c-3,10, por exemplo, isto é confirmado pelo aumento do consumo de agregado de 1504 para 1582 kg/m³ e, consequentemente, o aumento do consumo de cimento de 485 para 510 kg/m³. Entretanto, observa-se que para uma mesma energia de compactação não foi possível estabelecer a mesma porosidade entre as amostras produzidas com 2 e 3 camadas. A compactação com 3 camadas proporcionou porosidades menores para todos os níveis de energia empregados. Embora a energia

total manteve-se constante, dividindo-se a energia em um maior número de camadas foi possível atingir um grau de compactação superior. Uma das hipóteses associadas a esse fato é a distribuição vertical da porosidade, conforme será explorado posteriormente.

Na Figura 18 estão representados os resultados de porosidade no estado endurecido das amostras de concreto permeável. Para as duas misturas de concreto (g/c-3,10 e g/c-4,68) foram observados valores de porosidade no estado endurecido superiores à do estado fresco. Esse acréscimo, conforme já discutido, está associado aos processos de hidratação do cimento e formação dos poros da pasta de cimento. Essa discrepância entre os resultados foi superior na mistura g/c-3,10, o que pode ser justificado pelo maior volume de pasta de cimento empregado. No entanto, o efeito do número de camadas e da energia de compactação permaneceu coerente com os resultados de porosidade no estado fresco.

Figura 18 – Porosidade no estado endurecido das séries g/c-3,10 e g/c-4,68

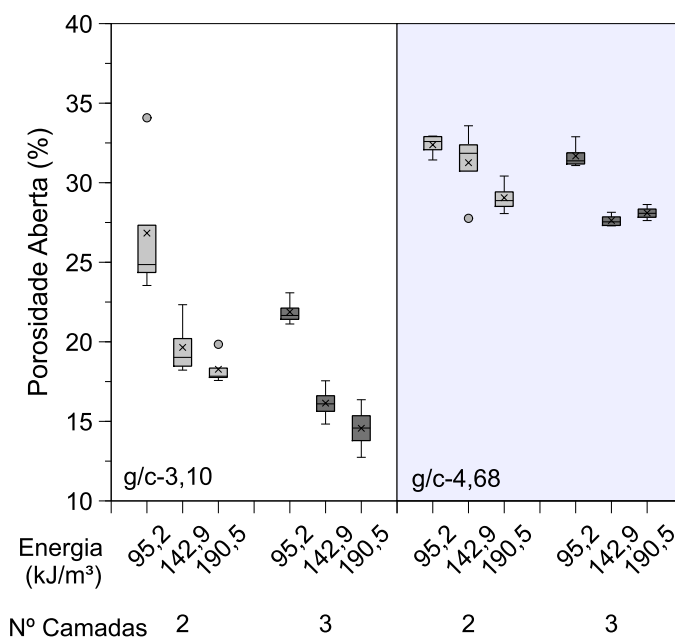


Notas: Distribuições *boxplot* referentes a 4 amostras. Pontos representam *outliers* afastados 1,5 vezes a distância interquartil a partir do primeiro ou terceiro quartil.

A porosidade aberta do concreto permeável também foi avaliada, conforme exposto na Figura 19. Na mistura g/c-3,10 a porosidade aberta foi inferior à porosidade total no estado endurecido, indicando a presença de poros fechados. A porosidade fechada, na ordem de 2 a 3%, pode ter sido formada pela compactação do concreto

e pelo maior volume de pasta da mistura g/c-3,10. Por outro lado, na mistura g/c-4,68 a porosidade total não diferiu estatisticamente da porosidade aberta. Isso indica que a maior parte dos poros é aberta, não havendo quantidade considerável de poros fechados.

Figura 19 – Porosidade aberta das séries g/c-3,10 e g/c-4,68 com diferentes níveis de compactação



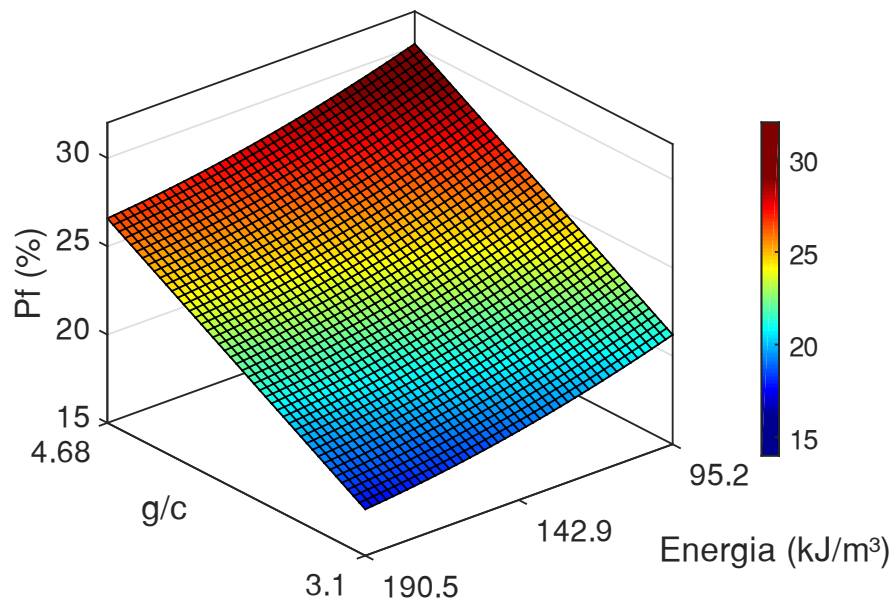
Notas: Distribuições *boxplot* referentes a 4 amostras. Pontos representam *outliers* afastados 1,5 vezes a distância interquartil a partir do primeiro ou terceiro quartil.

O controle de porosidade de concretos permeáveis é realizado principalmente pela dosagem do volume de pasta de cimento na mistura. No entanto, os resultados obtidos neste estudo demonstram que a energia de compactação também é um fator influente e que deve ser levado em consideração no método de dosagem do material. A porosidade no estado fresco (P_f) pode ser relacionada com o traço da mistura (g/c) e a energia de compactação (E_n) pelo modelo de regressão linear descrito na Equação 3.

$$P_f = 14,81 + 5,67 \cdot g/c - 99,5 \cdot 10^{-3} \cdot E_n + 217 \cdot 10^{-6} \cdot E_n^2 - 1,84 \cdot N \quad (3)$$

O modelo desenvolvido apresentou um R^2 ajustado de 0,96, reforçando a correlação entre as variáveis analisadas. A representação do modelo está contida na Figura 20.

Figura 20 – Representação do modelo de porosidade no estado fresco em função da energia de compactação e relação g/c para $N = 2$

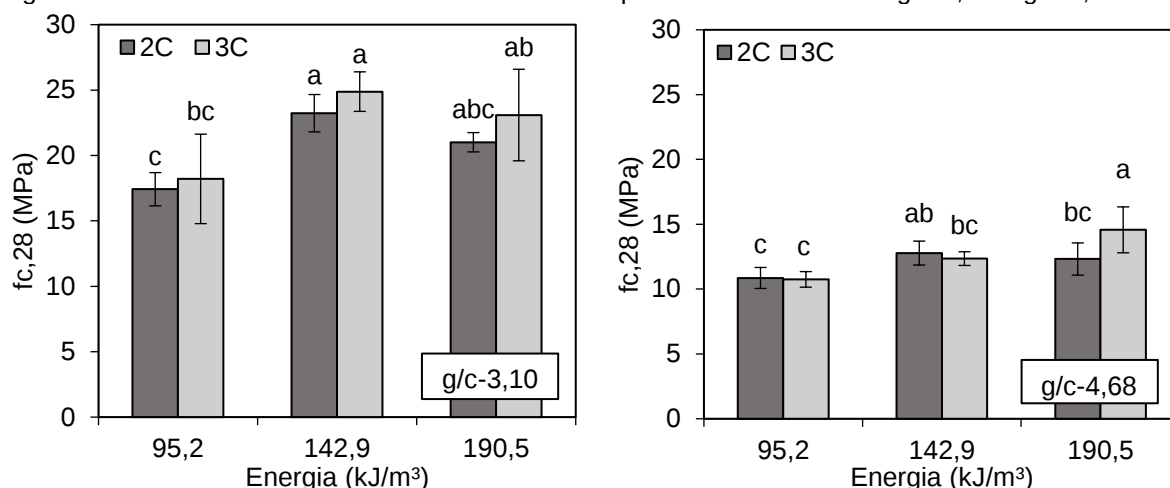


Na Figura 20 observa-se que a relação g/c é o fator com impacto mais significativo na porosidade do concreto permeável, no intervalo analisado. No entanto, o controle da porosidade pela relação g/c implica diretamente no consumo de cimento do concreto. Dessa forma, a redução da porosidade somente é possível empregando-se um maior volume de pasta de cimento e, conseqüentemente, maior custo do material. Esse efeito torna-se mais significativo para misturas próximas ao limite inferior de porosidade (15%), que neste estudo resultaram em consumos na ordem de 500 kg/m³. A energia de compactação, por outro lado, permite o controle de porosidade sem a alteração do traço da mistura. Isso demonstra que a compactação é uma variável que pode ser utilizada na otimização de misturas de concreto permeável.

4.3.2 Efeito da Compactação no Desempenho Mecânico

Apesar de a energia de compactação ter apresentado uma relação bem definida com a porosidade do concreto permeável, houve um comportamento diferente na resistência mecânica do material. Na Figura 21 estão expostos os resultados médios de resistência à compressão das misturas g/c-3,10 e g/c-4,68. Nota-se que o número de camadas não foi significativo nos resultados médios de resistência à compressão.

Figura 21 – Resultados médios de resistência à compressão dos concretos g/c-3,10 e g/c-4,68



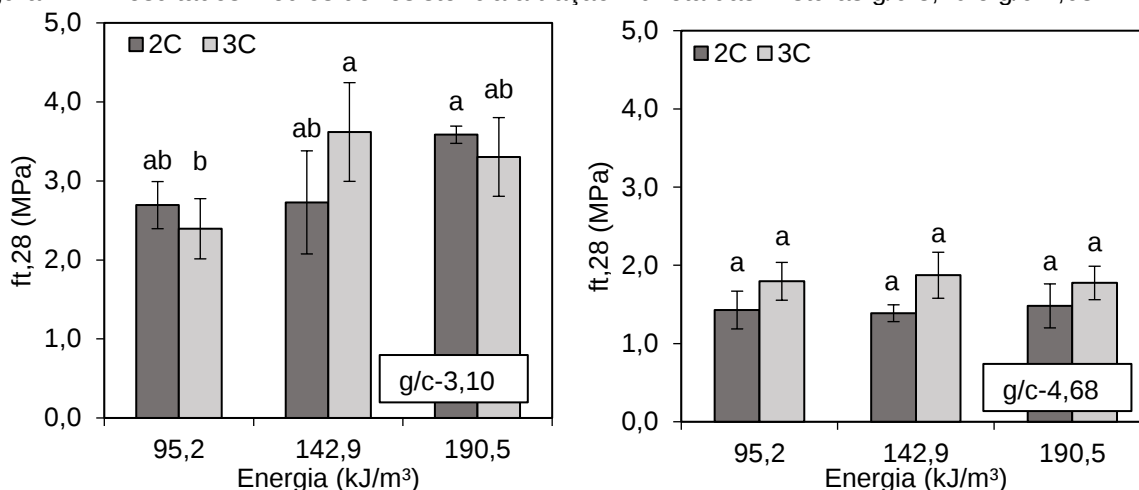
Notas: Barras seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente no teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

Mesmo com porosidades inferiores, as amostras compactadas com 3 camadas (3C) não resultaram em um desempenho mecânico estatisticamente superior. A energia de compactação, por outro lado, apresentou efeito significativo em ambas as misturas. As variações foram mais significativas entre as energias de 95,2 e 142,9 kJ/m³, independentemente do número de camadas de compactação. Para a mistura g/c-3,10 verifica-se que o aumento da energia de 95,2 para 142,9 kJ/m³ resultou em ganhos de resistência à compressão de 33% e 36% para as amostras confeccionadas com 2 e 3 camadas, respectivamente. Na mistura g/c-4,68 o aprimoramento mecânico foi de apenas 17%.

O melhor desempenho mecânico pode ser atribuído, em um primeiro momento, à redução da porosidade verificada pela elevação da energia de compactação. Além disso, a compactação favorece o contato entre os grãos do agregado, aumentando também a espessura da pasta de cimento (CROUCH; PITT; HEWITT, 2007; TORRES; HU; RAMOS, 2015). Porém, esse efeito não foi verificado para a terceira energia de compactação empregada. Mesmo apresentando as menores porosidades, as amostras consolidadas com energia de 190,5 kJ/m³ não apresentaram ganho significativo na resistência à compressão. Isso demonstra que o efeito da compactação é limitado, havendo aprimoramento mecânico até uma determinada energia de compactação. Além disso, a eficiência da compactação é menor nas camadas inferiores da amostra, uma vez que recebem indiretamente a energia dos impactos. Chandrappa e Biligiri (2016a) sugeriram que o aumento do número de camadas tenderia a homogeneizar a compactação e, consequentemente,

a distribuição vertical da porosidade. No entanto, neste estudo não houve variação significativa da resistência à compressão. Os resultados de resistência à tração indireta estão representados na Figura 22.

Figura 22 – Resultados médios de resistência à tração indireta das misturas g/c-3,10 e g/c-4,68



Notas: Barras seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente no teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

Com relação ao ensaio de tração por compressão diametral, embora tenham ocorrido variações nos valores médios, não foi possível estabelecer uma relação direta com a energia de compactação. Um dos motivos associados a isto é o desvio padrão elevado em alguns dos tratamentos. O número de camadas utilizado na compactação não interferiu na resistência à tração, assim como já havia sido constatado na resistência à compressão. Nas amostras g/c-3,10 compactadas com 3 camadas, no entanto, observa-se que a resistência à tração aumentou com o acréscimo da energia de compactação até 142,9 kJ/m³, não apresentando melhor desempenho para uma energia superior a esta. Para a mistura g/c-4,68 não houve influência da compactação na resistência à tração indireta. A média geral dessa mistura resultou em aproximadamente 1,81 MPa.

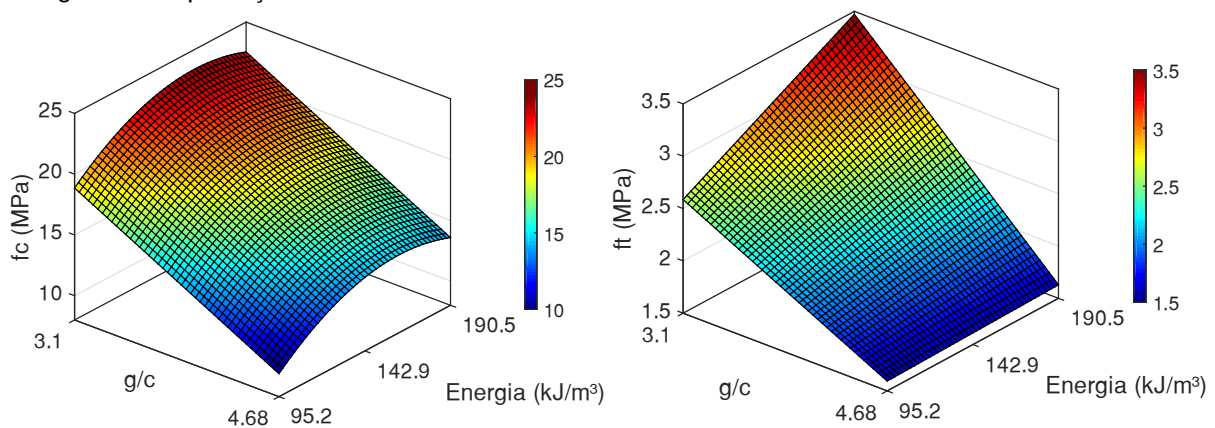
A partir dos dados experimentais coletados neste estudo, foram desenvolvidos modelos de regressão para avaliar a relação entre a energia de compactação e o desempenho mecânico do concreto permeável. Uma vez que o número de camadas de compactação não foi significativo na resistência mecânica, optou-se por não incluir esse fator nos modelos. As Equações 4 e 5 descrevem os modelos de resistência à compressão (f_c) e resistência à tração (f_t) desenvolvidos, respectivamente.

$$f_c = 14,30 - 5,68 \cdot g/c + 0,33 \cdot E_n - 1,02 \cdot 10^{-3} \cdot E_n^2 \quad (4)$$

$$f_t = 1,98 - 0,09 \cdot g/c + 26,81 \cdot 10^{-3} \cdot E_n - 5,65 \cdot 10^{-3} \cdot g/c \cdot E_n \quad (5)$$

Os modelos de resistência à compressão e resistência à tração apresentaram R^2 ajustado de 0,86 e 0,77, respectivamente, sendo sua representação gráfica apresentada na Figura 23.

Figura 23 – Representação gráfica dos modelos de resistência mecânica em função da relação g/c e energia de compactação

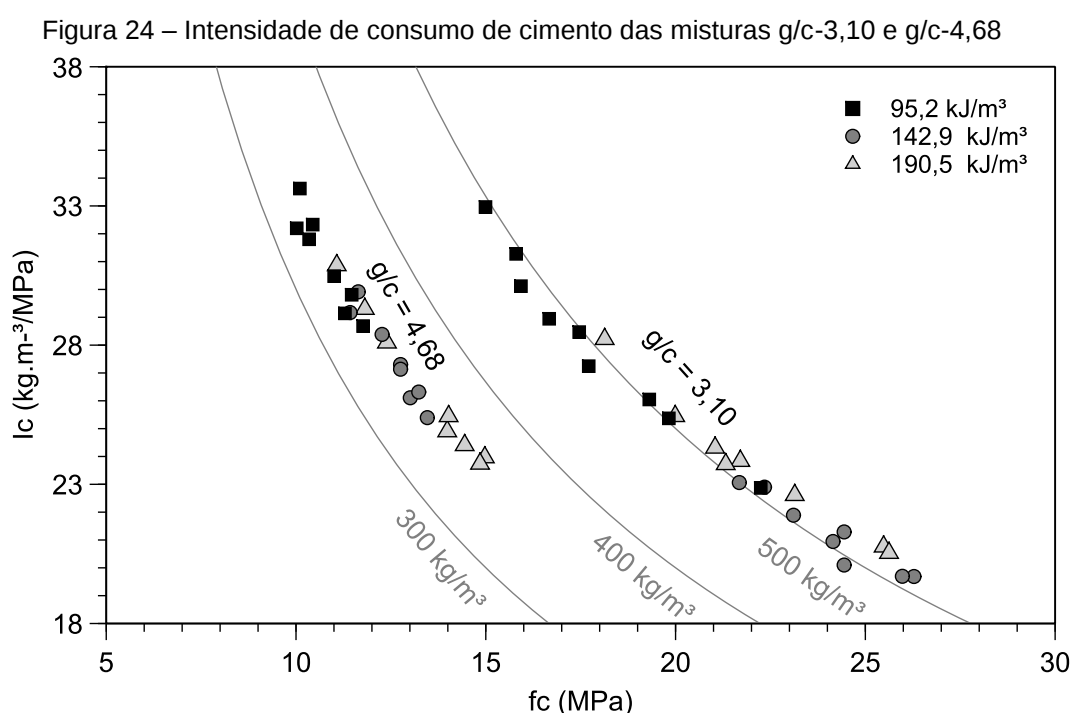


Ao contrário da porosidade, é possível identificar nos modelos de resistência que existe um limite de aprimoramento mecânico pelo incremento da energia de compactação. Esse resultado contribui para a definição de um nível de compactação ótimo, que proporciona o melhor desempenho mecânico para cada mistura de concreto permeável. Na Figura 23 é possível observar que a energia de 142,9 kJ/m³ pode ser considerada o nível de compactação ótimo para a resistência à compressão. Para a mistura g/c -4,68, o incremento da energia de compactação de 95,2 para 142,9 kJ/m³ proporcionou um acréscimo na resistência à compressão que seria equivalente à redução da relação g/c para 3,89. Porém, o ajuste da relação g/c ocasionaria um consumo de cimento aproximadamente 25% superior. Neste caso, o ajuste da energia de compactação torna-se a opção mais eficiente. Em contrapartida, uma energia de compactação superior ao nível ótimo não implicaria em um melhor desempenho mecânico. Ocorreria apenas a redução da porosidade global, sem benefício à resistência à compressão do concreto. Dessa forma, a utilização de energias acima do nível ótimo pode prejudicar o desempenho hidráulico do material.

No modelo de resistência à tração observa-se um comportamento distinto para cada mistura de concreto permeável, evidenciado pelo termo de interação entre a

relação g/c e a energia de compactação. Na mistura g/c-4,68 a energia de compactação não apresentou efeito significativo na resistência à tração indireta, o que pode indicar que o nível de compactação ótimo já foi atingido. Dessa forma, a única opção para aprimoramento mecânico seria o aumento do volume de pasta de cimento na mistura. Por outro lado, na mistura g/c-3,10 a resistência à tração forma uma relação linear com a energia de compactação, demonstrando que até o nível de 190,5 kJ/m³ ainda houve aprimoramento mecânico. Assim, a energia de compactação ótima pode variar para cada mistura de concreto permeável em função do volume de pasta de cimento empregado.

Conforme observado nos resultados desta etapa, o uso da energia de compactação ótima pode contribuir com o processo de dosagem de concretos permeáveis, permitindo o desenvolvimento de misturas com maior eficiência. Ou seja, é possível otimizar a resistência mecânica do material de uma mistura (relação g/c constante) sem ocasionar em um acréscimo significativo no consumo de cimento. Damineli *et al.* (2010) propuseram um índice para avaliar a eficiência no uso de cimento de materiais cimentícios. Esse índice, denominado neste estudo de intensidade de consumo de cimento (Ic), é obtido pela razão entre o consumo de cimento por volume unitário de concreto e a resistência mecânica medida. O Ic referente à resistência à compressão das misturas desenvolvidas neste estudo está representado na Figura 24.

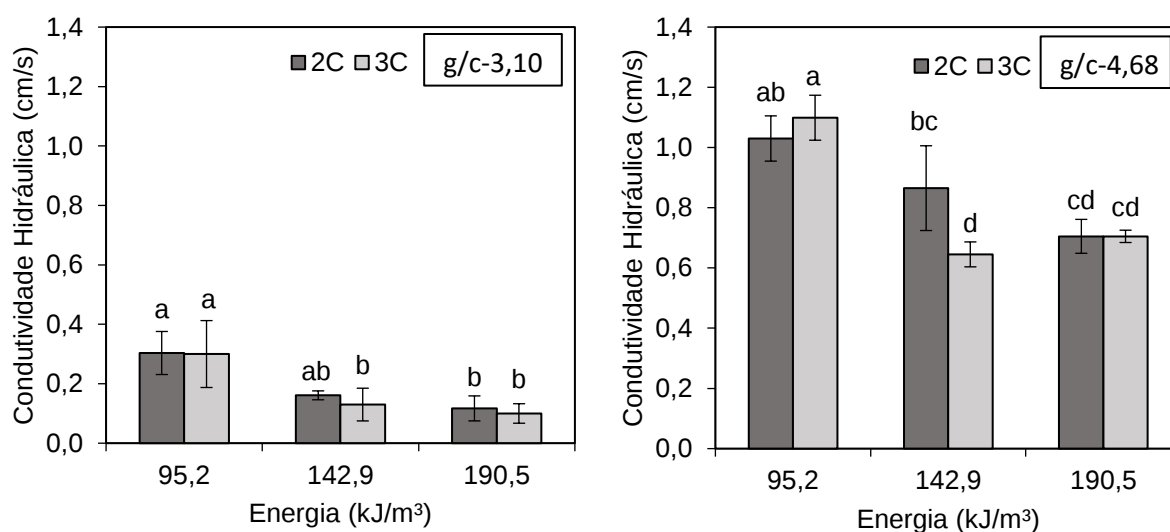


Conforme ilustrado na Figura 24, houve uma variação considerável na I_c das misturas de concreto permeável em função da energia de compactação utilizada. Para a mistura g/c-4,68, o consumo de cimento médio foi de 346 kg/m^3 . No entanto, a I_c variou entre 24 e $34 \text{ kg.m}^{-3}/\text{MPa}$. É possível notar que os concretos produzidos com maior energia de compactação apresentaram menor I_c . Isso indica que o aumento da energia de compactação torna essa mistura mais eficiente, demandando menor consumo de cimento para atingir uma determinada resistência à compressão. Para a mistura g/c-3,10, o consumo de cimento médio foi de 506 kg/m^3 . A I_c apresentou maior variabilidade, se situando entre 19 e $33 \text{ kg.m}^{-3}/\text{MPa}$. A compactação com $142,9 \text{ kJ/m}^3$ foi a mais eficiente, apresentando o menor índice I_c . Dessa forma, esses resultados reforçam a importância da etapa de compactação na produção de concretos permeáveis. Não apenas a compactação ótima providencia um melhor desempenho mecânico, mas também garante maior eficiência no uso do cimento.

4.3.3 Impacto da Compactação na Condutividade Hidráulica

Para avaliar o desempenho hidráulico das misturas de concreto permeável, foram analisadas as condutividades hidráulicas de cada amostra. Na Figura 25 estão ilustrados os resultados médios de coeficiente de permeabilidade, obtidos no permeâmetro de carga variável.

Figura 25 – Condutividade hidráulica média das misturas de concreto permeável g/c-3,10 e g/c-4,68



Notas: Condutividade hidráulica obtida no permeâmetro de carga variável ($h_i = 50 \text{ cm}$; $h_f = 10 \text{ cm}$). Barras seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente no teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

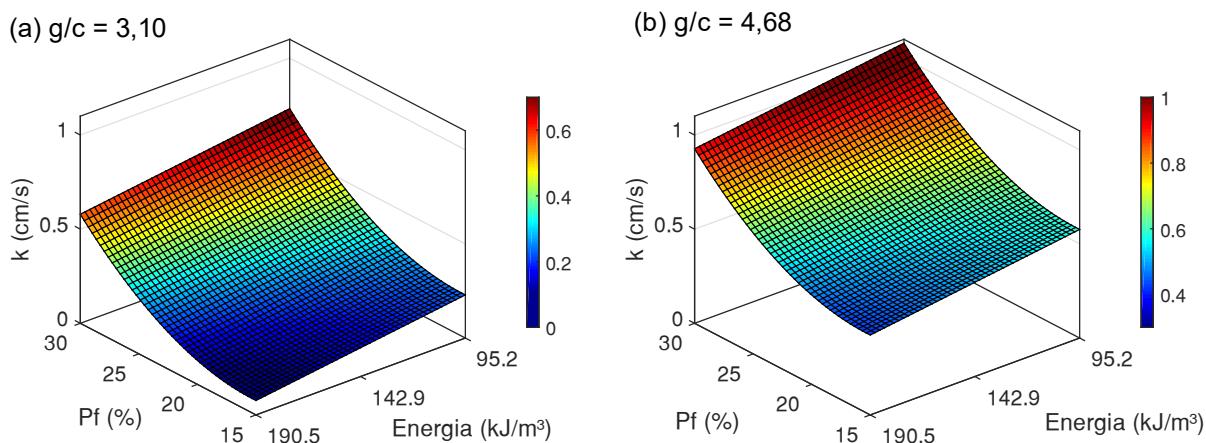
Conforme apresentado na Figura 25, o número de camadas de compactação não foi significativo na condutividade hidráulica, ainda que as porosidades tenham variado significativamente entre as amostras 2C e 3C. No entanto, a energia de compactação foi um fator influente no desempenho hidráulico do concreto permeável. Além de reduzir a porosidade média do concreto permeável, a compactação pode levar ao isolamento dos poros, prejudicando assim a sua condutividade hidráulica (BONICELLI *et al.*, 2013; SONEBI; BASSUONI; YAHIA, 2016). Isso foi verificado nesta etapa, ocorrendo redução significativa da condutividade hidráulica principalmente entre as energias de 95,2 e 142,9 kJ/m³. Entre esses dois níveis de compactação houve uma redução média de 57 e 29% na condutividade hidráulica das misturas g/c-3,10 e g/c-4,68, respectivamente. O impacto da energia de compactação foi maior nos concretos g/c-3,10, o que pode ser atribuído ao maior volume de pasta de cimento na mistura e, consequentemente, à formação de poros isolados. Além disso, a maior parte da energia de compactação é absorvida nas camadas superficiais do concreto permeável, gerando uma porosidade menor nessa região. Desta forma, ainda que a porosidade média seja mantida, as condições das camadas superficiais podem comprometer a permeabilidade do material. Nos concretos g/c-3,10 esse fenômeno foi mais significativo, uma vez que a mistura inicial já possuía uma porosidade (20%) próxima aos valores mínimos usualmente empregados (15%).

O incremento da energia de compactação para 190,5 kJ/m³ não foi estatisticamente significativo para ambas as misturas. Neste caso, a matriz granular já se encontrava próxima a sua compacidade máxima e a compactação adicional não promoveu alteração significativa na estrutura de poros do concreto permeável. Para compreender a relação entre as variáveis intervenientes na condutividade hidráulica (k) do concreto permeável, desenvolveu-se um modelo em função da mistura (g/c), energia de compactação (En) e a porosidade no estado fresco (Pf), conforme a Equação 6.

$$k = 0,25 + 0,22 \cdot g/c - 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot E_n - 0,07 \cdot P_f + 2,34 \cdot 10^{-3} \cdot P_f^2 \quad (6)$$

O modelo descrito na Equação 6 demonstra que a condutividade hidráulica é uma propriedade influenciada não apenas pela porosidade do concreto permeável, mas também pela energia de compactação empregada na consolidação do material. O ajuste do modelo aos dados experimentais foi verificado com um R² ajustado de 0,95. A representação dos modelos para as duas misturas está ilustrada na Figura 26.

Figura 26 – Modelos de condutividade hidráulica das misturas (a) g/c-3,10 e (b) g/c-4,68



Uma vez que a energia de compactação afeta a porosidade do concreto permeável, o modelo ilustrado na Figura 26 permite analisar o efeito isolado de cada variável na condutividade hidráulica. A porosidade no estado fresco é o parâmetro de maior influência, independentemente do volume de pasta de cimento na mistura. No entanto, observa-se no modelo que para uma mesma porosidade, a condutividade hidráulica é afetada pelo nível de compactação empregado. Esse efeito está relacionado à formação de poros isolados na estrutura do concreto permeável, principalmente nas camadas superficiais, conforme abordado anteriormente. Ainda que a condutividade hidráulica seja otimizada pela redução da energia de compactação, é necessário analisar essa propriedade em conjunto com a resistência mecânica do concreto permeável.

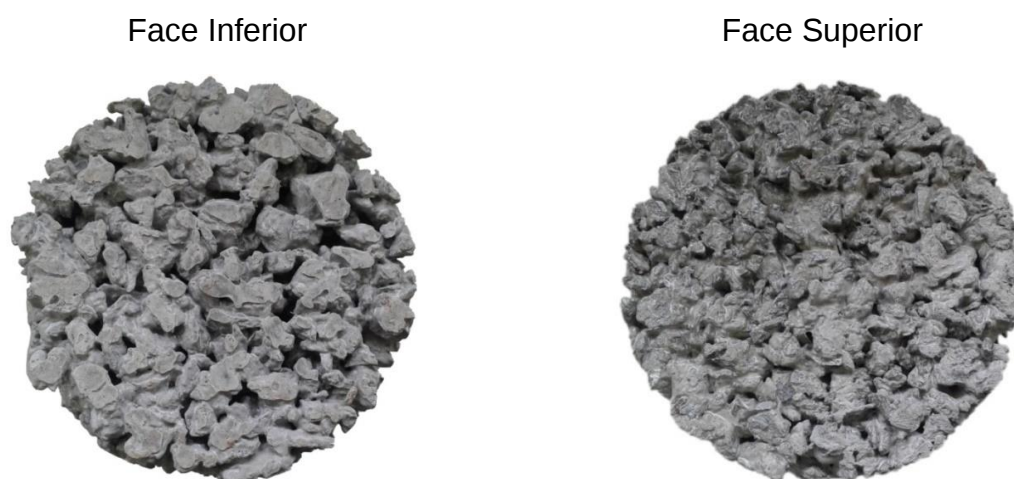
No processo de dosagem de concretos permeáveis há um interesse em se determinar a energia ótima de compactação para maximizar a resistência mecânica de uma mistura e potencializar a eficiência no uso do cimento. A compactação com energia acima desse nível, além de não proporcionar aprimoramento mecânico pode prejudicar o desempenho hidráulico do material. Dessa forma, o nível de compactação ótimo também limita o adensamento da mistura com o objetivo de evitar perdas de condutividade hidráulica não necessárias.

4.3.4 Caracterização do Perfil Vertical de Porosidade

O método de compactação empregado nesta fase permitiu a padronização na produção das amostras de concreto permeável, conforme constatado pela

homogeneidade da porosidade no estado fresco. No entanto, pode ser identificada visualmente uma diferença no aspecto das faces inferior e superior dos corpos de prova de concreto permeável, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 – Aspecto visual das faces inferior e superior das amostras de concreto P20



Tanto as amostras de concreto g/c-3,10 como g/c-4,68 apresentaram maior quantidade de poros na face inferior. Essa diferença pode estar associada à distribuição vertical da porosidade, como abordado por Haselbach e Freeman (2006) e Martin III, Kaye e Putman (2013). A existência dessa porosidade variável ao longo da altura da amostra não interfere apenas na condutividade hidráulica do concreto, mas também no comportamento mecânico do material. No teste de resistência à tração indireta foi observado que algumas das amostras apresentaram um tipo de ruptura distinto, conforme ilustrado na Figura 28.

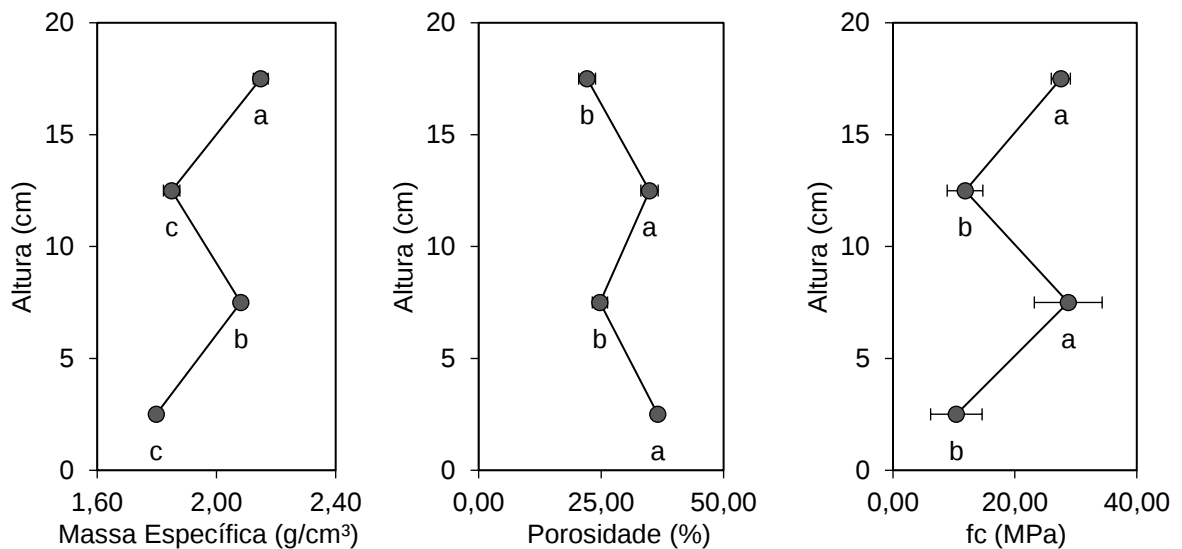
Conforme representado, a fratura ocorreu pela propagação de uma fissura longitudinal até o centro do corpo de prova, onde a ruptura se desenvolveu em um plano transversal. Esse comportamento pode ter ocorrido devido à diferença de porosidade entre cada camada compactada no processo de moldagem. Consequentemente, a resistência à tração indireta se limitou às propriedades mecânicas da camada mais porosa. Na Figura 28 é possível notar ainda a diferença na quantidade e dimensão dos poros entre as camadas intermediária e inferior em uma seção de fratura. Esse padrão se repetiu também na segunda camada compactada.

Figura 28 – Modo de ruptura à tração indireta e seção de fratura do concreto g/c-3,10 compactado com 2 camadas



Com o objetivo de caracterizar o perfil de distribuição vertical da porosidade, as amostras das séries g/c-3,10 e g/c-4,68 compactadas com a energia de 95,2 kJ/m³ utilizadas nos ensaios não destrutivos foram cortadas transversalmente para a obtenção de 4 discos de aproximadamente 5,0 cm de altura. Cada um dos discos foi caracterizado quanto à porosidade no estado endurecido, determinando-se também a sua respectiva resistência à compressão. Nas Figura 29 e 30 estão ilustradas as distribuições verticais de massa específica, porosidade e resistência à compressão das amostras compactadas com 2 camadas.

Figura 29 – Distribuição vertical da massa específica, porosidade e resistência à compressão do concreto g/c-3,10-2c



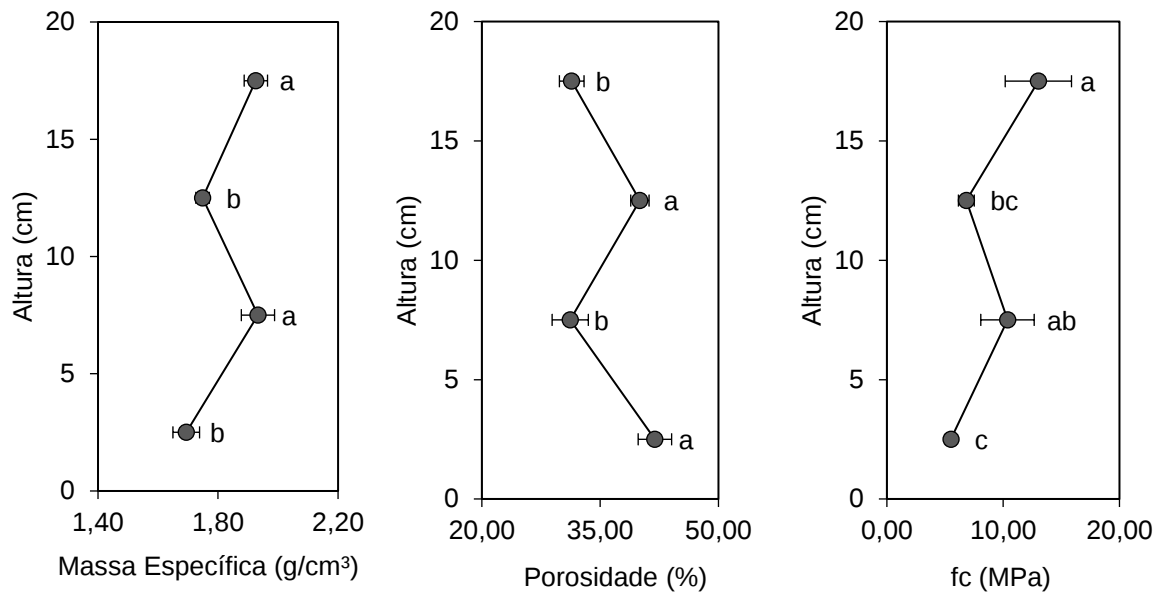
Nota: Pontos seguidos de mesma letra não diferem estatisticamente no teste de Tukey a um nível de 5% de significância.

Conforme observado na Figura 29, na compactação com duas camadas das amostras g/c-3,10 houve uma variação significativa entre as propriedades de cada camada analisada. Conforme já havia sido constatado visualmente, a porosidade na face superior foi mínima, atingindo valor máximo na face inferior da amostra. A diferença entre as porosidades chegou a até aproximadamente 14,5%. Essa variação, no entanto, se repetiu para cada camada de compactação. As regiões superiores de cada camada (15-20 e 5-10 cm) apresentaram características similares. Essas regiões correspondem ao volume de concreto que recebe diretamente a energia de compactação, resultando em uma menor porosidade. Consequentemente, as resistências mecânicas também foram máximas. Por outro lado, nas regiões inferiores de cada camada (10-15 e 0-5 cm), a compactação não foi efetiva. Isso pode ter ocorrido pelo efeito parede causado pela base do molde e a própria altura da camada de compactação. A porosidade nessas regiões foi mínima, acompanhada de menores resistências à compressão.

Ainda que nas regiões menos porosas a resistência tenha atingido valores de até 28,75 MPa, a resistência à compressão média do corpo de prova foi equivalente a 17,42 MPa. Dessa forma, pode-se verificar que tanto a resistência à compressão como a resistência à tração indireta foram limitadas pelas características da região mais porosa. Esse comportamento pode justificar o modo de fratura das amostras, observado na Figura 28.

Na Figura 30 está representada a variação da massa específica, porosidade e resistência à compressão do concreto em função da altura das amostras com g/c-4,68, compactadas com 2 camadas. Nas amostras g/c-4,68, também foi possível observar o mesmo comportamento das propriedades físicas e mecânicas ao longo da altura do corpo de prova. Entretanto, as variações foram menores quando comparado ao concreto g/c-3,10, constatando-se uma diferença máxima de porosidade de 10,74%. Nesse caso, o principal fator que pode ter influenciado é o volume de pasta em cada traço. O concreto g/c-3,10, por apresentar maior volume de pasta (29,63%), pode ter oferecido uma maior resistência à compactação do que o concreto g/c-4,68. A resistência à compressão variou, em média, de 5,50 a 13,02 MPa ao longo da altura das amostras. A resistência à compressão média determinada no corpo de prova foi de 10,86 MPa, valor intermediário entre as camadas de maior e menor porosidade da amostra de concreto permeável.

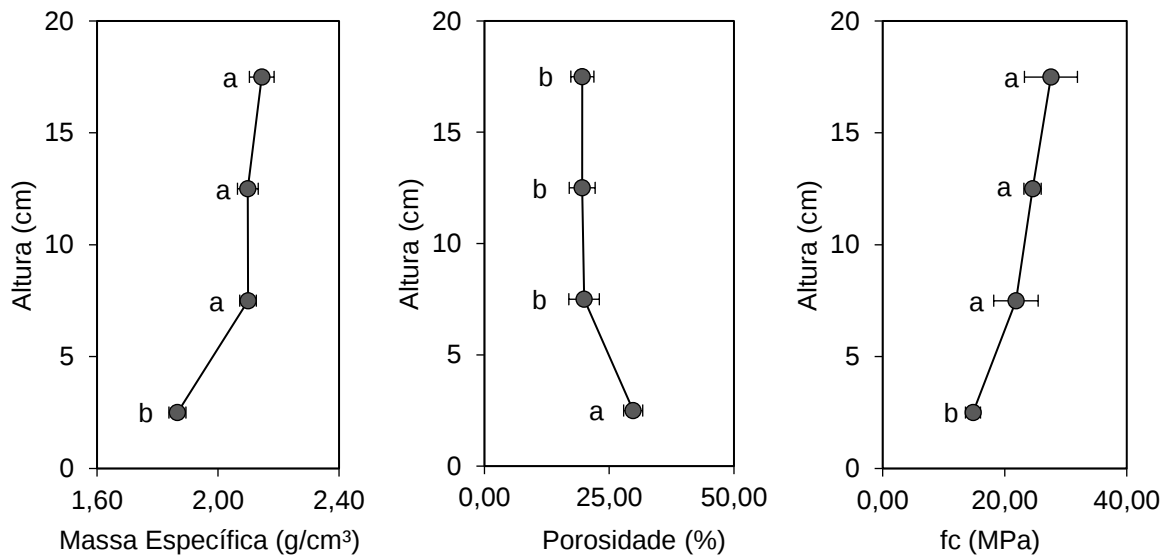
Figura 30 – Distribuição vertical da massa específica, porosidade e resistência à compressão do concreto g/c-4,68-2c



Nota: Pontos seguidos de mesma letra não diferem estatisticamente no teste de Tukey a um nível de 5% de significância.

Na Figura 31 estão relacionados os resultados de distribuições verticais de massa específica, porosidade e resistência à compressão das amostras compactadas com 3 camadas do concreto g/c-3,10.

Figura 31 – Distribuição vertical da massa específica, porosidade e resistência à compressão do concreto g/c-3,10-3c



Nota: Pontos seguidos de mesma letra não diferem estatisticamente no teste de Tukey a um nível de 5% de significância.

Conforme a Figura 31, a compactação em 3 camadas apresentou um perfil de distribuição da porosidade diferente da compactação em 2 camadas. É possível notar que não houve diferença estatística entre a massa específica, porosidade e resistência à compressão nas regiões entre 5 e 20 cm de altura. A região inferior (0-5 cm), no entanto, ainda apresentou porosidade superior às demais regiões e, consequentemente, menor resistência mecânica. O aumento no número de camadas permitiu uma compactação mais homogênea ao longo da altura da amostra. Isso foi possível devido à redução da altura de cada camada compactada. A região mais inferior das amostras ainda apresentou uma dispersão em relação às camadas superiores. Porém, essa diferença foi inferior quando comparada à compactação em 2 camadas, resultando em uma diferença de 10,22%. A resistência à compressão total do corpo de prova resultou em 18,21 MPa, ainda estando limitada à camada de maior porosidade. Na Figura 32 está ilustrado o modo de ruptura no teste de tração por compressão diametral das amostras compactadas com 3 camadas.

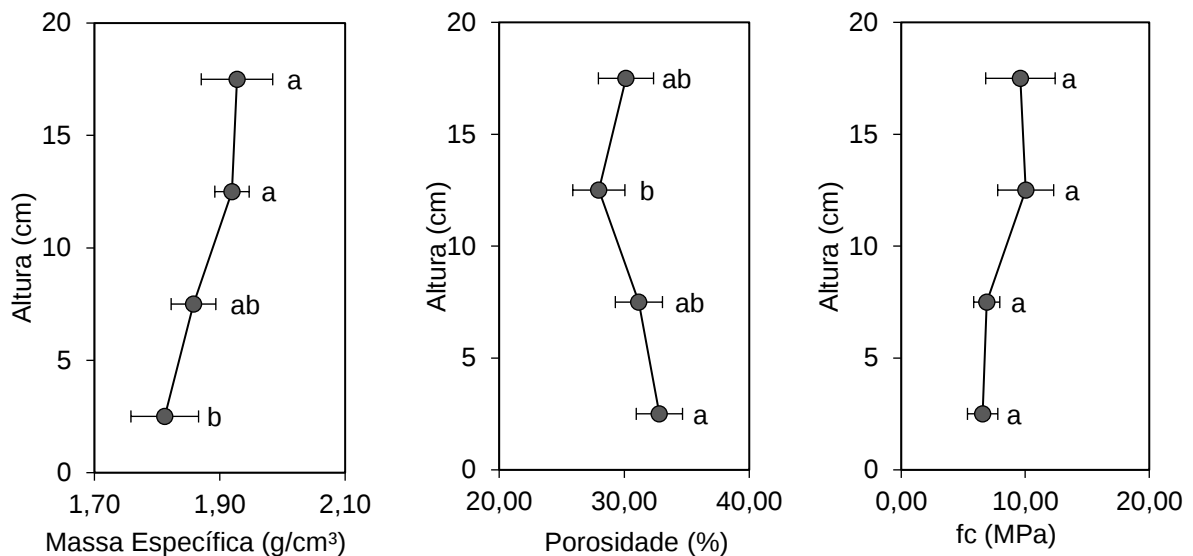
Figura 32 – Modo de ruptura à tração por compressão diametral das amostras compactadas com 3 camadas



Conforme observado na Figura 32, a seção de ruptura das amostras foi deslocada para uma região mais próxima à face inferior, correspondente à primeira camada de compactação. Esse comportamento foi coerente com a distribuição vertical da porosidade ilustrada na Figura 31, uma vez que a porosidade máxima se situou na

região de 0 a 5 cm da altura do corpo de prova. Embora o padrão de ruptura tenha sido alterado, não foi detectada diferença significativa na resistência mecânica do material. Na Figura 33 estão representadas as variações na massa específica, porosidade e resistência à compressão do concreto g/c-4,68, compactado com 3 camadas, em função da altura da amostra.

Figura 33 – Distribuição vertical da massa específica, porosidade e resistência à compressão do concreto g/c-4,68-3c



Nota: Pontos seguidos de mesma letra não diferem estatisticamente no teste de Tukey a um nível de 5% de significância.

Para as amostras de concreto g/c-4,68, a distribuição das propriedades também foi ainda mais homogênea do que a compactação em 2 camadas. A região inferior (0-5 cm) ainda apresentou maior porosidade em relação às demais regiões do corpo de prova, no entanto a diferença máxima de porosidade foi de 4,84%. Não foi detectada diferença estatística da resistência à compressão ao longo da altura do corpo de prova. Os valores de resistência em cada altura foram próximo à resistência média da mistura, de 10,75 MPa.

Conforme constatado nesse estudo, a distribuição vertical da porosidade é uma característica típica do concreto permeável e interfere diretamente na resistência mecânica do material. Embora o número de camadas empregado tenha gerado distribuições verticais da porosidade distintos, não houve diferença estatística entre as resistências à compressão globais. Isso pode ter ocorrido devido à limitação da resistência pela camada mais porosa, que nos dois casos corresponderam à camada

mais inferior das amostras. A condutividade hidráulica também não foi influenciada pela distribuição vertical da porosidade, o que pode ser atribuído à limitação da propriedade pelas camadas menos porosas (superfície). Uma vez que o número de camadas de compactação não apresentou um efeito significativo nas principais propriedades do concreto permeável, neste estudo foi estabelecida a compactação com 2 camadas como procedimento padrão. Embora um perfil mais homogêneo seja alcançado com maior número de camadas, deve ser levado em consideração a maior complexidade na produção das amostras. Isso pode acarretar uma variabilidade adicional na moldagem de corpos de prova, prejudicando a precisão da dosagem.

4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PREPARO DO CONCRETO PERMEÁVEL

Conforme abordado nesta etapa, o concreto permeável é um material com muitas particularidades em relação ao concreto convencional, exigindo um controle rigoroso no seu processo produtivo. A compactação é um dos procedimentos diferenciais da produção de concretos permeáveis, sendo um parâmetro de impacto direto em todas as propriedades do material. A condição de cura do concreto também deve ser selecionada de forma coerente, evitando-se possíveis interferências por fenômenos como a lixiviação da pasta de cimento. A partir dos resultados obtidos neste capítulo, foi definido um procedimento padrão de preparo para ser empregado no método de dosagem proposto neste estudo:

- a) Mistura: a mistura dos materiais constituintes deve ser realizada de forma que a pasta de cimento seja distribuída uniformemente ao redor dos grãos do agregado. O procedimento descrito na ASTM C192M (ASTM, 2016) proporcionou uma mistura homogênea dos materiais, não sendo constatadas dificuldades no procedimento;
- b) Compactação: deve ser realizada em número de camadas compatível com o corpo de prova ou elemento produzido. Para compactação em laboratório, amostras cilíndricas (10x20 cm) podem ser compactadas em 2 camadas. A utilização de 3 camadas pode contribuir para a homogeneização da porosidade no perfil vertical da amostra, porém dificulta a moldagem dos corpos de prova e pode ocasionar em uma maior variabilidade dos resultados. A energia pode ser ajustada até a compactação ótima, proporcionando a otimização das propriedades do concreto sem alterar as propriedades da mistura

(principalmente a relação g/c). A partir da compactação ótima, o aumento da energia torna-se ineficiente e pode prejudicar as propriedades do material. Para os agregados utilizados nesta etapa a utilização de 15 golpes de soquete Proctor por camada gerou a compactação ótima das misturas;

- c) Condição de cura: a cura do concreto permeável em laboratório deve ser realizada em condição úmida. As amostras devem ser umedecidas e armazenadas em um recipiente vedado para evitar contato com o ar e perda de umidade. A cura por imersão em água deve ser evitada, uma vez que a lixiviação da pasta de cimento pode comprometer o desenvolvimento da matriz cimentícia. A cura úmida é uma condição que se aproxima do procedimento realizado para pavimentos executados no local e pode ser replicada para a produção de elementos pré-moldados.

5 ETAPA II – AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE CARACTERIZAÇÃO

Assim como a produção do concreto permeável possui particularidades, a caracterização do material também emprega metodologias específicas para avaliar suas propriedades. A porosidade e o desempenho hidráulico são os parâmetros que diferenciam a caracterização desse tipo de concreto, sendo fundamentais para a análise de misturas e o processo de dosagem. Diferentes metodologias são empregadas na determinação dessas propriedades, havendo assim uma dificuldade no desenvolvimento de modelos de previsão gerais para o concreto permeável. Desta forma, nesta etapa foram avaliados os principais métodos de caracterização de porosidade e de desempenho hidráulico, estabelecendo-se uma relação entre estes. Neste estudo foram empregados dados provenientes das demais etapas experimentais, abrangendo uma faixa de porosidade de 15 a 30%.

5.1 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DA POROSIDADE

Metodologias de caracterização de porosidade já foram normatizadas a nível internacional e métodos alternativos propostos na literatura. No entanto, os resultados obtidos em cada processo divergem significativamente, conforme já constatado experimentalmente neste estudo. Devido a essa divergência nos resultados, nesta fase foi realizado um estudo para avaliar os principais métodos de caracterização, descritos no Quadro 7, e propor uma correlação entre estas. Isso foi realizado pela identificação dos tipos de poros aferidos em cada metodologia.

Quadro 7 – Metodologias utilizadas na caracterização da porosidade do concreto permeável

Metodologia	Porosidade	Princípio
ASTM C1688M (ASTM, 2014a)	Estado fresco	Relação entre a massa específica no estado fresco e a densidade teórica do concreto.
ASTM C1754M (ASTM, 2012b)	Estado endurecido	Relação entre a massa do concreto determinada por pesagem ao ar e em água após saturação por 30 minutos.
Adaptado de Deo e Neithalath (2010)	Aberta ou Efetiva	Massa de água necessária para o preenchimento dos poros de uma amostra vedada na lateral e fundo.

Conforme apresentado no Quadro 7, as principais metodologias normalizadas são a ASTM C1688M (ASTM, 2014a) e ASTM C1754M (ASTM, 2012b), referentes à

determinação da porosidade no estado fresco e endurecido, respectivamente. No entanto, as normas não diferenciam os tipos de poros avaliados por cada método. Para relacionar as porosidades no estado fresco e endurecido e identificar o tipo de porosidade medido em cada situação, foi realizado um estudo complementar para caracterizar a porosidade da pasta de cimento.

No estado fresco, considera-se a hipótese de que a porosidade medida pode ser considerada composta pelos vazios intergranulares. Conforme a ASTM C1688M (ASTM, 2014a), o volume da pasta de cimento no estado fresco consiste apenas no volume ocupado pela água e o cimento. No entanto, após os processos de hidratação do cimento estarão presentes poros formados pelos espaços não ocupados pelo cimento e os produtos de hidratação. Dessa forma, a porosidade do concreto permeável no estado endurecido consistirá na porosidade intergranular acrescida da porosidade da pasta de cimento.

Na caracterização de concretos convencionais a determinação da porosidade é feita pela NBR 9778 (ABNT, 2005), sendo necessário submeter as amostras à condição saturada com superfície seca. No concreto permeável não é possível garantir essa condição, uma vez que seria difícil a eliminação da água no interior da amostra mantendo-se, ainda, a saturação da pasta de cimento. Torres e Hu (2016) propuseram um método utilizando um sistema de ar comprimido para estabelecer a condição saturada com superfície seca. Porém, além de ser necessário um equipamento específico para isso, não há como assegurar se essa condição foi atingida.

Com o intuito de desconsiderar a porosidade da pasta de cimento da porosidade total, neste estudo foi realizada a caracterização da massa específica aparente de fragmentos de concreto permeável. Para isso, as amostras de concreto permeável utilizadas nos ensaios destrutivos da Etapa I foram trituradas até a obtenção de fragmentos de agregado cobertos pela pasta de cimento, permitindo assim a análise apenas da fração sólida do material. O processo de trituração foi realizado de forma que os grãos do agregado fossem separados, causando assim a exposição da superfície dos poros intergranulares. Após esse procedimento, torna-se possível submeter a fração sólida do concreto ao estado saturado com superfície seca. Na Figura 34 está ilustrada uma amostra de concreto de concreto permeável utilizada neste estudo.

Figura 34 – Amostra utilizada no ensaio de determinação da absorção da pasta de cimento



Os fragmentos foram lavados e peneirados em uma peneira com abertura de 4,75 mm para a eliminação do pó e fragmentos provenientes da trituração dos corpos de prova. A amostra granular foi, então, submetida ao teste de massa específica por um procedimento semelhante ao utilizado na caracterização de agregados graúdos, conforme a NBR 16917 (ABNT, 2021b):

- a) secagem das amostras em estufa a 100° C por 24 h e determinação da massa da amostra seca;
- b) imersão em água por um período de 24 h;
- c) secagem superficial da amostra e determinação da massa na condição saturada com superfície seca.
- d) determinação da massa da amostra em água, por meio de pesagem hidrostática;
- e) determinação da massa específica aparente, conforme a Equação 7:

$$d_{ap} = \frac{m_s}{m_{sss} - m_i} \quad (7)$$

Em que:

d_{ap} – Massa específica do fragmento de concreto permeável;

m_s – Massa da amostra seca em estufa a 100°C;

m_{sss} – Massa da amostra na condição saturada com superfície seca;

m_i – Massa da amostra em água.

A massa específica aparente calculada pela Equação 7 considera o volume sólido do fragmento acrescido dos poros permeáveis à água, ou seja, os vazios da pasta de cimento. Adaptando a metodologia descrita na ASTM C1688M (ASTM, 2014a), a porosidade intergranular no estado endurecido pode ser estimada pela Equação 8.

$$P_i = \frac{(d_{ap} - M_{esp})}{d_{ap}} \quad (8)$$

Em que:

d_{ap} – Massa específica aparente do fragmento de concreto permeável;

M_{esp} – Massa específica do concreto no estado endurecido.

As metodologias de caracterização no estado fresco e endurecido descritas no Quadro 7 foram aplicadas para as amostras produzidas na fase de estudo da metodologia de compactação (Seção 4.3). Uma vez que as amostras utilizadas são provenientes de diferentes misturas de concreto permeável e com porosidade variável, utilizou-se o teste de Análise de Variância de Medidas Repetidas para a comparação dos métodos. Um total de 48 amostras foi utilizado na validação deste estudo, apresentando porosidades no estado fresco variando de 14,15 a 30,32%. Na Tabela 7 estão descritos os resultados do teste estatístico aplicado neste estudo.

Tabela 7 – Resumo do teste ANOVA de medidas repetidas dos diferentes métodos de caracterização de porosidade

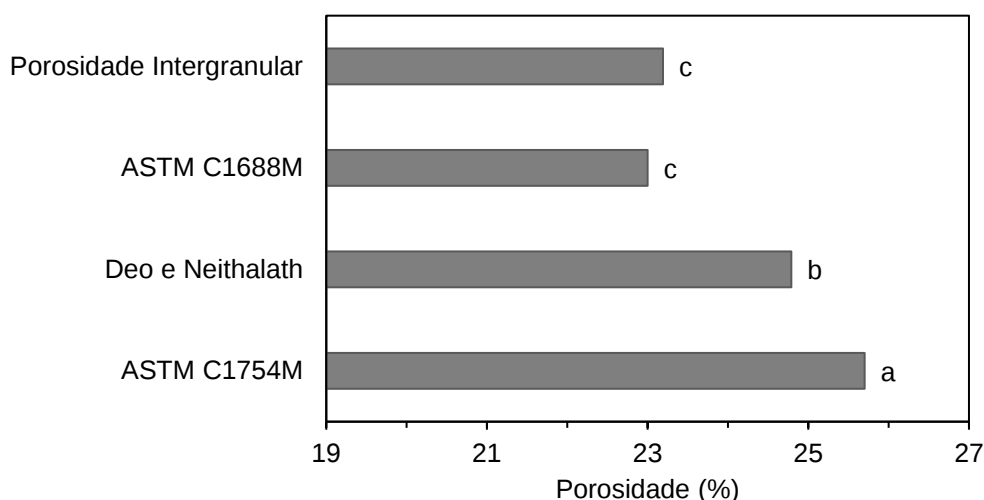
Fonte	GL	SQ	MQ	F	p-value
Amostra	47	5135,9	109,274	69,26	0,000
Método	3	242,5	80,828	51,23	0,000
Erro	141	222,5	1,578		
Total	191	5600,8			

Nota: GL – grau de liberdade; SQ – soma quadrática; MQ – média quadrática

Conforme apresentado na Tabela 7, houve significância estatística tanto entre as amostras como entre os métodos empregados. A variância de porosidade entre amostras era esperada, uma vez que eram provenientes de diferentes tratamentos. A

significância dos métodos de caracterização reforça a hipótese de que cada metodologia considera diferentes tipos de poros, justificando assim a diferença estatística detectada. Na Figura 35 é possível comparar os valores médios de porosidade encontrados em cada método de caracterização.

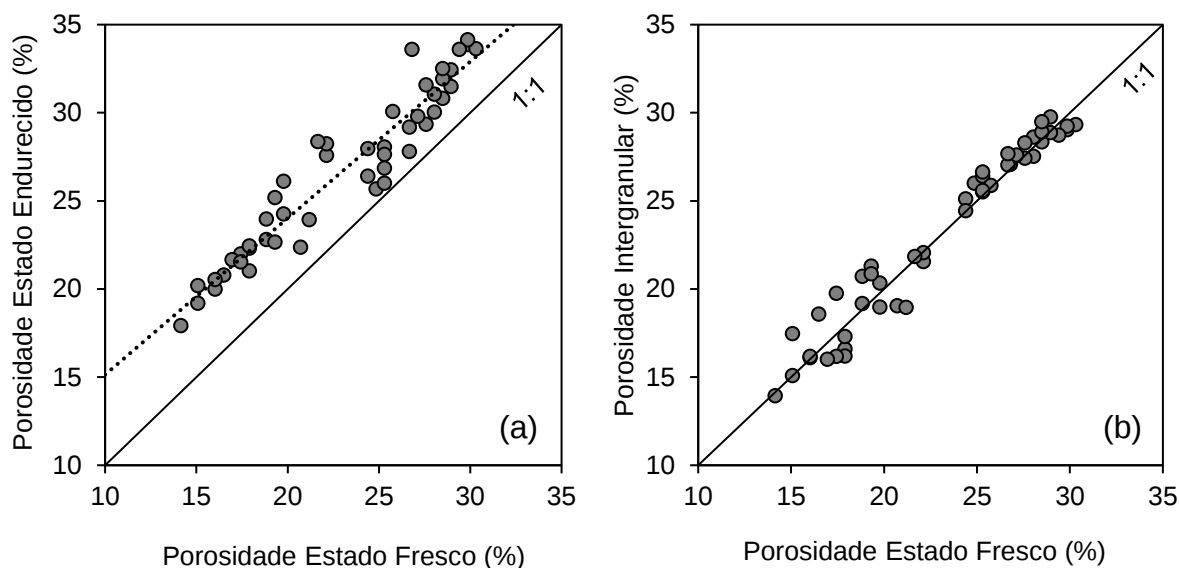
Figura 35 – Porosidade média obtida por cada metodologia de caracterização



Nota: Barras seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente no teste de Tukey a um nível de 5% de significância.

Analisando a Figura 35 é possível identificar que a maior porosidade média foi obtida pelo método ASTM C1754M (ASTM, 2012b), sendo coerente com uma medida de porosidade total (intergranular e vazios da pasta). A porosidade obtida pelo método ASTM C1688M (ASTM, 2014a) foi a menor porosidade medida, não havendo diferença estatística com a porosidade intergranular estimada pela metodologia proposta neste estudo. Esse resultado corrobora com a hipótese de que no estado fresco são medidos apenas os poros intergranulares do concreto permeável. Desta forma, a metodologia descrita na ASTM C1688M (ASTM, 2014a) pode ser considerada como uma forma de se estimar a porosidade intergranular do concreto, sendo importante diferenciá-la da porosidade total. A porosidade aberta, determinada pelo método proposto por Deo e Neithalath (2010) apresentou valores intermediários entre os outros métodos, uma vez que não são considerados os poros fechados. Assim, essa metodologia é uma forma de avaliar a conectividade dos poros no concreto permeável, ainda que a porosidade total seja mantida constante. Na Figura 36 está ilustrada a comparação entre as porosidades no estado fresco, estado endurecido e porosidade intergranular.

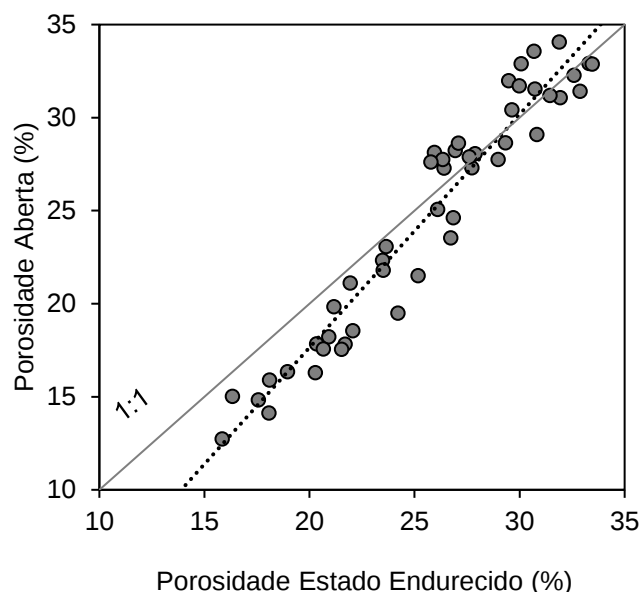
Figura 36 – Comparação entre as porosidades no estado fresco, (a) porosidade no estado endurecido e (b) porosidade intergranular



Ao comparar-se as porosidades obtidas em cada metodologia, na Figura 36a verifica-se que a porosidade no estado endurecido resultou em valores de 3 a 5% superiores à porosidade no estado fresco. Conforme discutido anteriormente, essa diferença pode ser atribuída aos poros da pasta de cimento. Nos concretos de menor porosidade (15 a 20%) essa diferença é maior, visto que o volume de pasta de cimento é superior nessas misturas. À medida que o volume de pasta de cimento reduziu na composição do concreto, a diferença entre as porosidades também foi inferior, contribuindo com as hipóteses levantadas neste estudo. Na Figura 36b, observa-se uma correspondência entre a porosidade no estado fresco e no estado endurecido, coerente com o resultado do teste estatístico realizado anteriormente.

Na Figura 37 também está ilustrada a comparação entre a porosidade no estado endurecido e porosidade aberta. A porosidade aberta apresentou, em geral, valores inferiores à porosidade no estado endurecido, sendo um indicativo da presença de poros fechados no concreto permeável. Observa-se na Figura 37 que essas diferenças foram maiores nos concretos de menor porosidade. Pela presença de uma quantidade maior de pasta de cimento, essas amostras foram mais suscetíveis à formação de poros isolados. Já nas amostras com porosidades próximas a 30%, essa diferença deixa de ser significativa, indicando que a quase totalidade de poros é classificada como aberta.

Figura 37 – Comparação entre a porosidade no estado endurecido e porosidade aberta



Os resultados obtidos neste estudo reforçam o uso da porosidade no estado fresco como um parâmetro de controle na dosagem de misturas de concreto permeável. A porosidade no estado endurecido é de difícil previsão, uma vez que depende das características da matriz cimentícia, bem como o processo de cura do concreto. A porosidade aberta, embora tenha maior potencial em representar a condutividade hidráulica, também é uma propriedade de difícil previsão, uma vez que é afetada pela energia de compactação e o volume de pasta na mistura. A porosidade no estado fresco, por outro lado, além de ser um procedimento de caracterização simples, é determinada logo após a consolidação do concreto. Isso permite um controle de qualidade na produção do concreto permeável e a verificação dos parâmetros de dosagem e de projeto. Por não considerar os poros da pasta de cimento, a porosidade no estado fresco ainda tem um potencial em representar o desempenho hidráulico do concreto permeável, visto que considera apenas os poros pertencentes a matriz granular.

5.2 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA

Um dos princípios da dosagem de concretos permeáveis é garantir que o material seja funcional na sua aplicação em pavimentos, ou seja, tenha capacidade para a drenagem de águas superficiais. Em laboratório a condutividade hidráulica tem sido extensamente utilizada na caracterização do concreto permeável, sendo obtida

tanto no permeâmetro de carga variável como de carga constante. No entanto, como ainda não há uma padronização do equipamento, diferentes modelos foram utilizados nos estudos de eficiência hidráulica do material. Em função disso, torna-se difícil estabelecer limites mínimos de condutividade hidráulica, uma vez que as condições experimentais podem levar a resultados distintos. Além disso, essas condições nem sempre são relatadas nas pesquisas, impossibilitando também a comparação de resultados.

Outro fator a ser considerado é a divergência entre as condições de campo e laboratório. Em pavimentos já executados o desempenho hidráulico é medido pela taxa de infiltração, obtida pelo teste com anel de infiltração. Uma forma de aproximar a caracterização em campo e laboratório é a adoção de um ensaio laboratorial similar ao anel de infiltração, como por exemplo a metodologia descrita na ISO 17785-1 (ISO, 2016). Porém, esse método foi pouco utilizado na literatura, sendo necessário também analisar sua eficiência como parâmetro para representar o desempenho hidráulico do concreto permeável. Desta forma, neste estudo foram avaliados diferentes modelos de permeâmetro, analisando-se também o efeito da carga hidráulica. Os resultados de condutividade hidráulica também foram comparados à taxa de infiltração medida pela metodologia ISO 17785-1 (ISO, 2016).

5.2.1 Métodos de Caracterização Hidráulica

Nesta fase experimental foram avaliados os principais fatores envolvidos na determinação da eficiência hidráulica do concreto permeável: (a) metodologia de caracterização; (b) modelo de permeâmetro e (c) carga hidráulica. Entre as metodologias de caracterização descritas na literatura, as mais empregadas são a mensuração da condutividade hidráulica por permeâmetros e da taxa de infiltração por meio do anel de infiltração. Os permeâmetros são os dispositivos mais utilizados em estudos de concreto permeável, porém diversos modelos e cargas hidráulicas são empregados.

Neste estudo foram construídos três permeâmetros baseados nos principais modelos descritos na literatura, sendo dois operados com carga constante e um com carga variável. Em todos os modelos é possível ajustar a carga hidráulica de ensaio, permitindo a caracterização da condutividade hidráulica em diferentes modos de

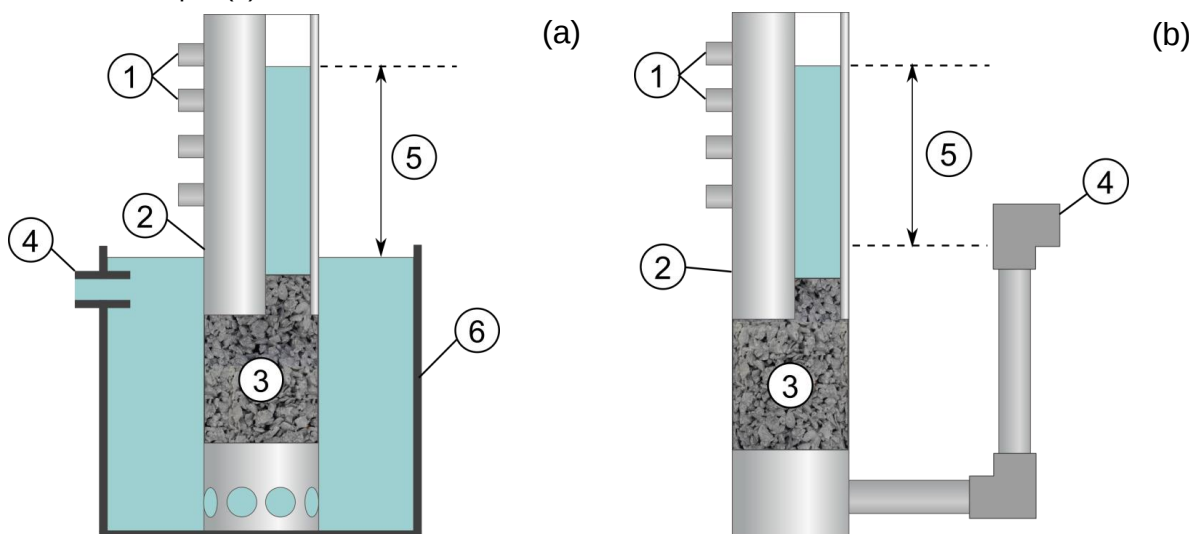
operação do permeâmetro. No Quadro 8 estão descritas as especificações de cada equipamento.

Quadro 8 – Especificação dos permeâmetros utilizados nesta pesquisa

Carga	Constante	Constante	Variável
Modelo	Reservatório	Extravasor	Extravasor
Referência	Park <i>et al.</i> (2010) Bhutta <i>et al.</i> (2013)	Ibrahim <i>et al.</i> (2014) Yap <i>et al.</i> (2018)	Yahia e Kabagire (2014) Chandrappa e Biligiri (2018a)
Cargas	10 – 20 – 30 – 40 cm	10 – 20 – 30 – 40 cm	5 a 50 cm
Ilustração			

Os permeâmetros de carga constante foram confeccionados em PVC, sendo compostos por um tubo de carga com quatro extravasores de nível, responsáveis por ajustar a carga hidráulica (10 a 40 cm), conforme observado no Quadro 8. No modelo de reservatório, a água escoada pela amostra é direcionada a um reservatório com nível mantido constante, enquanto no modelo com extravasor, a água é conduzida por um extravasor de saída com 40 mm de diâmetro. Os dois modelos estão detalhados na representação esquemática contida na Figura 38.

Figura 38 – Representação esquemática dos permeâmetros de carga constante com saída por (a) reservatório e por (b) extravasor



Nota: 1 – extravasores de nível; 2 – coluna de carga; 3 – amostra de concreto permeável com vedação lateral; 4 – extravasor de saída; 5 – altura de carga; 6 – reservatório de nível constante.

Para a utilização do equipamento, a amostra de concreto permeável é vedada lateralmente por meio de um filme plástico, sendo conectada ao tubo de carga e ao permeâmetro. A determinação da condutividade hidráulica é realizada alimentando-se o tubo de carga com uma vazão suficiente para a manutenção da carga hidráulica desejada. Após a estabilização do escoamento, é medida a massa de água escoada pelo extravasor de saída em um determinado intervalo de tempo. O coeficiente de permeabilidade é, então, calculado por meio da Equação 9.

$$k = \frac{L \cdot q}{h \cdot A \cdot t} \quad (9)$$

Em que:

k – Coeficiente de permeabilidade (cm/s);

L – Altura da amostra (cm);

q – Massa de água escoada (g);

h – Carga hidráulica (cm);

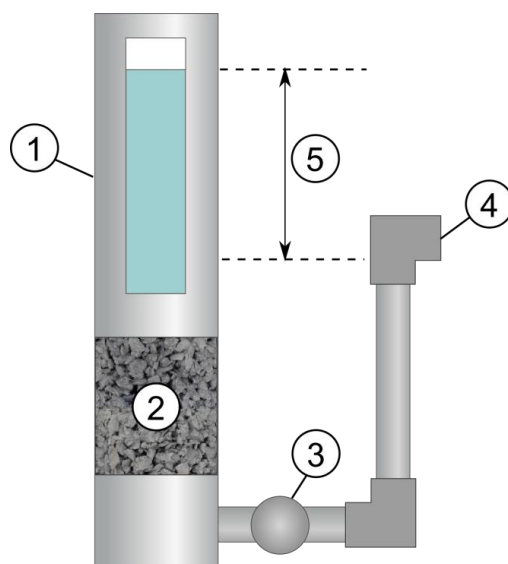
A – Área da seção transversal da amostra (cm²);

t – Intervalo de tempo (s).

O permeâmetro de carga variável também é constituído por um tubo de carga, porém com um visor para verificação do nível da água. A amostra é conectada ao tubo de carga e à base do permeâmetro, que possui um extravasor com 40 mm de diâmetro

e um registro de esfera para controle do escoamento. O permeâmetro de carga variável utilizado está ilustrado na Figura 39.

Figura 39 – Representação esquemática e foto do permeâmetro de carga variável



Nota: 1 – coluna de carga; 2 – amostra de concreto permeável com vedação lateral; 3 – registro; 4 – extravasor de saída; 5 – altura de carga inicial.

O coeficiente de permeabilidade é determinado ajustando-se o nível da água até um valor de carga inicial em relação ao nível do extravasor de saída. Na sequência, é medido o tempo necessário para o deslocamento do nível d'água até um valor de carga final, pré-estabelecido. A condutividade hidráulica pode ser calculada por meio da Equação 10.

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \cdot \ln\left(\frac{h_i}{h_f}\right) \quad (10)$$

Em que:

a – Área da seção transversal do tubo de carga (cm²);

L – Altura da amostra (cm);

A – Área da seção transversal da amostra (cm²);

t – Tempo para deslocamento da água (s);

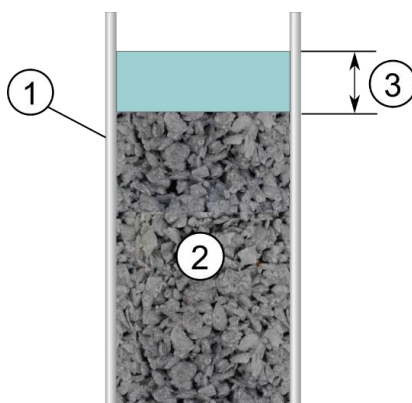
h_i – Carga hidráulica inicial (cm);

h_f – Carga hidráulica final (cm).

Além do coeficiente de permeabilidade, também foi caracterizada a taxa de infiltração dos concretos permeáveis pela metodologia descrita na ISO 17785-1 (ISO,

2016). Neste estudo essa metodologia também foi denominada de método do anel de infiltração, uma vez que se aproxima do procedimento empregado na avaliação da taxa de infiltração em campo. O preparo da amostra para o ensaio está ilustrado na Figura 40.

Figura 40 – Representação esquemática do ensaio para determinação da taxa de infiltração



Nota: 1 – vedação lateral com membrana plástica; 2 – amostra de concreto permeável; 3 – lâmina d'água mantida entre 15 e 25 mm.

A amostra de concreto permeável deve ser vedada lateralmente com uma membrana plástica. Segundo a ISO 17785-1 (ISO, 2016) a membrana deve exceder em pelo menos 50 mm a altura do corpo de prova, permitindo a formação de uma lâmina d'água acima da superfície. Inicialmente 1 L de água é vertido sobre a superfície do concreto para realizar a sua pré-molhagem. Logo em sequência 2 L de água são vertidos, mantendo-se uma lâmina d'água entre 15 e 25 mm acima da superfície do corpo de prova. A partir do momento em que a água atinge o concreto permeável, é cronometrado o tempo necessário para que todo o volume se infiltre no interior do material. A taxa de infiltração corresponde ao volume d'água infiltrado na superfície de concreto por unidade de tempo, sendo calculada pela Equação 11.

$$I = \frac{V}{At} \quad (11)$$

Em que:

I – Taxa de infiltração (cm/s);

V – Volume de água utilizado no ensaio (cm³);

A – Área da seção transversal da amostra (cm²);

t – Tempo necessário para infiltração do volume d'água (s).

Desta forma, os principais modelos de permeâmetro de carga constante (Figura 38) e carga variável (Figura 39) foram comparados para diferentes condições de carga hidráulica. Para o modelo de carga variável foram utilizadas cargas iniciais de 10, 20, 30, 40 e 50 cm. Nos equipamentos de carga constante foram empregadas alturas d'água de 10, 20, 30 e 40 cm. A carga hidráulica de 50 cm não foi utilizada, uma vez que seriam necessárias vazões elevadas mantidas constantes, principalmente nos concretos de elevada porosidade.

Também se comparou os resultados de condutividade hidráulica com a taxa de infiltração obtida no anel de infiltração. Esse método foi empregado como uma alternativa na caracterização hidráulica do concreto permeável em laboratório. Esse ensaio foi realizado nas duas faces das amostras cilíndricas de concreto permeável, permitindo avaliar a taxa de infiltração tanto das camadas superficiais como das inferiores.

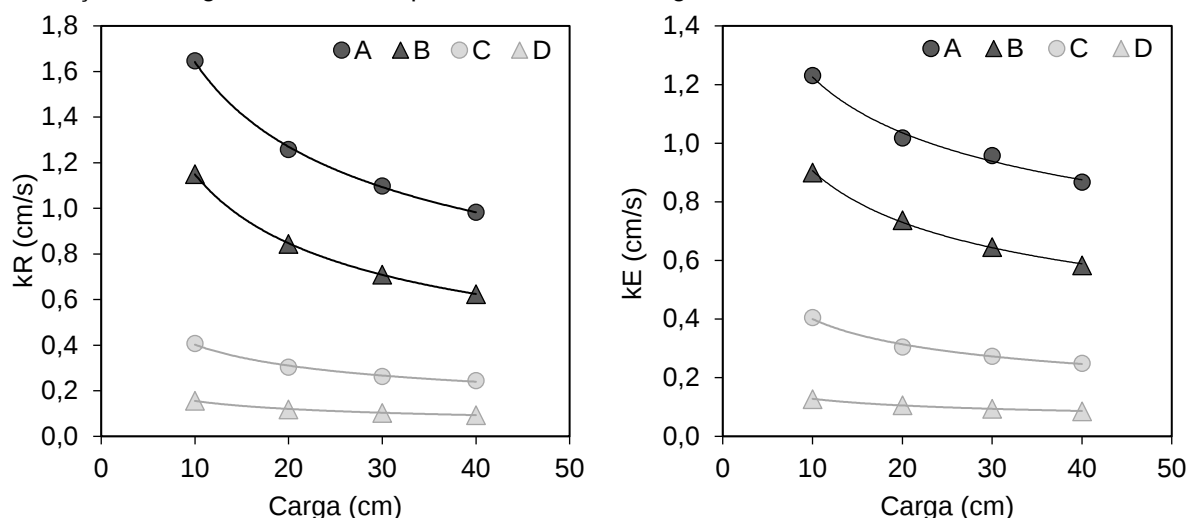
Este estudo foi realizado a partir da caracterização de amostras produzidas em diferentes etapas experimentais. No estudo comparativo entre os permeâmetros foram utilizados dados coletados em 96 corpos de prova, enquanto para a avaliação do método do anel de infiltração foram avaliados 184 corpos de prova. As amostras apresentaram porosidade no estado fresco variando entre 15 e 30%, sendo utilizados 9 agregados distintos (a descrição desses agregados será descrita com maior detalhamento no capítulo 6).

5.2.2 Comparação entre os Modelos de Permeâmetros

Para analisar o efeito da carga hidráulica as amostras de concreto permeável analisadas foram divididas em quatro grupos de condutividades hidráulicas similares (Grupos A, B, C e D). Os grupos abrangeram amostras com uma ampla variação na condutividade hidráulica, contendo resultados na faixa de 0,1 até 1,7 cm/s. No Grupo A foram reunidas as amostras de maior desempenho hidráulico, enquanto os concretos com menor condutividade hidráulica foram dispostos no Grupo D.

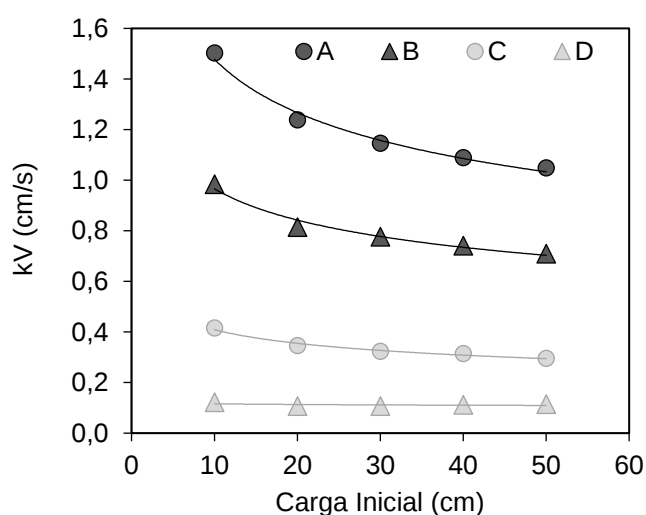
Na Figura 41 estão representadas as distribuições de coeficiente de permeabilidade em função da carga hidráulica utilizada nos permeâmetros do tipo reservatório (kR) e do tipo extravasor (kE). Pode ser observado na figura que houve variação do coeficiente de permeabilidade em função da carga hidráulica utilizada no teste. Porém, esse comportamento variou entre os grupos de amostras.

Figura 41 – Variação da permeabilidade das amostras de concreto permeável dos grupos A, B, C e D em função da carga hidráulica nos permeâmetros de carga constante



As amostras dos grupos A e B apresentaram uma redução significativa da condutividade hidráulica com o aumento da carga hidráulica. Para esses grupos, a redução foi de até 43 e 32% nos permeâmetros do tipo reservatório e extravasor, respectivamente. No grupo D, as amostras apresentaram uma variação mínima na condutividade hidráulica. As amostras do grupo C apresentaram uma redução de coeficiente de permeabilidade entre as cargas de 10 e 20 cm, porém essa variação foi menor entre as cargas de 20 e 40 cm. Entre os dois equipamentos houve diferença nos valores médios de coeficiente de permeabilidade, principalmente para os grupos A e B. Para o permeâmetro de carga variável os resultados médios de cada grupo estão expostos na Figura 42.

Figura 42 – Variação da permeabilidade das amostras de concreto permeável dos grupos A, B, C e D em função da carga hidráulica inicial no permeâmetro de carga variável

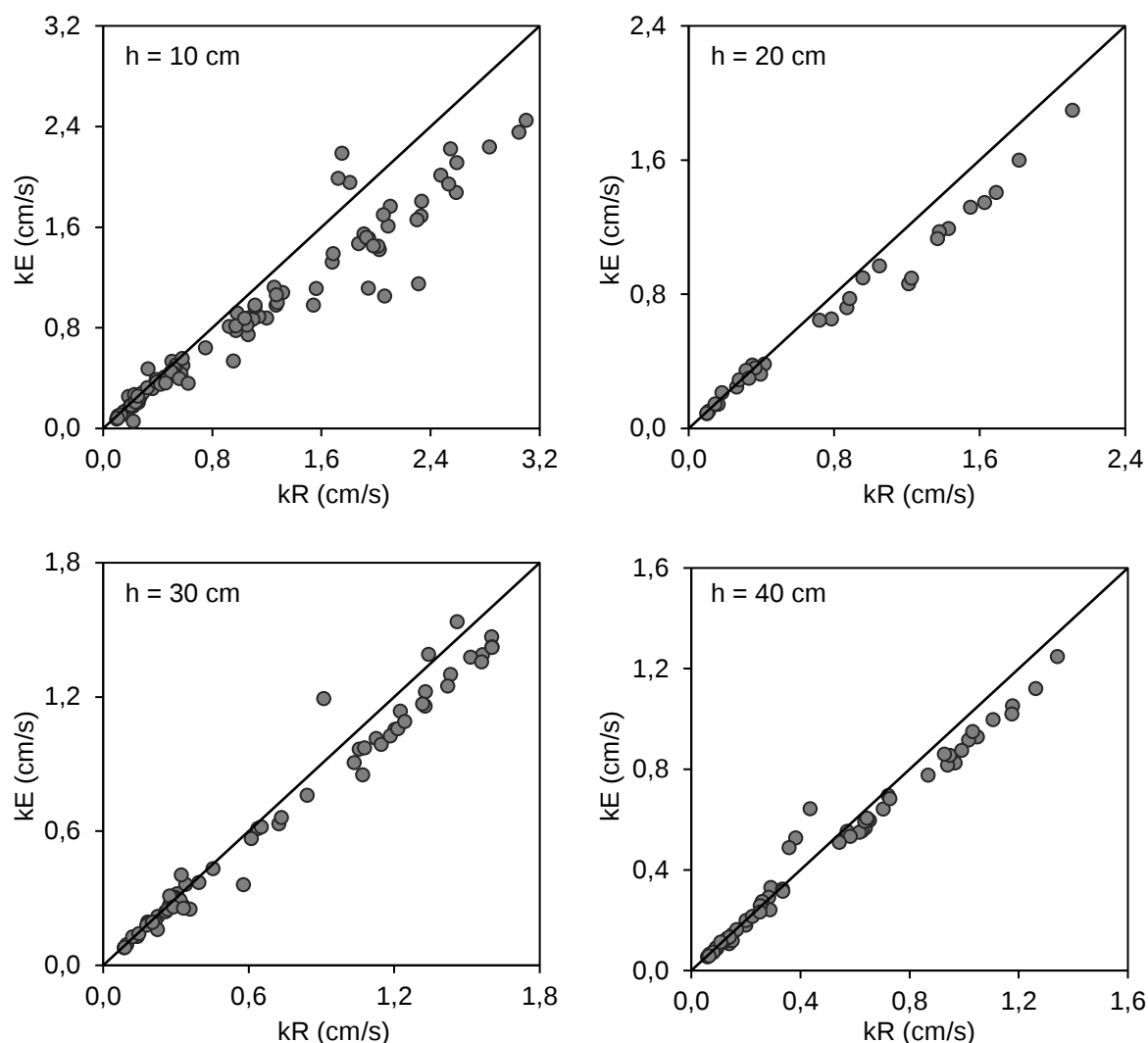


O comportamento das amostras foi similar no permeâmetro de carga variável. Nos grupos A e B as reduções de coeficiente de permeabilidade com o aumento da carga foram de aproximadamente 29%. Essa variação foi mais acentuada até a carga inicial de 30 cm, apresentando menor variação entre as cargas de 30 e 50 cm. No grupo D o coeficiente de permeabilidade foi constante, independentemente da carga inicial, enquanto no grupo C houve variação até a carga de 30 cm.

A variação da condutividade hidráulica em função da altura d'água no permeâmetro já foi constatada na literatura (SRIRAVINDRARAJAH; WANG; ERVIN, 2012; CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016b). O coeficiente de permeabilidade em meios porosos é determinado pela aplicação da Lei de Darcy, que relaciona a velocidade do escoamento e o gradiente hidráulico. No entanto, a Lei de Darcy torna-se válida apenas para os casos em que ambos os parâmetros assumem uma variação linear entre si (THIRUVENGADAM; KUMAR; SIVAKUMAR, 2014; NIJP *et al.*, 2017; DEBNATH; SARKAR, 2019). Essa condição ocorre quando o escoamento possui regime laminar. Em meios porosos o regime laminar geralmente é caracterizado por um número de Reynolds inferior a 1 (MARTIN III; KAYE; PUTMAN, 2014; WEST *et al.*, 2016). Em meios de alta porosidade como o concreto permeável, por exemplo, o escoamento pode assumir regime turbulento. Nessa condição a velocidade e o gradiente hidráulico passam a se relacionar de uma forma não-linear. É importante notar que ainda que a velocidade na coluna de carga apresente comportamento laminar, a velocidade da água no poro pode ter atingido regime turbulento.

Em um regime turbulento as forças inerciais, inicialmente desprezadas pela Lei de Darcy, passam a predominar no escoamento no meio poroso (ZHANG *et al.*, 2018). Dessa forma, uma parcela da carga hidráulica é dissipada por meio de forças de arrasto, levando a determinação de um coeficiente de permeabilidade inferior ao real (WEST *et al.*, 2016; NIJP *et al.*, 2017). Isto justifica a redução na condutividade hidráulica com o aumento da carga hidráulica, conforme constatado nas Figuras 41 e 42. O aumento da altura d'água gerou um aumento proporcional na velocidade do escoamento, intensificando assim a perda de carga e o erro na estimação da condutividade hidráulica. Para as amostras do grupo D, esse efeito não foi significativo devido à velocidade reduzida. A comparação entre os resultados obtidos nos permeâmetros de carga constante de reservatório e de extravasor está ilustrada na Figura 43.

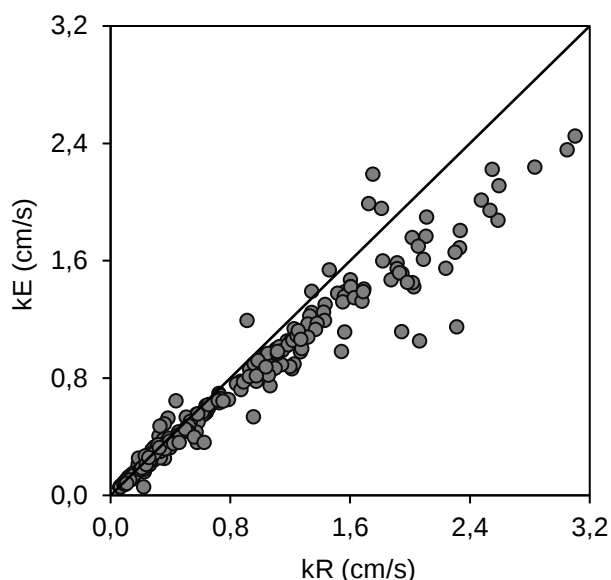
Figura 43 – Comparação entre os coeficientes de permeabilidade obtidos nos permeômetros de carga constante para as carga hidráulicas de 10, 20, 30 e 40 cm



Na figura estão representadas as retas de igualdade com inclinação 1:1 para comparação entre os valores de cada modelo. Os modelos do tipo extravasor (kE) e tipo reservatório (kR) foram analisados para as cargas de 10, 20, 30 e 40 cm. A faixa de condutividade hidráulica variou significativamente em relação à carga hidráulica utilizada, conforme já constatado anteriormente. Para uma altura d'água de 10 cm, os coeficientes de permeabilidade foram superiores, resultando em valores entre 0,14 e 3,2 cm/s. Para a carga de 40 cm as condutividades hidráulicas medidas se limitaram a 1,35 cm/s. As cargas de 20 e 30 cm, por sua vez, apresentaram resultados intermediários. Em todas as situações expostas na Figura 43 observa-se um comportamento similar na comparação entre ambos os modelos de permeômetro. Nas condutividades hidráulicas mais inferiores (aproximadamente até 0,6 cm/s) há uma

equivalência entre os resultados obtidos nos dois modelos. Nesses casos, o escoamento da água provavelmente se situa em uma condição em que a Lei de Darcy é válida. Portanto, a condutividade hidráulica é influenciada basicamente pelo gradiente hidráulico. A partir desse valor é possível notar uma discrepância entre os resultados, que se intensifica com o aumento da condutividade hidráulica. Na Figura 44 estão representados os coeficientes de permeabilidade agrupados, independentemente da carga hidráulica utilizada.

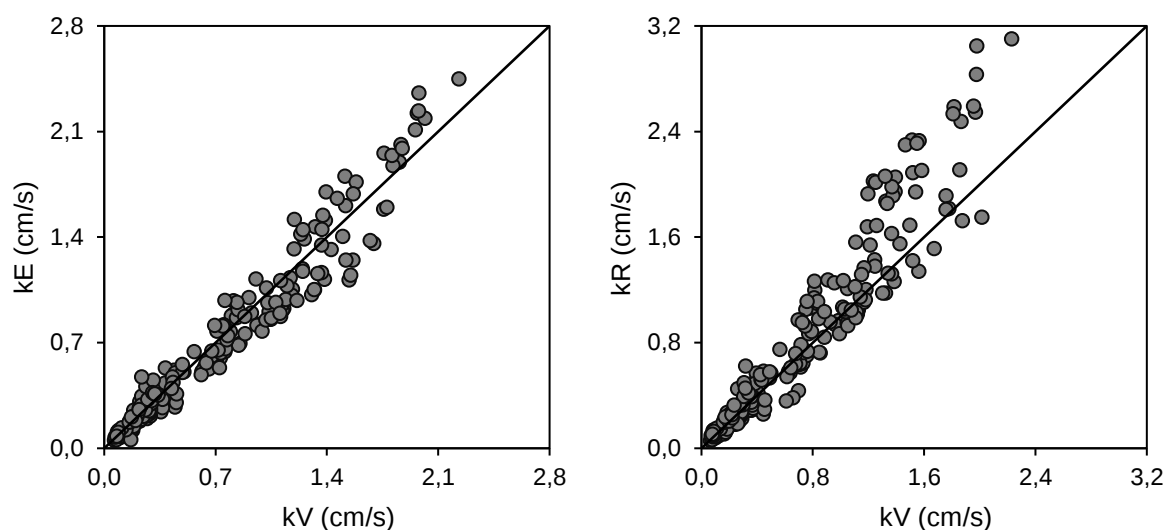
Figura 44 – Comparação entre os coeficientes de permeabilidade obtidos nos permeômetros de carga constante independentemente da carga hidráulica



Em geral, o permeômetro com reservatório resultou em valores superiores ao modelo com extravasor, principalmente na região superior a 1,6 cm/s. A diferença de operação entre os dois modelos também pode estar associada aos efeitos da velocidade do escoamento, que não são desprezíveis para as amostras de maior condutividade hidráulica. Devido às características construtivas distintas de cada permeômetro (Figura 38), diferentes perdas de carga podem estar associadas a cada equipamento. No modelo do tipo extravasor a água deve percorrer a tubulação de saída, o que pode ter contribuído na perda de carga do dispositivo. Além disso, a carga hidráulica real do experimento pode ser inferior aos valores medidos no ensaio. Isso ocorre pela forma de descarga da água pelo extravasor, sendo difícil a aferição precisa da carga. No segundo modelo, a água é descarregada diretamente no reservatório,

minimizando as perdas no equipamento. A carga hidráulica também é determinada com maior precisão, sendo esta medida pela distância vertical entre o nível d'água na coluna de carga e no reservatório. Os resultados obtidos nos permeâmetros de carga constante também podem ser comparados com o modelo de carga variável, conforme exposto na Figura 45.

Figura 45 – Comparação entre os coeficientes de permeabilidade obtidos nos permeâmetros de carga constante e de carga variável independentemente da carga hidráulica

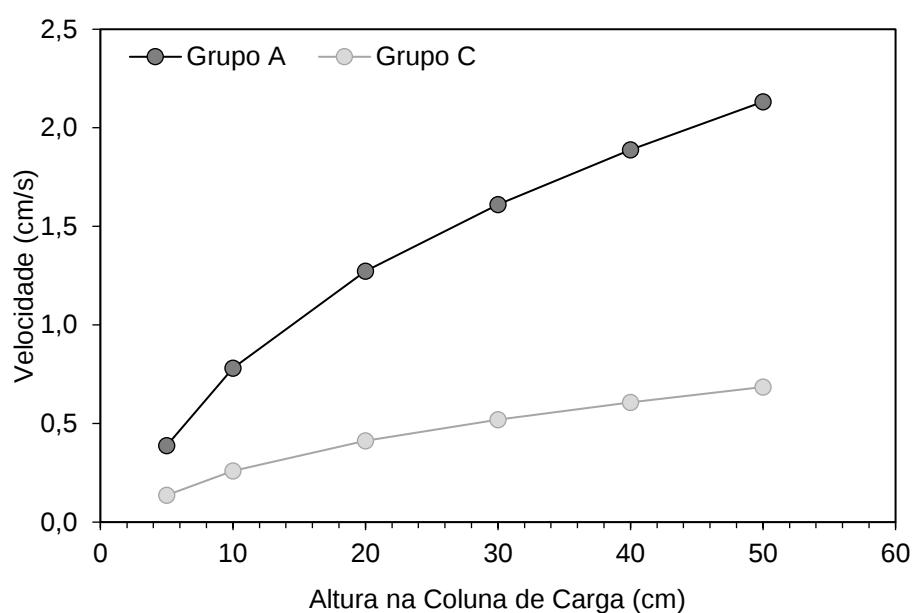


Pode ser observado na Figura 45 que o permeâmetro de carga variável (kV) apresentou resultados similares ao modelo de extravasor (kE). Isso pode ser justificado pelos dois permeâmetros apresentarem a mesma construção, se diferenciando apenas na forma de operação. Até aproximadamente 0,7 cm/s os resultados obtidos nos dois modelos foram mais próximos, havendo maior dispersão em relação à reta de igualdade em condutividades hidráulicas superiores. Ao comparar-se o permeâmetro de carga variável com o modelo de reservatório (kR) observa-se uma tendência deste apresentar resultados superiores. Até aproximadamente 0,8 cm/s houve uma correspondência entre as condutividades hidráulicas obtidas em cada modelo, havendo maior dispersão a partir desse ponto. Esse comportamento é bem similar ao exposto na Figura 44, podendo ser justificado pelas características construtivas de cada permeâmetro.

A operação do permeâmetro de carga variável também pode ter sido influenciada pelos efeitos da velocidade no concreto permeável. Devido à variação da carga hidráulica em função do tempo, diferentes velocidades serão desenvolvidas

dentro do permeâmetro. No início do teste, o nível d'água se desloca com velocidade máxima, desacelerando à medida que se aproxima do nível final. Na Figura 46 estão ilustrados os perfis de velocidade da água obtidos no teste de permeabilidade de carga variável.

Figura 46 – Perfil de velocidade da água em função da carga hidráulica no permeâmetro de carga variável



Desta forma, para uma mesma carga inicial a amostra estará sujeita a diferentes velocidades, podendo ainda estabelecer um escoamento definido pela Lei de Darcy quando a altura d'água no permeâmetro se aproxima da carga final. Outra questão que pode ser levantada é que a carga hidráulica final do teste também irá influenciar na estimativa do coeficiente de permeabilidade. Quanto maior for a carga final, o teste de permeabilidade ficará limitado à região de maior velocidade no permeâmetro (Figura 46), resultando em um valor de condutividade hidráulica inferior. Essas questões tornam difícil a comparação entre os permeâmetros de carga variável e de carga constante e o estabelecimento de limites mínimos de permeabilidade para o concreto. A comparação da condutividade hidráulica com requisitos normativos seria possível apenas com a padronização dos equipamentos e das condições de ensaio.

No que se refere à operação dos permeâmetros, o equipamento de carga constante possui a vantagem de estabelecer uma velocidade única durante todo o ensaio. No entanto, essa metodologia exige a descarga de uma vazão constante na

coluna de carga do permeâmetro. Nas amostras com porosidade superior, a manutenção da carga hidráulica pode exigir uma vazão elevada, ultrapassando a capacidade das instalações hidráulicas. Dessa forma, torna-se inviável também a análise de cargas hidráulicas superiores a 40 cm. Além disso, o consumo de água para a execução do ensaio é elevado, uma vez que o nível d'água deve ser mantido constante na coluna de carga.

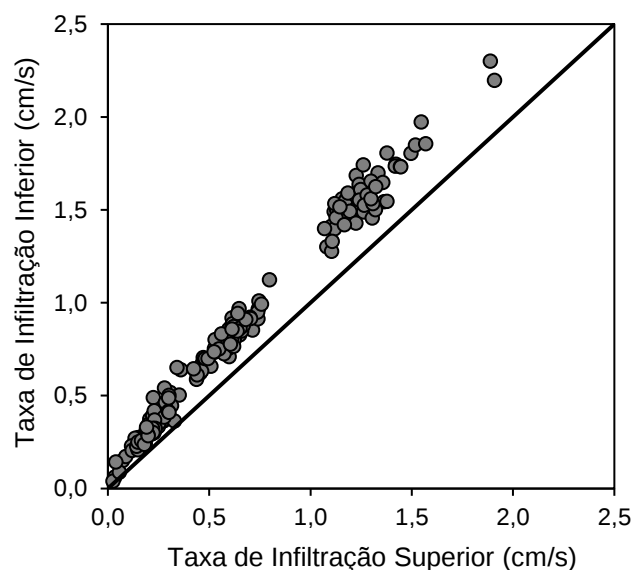
O permeâmetro de carga variável, apesar de desenvolver diferentes velocidades ao longo da coluna de carga, é um equipamento mais prático, uma vez que não necessita ser alimentado por uma vazão constante. Além de permitir a análise de amostras de alta permeabilidade, há uma maior flexibilidade no ajuste da carga hidráulica. Esse modelo também permite a análise de diferentes gradientes hidráulicos simultaneamente pelo levantamento de um perfil de deslocamento do nível d'água por tempo decorrido no ensaio. Isso pode ser realizado utilizando-se a capacidade máxima do permeâmetro (por exemplo 50 cm) e registrando-se o tempo necessário para a água se deslocar até níveis intermediários pré-definidos (por exemplo 40, 30, 20 e 10 cm). Essa operação otimiza o ensaio de caracterização hidráulica do concreto permeável, permitindo a construção de uma curva de condutividade hidráulica por carga hidráulica.

Em função desses aspectos, neste estudo optou-se pelo uso da condutividade hidráulica obtida no permeâmetro de carga variável para representar o desempenho hidráulico do concreto permeável. Para as etapas experimentais subsequentes optou-se por apresentar apenas o coeficiente de permeabilidade obtido para a carga inicial de 50 cm, visto que é a condição de ensaio que resultou em menor dispersão dos resultados.

5.2.3 Avaliação do Método do Anel de Infiltração

Como alternativa aos permeâmetros tradicionais, também foi realizado o ensaio de anel de infiltração pela metodologia ISO 17785-1 (ISO, 2016) nas amostras de concreto permeável. O ensaio foi realizado tanto na face superior como inferior da amostra, possibilitando a determinação da taxa de infiltração em ambas as camadas do concreto permeável para a caracterização hidráulica do material. Na Figura 47 estão ilustrados os resultados de taxa de infiltração obtidos para as amostras analisadas nesta etapa.

Figura 47 – Comparação entre a taxa de infiltração na camada superior e inferior das amostras

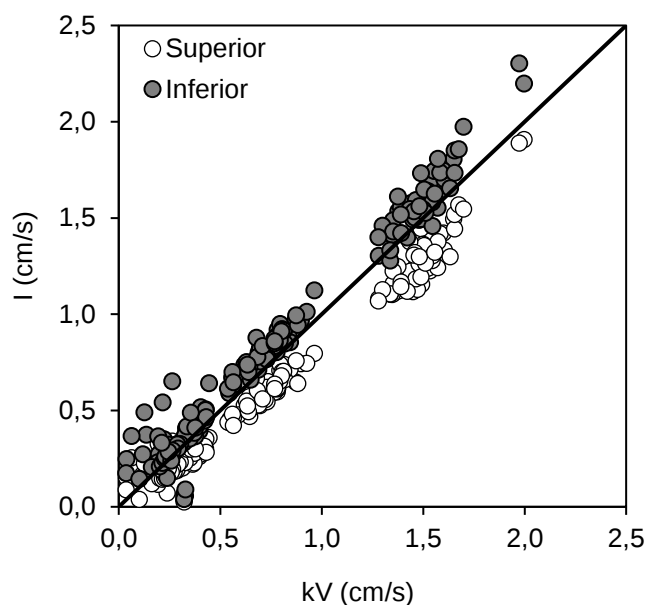


Analisando-se a Figura 47 é possível constatar que a taxa de infiltração foi superior na face inferior do concreto permeável para todas as amostras analisadas. Dessa forma, é possível concluir que o teste de anel de infiltração avalia a capacidade de infiltração de água das camadas próximas à superfície em que o teste é realizado. Assim como verificado anteriormente, a compactação do concreto permeável gera uma distribuição vertical da porosidade, sendo constatadas porosidades máximas nas camadas mais inferiores do material. Como consequência, a taxa de infiltração da água também foi superior nessa camada. Já as camadas superficiais absorvem a maior parte da energia de compactação, tendendo a apresentar porosidade e taxa de infiltração mínimas.

A utilização desse método de caracterização hidráulica possui a vantagem de avaliar a capacidade de infiltração de água da região mais crítica do concreto permeável, que é a camada superficial. Essa é a camada que será responsável por realizar a captação das águas pluviais incidentes no pavimento permeável, devendo então apresentar uma taxa de infiltração suficiente para isso. Além disso, também é possível avaliar a distribuição vertical da porosidade indiretamente pela comparação entre as taxas de infiltração obtidas em ambas as faces do concreto permeável. A taxa de infiltração obtida pelo método ISO 17785-1 (ISO, 2016) também foi comparada com a condutividade hidráulica, conforme a Figura 48. Para esta comparação foram utilizados os dados referentes ao permeâmetro de carga variável com carga inicial de

50 cm, que foram as condições de ensaio adotadas para as demais etapas experimentais, conforme já discutido.

Figura 48 – Comparação entre a taxa de infiltração e a condutividade hidráulica medida pelo permeâmetro de carga variável com carga inicial de 50 cm



Na Figura 48 observa-se que os valores de taxa de infiltração apresentaram comportamento coerente com a condutividade hidráulica medida no permeâmetro de carga variável (carga inicial de 50 cm). Observando os resultados, é possível identificar um comportamento linear entre a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração. Isso demonstra que, embora representem propriedades distintas, as duas metodologias possuem capacidade de descrever o comportamento hidráulico do concreto permeável em função das características da mistura. Dessa forma, o teste de anel de infiltração normatizado pela ISO 17785-1 (ISO, 2016) também é um procedimento coerente na caracterização de concretos permeáveis em laboratório. A vantagem desse teste é que as condições do ensaio se aproximam do que ocorre em campo, ou seja, o escoamento de uma pequena lâmina d'água sobre a superfície do concreto permeável. Além disso, os dispositivos necessários para a execução do teste são muito mais simples que os permeâmetros tradicionais, facilitando a padronização do método. Dessa forma, torna-se mais fácil padronizar a caracterização hidráulica do concreto permeável, permitindo assim a comparação de resultados entre diferentes estudos e o estabelecimento de critérios mínimos de desempenho. A única observação em relação ao ensaio ISO 17785-1 (ISO, 2016) é que a faces do corpo de

prova devem ser identificadas para garantir a execução do teste na superfície correta da amostra.

5.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS METODOLOGIAS DE CARACTERIZAÇÃO

Conforme abordado neste capítulo, a caracterização do concreto permeável pode ser realizada a partir de diferentes metodologias. No que se refere à porosidade, os métodos disponíveis podem identificar diferentes tipos de poros (abertos, intergranulares e totais), fato que geralmente não é detalhado nas pesquisas. A caracterização hidráulica também pode ser realizada por diferentes metodologias e dispositivos, resultando em uma divergência significativa nos resultados. Portanto, torna-se essencial selecionar as metodologias que refletem as propriedades de maior relevância na dosagem, produção e controle de misturas de concreto. A partir do estudo comparativo conduzido, os seguintes critérios podem ser levados em consideração:

- a) Porosidade: deve ser projetada e controlada preferencialmente no estado fresco (porosidade intergranular) para permitir a conferência logo após a produção do concreto permeável. Essa propriedade é de fácil caracterização e pode ser correlacionada com as propriedades do agregado e da mistura. A porosidade total (estado endurecido) também pode ser utilizada como parâmetro de dosagem, porém aumenta a complexidade do processo por considerar os poros da matriz cimentícia;
- b) Caracterização Hidráulica: na ausência de permeâmetros padronizados e critérios de ensaio em laboratório, ainda não há um consenso na caracterização da condutividade hidráulica. O permeâmetro de carga variável é o equipamento que apresenta maior facilidade operacional e possui maior flexibilidade na execução do ensaio (ajuste da carga inicial e final), sendo uma possibilidade na avaliação da condutividade hidráulica. A metodologia ISO 17785-1 (ISO, 2016) também é uma alternativa viável na caracterização hidráulica do material. Além de não exigir um equipamento complexo, o ensaio possui maior reprodutibilidade e se aproxima do método do anel de infiltração empregado para a caracterização em campo.

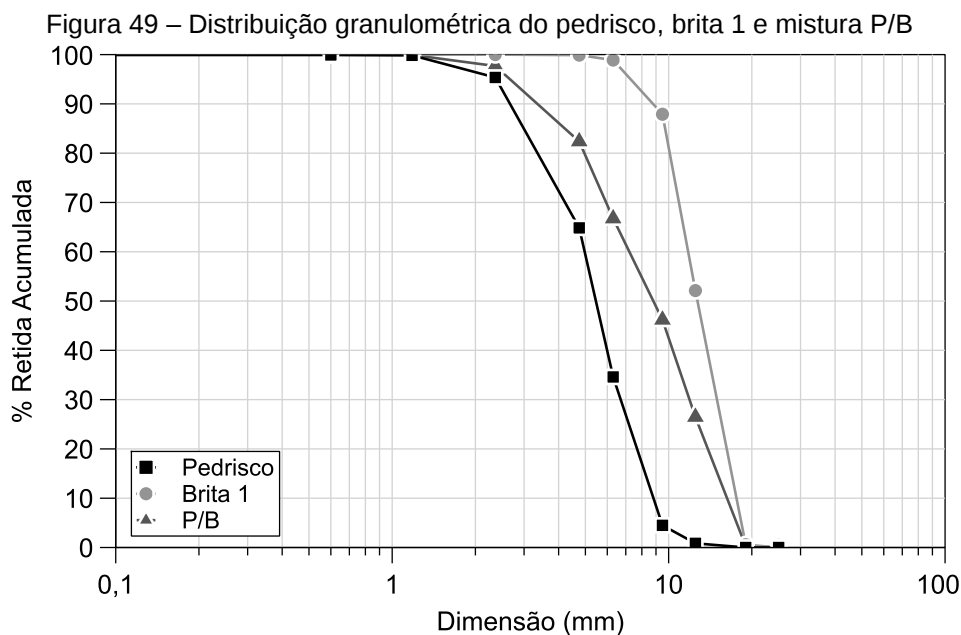
6 ETAPA III – INFLUÊNCIA DO AGREGADO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL

Conforme constatado nas etapas anteriores, a produção do concreto permeável possui características distintas, que devem ser controladas para garantir o desenvolvimento das propriedades do material. Dessa forma, a metodologia de preparo proposta tem como objetivo padronizar a fase de produção e garantir a eficácia da dosagem do material. Outra etapa essencial na elaboração de misturas de concreto permeável é a seleção dos agregados, que correspondem ao componente de maior volume no material. As propriedades do agregado gráúdo irão influenciar diretamente a estrutura da matriz granular do concreto poroso, afetando as suas propriedades mecânicas e hidráulicas. Assim, a seleção do agregado gráúdo deve ser realizada de forma a otimizar a dosagem concreto. Um dos principais fatores limitantes dos métodos de dosagem de concretos permeáveis é a restrição quanto aos agregados que podem ser utilizados. Portanto, nesta etapa o objetivo foi estudar as principais composições granulométricas do agregado gráúdo e o seu impacto na elaboração de misturas de concreto permeável, visando estabelecer relações para embasar a proposta de dosagem deste estudo.

6.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta etapa foram utilizadas diferentes composições granulométricas com o objetivo de avaliar três efeitos: (a) o tipo de distribuição granulométrica; (b) a dimensão dos grãos e; (c) a mistura de agregados. Dois agregados com distribuição contínua foram utilizados, sendo usualmente comercializados como pedrisco (P) e brita 1 (B). Os dois agregados possuíam mesma origem mineralógica, se distinguindo apenas pelas suas características granulométricas. A distribuição granulométrica dos materiais está ilustrada na Figura 49.

Agregados com tamanho de grãos uniforme (U) foram obtidos pelo peneiramento do pedrisco e brita 1, sendo selecionadas três frações com dimensões usualmente adotadas na produção de concretos permeáveis: 4,75, 6,3 e 9,5 mm (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; TORRES; HU; RAMOS, 2015; CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016a). Cada fração corresponde ao material compreendido entre duas peneiras da série normal ou intermediária, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003).



Agregados com distribuição descontínua (D) foram produzidos pela mistura binária entre as frações 4,75 e 9,5 mm. Essa composição foi estudada por ser utilizada normalmente na confecção de pavimentos asfálticos SMA (*stone matrix asphalt*) (BERNUCCI *et al.*, 2008; ASPHALT INSTITUTE, 2014). A mistura dos agregados foi realizada com proporção variável entre cada fração. Também foi analisada uma mistura entre o pedrisco e a brita 1 (P/B) com o intuito de gerar um empacotamento de partículas máximo. No Quadro 9 estão descritas as frações utilizadas e a nomenclatura empregada para este estudo.

Quadro 9 – Composições granulométricas do agregado graúdo utilizadas nesta etapa

Série	Distribuição	Fração (mm)	Composição Granulométrica
P	Contínua	1,18 a 9,5	Pedrisco
B	Contínua	4,75 a 12,5	Brita 1
P/B	Contínua	1,18 a 12,5	Mistura com 50% de pedrisco e 50% de brita 1
U4	Uniforme	4,75	Material passante na peneira #6,3 mm e retido na peneira #4,75 mm.
U6	Uniforme	6,3	Material passante na peneira #9,5 mm e retido na peneira #6,3 mm.
U9	Uniforme	9,5	Material passante na peneira #12,5 mm e retido na peneira #9,5 mm.
D25	Descontínua	4,75 e 9,5	Mistura com 25% da fração U4 e 75% da fração U9
D50	Descontínua	4,75 e 9,5	Mistura com 50% da fração U4 e 50% da fração U9
D75	Descontínua	4,75 e 9,5	Mistura com 75% da fração U4 e 25% da fração U9

Todas as composições granulométricas foram caracterizadas individualmente, sendo determinadas suas propriedades físicas no estado solto e compactado. As propriedades físicas de cada composição granulométrica estão descritas na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades físicas obtidas na caracterização do pedrisco

Série	Absorção (%)	Densidade			Massa Unitária		Índice de Volume de Vazios	
		Aparente*	Superfície Saturada	Seca	Estado Solto	Estado Compactado	Estado Solto	Estado Compactado
		(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)	(%)
P	0,66	3,02	2,98	2,96	1,56	1,71	48,49	43,45
B	0,53	3,03	3,00	2,98	1,60	1,78	47,07	41,27
P/B	0,60	3,03	2,99	2,97	1,66	1,79	45,12	40,76
U4	1,00	3,00	2,94	2,91	1,44	1,57	51,89	47,55
U6	0,92	3,03	2,98	2,95	1,45	1,58	52,27	48,02
U9	0,71	3,05	3,01	2,98	1,52	1,67	49,98	45,11
D25	0,96	3,00	2,95	2,92	1,60	1,74	47,39	42,81
D50	0,92	3,03	2,98	2,95	1,61	1,73	46,77	42,81
D75	0,71	3,05	3,01	2,98	1,57	1,70	47,92	43,68

Nota: *Densidade aparente excluindo-se poros permeáveis a água, calculada conforme ASTM C127 (ASTM, 2015).

Uma vez que os agregados utilizados são de mesma origem mineralógica, observa-se que a densidade foi similar em todas as composições granulométricas. A absorção de água variou conforme a dimensão média dos grãos, sendo o valor máximo observado no agregado U4 (menor fração uniforme utilizada) e mínima na brita 1 (com grãos de maior dimensão). As propriedades com maior variabilidade foram a massa unitária e, conseqüentemente, o volume de vazios. Essas duas características têm impacto direto na dosagem de concretos permeáveis, uma vez que, junto ao volume de pasta de cimento empregado, controlam a porosidade do material. Observa-se que as frações uniformes (U) apresentaram o maior volume de vazios, característica que justifica a recomendação na literatura desta distribuição granulométrica na produção de concretos permeáveis. As misturas binárias (D) resultaram em uma massa unitária superior à das frações isoladas. Isso pode ser justificado pelo preenchimento dos vazios da fração 9,5 mm pelos grãos da fração 4,75 mm. O aumento da massa unitária ocorre até um limite, no qual os grãos de menor dimensão ocupam todo o espaço intergranular das partículas de maior dimensão. A partir desse teor os fragmentos maiores passam a ser substituídos por

um empacotamento de grãos menores com volume unitário equivalente, causando a redução da massa unitária (DE LARRAD, 1999). Neste estudo, esse limite provavelmente se encontra entre os teores de 25 e 50% da fração mais fina.

Outra propriedade importante na análise de agregados é a sua área superficial. No método de dosagem Marshall de misturas asfálticas, a área superficial pode ser estimada pela ponderação entre a quantidade de agregado passante em uma determinada peneira e o seu respectivo fator de área superficial. Entretanto, essa metodologia não faz distinção entre as frações 4,75, 6,3 e 9,5 mm. Para estimar a área das frações, foi utilizado o modelo proposto por Panda, Das e Sahoo (2016), que corrigiram os fatores e incluíram valores individuais para cada fração com dimensão acima de 4,75 mm. A caracterização da área superficial das composições foi realizada com o intuito de estabelecer relações entre o agregado e as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável. Os resultados da caracterização de área superficial pelo método proposto por Panda, Das e Sahoo (2016) estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9 – Área superficial dos agregados utilizados na Etapa II

Série	Área Superficial (m ² /kg)
P	0,7123
B	0,3158
P/B	0,6493
U4	0,9091
U6	0,5973
U9	0,3718
D25	0,5061
D50	0,6404
D75	0,7748

Na Tabela 9 observa-se que a área superficial tem potencial aplicação para representar as propriedades granulométricas dos agregados. A área superficial aumenta de forma proporcional à quantidade de partículas de menor dimensão no agregado. Desta forma, a propriedade tem capacidade de representar de forma simplificada tanto a distribuição granulométrica como a dimensão média das partículas do agregado.

Para os concretos produzidos nesta etapa utilizou-se o cimento CII-F 32, sendo adotada uma relação a/c determinada pelo teste de drenagem de pasta de cimento, proposto por Nguyen *et al.* (2014). O preparo do concreto foi realizado seguindo os procedimentos padronizados na Etapa I desta pesquisa, utilizando-se uma energia de compactação de 142,9 kJ/m³ e cura úmida. Foram moldadas 8 amostras para cada mistura, sendo 4 corpos de prova utilizados na determinação da resistência à compressão e 4 amostras na caracterização da resistência à tração indireta, permeabilidade e propriedades físicas no estado endurecido. Para todos os concretos foi realizada a caracterização mecânica e hidráulica.

6.2 INFLUÊNCIA DO TAMANHO DO AGREGADO

Embora a influência do tamanho do agregado gráúdo nas propriedades do concreto permeável já tenha sido estudada (KIM; LEE, 2010; LIAN; ZHUGE, 2010; NEPTUNE; PUTMAN, 2010; ÓOSIĆ *et al.*, 2015), a relação agregado/cimento usualmente é mantida fixa, resultando em uma porosidade variável. Nesse caso, o efeito da porosidade pode ser mais influente que o efeito do tamanho do agregado, prejudicando a análise de resultados. Nesta fase experimental foram desenvolvidos concretos permeáveis com as frações uniformes de agregado (U) com dimensões de 4,75, 6,3 e 9,5 mm. As misturas de concreto foram projetadas para atingir uma porosidade fixa, evitando-se assim a influência deste parâmetro nos resultados. Uma vez que cada agregado apresentou um índice de vazios distinto, a relação agregado/cimento (g/c) foi ajustada individualmente para gerar concretos com porosidades no estado fresco de 20 e 30%. Os valores utilizados em cada mistura estão descritos na Tabela 10.

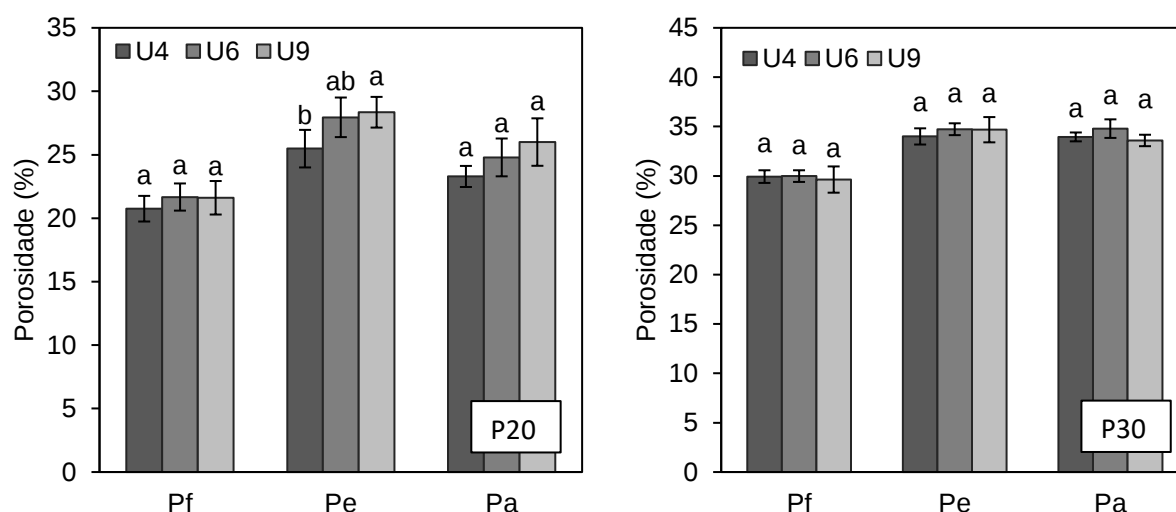
Tabela 10 – Relação agregado/cimento empregada em cada mistura de concreto permeável

Porosidade Projetada	U4	U6	U9
20%	2,88	2,92	3,05
30%	4,55	4,33	4,62

Todas as misturas de concreto permeável foram elaboradas com relação a/c de 0,28, determinada pelo método de Nguyen *et al.* (2014). Essa dosagem proporcionou a consistência de pasta de cimento suficiente para a cobertura dos

agregados de forma homogênea, sem ocorrência do seu escoamento. Na Figura 50 estão representados os resultados de porosidade aberta, porosidade no estado fresco e endurecido.

Figura 50 – Porosidades no estado fresco, endurecido e porosidade aberta dos concretos permeáveis Série U4, U6 e U9



Notas: Pf – Porosidade no estado fresco; Pe – Porosidade no estado endurecido; Pa – Porosidade aberta. Colunas pertencentes ao mesmo grupo seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si no Teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

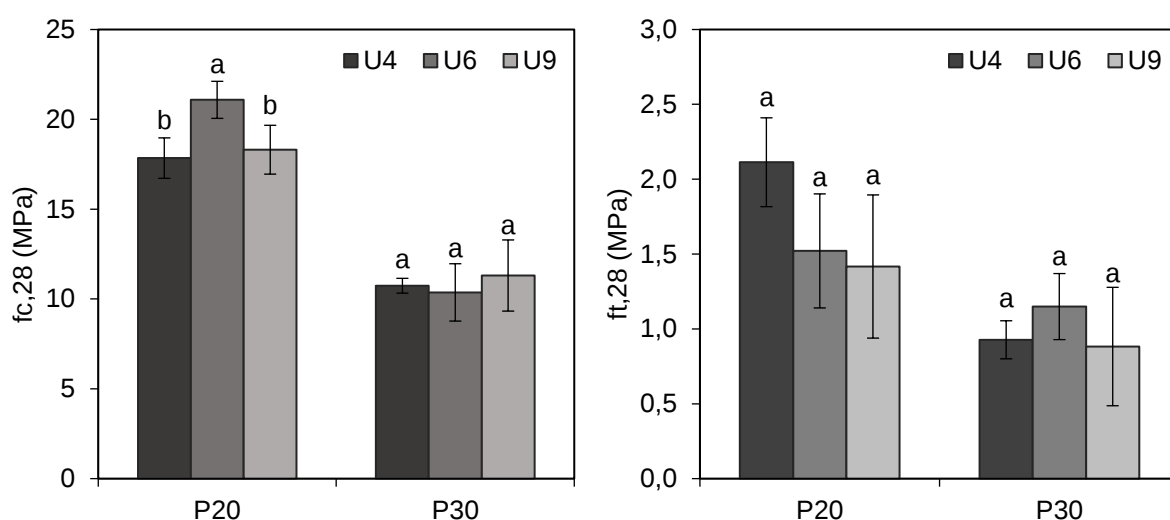
Na Figura 50 é possível observar que os concretos da série P20 apresentaram uma porosidade média no estado fresco de 21,35%. Embora a porosidade tenha resultado em um valor acima do projetado, não houve diferença estatística entre as frações granulométricas. As demais propriedades físicas também apresentaram resultados sem diferença significativa, com exceção da porosidade no estado endurecido. Conforme já discutido anteriormente, a variação entre a porosidade no estado fresco e endurecido pode ser atribuída ao desenvolvimento de poros na pasta de cimento. Observa-se, no entanto, que essas variações foram distintas para cada mistura de concreto. No estado endurecido, a porosidade aumentou proporcionalmente com o tamanho do agregado. A porosidade fechada foi similar nas três misturas, resultando em um valor médio de 2,57%.

Com relação aos concretos da série P30, a porosidade média no estado fresco foi de 29,85%, próximo ao valor projetado. Da mesma forma que nos concretos P20, não houve diferença estatística entre as amostras produzidas com cada tamanho de agregado. Houve um aumento médio de 4,57% na porosidade no estado endurecido,

oriundo da formação dos poros na pasta de cimento. Ao contrário dos concretos da série P20, essa variação foi similar nas três misturas. A porosidade aberta resultou em um valor médio muito próximo à porosidade no estado endurecido, indicando uma pequena quantidade de poros fechados (inferior a 1,0%).

De forma geral, os concretos da série P20 e P30 produzidos com as diferentes frações de agregado apresentaram porosidade e massa específica semelhantes, tanto no estado fresco como endurecido. Dessa forma, as variações no desempenho mecânico e hidráulico não estarão diretamente relacionadas à porosidade, mas sim às características de cada mistura. Na Figura 51 estão ilustrados os resultados médios da caracterização mecânica dos concretos P20 e P30.

Figura 51 – Resultados médios de resistência à compressão e à tração indireta para as amostras de concreto P20 e P30 produzidas com agregados de diferentes tamanhos

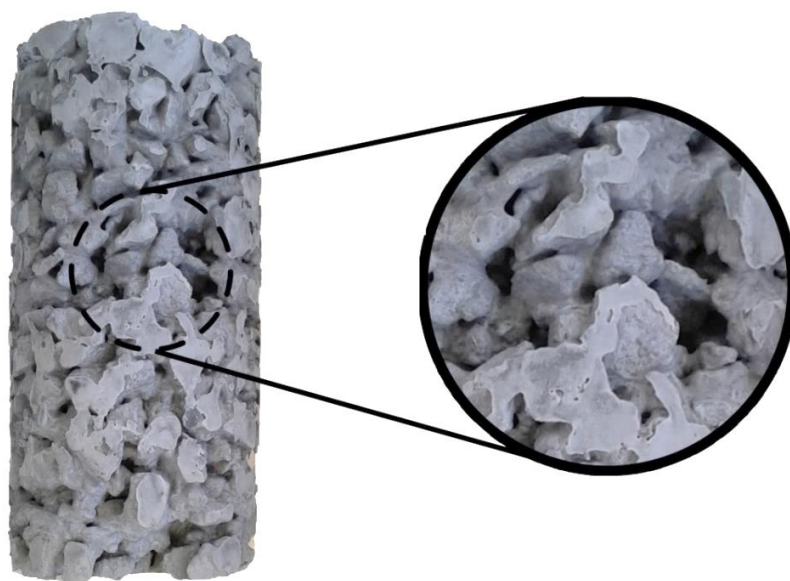


Nota: Colunas seguidas de mesma letra, no mesmo grupo de porosidade, não diferem estatisticamente no Teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

Conforme a Figura 51, o concreto permeável produzido com a fração 6,3 mm apresentou a maior resistência à compressão entre as misturas da série P20, equivalente a 21,1 MPa. Os concretos U4 e U9 apresentaram uma resistência 14% inferior, não havendo diferença estatística entre si. Para os concretos da série P30, no entanto, o tamanho do agregado não teve influência na propriedade. Para as três misturas, a resistência média foi de 11,0 MPa. Os resultados desta fase foram similares aos concretos P20 e P30 elaborados com o pedrisco de distribuição contínua, da Etapa I. Esse pode ser um indício de que a porosidade tem um efeito mais significativo do que as características granulométricas do agregado.

Neste estudo observou-se que houve significância do tamanho do agregado apenas para a série P20, sendo que a resistência à compressão máxima ocorreu para a fração 6,3 mm. Esse comportamento pode ter ocorrido pela interação entre dois efeitos reportados na literatura. O volume de pasta de cimento deve ser homogeneamente distribuído na superfície do agregado. Dessa forma, nos agregados de maior dimensão a camada de pasta de cimento tende a ser mais espessa. Uma vez que os três concretos permeáveis apresentaram um volume de pasta semelhante (média de 30%), isso justificaria o aumento da resistência à compressão do concreto U6 em relação ao U4. Esse comportamento, no entanto, não foi válido para a fração 9,5 mm. Nesse caso o tamanho dos poros pode ter influenciado também a resistência à compressão das amostras. Outro aspecto a ser considerado é a presença de poros de maior dimensão na superfície das amostras U9, conforme a Figura 52. A formação desses poros pode estar relacionada ao efeito parede no empacotamento dos grãos do agregado, principalmente na interface entre o concreto permeável e a superfície do molde utilizado na produção das amostras. Esse efeito pode ter ocorrido de forma mais significativa para o agregado de maior dimensão, prejudicando assim o seu desempenho mecânico.

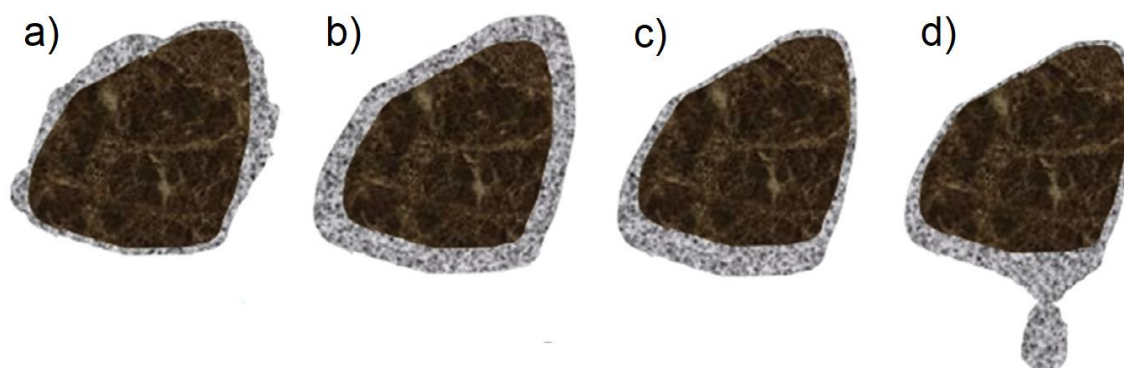
Figura 52 – Falha na compactação da amostra de concreto P20 confeccionada com a fração 9,5 mm



Além disso, outro ponto importante que deve ser levado em consideração é a consistência da pasta de cimento. Neste estudo optou-se pela utilização de uma

relação água/cimento única para todas as misturas. No entanto, cada fração pode exigir uma consistência de pasta distinta, conforme a sua área superficial. Isso pode ter afetado a distribuição da pasta de cimento na superfície do agregado, conforme ilustrado na Figura 53.

Figura 53 – Distribuição da pasta de cimento no agregado para diferentes consistências



Notas: a) distribuição não uniforme da pasta; b) distribuição uniforme da pasta; c) microescoamento; d) escoamento da pasta.

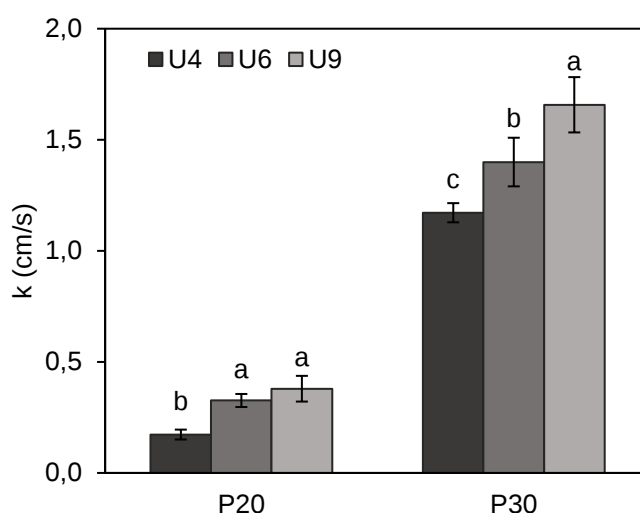
Fonte: Adaptado de Xie *et al.* (2018)

De acordo com Xie *et al.* (2018), ainda que não se verifique o escoamento da pasta de cimento, é possível a ocorrência do microescoamento. Esse fenômeno consiste no deslocamento da pasta de cimento para a região inferior do agregado, resultando em uma redução da espessura da matriz cimentícia na região superior (Figura 53c). Nas amostras U9, embora não tenha sido constatado o escoamento da pasta no teste de Nguyen *et al.* (2014), o microescoamento pode ter ocorrido, prejudicando assim o seu desempenho mecânico. Dessa forma, a relação a/c de 0,28 pode ter favorecido a mistura U6, promovendo uma cobertura mais uniforme. Essa quantidade de água, no entanto pode não ser o valor ideal para as demais frações utilizadas neste estudo. No entanto, ao contrário das misturas P20, os concretos da série P30 não apresentaram diferença estatística na resistência à compressão. A diferença de comportamento entre as duas porosidades de projeto pode estar associada ao volume de pasta em cada mistura. Para o volume de pasta empregado nos concretos P30 (20,1%), esses efeitos podem não ter influenciado significativamente, predominando o efeito da porosidade.

Com relação à resistência à tração indireta, os valores médios da série P20 se situaram entre 1,5 e 2,0 MPa. Para os concretos P30, a resistência à tração média

geral foi de 1,0 MPa. Nos dois casos não foi detectada diferença estatística entre os concretos produzidos com cada fração. O comportamento mecânico na tração por compressão diametral foi similar ao constatado na etapa anterior. A resistência à tração foi influenciada significativamente pela porosidade do concreto permeável. Porém, não foi possível estabelecer uma relação com o tamanho do agregado. Na Figura 54 estão apresentados os resultados do teste de condutividade hidráulica dos concretos série P20 e P30.

Figura 54 – Resultados médios de condutividade hidráulica dos concretos da série P20 e P30, obtidos pelo permeâmetro de carga variável



Nota: Colunas seguidas de mesma letra, no mesmo tipo de permeâmetro, não diferem estatisticamente no Teste de Tukey a um nível de significância de 5%. Altura d'água inicial de 50 cm para carga variável e 30 cm para carga constante.

Observando a Figura 54 pode-se notar que houve influência do tamanho do agregado no coeficiente de permeabilidade das amostras. Na série P20, o concreto U4 apresentou a condutividade hidráulica mínima, de aproximadamente 0,17 cm/s. As amostras U6 e U9 atingiram coeficientes de permeabilidades aproximadamente 86% superiores, não diferenciando estatisticamente entre si. Conforme a Figura 50, não houve diferença estatística na porosidade dos três concretos permeáveis desenvolvidos. Desta forma, a variação da condutividade hidráulica pode ser associada principalmente às características de cada fração de agregado. Segundo Zhong *et al.* (2016), os agregados de maior dimensão formam poros maiores e com maior conectividade, implicando em uma condutividade hidráulica superior. Os autores verificaram também que a porosidade aberta não é suficiente para estimar a

condutividade hidráulica de concretos, havendo a necessidade de considerar parâmetros como a tortuosidade dos poros. Yu *et al.* (2019b) verificaram também que o aumento do tamanho do agregado ocasiona uma redução da área de poros, o que contribui para o desempenho hidráulico das amostras. Desta forma, o aumento da condutividade hidráulica nas amostras U6 e U9 pode ser associado à presença de poros de maior dimensão e maior conectividade destes.

As amostras da série P30 apresentaram o mesmo comportamento no desempenho hidráulico em função do tamanho do agregado. No teste de permeabilidade com carga variável nota-se que houve diferença estatística entre as três misturas. O concreto U9 apresentou um coeficiente de permeabilidade 41% superior ao U4, ainda que a porosidade total das amostras não tenha diferido. Comparando-se os resultados das amostras P20 e P30, pode-se constatar que o efeito da porosidade ainda é predominante sobre a permeabilidade. O aumento em 10% na porosidade das amostras resultou em condutividades hidráulicas de 4 a 6 vezes superiores. Contudo, essa variação é acompanhada de uma queda de aproximadamente 50% na resistência à compressão e à tração indireta. Por outro lado, o aumento do tamanho do agregado resultou em coeficientes de permeabilidade superiores com menor interferência na resistência mecânica do concreto.

6.3 ESTUDO DE COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS

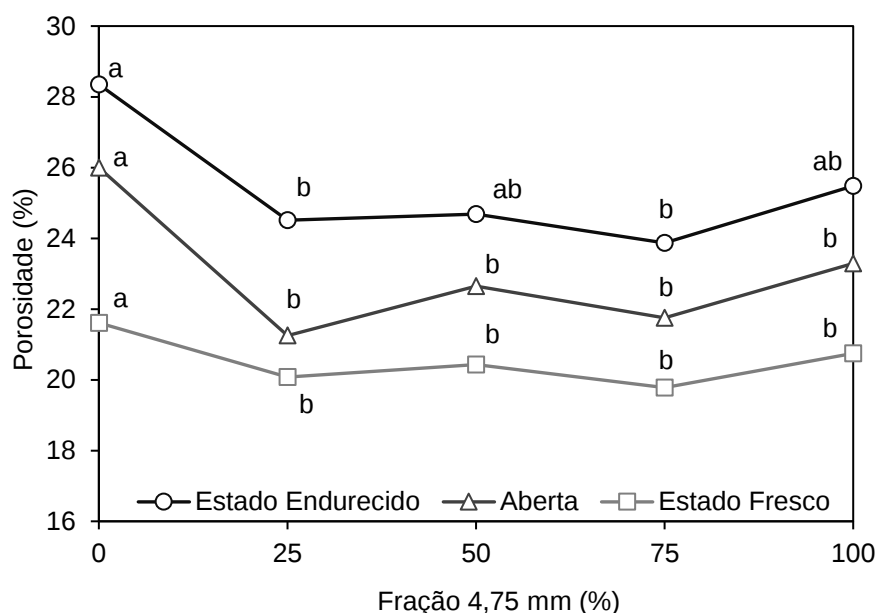
A distribuição granulométrica uniforme tem sido amplamente utilizada na confecção de concretos permeáveis, principalmente por propiciar ao agregado um índice de volume de vazios superior e evitar a compactação excessiva do concreto permeável (CROUCH; PITT; HEWITT, 2007). Na caracterização dos agregados utilizados nesta etapa foi possível confirmar essa hipótese. No entanto, um agregado com um maior índice de vazios exigirá uma maior quantidade de pasta de cimento para atingir uma determinada porosidade de projeto. Dessa forma, realizou-se um estudo avaliando o comportamento de misturas binárias do agregado e a sua influência no concreto permeável. Para isto, foram desenvolvidas misturas com 20 e 30% de porosidade, utilizando-se os agregados D25, D50 e D75. Essas misturas foram comparadas aos concretos confeccionados com as frações uniformes 9,5 e 4,75 mm, as quais foram denominadas D0 e D100, respectivamente. A relação g/c empregada em cada concreto está ilustrada na Tabela 11.

Tabela 11 – Relação agregado/cimento empregada em cada mistura de concreto permeável

Porosidade Projetada	D0 (U9)	D25	D50	D75	D100 (U4)
20%	3,05	3,28	3,56	3,37	2,88
30%	4,62	5,89	5,77	5,25	4,55

Nesta fase do estudo optou-se pela utilização de uma relação a/c de 0,28, valor compatível com as duas frações granulométricas, conforme constatado no teste de drenagem da pasta. Na Figura 55 estão expostos os resultados médios de porosidade das amostras série P20.

Figura 55 – Porosidade aberta, porosidade no estado fresco e endurecido das amostras série P20



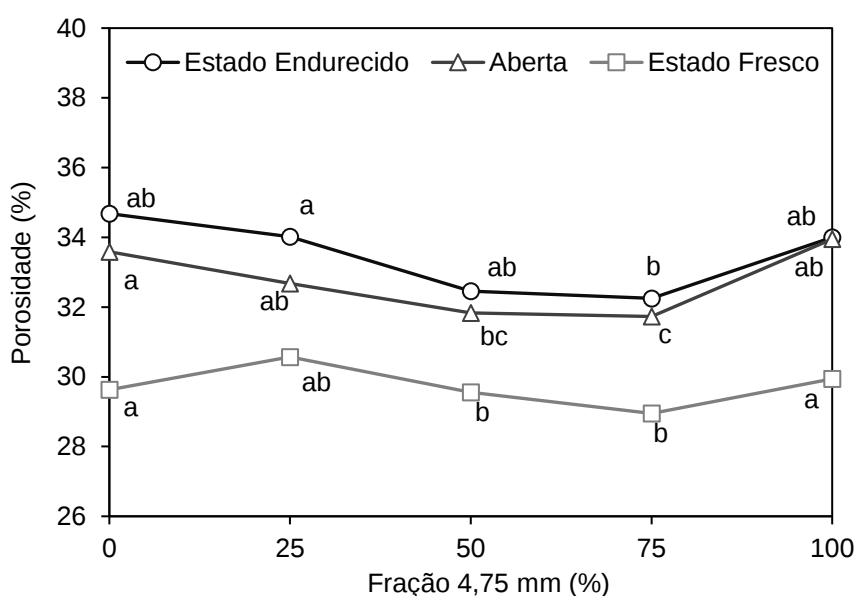
Notas: Pontos seguidos de mesma letra na linha não diferem estatisticamente no teste de Tukey a um nível de 5% de significância.

De acordo com a Figura 55, foram detectadas diferenças estatísticas nas propriedades físicas das diferentes misturas de concreto. Nota-se que a amostra D0 apresentou porosidades no estado fresco, endurecido e aberta superiores as demais amostras. A massa específica média no estado fresco das misturas binárias foi 2,17 g/cm³, diferindo das amostras de concreto uniforme. No estado endurecido verificou-se o mesmo comportamento. Isso pode ter ocorrido devido à variação do índice de volume de vazios dos agregados. Os agregados uniformes apresentaram maior volume de vazios, sendo necessário um maior volume de pasta para manter a porosidade constante. Consequentemente, a massa específica nessas misturas foi

inferior. Em geral, não houve variação significativa nas propriedades dos concretos que continham mistura binária entre os agregados (D25, D50 e D75).

Na Figura 56 estão relacionados os resultados médios da caracterização física dos concretos P30. A porosidade média no estado fresco das amostras P30 foi de 29,71%, havendo diferenças estatísticas entre algumas das amostras. A composição D75 apresentou a menor porosidade no estado fresco e endurecido. A porosidade aberta das amostras com a fração uniforme (D0 e D100) foi superior à das misturas binárias. Isso pode estar relacionado com a formação de poros fechados causada pela composição entre as frações 9,5 e 4,75 mm.

Figura 56 – Porosidade aberta, porosidade no estado fresco e endurecido das amostras série P30



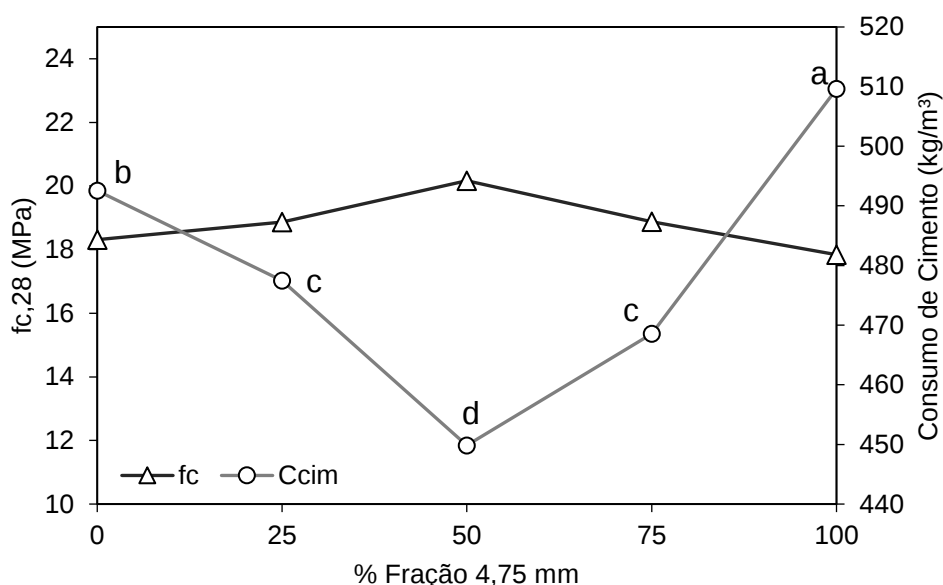
Notas: Pontos seguidos de mesma letra na linha não diferem estatisticamente no teste de Tukey a um nível de 5% de significância.

Tanto as amostras P20 como P30 apresentaram diferenças estatísticas em algumas das propriedades físicas. Essas variações, ainda que pequenas, podem influenciar no desempenho mecânico e hidráulico do concreto permeável. Desta forma, estas serão consideradas na análise dos resultados obtidos nesta fase.

Na Figura 57 estão ilustrados os resultados de resistência à compressão dos concretos da série P20. A variação da resistência à compressão não foi significativa em relação ao teor da fração 4,75 mm. As resistências se situaram entre 17,8 e 20,2 MPa, valores similares aos obtidos na etapa anterior para a série P20. Esse comportamento pode ser explicado pela porosidade no estado fresco, a qual foi similar

para todas as misturas. Por outro lado, para manter a porosidade constante foi necessária a dosagem de diferentes volumes de pasta, levando a uma variação no consumo de cimento. Na Figura 57 observa-se o consumo de cimento variou entre 450 e 510 kg/m³. Ainda que o concreto D50 tenha apresentado o menor consumo de cimento, sua resistência à compressão foi a maior média dentre as composições analisadas. Isso pode ser verificado também pelo consumo de agregado do concreto D50 (1597 kg/m³), que foi o valor máximo dentre as misturas. Com uma estrutura granular do agregado mais compacta, houve uma menor necessidade de pasta de cimento para atingir a porosidade de projeto de 20%.

Figura 57 – Resultados médios de resistência à compressão e consumo de cimento dos concretos permeáveis da série P20 confeccionados com composições binárias do agregado

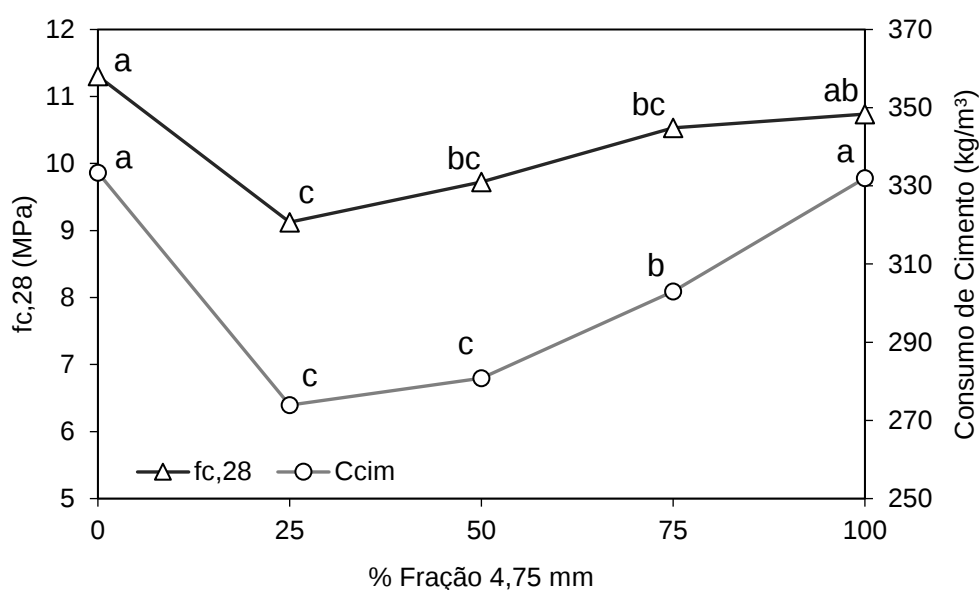


Notas: Pontos seguidos de mesma letra na linha não diferem estatisticamente no teste de Tukey a um nível de 5% de significância.

Embora a redução na quantidade de cimento tenha sido estatisticamente significativa, não houve efeito prejudicial sobre a resistência à compressão axial. Esse resultado tem implicância direta na dosagem de concretos permeáveis. Ainda que a composição granulométrica não tenha efeito sobre o desempenho mecânico do concreto, a utilização de agregados que proporcionem uma estrutura mais compacta permite uma dosagem mais econômica do material. Neste estudo, a mistura D50 apresentou um consumo de cimento 10% inferior ao concreto D100, diferença que pode ser significativa na escolha do agregado para a confecção de concretos permeáveis. Agar-Ozbek *et al.* (2013) também verificaram em seu estudo que esse

tipo de composição favorece o empacotamento do agregado. Os autores verificaram que a mistura de frações uniformes 2-4 mm e 4-8 mm proporcionou um melhor empacotamento quando comparado às frações individuais. Na Figura 58 estão apresentados os resultados médios de resistência à compressão dos concretos da série P30.

Figura 58 – Resultados médios de resistência à compressão e consumo de cimento dos concretos permeáveis da série P30 confeccionados com composições binárias do agregado



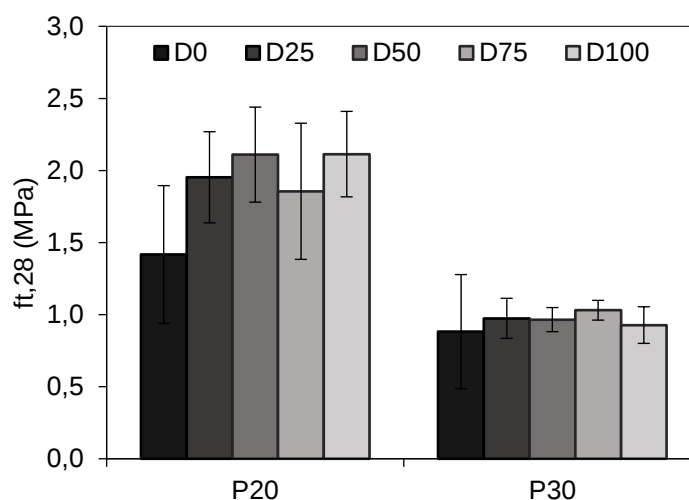
Notas: Pontos seguidos de mesma letra na linha não diferem estatisticamente no teste de Tukey a um nível de 5% de significância.

Para os concretos permeáveis projetados para uma porosidade de 30% observa-se um comportamento diferente em relação à série P20. A mistura entre as frações 4,75 e 9,5 mm, em geral, apresentou menor desempenho mecânico quando comparado às frações isoladas. É possível notar que o consumo de cimento apresentou um comportamento similar em relação à quantidade da fração de menor dimensão. As misturas D25 e D50 apresentaram um menor consumo de cimento, decorrente da maior compacidade dos agregados. Porém, ao contrário dos concretos da série P20, houve uma redução significativa na resistência à compressão média das misturas. O concreto D25 foi o que apresentou maior porosidade no estado fresco, o que pode ter contribuído para a redução de resistência. A mistura D0 (100% fração 9,5 mm) apresentou a maior resistência à compressão média, em conjunto com o consumo de cimento máximo (333 kg/m³). As misturas D50 e D75 apresentaram um

desempenho mecânico similar ao do concreto D100, porém o seu consumo de cimento foi 15,5 e 8,7% inferior, respectivamente.

Comparando-se os resultados médios dos concretos P20 e P30, a resistência mecânica apresentou um comportamento inverso em relação à composição das misturas. Torres, Hu e Ramos (2015) constataram que a resistência à compressão depende diretamente da espessura da pasta de cimento. Porém, Yu *et al.* (2019a) verificaram em seu estudo que após uma determinada espessura (1,15 mm) não houve variação significativa no desempenho mecânico. Isso pode justificar o comportamento dos concretos P20 e P30, neste estudo. Enquanto na série P30 a resistência à compressão foi influenciada diretamente pela matriz cimentícia, as amostras P20 se mantiveram invariáveis, o que pode estar relacionado com a espessura limite citada por Yu *et al.* (2019a). Na Figura 59 estão representados os resultados médios de resistência à tração indireta dos concretos permeáveis P20 e P30.

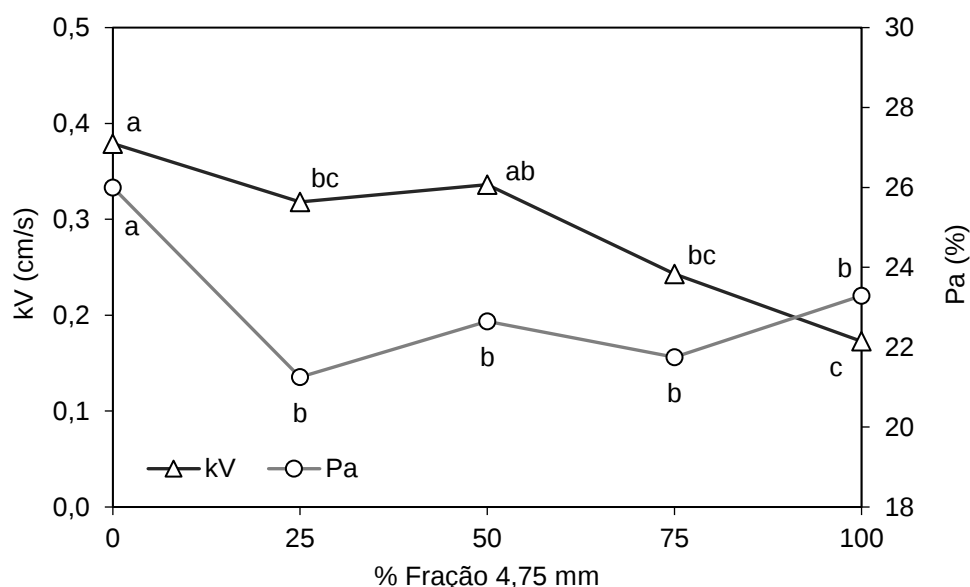
Figura 59 – Resultados médios de resistência à tração indireta dos concretos das séries P20 e P30



Conforme a Figura 59, não houve uma relação clara entre a composição granulométrica do agregado e a resistência à tração indireta. A resistência à tração média das amostras P20 variou de 1,4 a 2,1 MPa, no entanto não houve diferença estatística entre estas. Observa-se que houve grande dispersão nos resultados, o que pode ter prejudicado a análise. A resistência mínima foi observada para o concreto D0 (100% fração 9,5 mm), o que pode estar relacionado com a irregularidade e distribuição dos poros, conforme já discutido. Para as amostras com porosidade

projetada para 30% a resistência média foi de 1,0 MPa, não sendo verificada variação significativa. O desvio padrão da amostra D0 foi elevado em relação aos demais tratamentos, resultando em um coeficiente de variação de aproximadamente 45%. Isso pode ter ocorrido devido a uma distribuição heterogênea da estrutura dos poros na amostra, que é característico nos concretos desenvolvidos com agregados de maior dimensão (YU *et al.*, 2019b). De forma geral, ainda houve predominância do efeito da porosidade no que se refere à resistência à tração por compressão diametral. Na Figura 60 estão apresentados os resultados médios de condutividade hidráulica dos concretos permeáveis P20, obtidos no permeâmetro de carga variável.

Figura 60 – Resultados médios de condutividade hidráulica e porosidade aberta dos concretos permeáveis da série P20

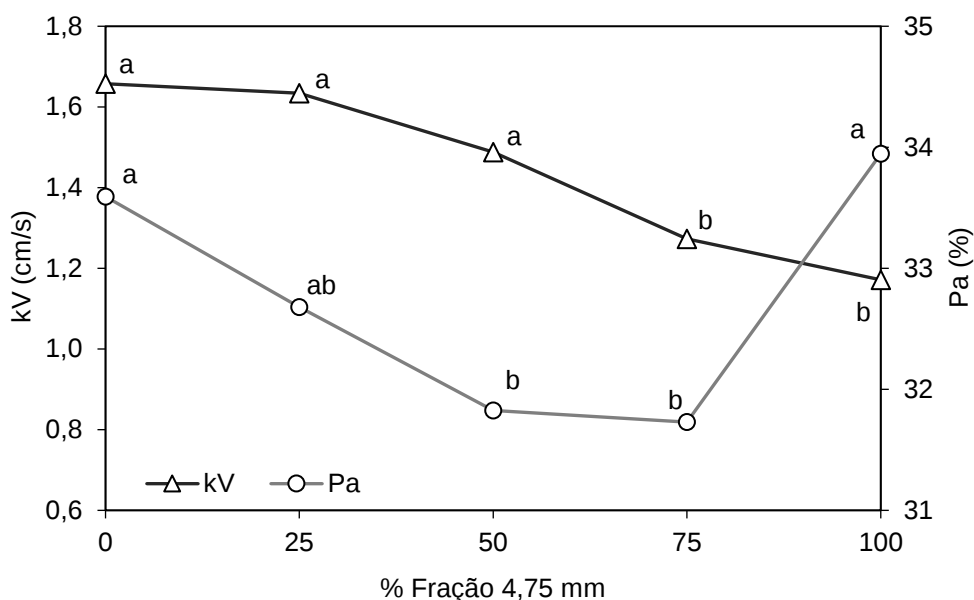


Notas: Pontos seguidos de mesma letra na linha não diferem estatisticamente no teste de Tukey a um nível de 5% de significância.

Analisando a Figura 60 é possível notar que a condutividade hidráulica média das amostras foi inversamente proporcional ao teor da fração 4,75 mm na mistura de agregados. O concreto D0, produzido apenas com a fração 9,5 mm apresentou o maior coeficiente de permeabilidade, o que pode ser atribuído inicialmente à dimensão dos poros intergranulares. Adições de até 50% do agregado com dimensão de 4,75 mm causaram uma redução no coeficiente de permeabilidade pouco significativa (inferior a 10%). Com o acréscimo dessa fração, esta passa a ocupar os vazios intergranulares dos grãos de maior dimensão. Ainda que a porosidade tenha sido mantida constante, a mistura dos agregados pode ter alterado a forma e a distribuição

dos vazios no concreto permeável (NEPTUNE; PUTMAN, 2010). Além disso, nota-se ainda a influência da porosidade aberta na permeabilidade das amostras. A redução do coeficiente de permeabilidade nas amostras D25, D50 e D75 pode ser justificada pela formação de poros isolados, causada pela adição da fração 4,75 mm. Porém, nota-se que a porosidade aberta não é suficiente para prever o comportamento hidráulico do material, sendo fundamental considerar também as características do agregado, conforme já discutido anteriormente. Na Figura 61 estão representados os resultados médios de coeficiente de permeabilidade dos concretos P30, obtidos no permeâmetro de carga variável.

Figura 61 – Resultados médios de condutividade hidráulica e porosidade aberta dos concretos permeáveis da série P30



Notas: Pontos seguidos de mesma letra na linha não diferem estatisticamente no teste de Tukey a um nível de 5% de significância.

Na Figura 61 a variação do coeficiente de permeabilidade apresentou uma tendência similar ao dos concretos P20. Enquanto o concreto D0 apresentou a condutividade hidráulica máxima (1,66 cm/s), os demais concretos apresentaram redução na propriedade proporcional à quantidade da fração 4,75 mm. Essa redução foi mais significativa para os teores acima de 50%. Entre os concretos D0 a D75, observa-se que a porosidade aberta teve uma influência significativa na condutividade hidráulica das amostras. Ou seja, a redução do desempenho hidráulico pode ser atribuída à formação dos poros fechados. No entanto, para o concreto D100 houve

uma inversão desse comportamento. Ainda que sua porosidade aberta tenha aumentado em relação aos demais concretos, o coeficiente de permeabilidade continuou a reduzir. Isso pode estar relacionado também ao tamanho médio dos poros, influenciado pela presença dos grãos de menor dimensão.

6.4 ANÁLISE DE AGREGADOS CONVENCIONAIS

Conforme constatado nas duas fases iniciais, foi possível desenvolver concretos permeáveis com porosidade fixa utilizando-se agregados uniformes e misturas binárias. O comportamento mecânico dos concretos foi similar, sendo o fator predominante a porosidade. No entanto, o consumo de cimento variou significativamente, demonstrando a importância na escolha do agregado graúdo. O efeito do tamanho do agregado foi mais significativo na condutividade hidráulica, sendo que os agregados de maior dimensão proporcionaram melhor desempenho hidráulico. Embora os agregados selecionados tenham apresentado propriedades mecânicas e hidráulicas satisfatórias, frações uniformes não são usualmente comercializadas. Dessa forma, nesta fase foram avaliados os agregados de distribuição contínua, sendo empregadas as frações usualmente comercializadas. Para isso foram empregados o pedrisco e brita 1 para a confecção dos concretos permeáveis. Com o intuito de gerar um agregado de empacotamento de partículas máximo, foi avaliada também a mistura entre esses dois materiais. A mistura com 50% de cada material foi a que proporcionou compacidade máxima, sendo esta selecionada para a confecção do concreto permeável. Os traços utilizados estão descritos na Tabela 12.

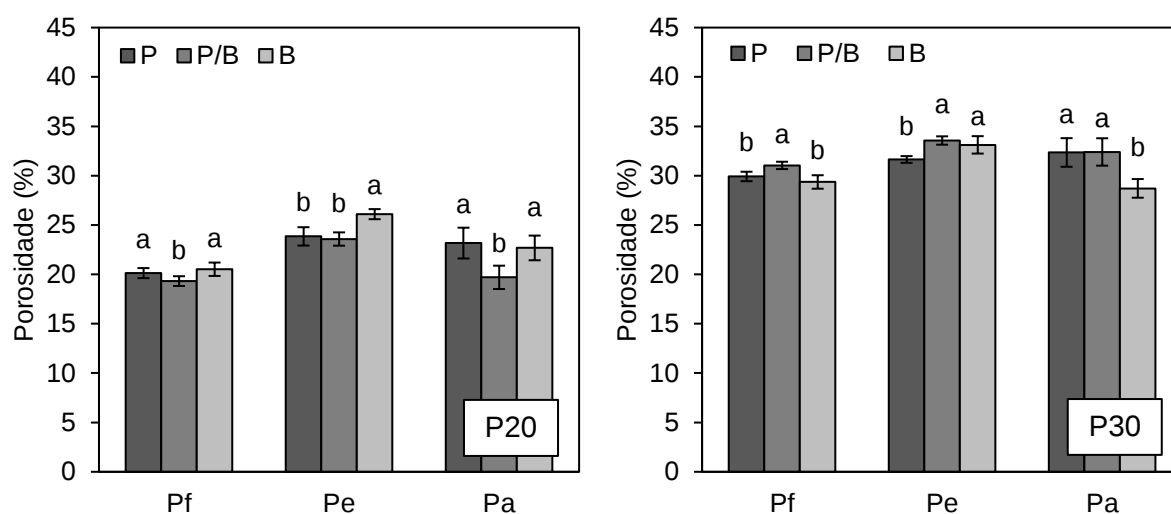
Tabela 12 – Relação agregado/cimento empregada em cada mistura de concreto permeável

Porosidade Projetada	P	B	P/B
20%	3,58	3,35	3,53
30%	6,12	5,42	7,15

A relação a/c adotada para os concretos dessa fase foi 0,26. Observa-se que a quantidade de água necessária para os concretos série B e P/B foi inferior aos demais concretos moldados nesta etapa. Devido aos grãos de maior dimensão, esses agregados possuem menor área superficial e, conseqüentemente, menor demanda

de água. Para o concreto confeccionado com pedrisco, a relação a/c ideal seria 0,28. No entanto, para utilizar a mesma relação a/c dos demais concretos (0,26), empregou-se aditivo superplastificante para corrigir a consistência da pasta de cimento. Os resultados médios da caracterização de porosidade estão ilustrados na Figura 62.

Figura 62 – Resultados médios de porosidade aberta, porosidade no estado fresco e endurecido dos concretos série P20 e P30



Notas: Pf – Porosidade no estado fresco; Pe – Porosidade no estado endurecido; Pa – Porosidade aberta. Colunas pertencentes ao mesmo grupo seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si no Teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

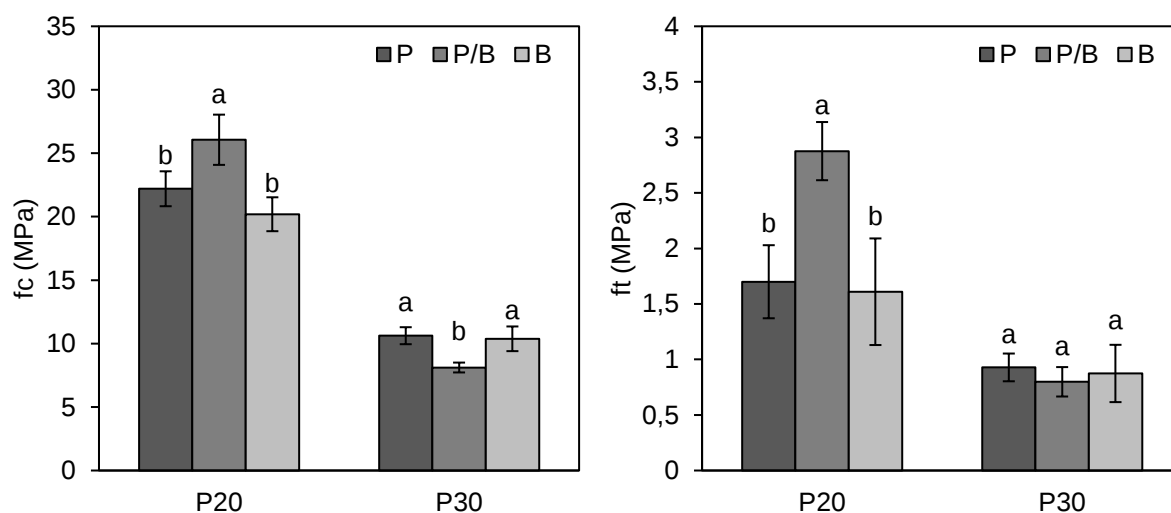
Na Figura 62 pode-se observar que foi possível produzir concretos permeáveis com porosidades no estado fresco próximas aos valores projetados de 20 e 30%. Para a série P20 a porosidade média foi de 19,99%, no entanto houve uma diferença significativa no concreto P/B, que apresentou porosidade de 19,32%. Para a série P30 a porosidade média resultou em 30,11%, também sendo detectada diferença significativa na mistura dos agregados (31,04%). Embora as diferenças encontradas sejam pequenas, estas podem ocasionar variações no comportamento mecânico e hidráulico do concreto permeável. Dessa forma, a variação de porosidade também foi levada em consideração na análise dos resultados.

No estado endurecido houve aumento da porosidade, conforme esperado. Esse incremento foi mais significativo nos concretos B e menos significativo para a série P. Esse comportamento pode estar associado ao volume de pasta de cimento presente em cada mistura. Na série B foi necessário um volume de pasta superior (27,31%) para atingir a porosidade de projeto, sendo assim mais suscetível à variação

de porosidade pelo processo de hidratação do cimento. Na série P o volume de pasta foi 26,25% e, portanto, possuía menor quantidade de matriz cimentícia sujeita a variação de porosidade. A série P/B apresentou um volume de pasta de cimento intermediário, apresentando também variação de porosidade intermediária entre os demais concretos.

Não houve um comportamento constante da porosidade aberta nas duas séries de concreto permeável. Na série P20 a mistura P/B foi a que apresentou menor porosidade aberta, indicando a formação de poros fechados. Devido à formação de uma matriz granular mais compacta, esse concreto foi mais afetado pela presença da pasta de cimento, ocasionando o tamponamento de poros. Já na série P30 o concreto B foi o que apresentou menor porosidade aberta. Essa alteração no comportamento pode estar associada à variabilidade do processo de compactação, principalmente nos concretos produzidos com agregados de maior dimensão, conforme explorado anteriormente. Na caracterização mecânica do concreto permeável também foram observadas diferenças significativas, conforme exposto na Figura 63.

Figura 63 – Resultados médios de resistência à compressão e à tração das misturas P20 e P30



Nota: Colunas pertencentes ao mesmo grupo seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si no Teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

Na Figura 63 observa-se que na série P20 o concreto P/B apresentou o melhor desempenho na resistência à compressão, atingindo um valor 17% superior aos demais concretos. A variação da resistência à tração da mistura foi ainda mais significativa, resultando em um aumento de 70%. Embora o concreto P/B tenha

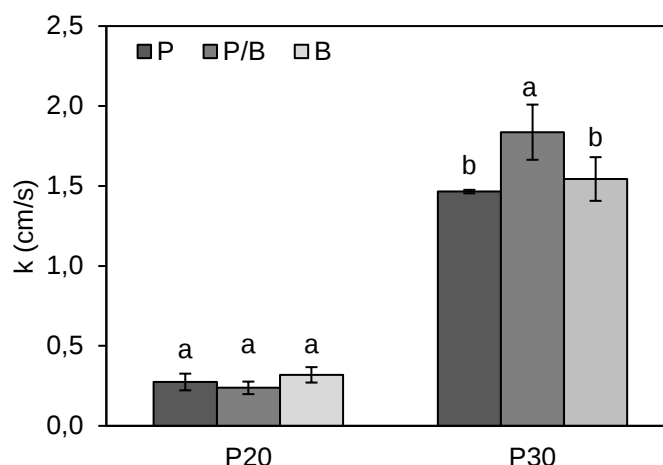
resultado em uma porosidade significativamente inferior aos demais tratamentos, o desempenho por consumo de cimento ainda foi superior. Além do efeito da porosidade, o empacotamento de partículas gerado pela mistura entre o pedrisco e a brita 1 pode ter contribuído para a resistência mecânica. Um comportamento similar ocorreu para a resistência à tração indireta nessa mistura. O concreto P/B apresentou resistência média 64% superior aos demais concretos, confirmando o desempenho mecânico superior.

Na série P30, por outro lado, o comportamento não foi o mesmo. O concreto P/B apresentou a menor resistência à compressão média, resultando em 8,11 MPa. Esse efeito pode ser justificado de forma similar ao verificado nas misturas descontínuas (D), em que o empacotamento de partículas da mistura gerou um consumo de cimento mínimo (235 kg/m³), o qual teve influência no comportamento mecânico do concreto permeável. Na resistência à tração indireta não foi detectada diferença significativa entre os concretos permeáveis, resultado em uma média geral de 0,84 MPa.

O comportamento mecânico dos concretos permeáveis produzidos com agregados convencionais foi similar aos resultados obtidos para a série D. A mistura de agregados para produzir uma matriz granular mais compacta tem potencial no desenvolvimento de misturas com menor consumo de cimento e desempenho mecânico superior. No estudo de Xie *et al.* (2020), os autores verificaram que a resistência do concreto permeável é influenciada pela área total de pasta de cimento nas zonas de contato entre agregados. Essa propriedade é afetada pelo número de pontos de contato, dimensão dos agregados e pelo volume de pasta de cimento empregado na mistura.

Apesar de demandar um volume de pasta de cimento inferior, na série P20 a mistura de agregados pode ter promovido um aumento do número de pontos de contato, contribuindo para a resistência mecânica global. Já nas misturas P30 o volume de pasta pode ter sido insuficiente para cobrir todos os pontos de contato entre agregados, gerando zonas de contato com menor resistência. Essa hipótese justifica os resultados obtidos para as séries C e D, sendo coerente também com as discussões propostas por Torres, Hu e Ramos (2015) e Yu *et al.* (2019a). Na Figura 64 estão ilustrados os resultados médios de condutividade hidráulica das misturas P20 e P30.

Figura 64 – Resultados médios de condutividade hidráulica das misturas P20 e P30



Nota: Colunas pertencentes ao mesmo grupo seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si no Teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

O desempenho hidráulico dos concretos permeáveis série C apresentou menor variabilidade em relação aos demais tipos de distribuição estudados. Na série P20 não foi detectada diferença estatística na condutividade hidráulica, sendo observado um valor médio de 0,28 cm/s. Na série P30 a mistura P/B foi a que apresentou maior condutividade hidráulica, diferindo estatisticamente dos concretos P e B. Essa diferença pode estar associada, em parte, à maior porosidade detectada anteriormente.

Ao contrário do que foi observado nas misturas binárias, a composição entre o pedrisco e a brita 1 não gerou nenhum prejuízo ao desempenho hidráulico dos concretos permeáveis analisados nesta fase. Isso pode ter ocorrido devido aos agregados de origem (brita 1 e pedrisco) já apresentarem uma distribuição granulométrica contínua, com grãos de dimensões variando dentro de uma faixa de valores. Dessa forma, a mistura de compacidade máxima (50% de cada fração), não modificou de forma significativa as características da rede de poros dos concretos permeáveis. No entanto, esperava-se que o concreto B tivesse apresentado a condutividade hidráulica máxima, uma vez que era composto por grãos de maior dimensão. Conforme verificado na Figura 62, o concreto B da série P30 apresentou menor porosidade aberta em relação aos demais concretos, o que pode ter prejudicado sua eficiência hidráulica. Uma hipótese que pode ser levantada para esse efeito é em relação à compactação ótima. A energia de compactação empregada nesta etapa pode ter superado o valor ótimo da mistura B. Dessa forma, a

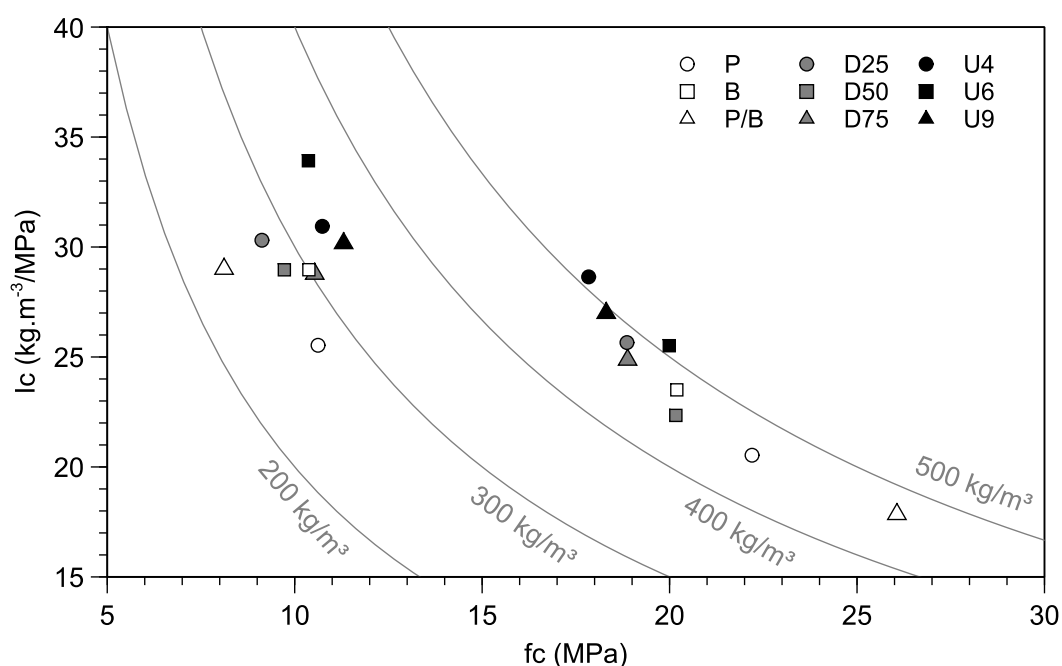
compactação adicional pode ter ocasionado o tamponamento excessivo dos poros, formando-se assim uma porosidade fechada superior aos demais concretos. Sendo assim, a porosidade aberta foi o efeito predominante na condutividade hidráulica dos concretos produzidos nesta fase.

6.5 EFICIÊNCIA MECÂNICA E HIDRÁULICA DAS MISTURAS

Conforme observado nesta etapa, foi possível desenvolver concretos permeáveis com agregados de distribuições granulométricas distintas. Em todos os casos as misturas foram dosadas para resultar em porosidades fixas de 20 e 30%. Embora tenha-se atingido valores próximos às porosidades de projeto, observa-se que o desempenho mecânico e hidráulico das misturas variou significativamente. Dessa forma, a escolha do agregado graúdo é de grande relevância para a dosagem de concretos permeáveis.

Com o objetivo de avaliar o agregado com maior eficiência, foram analisados o índice de consumo de cimento e o desempenho mecânico e hidráulico dos concretos produzidos nesta etapa. Na Figura 65 estão representados os índices de intensidade de consumo de cimento (I_c) médios em função da resistência à compressão dos concretos U, D e C.

Figura 65 – Intensidade de consumo de cimento das misturas produzidas com agregados de distribuição uniforme, descontinua e contínua

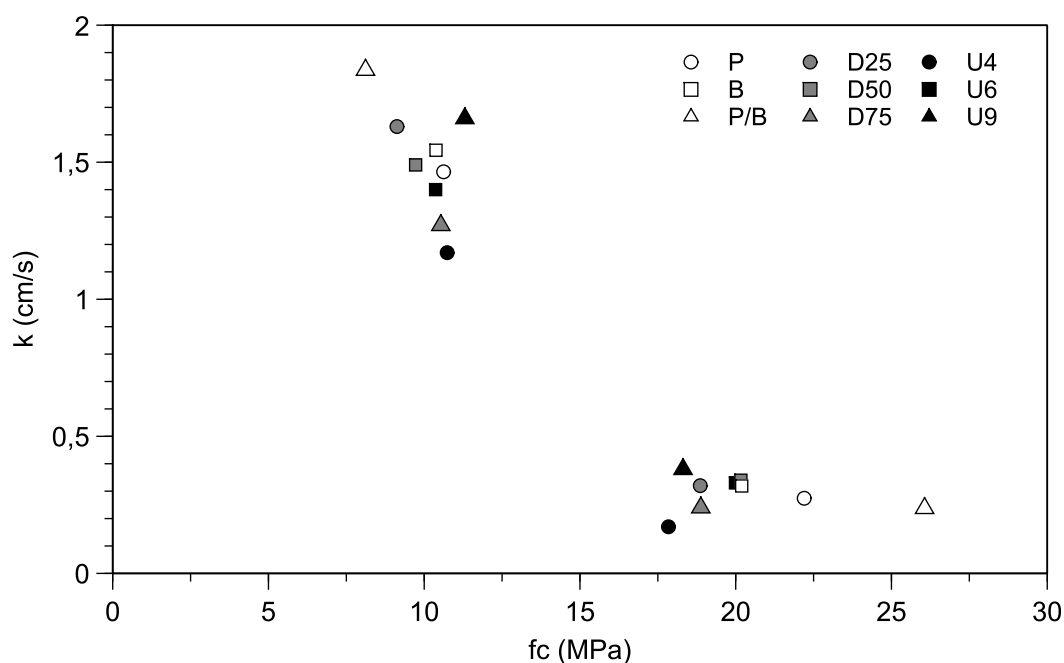


Observando a Figura 65 é possível identificar que concretos produzidos com a mesma porosidade podem apresentar uma variabilidade considerável no desempenho mecânico e, principalmente, no consumo de cimento. As misturas P30 apresentaram, em média, resistência à compressão compreendida entre 8 e 12 MPa. Para uma porosidade fixa, a resistência mecânica dessas misturas foi influenciada diretamente pelo consumo de cimento. Dessa forma, o melhor desempenho mecânico ocorreu nos concretos confeccionados com agregados de menor compactidade e, conseqüentemente, maior volume de pasta adicionado para atingir a porosidade de 30%. Assim, a série U foi a que apresentou resistência mecânica máxima, resultando em um valor médio de 10,8 MPa. As séries D e C, por apresentarem uma distribuição de grãos contínua, necessitaram de um menor consumo de cimento para atingir a porosidade de projeto, levando assim a um desempenho mecânico inferior. No entanto, é possível verificar que a intensidade de consumo de cimento variou significativamente dentro do grupo P30. Os concretos D e C apresentaram os menores índices, demonstrando que essas misturas demandaram menor consumo de cimento para cada unidade de resistência mecânica.

Para a série P20, a resistência mecânica apresentou uma variabilidade maior, verificando-se valores médios no intervalo de 17 a 26 MPa. Ao contrário dos concretos P30, a resistência mecânica não foi influenciada diretamente pelo consumo de cimento. As misturas com agregado uniforme foram as que demandaram maior volume de pasta de cimento para atingir a porosidade de 20%, porém foram as que resultaram no menor desempenho mecânico. Como consequência, os concretos da série U foram os que apresentaram maior índice I_c , demonstrando menor eficiência no consumo de cimento. Conforme abordado anteriormente, as misturas binárias (série D) promoveram um empacotamento de partículas de forma a densificar a matriz granular do concreto permeável. Como consequência, essas misturas exigiram menor consumo de cimento para desenvolver a porosidade projetada. Embora o desempenho mecânico não tenha superado significativamente os concretos série U, as misturas D apresentaram maior eficiência no consumo de cimento. Na Figura 65 observa-se um menor índice I_c das misturas D sem prejuízo à resistência à compressão. A eficiência máxima ocorreu para a série D50, que correspondeu à mistura binária de maior massa unitária entre as frações 4,75 e 9,5 mm. Os agregados convencionais (série C) apresentaram um empacotamento de partículas similar às misturas binárias, resultando em consumos de cimento na mesma ordem de

grandeza. No entanto, observa-se que o desempenho mecânico dos concretos com agregados de distribuição contínua foi superior. Conforme observado na Figura 65, a resistência à compressão foi máxima para o concreto P/B, seguido do concreto produzido com pedrisco. Consequentemente, esses materiais foram os que apresentaram as menores intensidades de consumo de cimento, resultando em 17,9 e 20,5 kg.m⁻³/MPa, respectivamente. Para avaliar o desempenho global do concreto permeável, também é necessário analisar as características hidráulicas. Na Figura 66 estão ilustrados os resultados de condutividade hidráulica em função da resistência à compressão dos concretos série P20 e P30 produzidos com os agregados uniformes, descontínuos e contínuos.

Figura 66 – Comparação entre o desempenho mecânico e hidráulicos dos concretos permeáveis produzidos com agregados série U, D e C



É possível notar que concretos com um mesmo desempenho mecânico podem apresentar uma variabilidade considerável na condutividade hidráulica. Essa dispersão foi mais significativa para os concretos da série P30. Em geral, os concretos produzidos com agregados de menor dimensão foram os que apresentaram menor condutividade hidráulica. Entre as distribuições uniformes, a fração 9 mm foi a que gerou máximo desempenho hidráulico e mecânico. A redução da dimensão dos grãos não gerou nenhum benefício nas propriedades analisadas. Ainda para essa

porosidade, a composição de misturas binárias também não aumentou a eficiência do concreto permeável, uma vez que a condutividade hidráulica se tornou inferior à dos concretos da série U, sem aperfeiçoamento mecânico. Com agregados de distribuição contínua P e B, a condutividade hidráulica do concreto permeável foi intermediária, apresentando valores similares aos concretos D25 e D50. A mistura P/B, por outro lado, apresentou o maior coeficiente de permeabilidade entre os concretos analisados, porém com um desempenho mecânico inferior às demais misturas.

Para a porosidade de 20% é possível notar que o tipo de agregado possui menor influência na condutividade hidráulica. O concreto U9 continuou resultando no concreto de maior eficiência hidráulica, porém sem diferença considerável em relação aos concretos D25, D50, U6 e B, que apresentaram desempenho mecânico superior. A fração uniforme U4 permaneceu como a menor condutividade hidráulica, além de ser o concreto com a resistência à compressão mínima da série P20. Os concretos P e P/B, apesar de apresentarem coeficientes de permeabilidade intermediários, resultaram no melhor desempenho mecânico.

6.6 INFLUÊNCIA DO AGREGADO NA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Ao analisar os três tipos de distribuição granulométrica, observou-se que a porosidade não é um parâmetro suficiente para representar a condutividade hidráulica do concreto permeável. Concretos com uma mesma porosidade no estado fresco apresentaram desempenhos hidráulicos distintos, que foram associados às características dos agregados. Na literatura já foram desenvolvidos modelos e teorias relacionando as propriedades da estrutura de poros do concreto permeável com o coeficiente de permeabilidade (NEITHALATH; SUMANASOORIYA; DEO, 2010; YU *et al.*, 2019b). No entanto, muitos desses modelos se baseiam em características analisadas após a moldagem do concreto permeável, sendo difícil a sua estimativa a partir da caracterização dos materiais constituintes.

Dessa forma, neste estudo o intuito foi desenvolver um modelo de previsão de condutividade hidráulica simplificado, a partir das propriedades do agregado e dos parâmetros de dosagem. A partir dos dados de condutividade hidráulica medidos no permeâmetro de carga variável (carga inicial de 50 cm), diferentes parâmetros foram avaliados para compor o modelo de regressão. Neste estudo foram propostas variáveis compostas com o intuito de representar de forma simplificada as

características do agregado e da dosagem do concreto permeável. Uma vez que tanto o tamanho como a distribuição dos grãos do agregado são significativos na condutividade hidráulica, a área superficial (S) do material foi avaliada com um dos parâmetros do modelo. No entanto, os valores descritos na Tabela 9, obtidos pela metodologia de Panda, Das e Sahoo (2016), representam a área superficial por massa de agregado gráúdo. Como o consumo de agregado em cada concreto permeável depende da energia de compactação e das próprias características do agregado, esse valor pode não ser representativo. Dessa forma, é necessário corrigir a área superficial em função do consumo de agregado gráúdo no concreto permeável, conforme a Equação 12.

$$S_u = S \cdot C_{agg} \quad (12)$$

O parâmetro S_u foi denominado de área superficial unitária e representa a área de agregado presente em um volume unitário de concreto permeável. Outras variáveis consideradas no modelo de regressão foram o índice de vazios do agregado gráúdo (E_v) e o volume de pasta de cimento na mistura (V_p). Esses parâmetros foram avaliados na forma relativa à área superficial. A relação E_v/S_u foi utilizada com o intuito de representar as características dos vazios do agregado gráúdo, enquanto a relação V_p/S_u caracteriza a distribuição da pasta de cimento em torno da superfície dos grãos do agregado. A combinação dos dois parâmetros tem potencial em reunir as informações relevantes do agregado gráúdo e da dosagem de pasta de cimento na mistura de concreto permeável para estimar seu desempenho hidráulico.

Para o desenvolvimento do modelo de regressão, foram utilizados os dados experimentais desta etapa em conjunto com dados experimentais complementares. Para desenvolver um modelo dentro da faixa usual de porosidades, foram incluídos como dados complementares os concretos produzidos com os agregados U6 e U9 com 25% de porosidade e concretos produzidos com pedrisco com porosidades de 22,5 e 25%, além de repetições para as porosidades de 20 e 30%. O resumo do conjunto de dados está exposto na Tabela 13, sendo relacionados a porosidade, área superficial unitária, volume de pasta de cimento, volume de vazios do agregado gráúdo e a condutividade hidráulica obtida (considerando permeâmetro de carga variável com carga inicial de 50 cm).

Tabela 13 – Valores médios de condutividade hidráulica e dos parâmetros de entrada do modelo de regressão

Agregado	Porosidade (%)	Su (m ² /m ³)	Vp/Su (mm)	Ev/Su (mm)	k (cm/s)
U4	20,0	1330,2	0,23	0,39	0,17
	30,0	1368,6	0,14	0,36	1,17
U6	20,0	869,8	0,34	0,60	0,36
	25,0	904,5	0,28	0,55	0,64
	30,0	893,7	0,23	0,57	1,40
U9	20,0	554,4	0,53	0,92	0,46
	25,0	587,4	0,42	0,82	0,67
	30,0	571,8	0,35	0,87	1,51
D25	20,0	789,1	0,36	0,62	0,32
	30,0	815,2	0,20	0,58	1,63
D50	20,0	1019,6	0,26	0,46	0,34
	30,0	1041,1	0,16	0,44	1,49
D75	20,0	1219,0	0,23	0,39	0,24
	30,0	1239,3	0,15	0,38	1,27
Pedrisco	20,0	1148,2	0,23	0,41	0,30
		1125,6	0,24	0,42	0,29
	22,5	1170,7	0,20	0,39	0,32
	25,0	1160,3	0,17	0,40	0,88
		1136,4	0,19	0,42	0,75
	30,0	1169,9	0,13	0,39	1,55
		1142,7	0,14	0,41	1,36
Brita	20,0	498,2	0,55	0,96	0,38
	30,0	510,6	0,34	0,91	1,54
P/B	20,0	1058,6	0,25	0,44	0,24
	30,0	1085,9	0,12	0,41	1,84

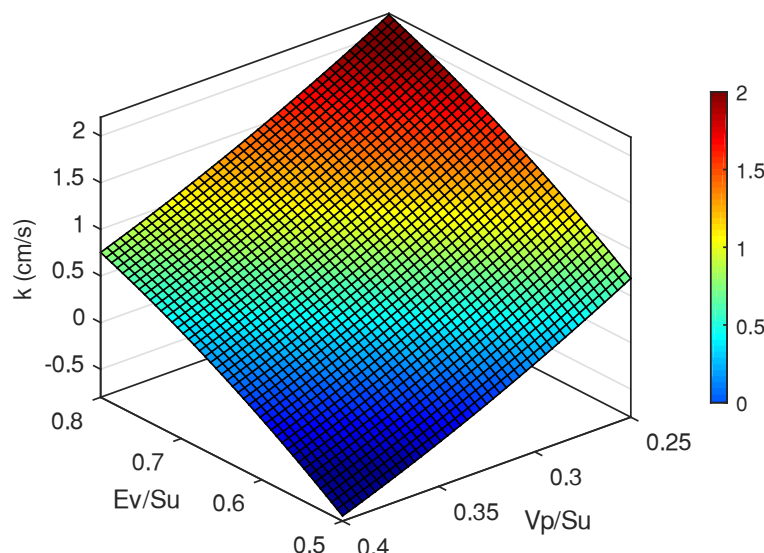
Com esse conjunto de dados foi possível desenvolver um modelo de regressão para estimativa da condutividade hidráulica do concreto permeável contemplando de forma simplificada as características do agregado graúdo. Obteve-se um erro padrão de 0,10 cm/s e R² ajustado de 0,9895, sendo o modelo exposto na Equação 13.

$$K = 11,1 \cdot Ev/Su - 18,0 \cdot Vp/Su - 4,7 \cdot (Ev/Su)^2 + 13,0 \cdot (Vp/Su)^2 \quad (13)$$

É possível identificar no modelo que a porosidade não foi utilizada como um preditor da condutividade hidráulica, porém foi possível estabelecer uma boa correlação da propriedade com os parâmetros selecionados. Isso pode ser explicado pelo fato de a porosidade ser um valor residual da diferença entre o volume de vazios do agregado (E_v) e o volume de pasta da mistura (V_p). Desta forma, a porosidade acaba sendo incorporada indiretamente no modelo pela associação dessas duas

variáveis na forma relativa à área superficial. A representação gráfica do modelo pode ser observada na Figura 67.

Figura 67 – Representação gráfica do modelo de regressão de condutividade hidráulica em função dos parâmetros E_v/S_u e V_p/S_u

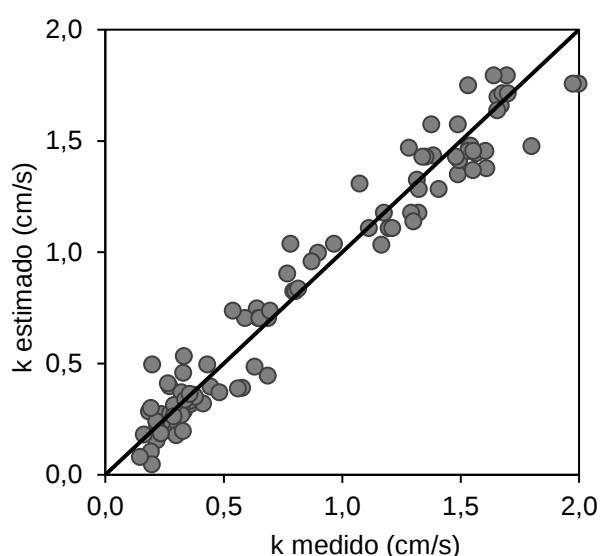


No modelo apresentado na Equação 13 a constante de regressão não foi incluída, uma vez que não apresentou significância estatística. A remoção da constante de regressão pode ser justificada, neste caso, pela presença do parâmetro E_v/S_u . Um índice de vazios (E_v) nulo representaria um agregado sem vazios, o que levaria a uma condutividade hidráulica também nula. Dessa forma, a presença da constante de regressão não seria coerente. Conforme ilustrado no modelo, a condutividade hidráulica é otimizada utilizando-se agregados com E_v/S_u máximo, o que pode ser alcançado com materiais de menor compactidade e/ou grãos de maior dimensão (ou seja, menor área superficial unitária S_u). Embora a energia de compactação não esteja explícita no modelo de regressão, parte do efeito da compactação também pode ser interpretada pelo parâmetro E_v/S_u . O aumento no esforço de compactação ocasiona uma aproximação dos grãos do agregado e, conseqüentemente, um menor índice de vazios. Outro efeito observado é o aumento no consumo de agregado por metro cúbico de concreto, que é um fator considerado na área superficial unitária, conforme Equação 12. Assim, variações na energia de compactação ainda podem ser avaliadas pelo modelo descrito na Equação 13, até certo limite. A compactação excessiva, por outro lado, pode gerar poros isolados, que

são de difícil previsão e poderiam levar a um erro superior ao utilizar o modelo de previsão.

A condutividade hidráulica também é controlada pela dosagem de volume de pasta de cimento, que está compreendido no parâmetro V_p/S_u . Para cada agregado existirá uma dosagem máxima de pasta de cimento (relação g/c) que poderá ser empregada em função do desempenho hidráulico desejado. Dessa forma, ainda que a porosidade não componha o modelo em questão, este tem utilidade na seleção de agregados e na dosagem do concreto permeável visando o controle da condutividade hidráulica. Na Figura 68 está ilustrada a comparação entre os valores medidos e estimados de condutividade hidráulica.

Figura 68 – Comparação entre condutividade hidráulica estimada e medida para o conjunto de dados utilizado no modelo de regressão



Conforme a Figura 68, foi possível estimar a condutividade hidráulica em uma faixa ampla e contemplando diferentes distribuições granulométricas do agregado. Dessa forma, os parâmetros utilizados têm potencial de representar as características de cada agregado, considerando assim as variações de condutividade hidráulica não previstas apenas pela porosidade. A vantagem da utilização de E_v/S_u e V_p/S_u como preditores é que esses parâmetros podem ser determinados ou estimados a partir da caracterização dos materiais constituintes do concreto permeável. O índice de volume de vazios (E_v) e a área superficial (S) podem ser obtidos pela caracterização da densidade, massa unitária e distribuição granulométrica do agregado. Embora seja necessário um conhecimento prévio do consumo de agregado para corrigir a área

superficial, é possível estimar esse parâmetro, conforme será abordado na próxima etapa experimental. O volume de pasta de cimento (V_p), por sua vez, é um parâmetro proveniente da dosagem do concreto permeável e que também pode ser estimado previamente.

6.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE A SELEÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO

Conforme constatado neste capítulo, o tamanho e distribuição granulométrica do agregado graúdo têm impacto direto nas propriedades do concreto permeável. Dessa forma, a seleção do material granular terá influência no processo de dosagem. Cada distribuição granulométrica apresenta particularidades no desenvolvimento de misturas de concreto permeável, devendo ser levadas em consideração na dosagem do material. As seguintes características foram observadas para os agregados avaliados neste estudo:

- a) Distribuição Uniforme: os agregados uniformes apresentam maior volume de vazios que as demais distribuições. No entanto, o desempenho hidráulico é mais afetado pela dimensão dos grãos. Agregados uniformes com maior dimensão apresentam maior condutividade hidráulica, fato associado à formação de poros de maiores no concreto permeável. Para uma porosidade fixa a dimensão possui menor efeito no desempenho mecânico, prevalecendo assim a seleção pelo critério hidráulico. Por apresentarem maior volume de vazios, esses agregados exigem maior consumo de cimento para atingir uma determinada porosidade de projeto, tornando o concreto permeável mais oneroso. Esses agregados podem ser vantajosos no projeto de misturas com alta porosidade, visto que nessa situação ainda mantém um volume de pasta de cimento mínimo para o desenvolvimento da resistência mecânica. No entanto, é importante considerar a viabilidade no uso desta distribuição na produção de concretos permeáveis, uma vez que demandaria um processamento adicional no preparo dos agregados;
- b) Distribuição Contínua: são agregados que, por natureza, apresentam menor volume de vazios. Essa estrutura granular mais compacta proporciona a dosagem de misturas de concreto permeável com menor consumo de cimento para atingir uma porosidade de projeto. Esse efeito é desejável principalmente nas misturas com baixa porosidade, não sendo constatado prejuízo ao

desempenho mecânico neste estudo. Apesar de estes agregados resultarem em concretos com uma estrutura de poros mais complexa, ainda é possível obter condutividades hidráulicas consideráveis. O desempenho hidráulico é afetado pela distribuição de tamanho dos grãos, que pode ser representada pela área superficial;

- c) Mistura de Agregados: assim como para o concreto convencional, a mistura de agregados pode otimizar a mistura de concreto permeável, proporcionando estruturas granulares mais compactas e que demandam menor cimento para atingir as porosidades desejadas. No entanto, a mistura de agregados pode ser prejudicial no desenvolvimento de misturas de alta porosidade, uma vez que a demanda de pasta de cimento será menor, resultando em zonas de contato entre agregados menos resistentes. O desempenho hidráulico continua sendo uma função da distribuição de tamanho dos grãos, apresentando comportamento similar aos agregados contínuos. O excesso de grãos de menor dimensão (maior área superficial) pode reduzir o desempenho hidráulico.

Conforme foi observado neste estudo, os agregados convencionais (distribuição contínua) podem ser adequados para a produção de concretos permeáveis. O processo de dosagem pode ser realizado com esses materiais, sendo possível desenvolver misturas na faixa usual de porosidades (20 a 30%) ainda mantendo um desempenho hidráulico mínimo. Os agregados uniformes, por sua vez, podem favorecer a condutividade hidráulica e o desempenho mecânico em algumas situações. Porém, esses materiais não são usualmente comercializados, exigindo uma etapa de preparo prévio que pode inviabilizar o seu uso. Nesses casos pode ser mais adequado analisar alternativas envolvendo agregados convencionais, como a mistura de agregados (redução do consumo de cimento) ou a remoção de grãos de menor dimensão (maior desempenho hidráulico).

7 ETAPA IV – DOSAGEM DE CONCRETO PERMEÁVEL PELO MÉTODO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO

Conforme abordado nas três primeiras etapas experimentais deste estudo, diversas características afetam as propriedades do concreto permeável, desde a seleção do agregado graúdo até características da sua produção, como o processo de cura e de compactação. Embora métodos de dosagem já tenham sido propostos na literatura, ainda existem restrições nas metodologias que limitam a sua aplicação de forma ampla. A elaboração de misturas de concreto permeável muitas vezes se inicia por meio da escolha de uma proporção agregado/cimento e relação água/cimento em faixas indicadas pela literatura ou por tentativas e ajustes no traço até a obtenção da porosidade ou características desejadas (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004; ACI, 2010; YAHIA; KABAGIRE, 2014; SONEBI; BASSUONI; YAHIA, 2016).

Dessa forma, uma das demandas no processo de dosagem é um método para o desenvolvimento de misturas de concreto permeável com o objetivo de atingir uma porosidade de projeto fixa. Controlando-se a porosidade, é possível estabelecer uma relação entre os parâmetros de dosagem e as propriedades mecânicas e hidráulicas do material. E isso deve ser realizado de uma forma simples, que possibilite a dosagem de forma prática e com flexibilidade na escolha do agregado e do método de compactação. Portanto, o objetivo desta etapa foi propor um método de dosagem de concreto permeável modificado, baseado no controle da porosidade no estado fresco. A metodologia apresentada foi desenvolvida a partir da relação entre os estados de compactação do agregado graúdo e da mistura de concreto permeável, sendo essa metodologia denominada neste estudo de método do grau de compactação.

7.1 MÉTODO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO

O método do grau de compactação, desenvolvido neste estudo, consiste em um procedimento para relacionar as propriedades dos materiais constituintes do concreto permeável e projetar misturas com uma porosidade fixa. Na literatura já foram apresentados métodos para elaborar misturas com porosidade controlada, porém isso era obtido com o uso de ábacos ou coeficientes restritos a um tipo de agregado ou pela correção da energia de compactação. O método de dosagem

descrito na ACI 522R (ACI, 2010) é uma das metodologias apresentadas, consistindo em um procedimento simples para desenvolver misturas de concreto permeável. Por meio de relações volumétricas, a dosagem de pasta de cimento é realizada a partir do desempenho hidráulico desejado. No entanto, a principal limitação do método é a restrição quanto aos tipos de agregado que podem ser utilizados. Além disso, poucas informações são fornecidas a respeito da energia de compactação e como esta afeta o processo de dosagem.

Conforme observado na Etapa III, o concreto permeável é influenciado diretamente pelas características do agregado graúdo, principalmente pelo índice de volume de vazios. Dessa forma, para um método de dosagem ser de aplicação prática, deve permitir o ajuste da mistura para os agregados disponíveis localmente. Além disso, a porosidade não pode ser alcançada pela variação da energia de compactação, uma vez que esta geralmente é um parâmetro pré-definido e de maior dificuldade no seu ajuste. Assim, a dosagem de concreto permeável deve ser realizada para atender qualquer energia de compactação, uma vez que esta pode ser limitada pelos equipamentos disponíveis para a execução do pavimento ou de peças pré-fabricadas. Neste estudo foi proposta uma metodologia de dosagem volumétrica modificada a partir dos métodos ACI 522R (ACI, 2010), NRMCA (2019) e Nguyen *et al.* (2014). Um teste de compactação foi proposto com o objetivo de caracterizar a resposta da mistura de concreto permeável (e do agregado graúdo utilizado) a uma determinada energia de compactação. Com esse teste é possível relacionar os principais parâmetros do agregado graúdo e desenvolver uma mistura de concreto permeável com porosidade pré-definida.

7.1.1 Descrição do Método

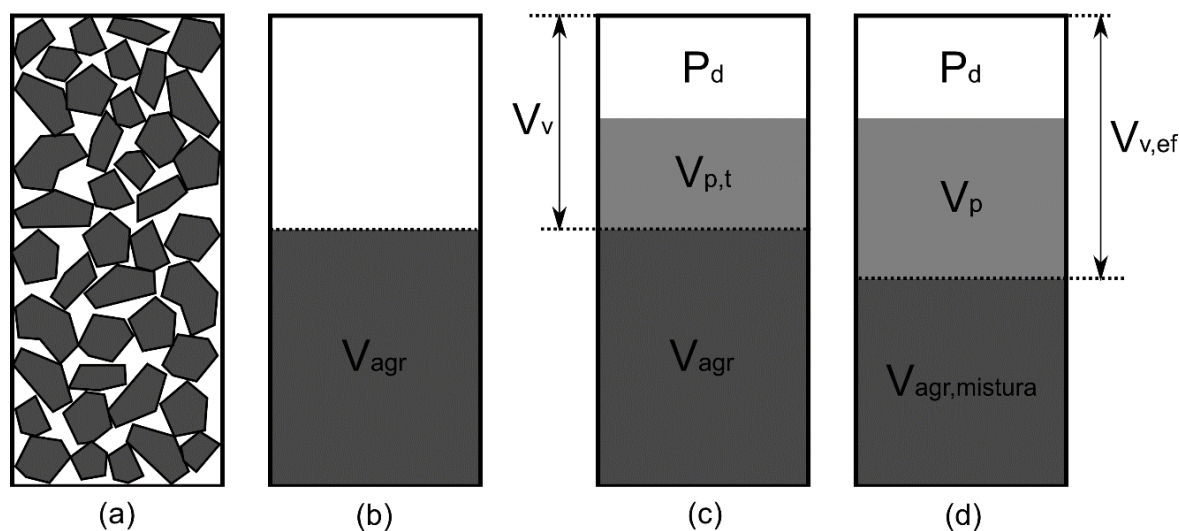
O método do grau de compactação foi desenvolvido a partir de relações volumétricas entre os materiais constituintes do concreto permeável, permitindo o uso de caracterizações físicas usuais destes. A metodologia foi proposta para misturas de concreto permeável convencionais, sendo possível também a inclusão de agregado miúdo. O desenvolvimento das equações propostas está detalhado a seguir, sendo as variáveis utilizadas descritas na Tabela 14.

Tabela 14 – Nomenclatura dos parâmetros utilizados no método do grau de compactação

Parâmetro	Unidade	Descrição
a/c	-	Relação em massa água/cimento
C_{agg}	g/cm^3	Consumo de agregado graúdo por volume unitário de concreto
C_{cim}	g/cm^3	Consumo de cimento por volume unitário de concreto
d_{agg}	g/cm^3	Densidade do agregado graúdo
d_{agm}	g/cm^3	Densidade do agregado miúdo
d_{cim}	g/cm^3	Densidade do cimento
G_c	-	Grau de compactação do agregado graúdo
m/c	-	Proporção em massa agregado miúdo/cimento
MU_c	g/cm^3	Massa unitária do agregado graúdo no estado compactado
P_d	%	Porosidade intergranular de projeto
V_p	%	Volume de pasta de cimento de projeto
$V_{p,t}$	%	Volume de pasta de cimento teórico
V_v	%	Volume de vazios do agregado graúdo no estado compactado
$V_{v,ef}$	%	Volume de vazios efetivo do agregado graúdo
$\rho_{f,est}$	g/cm^3	Massa específica estimada no estado fresco

De forma simplificada, um agregado graúdo no estado compactado é composto por um volume sólido proveniente dos grãos do material granular (V_{agr}) e um volume de vazios (V_v), que corresponde aos espaços intergranulares (Figura 69a e b).

Figura 69 – Relações volumétricas entre o agregado, pasta de cimento e porosidade no concreto permeável



Teoricamente, na produção de um concreto permeável a pasta de cimento envolve os grãos de agregado, passando a ocupar parte dos vazios intergranulares V_v . Em uma condição ideal como essa, o volume de pasta de cimento poderia ser estimado de forma volumétrica pela diferença entre o índice de vazios V_v e a porosidade de projeto P_d (Figura 69c), conforme exemplificado na Equação 14.

$$V_{p,t} = V_v - P_d \quad (14)$$

Dessa forma, o volume de pasta teórico $V_{p,t}$ poderia ser determinado para qualquer agregado, desde que conhecido o índice de vazios V_v . No entanto, essa expressão seria válida somente se o agregado pudesse ser compactado ao máximo na mistura de concreto permeável, de forma que o consumo de agregado por metro cúbico de concreto fosse equivalente à massa unitária compactada do agregado. Porém, em uma compactação real do concreto permeável o comportamento do agregado difere da situação em que o seu índice de vazios é determinado. Isso ocorre pelo fato de que a presença da pasta de cimento entre os grãos do agregado dificulta a sua compactação. Portanto, em um volume unitário de concreto permeável o volume de agregado na mistura $V_{agr,mistura}$ será inferior. Consequentemente, haverá um aumento dos vazios intergranulares, que serão denominados neste estudo de volume de vazios efetivo do agregado $V_{v,ef}$.

Na Figura 69d observa-se que para compensar o menor volume de agregado na mistura é necessário um volume de pasta de cimento V_p superior para atingir a porosidade de projeto P_d . Assim, a Equação 14 pode ser reescrita para incluir o efeito de compactação do agregado, conforme apresentado na Equação 15.

$$V_p = V_{v,ef} - P_d \quad (15)$$

O volume de vazios efetivo $V_{v,ef}$ depende de características como o tamanho e distribuição granulométrica do agregado graúdo, consistência da pasta de cimento e a energia de compactação empregada. Considerando a Figura 69d, o volume de vazios efetivo pode ser descrito pela Equação 16.

$$V_{v,ef} = 1 - V_{agr,mistura} \quad (16)$$

Considerando a densidade do agregado graúdo d_{agg} , é possível modificar essa expressão, resultando na Equação 17.

$$V_{v,ef} = 1 - \frac{C_{agg}}{d_{agg}} = \frac{d_{agg} - C_{agg}}{d_{agg}} \quad (17)$$

A Equação 17 resulta em uma relação similar ao procedimento para determinação do índice de vazios de agregados graúdos, conforme descrito na NBR 16972 (ABNT, 2021c). No entanto, na Equação 17 é utilizado o consumo de agregado por metro cúbico de concreto permeável (C_{agg}) para calcular o volume de vazios efetivo. Para correlacionar o estado de compactação do agregado no seu estado isolado e dentro da mistura de concreto permeável será utilizado um índice denominado neste estudo de grau de compactação do agregado (G_c), conforme a Equação 18.

$$G_c = \frac{C_{agg}}{MU_c} \quad (18)$$

O grau de compactação permite relacionar o comportamento do agregado na mistura de concreto permeável com a sua massa unitária compactada (MU_c), que é um parâmetro de fácil determinação e já utilizado na caracterização de agregados. Conhecendo-se o coeficiente G_c , é possível estimar o volume de pasta de cimento necessário por meio de relações volumétricas. O índice de vazios efetivo do agregado no concreto pode reescrito na forma da Equação 19.

$$V_{v,ef} = \frac{d_{agg} - MU_c \cdot G_c}{d_{agg}} \quad (19)$$

d_{agg} – densidade aparente do agregado (ASTM C127, 2015), quando utilizado no estado seco

d_{agg} – densidade seca do agregado (NBR 16917, 2021b), quando saturado com superfície seca.

Conhecendo-se o volume de vazios efetivo do agregado, é possível calcular o volume de pasta de cimento necessário para alcançar a porosidade de projeto no estado fresco utilizando-se a Equação 15. O volume de pasta de cimento no concreto permeável é composto pelo volume de cimento, água e agregado miúdo, quando este

for utilizado. Partindo-se dessa relação, o consumo de cimento do concreto pode ser definido pela Equação 20.

$$C_{\text{cim}} = \left(\frac{V_p/100}{1/d_{\text{cim}} + a/c + (m/c)/d_{\text{agm}}} \right) \quad (20)$$

O consumo de agregado por metro cúbico de concreto pode ser estimado com auxílio do grau de compactação, conforme descrito na Equação 21.

$$C_{\text{agg}} = G_c \cdot MU_c \quad (21)$$

Por fim, a proporção em massa agregado graúdo/cimento (g/c) pode ser obtida pela relação entre o consumo de agregado e o consumo de cimento, conforme a Equação 22.

$$g/c = \frac{C_{\text{agg}}}{C_{\text{cim}}} \quad (22)$$

Por meio das relações obtidas, a massa específica aparente do concreto também pode ser estimada ($\rho_{f,\text{est}}$), conforme a Equação 23.

$$\rho_{f,\text{est}} = \left(1 + \frac{1}{g/c} + \frac{a/c}{g/c} + \frac{m/c}{g/c} \right) MU_c \cdot G_c \quad (23)$$

A partir da sequência de equações desenvolvidas neste tópico é possível determinar o traço do concreto permeável (representado pela relação g/c) partindo-se de uma porosidade de projeto P_d e selecionando-se a relação a/c e o teor de agregado miúdo m/c. A relação a/c pode ser definida inicialmente para ajustar a consistência da pasta de cimento com o objetivo de proporcionar a cobertura dos agregados de forma homogênea e sem ocorrência de drenagem da pasta. Neste estudo foi adotado o teste de consistência desenvolvido por Nguyen *et al.* (2014), conforme será descrito posteriormente. O teor de agregado miúdo também deve ser previamente selecionado caso seja utilizado, sendo a sua definição limitada principalmente por critérios

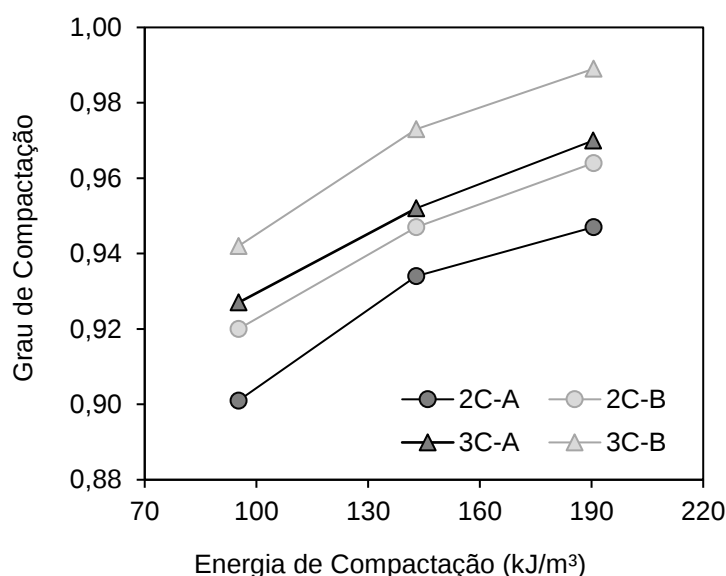
mecânicos. A definição do teor de agregado miúdo será abordada na etapa de otimização de misturas de concreto permeável.

O parâmetro fundamental para as relações desenvolvidas neste estudo serem válidas é o grau de compactação G_c . Esse índice é afetado pelas características dos materiais constituintes e pelo método de compactação adotado.

7.1.2 Grau de Compactação

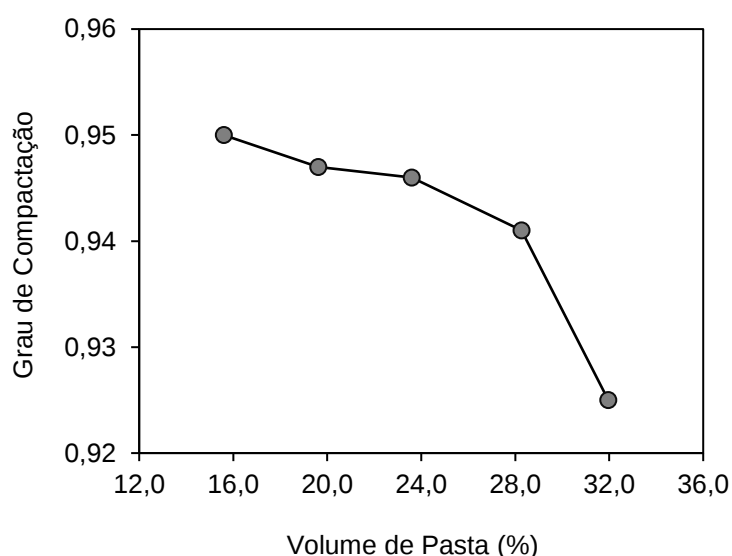
O grau de compactação é um parâmetro que foi inserido neste método com o intuito de relacionar o estado compactado do agregado e o seu comportamento quando utilizado na mistura de concreto permeável. Para os concretos moldados nas Etapas I e III, o G_c médio das misturas variou de 0,885 a 0,989. O fator de maior impacto nesse parâmetro é o método e energia de compactação empregados. Na Figura 70 está ilustrado o efeito da energia de compactação no índice G_c . Os dados na Figura 70 são referentes a fase de compactação na Etapa I deste estudo. Observa-se que o grau de compactação aumentou proporcionalmente à energia de compactação empregada na moldagem do concreto permeável. Além da energia, o número de camadas de compactação também foi significativo. Os concretos produzidos com 3 camadas (3C) apresentaram maior G_c em relação aos concretos produzidos com apenas 2 camadas (2C). Os efeitos da energia e número de camadas são justificados pelos mesmos princípios abordados na Etapa I.

Figura 70 – Efeito da energia e método de compactação no índice G_c



O volume de pasta de cimento presente em cada mistura também tem efeito significativo no G_c . A mistura B, produzida com menor volume de pasta, apresentou maior grau de compactação em relação à mistura A em todas as energias analisadas. A variação do grau de compactação em função do volume de pasta também pode ser observada na Figura 71.

Figura 71 – Grau de compactação médio em função do volume de pasta de cimento em concretos produzidos com pedrisco

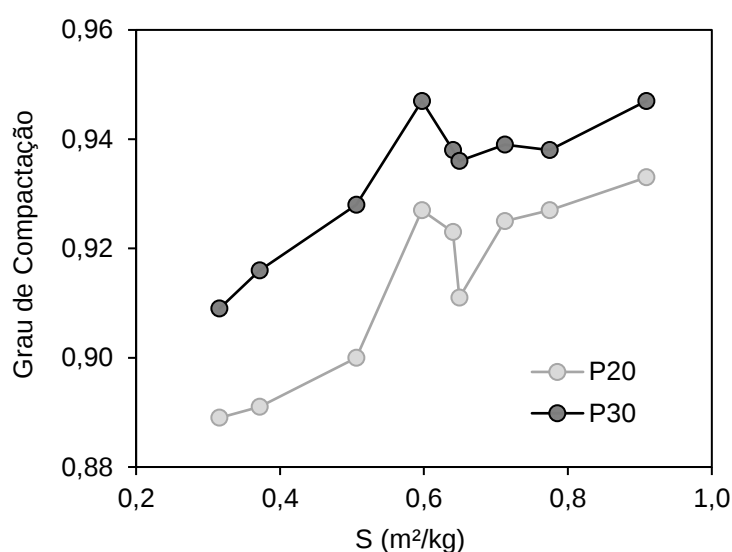


Observa-se um efeito direto do volume de pasta de cimento no grau de compactação. Os dados se referem a concretos produzidos com pedrisco e porosidade compreendida entre 15 e 30%. Os resultados ilustrados na figura reforçam a premissa do método do grau de compactação, discutido em 7.1.1. Com o aumento de pasta de cimento na mistura (e redução da porosidade) torna-se cada vez mais difícil compactar o concreto permeável. Como resultado, os grãos do agregado ficam mais afastados entre si, levando a um menor grau de compactação. O G_c variou de forma aproximadamente linear até 24% de volume de pasta de cimento, havendo um decrescimento não-linear a partir desse ponto. Esse fenômeno tem importância na dosagem de concretos permeáveis, impactando diretamente no consumo de cimento. Ao reduzir a porosidade de projeto do concreto permeável, além do volume de pasta necessário para ocasionar essa redução, um volume adicional é exigido para compensar a variação do grau de compactação.

O coeficiente G_c também varia em função do agregado utilizado, conforme exposto na Figura 72. É possível notar que há uma tendência de o grau de

compactação aumentar de forma proporcional à área superficial do agregado (S). Dessa forma, os agregados de menor dimensão foram compactados com maior facilidade, atingindo uma compactidade mais próxima ao seu valor máximo. É importante notar que esses agregados não são necessariamente os que apresentam estrutura mais compacta. O grau de compactação não avalia a compactidade absoluta de cada agregado, mas sim de forma relativa. Portanto, esse parâmetro não deve ser utilizado individualmente como critério de seleção de agregados.

Figura 72 – Grau de compactação médio em função da área superficial do agregado graúdo



Conforme exposto nas Figuras 70, 71 e 72, o grau de compactação varia significativamente em função de diversos fatores da mistura de concreto permeável. Esta é uma das dificuldades em se estabelecer um método para desenvolver misturas com porosidade fixa. Dessa forma, para se obter a precisão máxima do método é necessário determinar G_c experimentalmente. Isso pode ser realizado pelo teste de compactação.

7.1.3 Teste de Compactação e Aplicação do Método

O teste de compactação proposto neste estudo consiste em um procedimento experimental para avaliar o comportamento de uma mistura de concreto permeável no estado fresco e obter assim o coeficiente G_c . Para isso, é necessário desenvolver um traço piloto e submetê-lo à energia de compactação selecionada. O traço inicial deve ser elaborado para a porosidade que se deseja atingir, adotando-se um grau de

compactação inicial $G_{c,i}$. Para a aplicação do método do grau de compactação e execução do teste, são necessários os dados de entrada expostos no Quadro 10.

Quadro 10 – Dados de entrada no método do grau de compactação

Parâmetro		Origem
MU_c	Massa unitária do agregado graúdo	NBR 16972 (ABNT, 2021c)
d_{agg}	Densidade do agregado graúdo	NBR 16917 (ABNT, 2021b) ASTM C127 (ASTM, 2015)
d_{agm}	Densidade do agregado miúdo	NBR 16916 (ABNT, 2021a)
a/c	Relação água/cimento	Teste de drenagem da pasta de Nguyen <i>et al.</i> (2014) ou outro método
m/c	Relação agregado miúdo/cimento	Pré-definido de acordo com características da mistura
$G_{c,i}$	Grau de compactação inicial	Adotado em função das características do agregado e energia de compactação

Conforme exposto no Quadro 10, a relação a/c é um dado de entrada neste método. A sua determinação é realizada com base na consistência ideal da pasta de cimento, que deve promover a cobertura homogênea dos agregados sem ocasionar escoamento nos poros. Neste estudo foi adotado o teste de drenagem da pasta proposto por Nguyen *et al.* (2014) para integrar o método de dosagem na fase de seleção da relação a/c . O coeficiente $G_{c,i}$, por sua vez, deve ser inicialmente adotado para permitir a elaboração do traço piloto. Esse valor pode ser selecionado com base no conhecimento prévio dos agregados e método de compactação empregado ou adotado a partir de valores de referência. Na ausência de dados, sugere-se adotar um valor entre 0,88 e 0,98 para compactação com soquete Proctor. As Figuras 70, 71 e 72 podem ser utilizadas como referência para a seleção de um grau de compactação inicial para procedimentos experimentais similares. Os procedimentos para executar o teste de compactação estão descritos a seguir:

I) Teste de Drenagem da Pasta (adaptado de Nguyen *et al.* 2014)

- Selecionar relações g/c e a/c iniciais, próximas a valores usualmente empregados em concretos permeáveis. Segundo Nguyen *et al.* (2014) parte-se de valores $g/c = 4,0$ e $a/c = 0,28$;
- Utilizando as relações g/c e a/c selecionadas, misturar uma quantidade de concreto permeável suficiente para preencher uma peneira de ensaio de agregados, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009);

- c) Preencher uma peneira de abertura de 1,18 mm com a massa de concreto permeável e aplicar uma vibração mecânica por aproximadamente 15 segundos. O tempo de vibração pode ser ajustado em função da técnica de adensamento do concreto permeável;
- d) Inspeccionar o fundo da peneira e verificar se houve escoamento significativo da pasta de cimento. Caso não seja constatado escoamento, realizar um incremento de 0,02 na relação a/c e repetir o teste até que ocorra passagem da pasta de cimento pela malha da peneira;
- e) A quantidade de água ideal para o concreto permeável consiste na maior relação a/c que não apresente escoamento da pasta no fundo da peneira.

II) Definição do Traço Piloto

- a) Com os dados de caracterização do agregado graúdo e o $G_{c,i}$ adotado, calcular o volume de vazios efetivo do agregado com a Equação 19;
- b) Selecionar a porosidade de projeto P_d e determinar o volume de pasta necessário, conforme a Equação 15;
- c) Utilizando os dados dos materiais constituintes, relação a/c determinada no teste de drenagem e relação m/c (caso utilizado agregado miúdo), calcular o consumo de cimento e agregado com as Equações 20 e 21;
- d) Determinar o traço em massa (relação g/c) com auxílio da Equação 22;
- e) Estimar a massa específica do concreto com a Equação 23.

III) Teste de Compactação

- a) Com o traço piloto de concreto permeável determinado, calcular a quantidade de materiais necessária para preencher um molde característico. O molde característico utilizado no teste de compactação deve ser o mesmo empregado para moldar os corpos de prova para as demais caracterizações do concreto permeável. Neste estudo foi adotado o molde cilíndrico com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, uma vez que corresponde aos moldes utilizados na confecção de amostras para caracterização mecânica e hidráulica. Outros moldes podem ser utilizados, no entanto os resultados irão divergir para cada tipo e dimensão devido ao efeito de distribuição vertical da porosidade;
- b) Medir a massa do molde característico vazio M_m ;

- c) Misturar o concreto permeável e compactar a mistura no molde característico utilizando o método e energia de compactação adotados no estudo. Para moldes cilíndricos é recomendada a utilização de soquetes de compactação padronizados (Proctor ou Marshall). O procedimento de preenchimento do molde, compactação e acabamento superficial deve ser padronizado para reduzir a variabilidade da compactação;
- d) Medir a massa do molde contendo o concreto M_c ;
- e) Determinar a massa específica do concreto permeável com a Equação 24;

$$\rho_f = \frac{M_c - M_m}{V_m} \quad (24)$$

Sendo:

ρ_f – Massa específica no estado fresco do concreto permeável (g/cm³);

M_m – Massa do molde característico (g);

M_c – Massa do molde contendo o concreto permeável compactado (g);

V_m – Volume do molde característico (cm³).

- f) Calcular a densidade teórica do concreto permeável conforme especificado pela ASTM C1688M (ASTM, 2014a), utilizando a Equação 25;

$$d_t = \frac{M}{V} \quad (25)$$

Sendo:

d_t – Densidade teórica do concreto permeável (g/cm³);

M – Soma das massas dos componentes do concreto permeável (g);

V – Soma dos volumes de cada componente na mistura (cm³).

- g) Calcular a porosidade no estado fresco do concreto permeável utilizando a Equação 26;

$$P_f = \frac{d_t - \rho_f}{d_t} \quad (26)$$

- h) Calcular os consumos de cimento e agregado reais da mistura com as Equações 27 e 28;

$$C_{\text{cim},r} = \frac{\rho_f}{(1 + g/c + a/c + m/c)} \quad (27)$$

$$C_{\text{agg},r} = C_{\text{cim},r} \cdot g/c \quad (28)$$

Sendo:

$C_{\text{cim},r}$ – Consumo de cimento real na mistura (g/cm³);

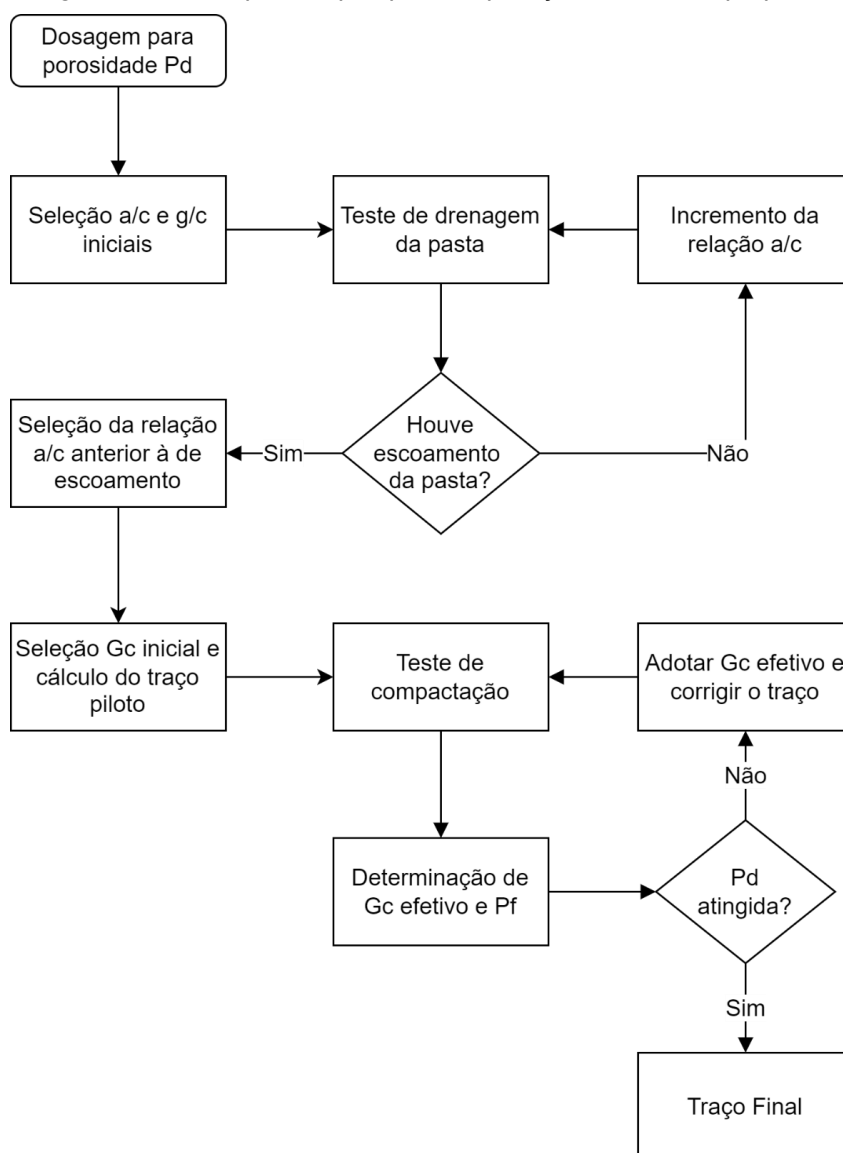
$C_{\text{agg},r}$ – Consumo de agregado graúdo real na mistura (g/cm³).

- i) Determinar o grau de compactação efetivo $G_{c,ef}$ utilizando a Equação 29.

$$G_{c,ef} = \frac{C_{\text{agg},r}}{MU_c} \quad (29)$$

Ao submeter o traço piloto ao teste de compactação, serão medidas a massa específica aparente e a porosidade no estado fresco, que podem ser comparadas aos valores estimados na dosagem (passo II). Caso sejam constatadas diferenças significativas na porosidade, o grau de compactação adotado não corresponde ao valor real da mistura para o agregado e energia de compactação utilizados. Neste caso, o traço de concreto permeável pode ser corrigido por meio do grau de compactação efetivo $G_{c,ef}$ (Equação 29), que é o resultado de interesse no teste de compactação. Adotando-se o grau de compactação efetivo, o traço final pode ser calculado seguindo o mesmo procedimento descrito no passo II do método. Caso a diferença entre $G_{c,i}$ e $G_{c,ef}$ seja elevada, recomenda-se repetir o teste de compactação para validar o coeficiente e aumentar a sua precisão. Caso sejam desenvolvidas misturas com outras porosidades, recomenda-se realizar o teste de compactação para cada uma delas. Ainda que o agregado e a energia de compactação sejam mantidos constantes, variações no grau de compactação podem ocorrer pela diferença de volume de pasta de cimento (Figura 71). A síntese do método do grau de compactação está ilustrada na Figura 73.

Figura 73 – Principais etapas para a aplicação do método proposto



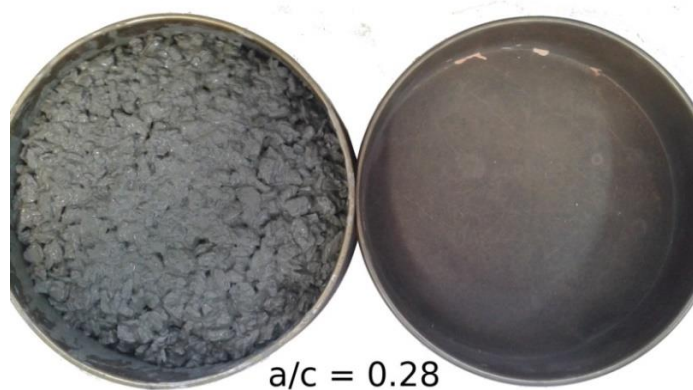
Conforme detalhado neste tópico, o método do grau de compactação proporciona uma metodologia sistematizada para o desenvolvimento de misturas com porosidade fixa. O controle do grau de compactação permite a correção do traço de concreto permeável de forma iterativa, dispensando assim a correção por meio da energia de compactação ou por tentativas experimentais. Além disso, o método desenvolvido é de simples aplicação, exigindo como dados de entrada propriedades dos agregados já empregadas na dosagem de concretos convencionais. O método também é aplicável a qualquer tipo de agregado, uma vez que o teste de compactação é responsável por caracterizar a resposta do material ao esforço de compactação para cada composição da mistura. Dessa forma, torna-se possível utilizar a porosidade no estado fresco como um parâmetro de dosagem e controle das propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável.

7.1.4 Aplicação do Método do Grau de Compactação

Com o intuito de exemplificar a aplicação do método do grau de compactação foram desenvolvidas três misturas de concreto permeável com o intuito de alcançar 20, 25 e 30% de porosidade. As misturas foram desenvolvidas com pedrisco, com caracterização descrita na Etapa I, na Figura 49 e Tabela 6. O agregado graúdo foi lavado previamente para eliminar impurezas, uma vez que estas interferem na demanda de água da mistura. Neste momento não foi utilizado agregado miúdo, uma vez que um método para avaliar a adição desse componente será abordado posteriormente.

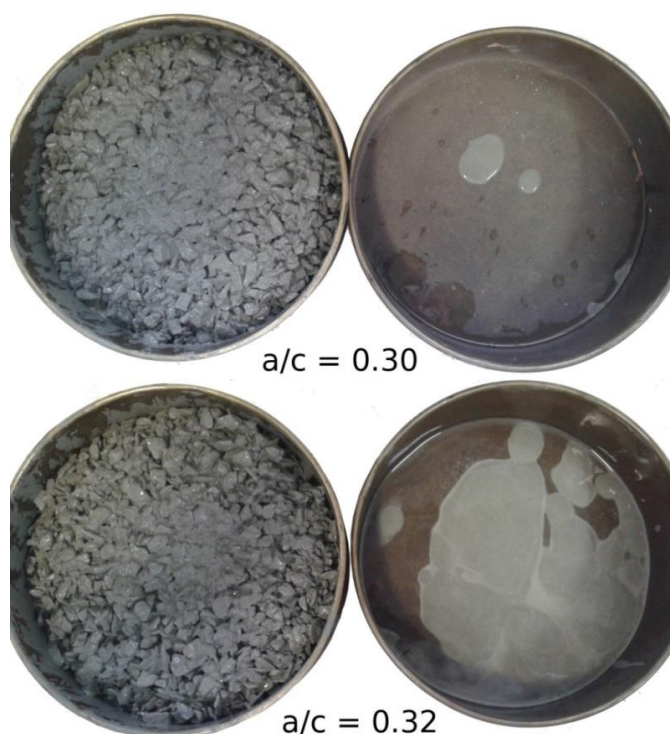
O primeiro passo foi a seleção da relação a/c utilizando-se a metodologia proposta por Nguyen *et al.* (2014). Partindo-se de uma relação a/c de 0,28 e g/c de 4,0, foi realizada a mistura manual do concreto permeável, conforme o procedimento de preparo de concretos convencionais. Ao realizar-se a vibração mecânica do concreto na peneira com abertura de 1,18 mm não foi observado escoamento da pasta de cimento, conforme ilustrado na Figura 74.

Figura 74 – Fundo da peneira e aspecto visual do concreto com relação a/c de 0,28 após vibração



Como não houve escoamento de pasta na primeira mistura, a relação a/c do concreto foi aumentada para 0,30. Após a vibração mecânica verificou-se que havia uma pequena quantidade de pasta de cimento no fundo da peneira (Figura 75). Para uma relação a/c de 0,32 a vibração mecânica provocou o escoamento de uma grande quantidade de pasta, cobrindo a maior parte do fundo da peneira (Figura 75). Neste caso, para quantidades de água superiores a 0,30 a pasta de cimento torna-se excessivamente fluida, havendo a possibilidade do escoamento da pasta pelo interior do concreto e, conseqüentemente, o tamponamento dos seus poros.

Figura 75 – Fundo da peneira e aspecto visual dos concretos permeáveis com relação a/c de 0,30 e 0,32 após vibração



Para maior precisão do teste, repetiu-se o ensaio para uma relação a/c de 0,29, também sendo verificado o escoamento de parte da pasta de cimento. Desta forma, foi adotada uma relação a/c de 0,28 para o desenvolvimento das misturas de concreto. Uma vez que o objetivo foi desenvolver concretos com três porosidades distintas, adotou-se um grau de compactação inicial para cada mistura prevendo-se o efeito do volume de pasta de cimento. Os valores foram adotados com base em experimentos prévios, conforme exposto na Tabela 15.

Tabela 15 – Parâmetros de entrada e traço piloto das misturas P20, P25 e P30

Parâmetro		P20	P25	P30
Grau de compactação inicial	$G_{c,i}$	0,932	0,947	0,950
Relação água/cimento	a/c	0,28	0,28	0,28
Volume de vazios efetivo (%)	$V_{v,ef}$	47,26	46,42	46,26
Volume de pasta (%)	V_p	27,26	21,42	16,26
Consumo de cimento (kg/m ³)	C_{cim}	456,3	358,5	272,2
Consumo de agregado (kg/m ³)	C_{agg}	1594,2	1619,7	1624,5
Relação agregado/cimento	g/c	3,49	4,52	5,97
Traço em massa	-	1:3,49	1:4,52	1:5,97
Massa específica estimada (g/cm ³)	$\rho_{f,e}$	2,178	2,079	1,973

Aplicando-se o procedimento descrito no passo II do item 7.1.2 obteve-se o consumo de materiais por metro cúbico de concreto e o traço em massa, conforme apresentado na Tabela 15. A massa específica também foi estimada para auxiliar no controle das misturas. Na sequência, a mistura manual dos três traços foi realizada, submetendo-os ao teste de compactação descrito no passo III do item 7.1.2. Nesta campanha experimental foi utilizada a compactação com soquete Proctor e energia de 142,9 kJ/m³, que corresponde à compactação ótima encontrada para o pedrisco (Etapa I). Após a realização do teste, as propriedades no estado fresco foram determinadas, conforme descrito na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados do teste de compactação das misturas P20, P25 e P30

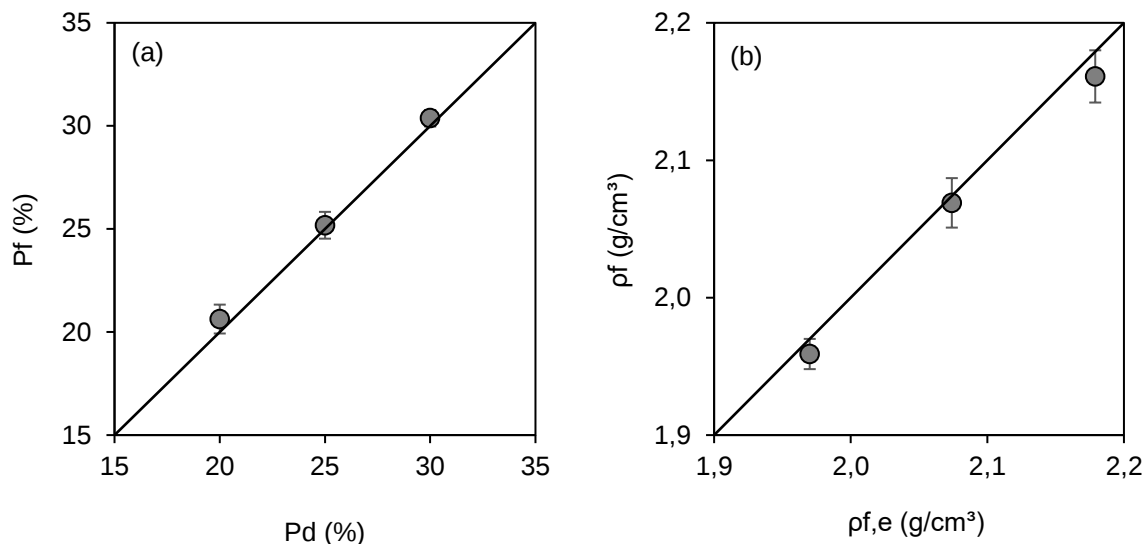
Parâmetro		P20	P25	P30
Densidade teórica (g/cm ³)	d_t	2,723	2,771	2,818
Massa específica medida (g/cm ³)	ρ_f	2,180	2,059	1,961
Porosidade no estado fresco (%)	P_f	19,93	25,72	30,43
Consumo de cimento real (kg/m ³)	$C_{cim,r}$	456,7	355,1	270,5
Consumo de agregado real (kg/m ³)	$C_{agg,r}$	1595,6	1604,2	1614,6
Grau de compactação efetivo	$G_{c,ef}$	0,9331	0,9381	0,9442
Traço final		1:3,50	1:4,37	5,81

Observa-se que para o traço piloto P20 houve pouca divergência entre a porosidade medida e projetada. Isto indica que o grau de compactação adotado para a mistura foi próximo ao valor efetivo no teste de compactação. Ainda que não necessário, a correção do traço resultaria em uma relação g/c de 3,50. Para as misturas P25 e P30 houve uma diferença pouco superior entre a porosidade medida e projetada. Essas divergências se devem ao grau de compactação efetivo ser inferior aos valores adotados, indicando que a estrutura granular da mistura apresentou menor compacidade do que o esperado. Assim, a correção do traço pode ser realizada adotando-se o grau de compactação efetivo respectivo de cada mistura e aplicando-se as equações descritas no item 7.1.2. Após a correção do traço, obteve-se relações g/c de 4,37 e 5,81 para as misturas P25 e P30, respectivamente. Como a divergência entre o grau de compactação inicial e efetivo nos três concretos foi inferior a 1%, uma segunda iteração no teste de compactação não foi necessária. Dessa forma, os traços finais obtidos na Tabela 16 já poderiam ser utilizados na produção dos concretos permeáveis projetados. Para caracterizar os traços obtidos foi realizada a moldagem

de 8 corpos de prova para cada mistura, aferindo-se as suas propriedades no estado fresco.

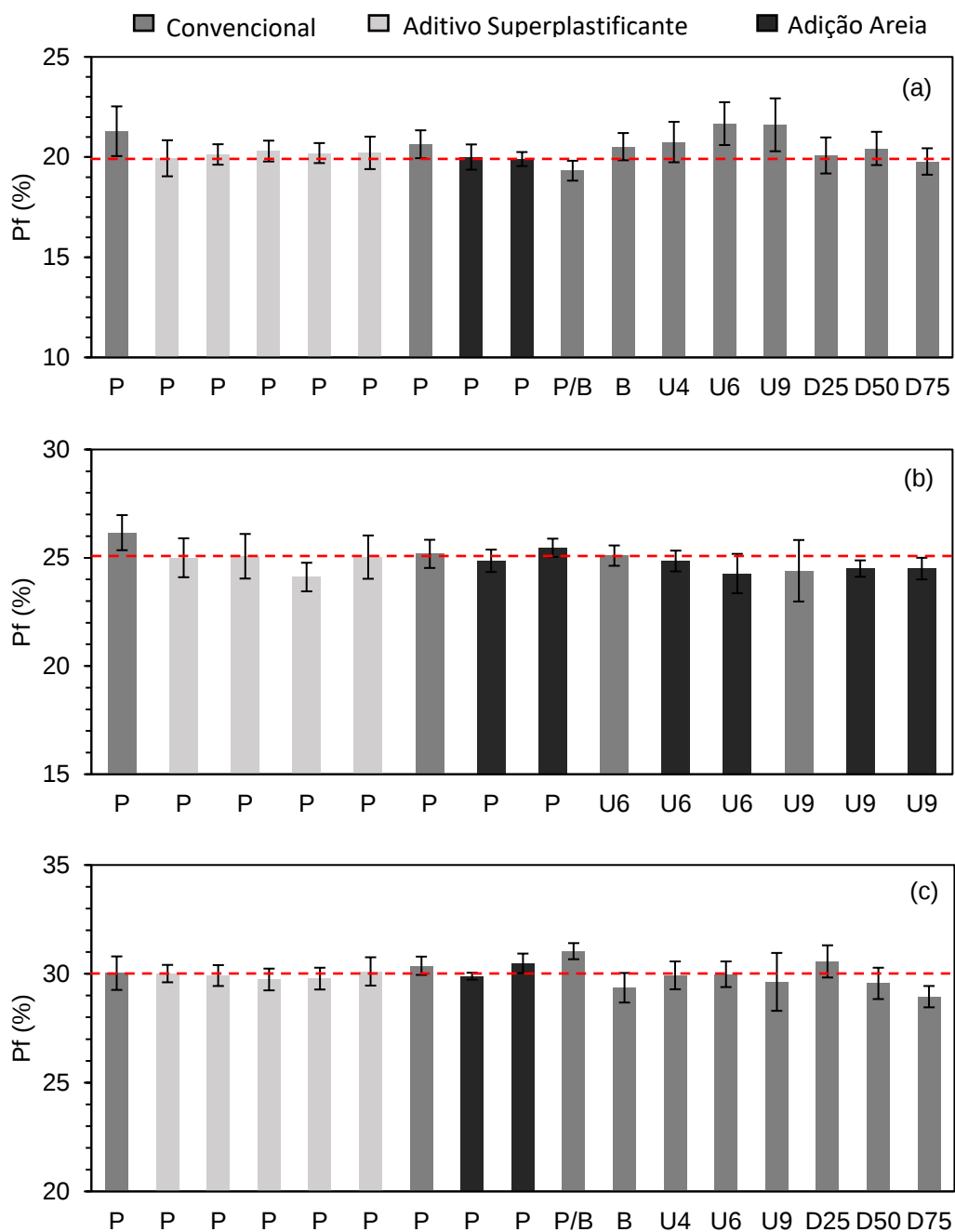
Na Figura 76 estão expostos os resultados médios de porosidade e massa específica medidos em função do valor estimado. Na Figura 76 é possível notar que as porosidades das misturas foram próximas aos valores de projeto, demonstrando coerência com o resultado do teste de compactação. A maior divergência ocorreu para o traço P20, que apresentou porosidade média de 20,6%. Uma maior variabilidade é esperada em concretos com alto teor de pasta de cimento, uma vez que este é um fator diretamente relacionado com a compactação da estrutura granular. De forma similar, a massa específica medida dos concretos foi similar aos valores estimados pela Equação 23, conforme ilustrado na Figura 76b. Isso demonstra que o grau de compactação é um parâmetro chave na elaboração de mistura de concreto permeável e a sua determinação é possível pelo teste de compactação proposto.

Figura 76 – Resultados de (a) porosidade no estado fresco e (b) massa específica no estado fresco comparados aos valores de projeto



O método do grau de compactação também foi utilizado na elaboração das misturas utilizadas nas demais etapas deste estudo. Na Figura 77 estão ilustradas as porosidades médias obtidas pela aplicação da metodologia no desenvolvimento de concretos permeáveis com diferentes características.

Figura 77 – Porosidade média de concretos permeáveis série (a) P20, (b) P25 e (c) P30



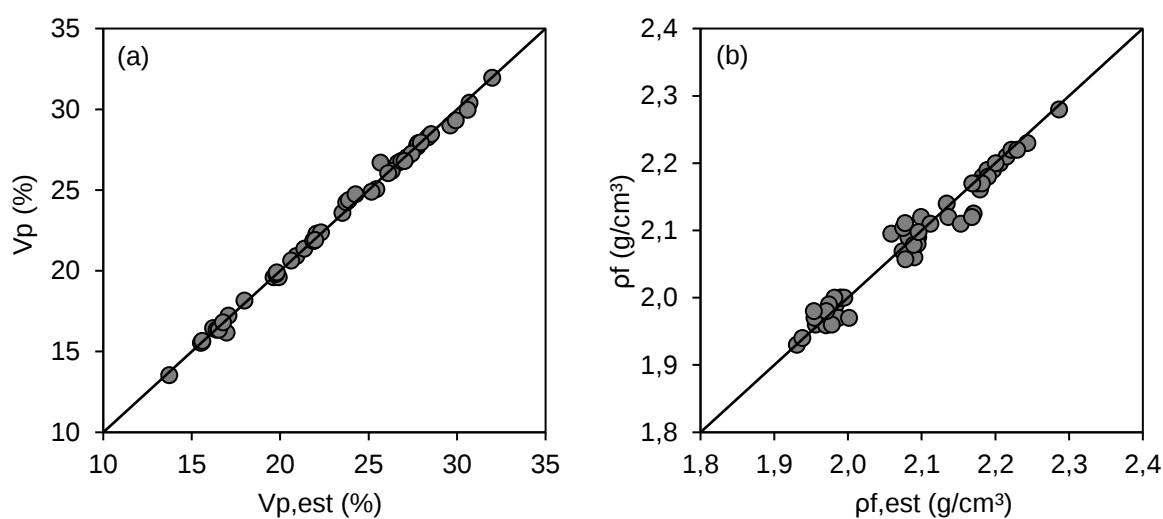
Notas: Porosidade média de 8 repetições. P – pedrisco; B – brita 1; P/B – mistura com 50% de pedrisco e 50% de brita 1; U4 – fração uniforme 4,75 mm; U6 – fração uniforme 6,3 mm; U9 – fração uniforme 9,5 mm; D25 – mistura binária 25% de 4,75 mm e 75% 9,5 mm; D50 – mistura binária 50% de 4,75 mm e 50% 9,5 mm; D75 – mistura binária 75% de 4,75 mm e 25% 9,5 mm.

Conforme apresentado na figura, foi possível desenvolver misturas de concreto permeável com agregados de diferentes composições granulométricas, atingindo-se porosidades próximas aos valores projetados. Embora em alguns traços tenha ocorrido uma divergência entre a porosidade medida e estimada, o erro

percentual médio das 48 misturas foi de 1,8%. Isso demonstra que o grau de compactação é um parâmetro que tem capacidade de representar como cada agregado se comporta na mistura de concreto para uma determinada energia de compactação. Ainda que a compactação do concreto permeável seja um procedimento sujeito a grande variabilidade, o desvio padrão médio foi de 0,70%. Isso indica que a compactação em laboratório com soquete Proctor é um método que tem capacidade de produzir amostras com um controle adequado de porosidade. Esse controle também contribui para a precisão na estimação do grau de compactação.

O método desenvolvido não se restringe apenas a misturas de concreto permeável convencional (sem aditivo, adições ou agregado miúdo). Na Figura 77 nota-se que também foi possível desenvolver misturas utilizando-se aditivo superplastificante e areia em sua composição. Isso foi possível pelo ajuste do volume de pasta de cimento individualmente em cada mistura, de acordo com as características do agregado, consistência da pasta de cimento e energia de compactação. Dessa forma, o grau de compactação engloba em um único coeficiente o efeito de diferentes fatores intervenientes no processo de produção do concreto permeável (g/c, a/c, m/c, MU_c). Na Figura 78a está ilustrada a comparação entre o volume médio de pasta de cimento das misturas e o valor estimado.

Figura 78 – (a) Volume de pasta de cimento e (b) massa específica no estado fresco em comparação a valores estimados



Conforme a figura, corrigindo-se o volume de vazios do agregado com o grau de compactação foi possível estimar o volume de pasta necessário para atingir a

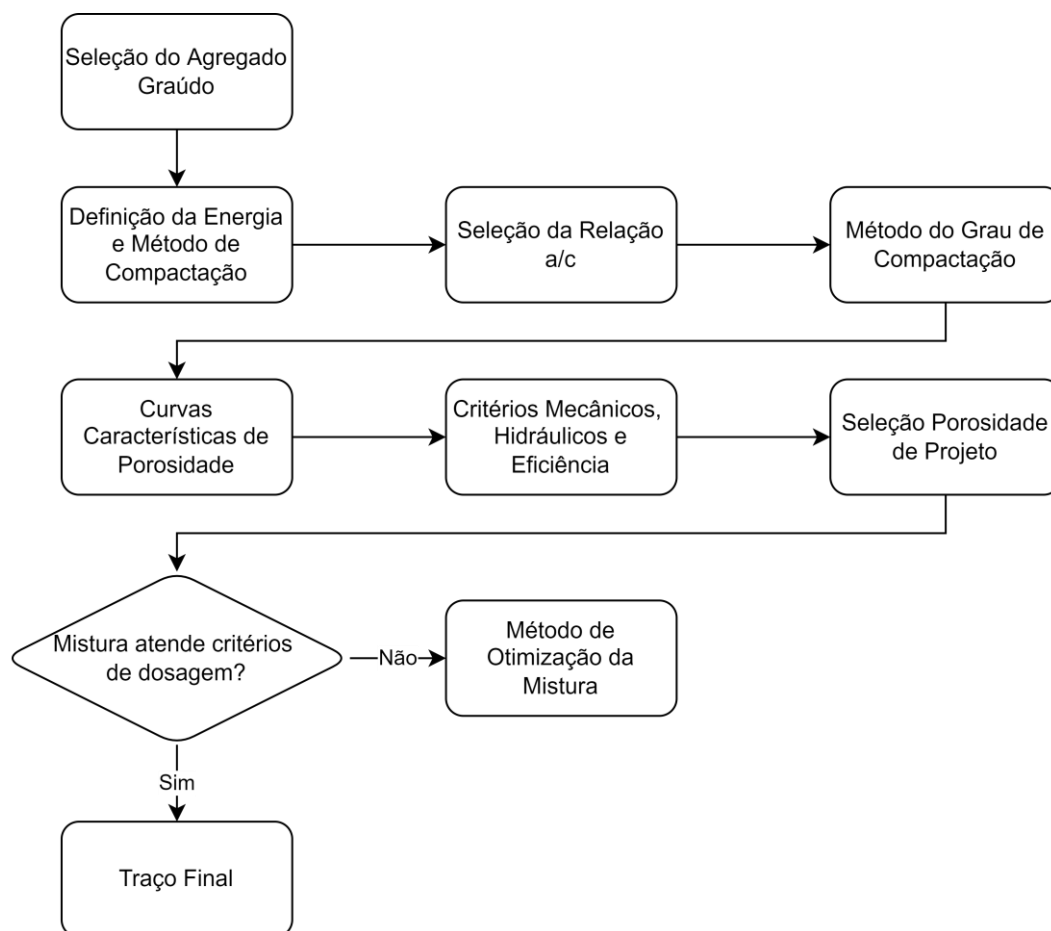
porosidade de projeto. O erro percentual médio na estimativa foi de 0,82%, não havendo relação direta deste com o volume de pasta de cimento na mistura. Dessa forma, o método se apresentou válido em uma faixa de volume de pasta considerável (13 a 32%), permitindo a obtenção de porosidades usualmente utilizadas na produção de concretos permeáveis (20 a 30%). Também foi possível realizar a estimativa da massa específica no estado fresco (Figura 78b), com erro percentual médio de 0,64%. Assim, a Equação 23 pode ser utilizada para estimar a massa específica do concreto permeável a partir dos parâmetros de dosagem.

Como foi exposto neste tópico, o método do grau de compactação é um procedimento teórico-experimental para elaborar misturas de concreto permeável controlando-se a porosidade no estado fresco. Uma vantagem que pode ser destacada neste método é a flexibilidade com relação ao tipo de agregado e energia de compactação empregados na produção do material. Isso torna a metodologia aplicável a diferentes materiais constituintes, dispensando ábacos ou coeficientes restritos a um material específico. Além disso, o método proposto permite caracterizar efeitos de difícil previsão teórica por meio de um teste de compactação simples. O grau de compactação torna-se um parâmetro fundamental para isso, permitindo assim o ajuste da mistura em cada condição experimental. Sendo assim, este método tem potencial aplicação no processo de dosagem de misturas de concreto permeável, permitindo o controle da porosidade e, conseqüentemente, das principais propriedades do material.

7.2 PROCEDIMENTO PARA DOSAGEM DE CONCRETOS PERMEÁVEIS

Conforme apresentado neste trabalho, a porosidade no estado fresco (intergranular) é um parâmetro que pode ser utilizado no controle das propriedades do concreto permeável. Por meio do método do grau de compactação, torna-se possível o ajuste da porosidade do material para controlar suas propriedades mecânicas e hidráulicas. Dessa forma, um método de dosagem foi estabelecido neste estudo aplicando-se esse procedimento para o controle do desempenho do concreto permeável. As principais etapas do método de dosagem estão relacionadas na Figura 79.

Figura 79 – Principais etapas do método de dosagem proposto



Conforme ilustrado na Figura 79, a dosagem do concreto permeável se inicia pela seleção e caracterização do agregado graúdo. Embora o método se adapte à diferentes agregados, as suas propriedades afetam diretamente outros parâmetros de dosagem. Dessa forma, o material deverá ser escolhido com base em critérios de desempenho do concreto permeável. O método e energia de compactação também devem ser selecionados de acordo com as características do processo de dosagem. Devem-se selecionar os métodos mais adequados à tipologia das amostras empregadas e o processo de produção do concreto permeável.

Após definidos os parâmetros fixos de dosagem (agregado graúdo, método e energia de compactação), a primeira etapa consiste na elaboração de traços piloto de concreto permeável para a construção de curvas características. As misturas deverão ser projetadas para atingir porosidades compreendidas na faixa de ajuste considerada para a dosagem. Os traços de cada mistura podem ser desenvolvidos aplicando-se

os testes de drenagem da pasta (seleção da relação a/c inicial) e de compactação (definição do grau de compactação), conforme abordado em 7.1.3.

Após a caracterização das misturas, modelos de desempenho mecânico, hidráulico e de consumo de cimento podem ser ajustados com a finalidade de construir curvas características em função da porosidade. Por meio das curvas características é possível controlar as propriedades do concreto permeável ajustando-se a porosidade do material. Dessa forma, uma porosidade de projeto pode ser definida para atender os critérios mecânicos e hidráulicos exigidos. O ajuste da porosidade é limitado principalmente pelo desempenho hidráulico mínimo do concreto permeável. Portanto, caso o desempenho mecânico não seja satisfeito, as misturas devem passar por um processo de otimização, conforme será abordado na Etapa V.

7.2.1 Seleção do Agregado e Energia de Compactação

Concretos permeáveis podem ser desenvolvidos com agregados de distribuições granulométricas variadas. É possível utilizar desde agregados convencionais até composições específicas, como frações uniformes e misturas binárias. Conforme abordado na Seção 7.1, o método do grau de compactação permite desenvolver misturas com porosidade fixa para cada tipo de agregado, independentemente da sua dimensão ou composição granulométrica. No entanto, a seleção do agregado tem impacto significativo na condutividade hidráulica alcançada para uma mesma porosidade e na eficiência no consumo de cimento para uma determinada resistência mecânica. Os seguintes critérios podem ser levados em consideração na escolha do agregado:

- a) Dimensão: agregados com maior dimensão geram concretos permeáveis com maior condutividade hidráulica;
- b) Distribuição Uniforme: resulta em maior índice de vazios, favorecendo a condutividade hidráulica (depende da dimensão). Porém, exige maior quantidade de pasta para alcançar uma determinada porosidade de projeto. Não é uma fração usualmente comercializada;
- c) Distribuição Contínua: apresenta maior eficiência no consumo de cimento, resultando em melhor desempenho mecânico para uma mesma porosidade. Ainda mantém condutividade hidráulica, porém pode ser prejudicada nas porosidades próximas ao limite inferior (15%);

- d) Mistura de Agregados: pode potencializar a eficiência no uso do cimento e desempenho mecânico. No entanto, esse efeito é menos significativo para porosidades elevadas. A condutividade hidráulica tende a ser inferior à dos materiais de origem.

O método e energia de compactação devem ser empregados conforme a técnica de execução do pavimento permeável. Os soquetes padronizados Proctor e Marshall têm sido empregados por gerar compactação mais homogênea e próximas das condições de campo (GAEDICKE; MARINES; MIANKODILA, 2014). No caso de peças pré-fabricadas (placas ou *pavers*), a compactação deve ser compatível com aquela utilizada no processo de produção destas. Caso exista possibilidade no ajuste do nível de compactação, um estudo pode ser realizado para avaliar a energia ótima, conforme exemplificado na Etapa I. A energia ótima é aquela que gera o melhor desempenho do concreto permeável e permite explorar o maior potencial de cada mistura, sendo preferível na produção do material.

7.2.2 Seleção da Porosidade de Projeto

Como a porosidade afeta diretamente a resistência mecânica e o desempenho hidráulico, é um parâmetro que deve ser utilizado no controle das misturas de concreto permeável. A porosidade no estado fresco representa os poros intergranulares do material, sendo possível adotá-la tanto como parâmetro de dosagem como de aferição da propriedade logo após a compactação do concreto. Dessa forma, as propriedades do material podem ser descritas por meio de curvas características em função da porosidade como variável de dosagem.

A resistência mecânica do concreto permeável pode ser descrita como uma função inversamente proporcional à porosidade, desde que mantidas constantes as propriedades da matriz cimentícia. Embora modelos exponenciais sejam tradicionalmente utilizados para descrever a relação porosidade-resistência em materiais homogêneos (MEHTA; MONTEIRO, 2008), em concretos permeáveis esse comportamento tem sido descrito por relações lineares (BHUTTA; TSURUTA; MIRZA, 2012; CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2018c; SAHDEO *et al.*, 2020; SHEN *et al.*, 2021). Portanto, a resistência mecânica do concreto pode ser representada pela Equação 30.

$$f = c_1 \cdot P + c_2 \quad (30)$$

Sendo:

f – Resistência mecânica analisada;

P – Porosidade no estado fresco;

c₁ e c₂ – Constantes de regressão.

Para a condutividade hidráulica, por outro lado, não há consenso no modelo de maior representatividade. Já foram estabelecidas relações lineares (GAEDICKE; MARINES; MIANKODILA, 2014; ZHANG, Y. *et al.*, 2020), exponenciais (HUANG *et al.*, 2021) e regressões baseadas na equação de Kozeny-Carman (ZHONG *et al.*, 2016; CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016b). Parte da variabilidade no comportamento hidráulico em função da porosidade pode ser atribuída a ausência de um ensaio padronizado na aferição da condutividade hidráulica. Conforme constatado anteriormente, o modelo de permeâmetro, carga hidráulica e tipo de ensaio (carga constante, variável ou anel de infiltração) interferem na condutividade hidráulica, o que deve ser levado em consideração também na dosagem de concretos permeáveis. Neste estudo o modelo exponencial tem apresentado ajuste coerente na relação porosidade-condutividade hidráulica para os métodos de caracterização empregados, sendo possível aplicar a Equação 31.

$$k = c_3 \cdot \exp(c_4 \cdot P) \quad (31)$$

Sendo:

k – Condutividade hidráulica ou taxa de infiltração;

c₃ e c₄ – Constantes de regressão.

Para a caracterização da condutividade hidráulica em amostras cilíndricas recomenda-se a utilização de permeâmetros de carga variável, que permitem uma caracterização completa de forma simples, ou do anel de infiltração conforme a ISO 17785-1 (ISO, 2016). Para amostras prismáticas deve-se utilizar o teste do anel de infiltração, que é o único normatizado a nível nacional e internacional (NBR 16416 e ASTM C1701M).

Outra propriedade de relevância na dosagem de concretos permeáveis é o consumo de cimento, que impacta diretamente no custo de produção do material. À medida que a porosidade é reduzida para realizar o aprimoramento mecânico, um maior consumo de cimento é exigido para fornecer volume de pasta à mistura. Isso pode inviabilizar a produção do concreto permeável, especialmente próximo ao limite inferior de porosidade (15 a 20%). O consumo de cimento é controlado pelo volume de pasta de cimento, que é proporcional à porosidade de projeto em concretos produzidos com mesma relação a/c e teor de agregado miúdo m/c. Dessa forma, é possível aplicar a Equação 32 para representar o consumo de cimento em função da porosidade.

$$C_{\text{cim}} = c_5 \cdot P + c_6 \quad (32)$$

Sendo:

C_{cim} – Consumo de cimento;

c_5 e c_6 – Constante de regressão.

As três curvas características podem ser construídas para o agregado graúdo e método de compactação empregados, permitindo selecionar a porosidade de acordo com o desempenho desejado. Para o ajuste das curvas é necessário obter experimentalmente dados referentes a três porosidades distintas, abrangendo a faixa usual de dosagem. Recomenda-se como pontos iniciais traços com porosidades de 20, 25 e 30%, podendo esse intervalo ser extrapolado em função do agregado, método de compactação e tipo de execução do pavimento. As misturas podem ser desenvolvidas aplicando-se o método do grau de compactação, obtendo-se assim o traço necessário para atingir cada porosidade.

A seleção da porosidade de projeto deverá ser realizada em função do desempenho necessário ao pavimento permeável. O primeiro critério que deve ser levado em consideração é a eficiência hidráulica do material. Para que o concreto permeável seja funcional é necessária uma condutividade hidráulica mínima, que deve prever possíveis reduções pelo efeito de colmatação ao longo da vida útil do material. A NBR 16416 (ABNT, 2015a), por exemplo, estabelece uma condutividade hidráulica mínima de 0,10 cm/s, medida pelo anel de infiltração no pavimento já instalado. Na

dosagem experimental em laboratório deve ser levado em consideração as diferenças no coeficiente de permeabilidade obtido nos permeâmetros, bem como a forma de execução do pavimento (compactado em campo ou pré-fabricado). Um desempenho hidráulico superior também pode ser desejado em pavimentos responsáveis por drenar uma área de contribuição elevada. Nesse sentido, um coeficiente de permeabilidade de projeto (k_d) pode ser definido em função do desempenho hidráulico desejado. O concreto permeável deverá apresentar uma porosidade mínima (P_{min}) para garantir essa condição, podendo ser definida pelo modelo descrito na Equação 31.

O segundo critério a ser verificado é o desempenho mecânico. A resistência necessária deverá ser definida de acordo com o dimensionamento estrutural do pavimento. A NBR 16416 (ABNT, 2015a) estabelece de forma simplificada critérios mecânicos em função do tipo de tráfego (veículos ou somente pedestres) e da forma de execução do pavimento (moldado no local, peças de pavimentação ou placas pré-fabricadas). Esses requisitos se limitam a tráfego leve, sendo necessário um dimensionamento estrutural do pavimento na avaliação de outras condições de carregamento. Dessa forma, uma resistência de projeto (f_d) pode ser estabelecida, definindo-se a porosidade de projeto (P_d) necessária para alcançá-la por meio da Equação 30. No entanto, é necessário avaliar os dois critérios em conjunto, sendo possível ocorrer duas situações distintas:

- a) $P_d > P_{min}$: a resistência mecânica de projeto é alcançada mantendo-se um desempenho hidráulico mínimo;
- b) $P_d < P_{min}$: a resistência mecânica pode ser alcançada com um desempenho hidráulico inferior ao de projeto. Nesse caso deve ser avaliado o aprimoramento mecânico da matriz cimentícia adotando-se P_{min} como a porosidade de projeto.

Ainda que ambos os critérios sejam atendidos no processo de dosagem, é essencial também verificar o consumo de cimento das misturas. Concretos com baixa porosidade podem gerar traços com excesso de cimento, podendo inviabilizar a sua aplicação. A Equação 32 permite uma análise prévia da mistura, permitindo a determinação do consumo de cimento para a porosidade de projeto selecionada. Para misturas com consumo excessivo de aglomerante pode ser considerada a adição de agregado miúdo para redução do custo do material, conforme será discutido na etapa de otimização da mistura.

7.2.3 Aplicação do Método de Dosagem

Para a demonstração do método de dosagem foi utilizado cimento Portland CPII-F32 e agregado graúdo comercializado como pedrisco, com propriedades físicas expostas na Tabela 17.

Tabela 17 – Propriedades físicas obtidas na caracterização do agregado graúdo

Absorção (%)	Aparente* (g/cm ³)	Densidade		Massa Unitária		Índice de Volume de Vazios	
		Superfície Saturada (g/cm ³)	Seca (g/cm ³)	Estado Solto (g/cm ³)	Estado Compactado (g/cm ³)	Estado Solto (%)	Estado Compactado (%)
0,66	3,02	2,98	2,96	1,56	1,71	48,49	43,45

Nota: *Densidade aparente excluindo-se poros permeáveis a água, calculada conforme ASTM C127 (ASTM, 2015).

O pedrisco foi empregado por ser um agregado convencional e que não necessita de nenhum preparo prévio para ajustar sua composição granulométrica. Embora agregados contínuos de maior dimensão (como a brita 1) também possam ser utilizados, nesta fase optou-se pelo pedrisco por apresentar dimensão mais compatível com os moldes utilizados e resultarem em menor variabilidade experimental. Essa campanha experimental foi conduzida utilizando-se moldes cilíndricos (10x20 cm) para a caracterização do concreto permeável, empregando-se a compactação com soquete Proctor. Conforme definido anteriormente, a compactação ótima para o pedrisco utilizado neste estudo foi equivalente a 142,9 kJ/m³.

Seguindo o fluxograma apresentado na Figura 79, o método de dosagem foi utilizado para desenvolver misturas de concreto com os agregados citados anteriormente. O primeiro passo foi a aplicação do método do grau de compactação para elaborar as misturas que constituirão a curva característica do concreto permeável. No teste de drenagem da pasta de cimento obteve-se uma relação a/c ideal de 0,28, coerente com os resultados obtidos nas etapas anteriores. Para construir as curvas características do concreto permeável foram selecionadas as porosidades de 15, 20, 25 e 30%. Também foram desenvolvidos concretos com porosidades intermediárias de 17,5 e 22,5% para confirmar o comportamento nessa faixa de maior volume de pasta de cimento. Para executar o teste de compactação foram adotados valores iniciais de $G_{c,i}$, baseando-se em dados experimentais de

etapas anteriores. Na Tabela 18 estão descritos os parâmetros de projeto das misturas de concreto permeável e o traço piloto desenvolvido.

Tabela 18 – Traço piloto utilizado para execução do teste de compactação de cada mistura

Parâmetro		P15	P17,5	P20	P22,5	P25	P30
Grau de compactação inicial	$G_{c,i}$	0,93	0,93	0,95	0,94	0,96	0,95
Relação água/cimento	a/c	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Volume de vazios efetivo (%)	$V_{v,ef}$	46,62	46,80	45,75	46,19	44,86	45,77
Volume de pasta (%)	V_p	31,62	29,30	25,75	23,69	19,86	15,77
Consumo de cimento (kg/m ³)	C_{cim}	529,3	490,4	431,1	369,6	332,3	264,0
Consumo de agregado (kg/m ³)	C_{agg}	1611,9	1606,6	1638,2	1624,9	1665,4	1637,7
Relação agregado/cimento	g/c	3,05	3,28	3,80	4,10	5,01	6,20
Massa específica estimada (g/cm ³)	$\rho_{f,e}$	2,29	2,23	2,19	2,13	2,09	1,98
Traço em massa	-	1:3,05	1:3,28	1:3,80	1:4,10	1:5,01	1:6,20

Conforme observado na Tabela 18, para variar a porosidade de 15 a 30% foi necessário variar a relação g/c de 3,05 a 6,20. Realizando a mistura de cada um dos traços piloto foi possível executar o teste de compactação para validar o grau de compactação adotado. No teste foi medida a massa específica no estado fresco, permitindo a caracterização da mistura, conforme abordado na Tabela 19.

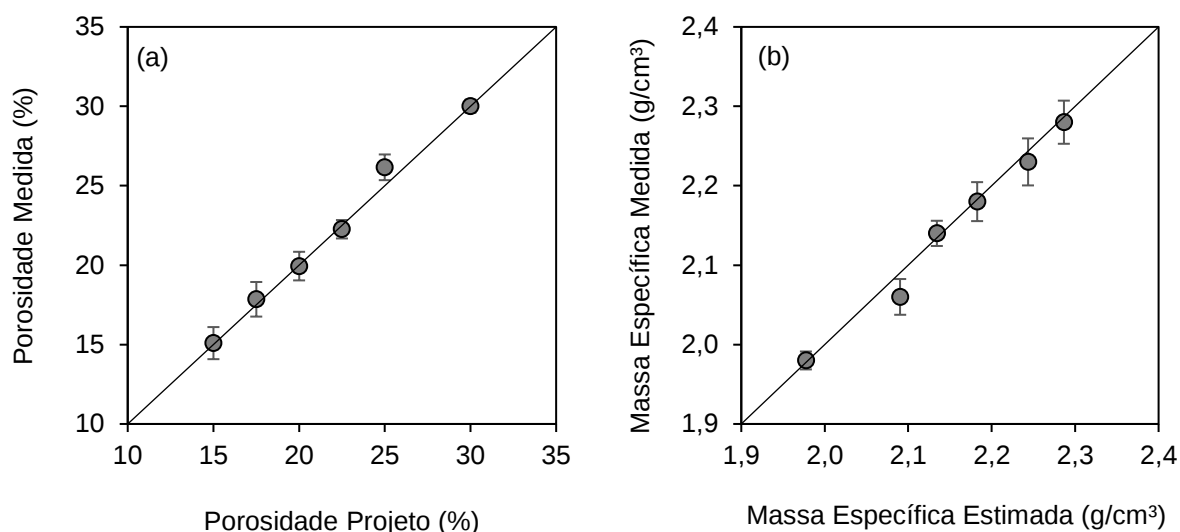
Tabela 19 – Resultados do teste de compactação das misturas

Parâmetro		P15	P17,5	P20	P22,5	P25	P30
Densidade teórica (g/cm ³)	d_t	2,69	2,71	2,74	2,75	2,79	2,82
Massa específica medida (g/cm ³)	ρ_f	2,27	2,27	2,15	2,14	2,09	1,98
Porosidade (%)	P_f	15,57	16,04	21,31	22,24	25,08	29,77
Consumo de cimento real (kg/m ³)	$C_{cim,r}$	525,7	499,1	424,0	397,9	332,0	264,8
Consumo de agregado real (kg/m ³)	$C_{agg,r}$	1601,1	1635,1	1611,3	1630,3	1663,6	1643,0
Grau de compactação efetivo	$G_{c,ef}$	0,9260	0,9457	0,9319	0,9429	0,9622	0,9503
Traço final		1:2,99	1:3,44	1:3,61	1:4,14	1:4,99	1:6,29

Após realizar o teste experimental, o grau de compactação efetivo foi calculado, permitindo assim determinar o traço final de cada mistura. Para avaliar as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável, foi realizada a moldagem de oito corpos de prova de cada mistura, utilizando-se os traços contidos na Tabela 19. Após a moldagem das amostras foi realizada a sua caracterização no

estado fresco para verificar a porosidade final obtida em cada mistura, conforme exposto na Figura 80.

Figura 80 – Comparação entre (a) porosidade de projeto e porosidade medida no estado fresco e (b) massa específica estimada e medida no estado fresco

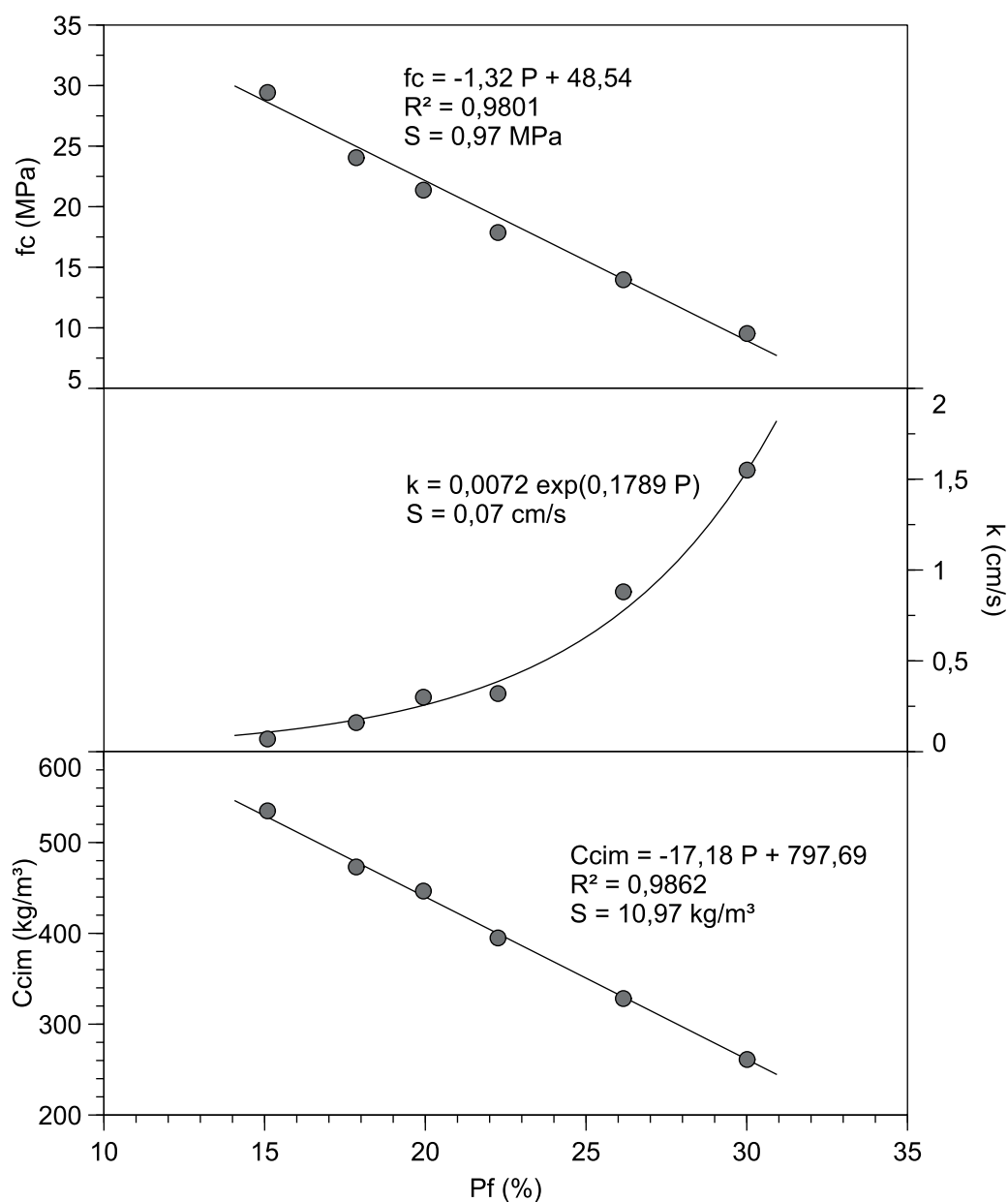


Conforme observado na Figura 80a, foi possível atingir com precisão as porosidades pré-estabelecidas para a construção das curvas características. A maior discrepância ocorreu para a mistura P25, sendo a variação atribuída ao grau de compactação obtido no teste de compactação. De forma semelhante, na Figura 80b observa-se que por meio da Equação 23 foi possível estimar a massa específica do concreto permeável. As amostras produzidas foram, então, submetidas aos testes de resistência à compressão axial e condutividade hidráulica. Neste estudo optou-se por utilizar a resistência à compressão para demonstrar a aplicação do método, no entanto, é importante notar que deve ser utilizada a propriedade mecânica correspondente aos requisitos de dimensionamento do pavimento (Tabela 1).

Os resultados obtidos na caracterização foram ajustados aos modelos descritos nas Equações 30, 31 e 32, permitindo a construção das curvas características ilustradas Figura 81. Na figura é possível notar que a resistência à compressão e o consumo de cimento assumiram uma relação linear com a porosidade no estado fresco, com erro padrão de 0,97 MPa e 10,97 kg/m³, respectivamente. A condutividade hidráulica, por sua vez, apresentou comportamento exponencial, com erro padrão de 0,07 cm/s. Por meio das curvas características e dos modelos

ajustados é possível selecionar a porosidade de projeto em função dos critérios de dosagem.

Figura 81 – Curvas de resistência à compressão, condutividade hidráulica e consumo de cimento em função da porosidade



Nota: Condutividade hidráulica medida no permeômetro de carga variável ($h_i = 50 \text{ cm}$; $h_f = 10 \text{ cm}$)

Considerando uma condutividade hidráulica mínima de 0,10 cm/s acrescida do erro padrão do modelo (0,07 cm/s), a porosidade mínima equivale a 17,7%. Utilizando essa porosidade nos modelos descritos na Figura 81, obtém-se uma resistência à compressão de 25,2 MPa e consumo de cimento de 493,6 kg/m³. Essa mistura corresponde ao desempenho mecânico máximo do concreto permeável,

considerando-se os materiais e método de compactação empregados. Uma resistência à compressão superior não pode mais ser obtida pelo controle da porosidade, uma vez que a redução da propriedade prejudicaria significativamente a condutividade hidráulica. Outro fator que deve ser levado em consideração é a eficiência da mistura. Nota-se que para atingir essa resistência máxima de projeto é necessário um consumo de cimento elevado, que pode inviabilizar a aplicação do concreto. Nessas duas situações ainda é possível aplicar uma segunda fase de dosagem com o objetivo de otimizar as misturas de concreto permeável. Essa otimização pode ser realizada pelo aperfeiçoamento da matriz cimentícia para gerar um desempenho mecânico superior, considerando-se também a inclusão de agregado miúdo para reduzir o consumo de cimento. Porém, essas alterações devem ser realizadas de forma controlada para não prejudicar o desempenho hidráulico do concreto permeável, conforme será abordado na Etapa V.

7.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO

Conforme abordado neste capítulo, a dosagem de concretos permeáveis é um processo que envolve diversas variáveis que devem ser controladas rigorosamente. O primeiro parâmetro que deve ser analisado é a porosidade do material. A porosidade no estado fresco (intergranular) tem capacidade de controlar diretamente o desempenho mecânico e, principalmente, a condutividade hidráulica do concreto permeável. No entanto, ajustar a porosidade de uma mistura de concreto permeável é uma das dificuldades no processo de dosagem. Isso ocorre devido a interação entre as propriedades do agregado e da matriz cimentícia no processo de compactação do material. Para considerar esse efeito, o método de dosagem proposto na ACI 522R (ACI, 2010) recomenda a dosagem de pasta de cimento por meio de ábacos em função do nível de compactação, porém restrito a apenas uma granulometria específica do agregado graúdo. A aplicação do método para outros agregados exige ajustes por meio de tentativas experimentais.

O método do grau de compactação proposto neste estudo fornece uma metodologia para realizar esse ajuste, sendo de fácil execução e com versatilidade nas condições experimentais. Para cada mistura a ser desenvolvida é executado um teste de compactação para a obtenção das informações necessárias à elaboração do traço de concreto permeável, dispensando assim o uso de ábacos e não necessitando

do ajuste da energia de compactação. Nesse aspecto, foi possível aplicar a metodologia para diferentes energias de compactação, agregados com diferentes tamanhos e distribuições granulométricas, relação a/c variável e presença de agregado miúdo.

Por meio do controle da porosidade no estado fresco, a dosagem do concreto permeável pôde ser estabelecida com a elaboração de modelos de resistência, condutividade hidráulica e de consumo de cimento. A mistura de projeto pode, então, ser definida pela seleção de uma porosidade que satisfaça os critérios mecânicos e hidráulicos desejados. Conhecendo-se a porosidade de projeto, o traço de concreto permeável pode ser determinado pela aplicação do método do grau de compactação. A porosidade do concreto permeável pode ser ajustada conforme o desempenho mecânico desejado, sendo esse processo limitado à porosidade mínima (definida pela condutividade hidráulica mínima). Na impossibilidade de reduzir a porosidade, o desempenho mecânico do concreto permeável pode ainda ser ajustado pelo aprimoramento da matriz cimentícia. Esse procedimento faz parte da fase de otimização de misturas, conforme será descrito no próximo capítulo experimental.

8 ETAPA V – MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS DE CONCRETO PERMEÁVEL

Conforme abordado, por meio do método do grau de compactação foi possível estabelecer um procedimento para elaborar misturas com porosidade controlada. Esse controle permite a dosagem de concretos permeáveis delimitando-se porosidades de projeto em função do desempenho desejado. No entanto, o ajuste da porosidade é limitado principalmente pela condutividade hidráulica mínima de projeto. Nas situações em que a resistência mecânica não pode ser incrementada por meio da redução de porosidade, uma alternativa é o aprimoramento da matriz cimentícia.

O efeito da relação água/cimento, extensamente estudado para matrizes cimentícias convencionais, não é apresentado na literatura como um parâmetro de dosagem de concretos permeáveis. No entanto, há poucas pesquisas desenvolvidas nesse tema, sendo que muitas destas utilizam a relação a/c unicamente como controle da consistência da pasta de cimento. Ou ainda, não realizam o devido controle da mistura de concreto permeável (como a própria consistência da pasta ou a porosidade do concreto). A manipulação das características da matriz cimentícia é uma possibilidade no ajuste da resistência mecânica do concreto permeável. No entanto, isso deve ser realizado apenas com um controle rigoroso da consistência da pasta de cimento, evitando-se o seu escoamento e, conseqüentemente, a colmatação dos poros do concreto.

O controle da matriz cimentícia no concreto permeável, seja pelo volume de pasta empregado ou pela relação a/c, é uma das principais alternativas para obter materiais com um desempenho mecânico superior. Porém, ainda que isso seja tecnicamente possível, o custo do concreto permeável será impactado de forma significativa pelo ajuste das características da matriz cimentícia. Além disso, a eficiência no uso do cimento pode ser baixa, indicando um subaproveitamento do insumo na produção do concreto permeável. Nos concretos produzidos nas Etapas I e III a menor intensidade de consumo de cimento (I_c) obtida foi de aproximadamente $18,0 \text{ kg.m}^{-3}/\text{MPa}$, valor elevado quando comparado a concretos convencionais. Segundo uma pesquisa conduzida por Damineli *et al.* (2010), em um conjunto amostral de 602 estudos brasileiros o índice I_c usualmente varia de 5 a $15 \text{ kg.m}^{-3}/\text{MPa}$, raramente ultrapassando $20 \text{ kg.m}^{-3}/\text{MPa}$. Portanto, a dosagem do concreto permeável também deve compreender formas de otimizar o consumo de

cimento, tornando o material mais eficiente. Nesse aspecto, a inclusão do agregado miúdo na mistura tem um potencial em contribuir para a eficiência no uso do cimento do concreto permeável. No entanto, poucos estudos avaliaram o efeito da adição de areia no concreto permeável, não existindo ainda um método com esse intuito.

Portanto, nesta etapa experimental o objetivo foi propor uma metodologia de otimização de misturas de concreto permeável visando o aperfeiçoamento mecânico, quando necessário, e o aumento da eficiência no consumo de cimento. O processo de otimização proposto baseou-se modificação da matriz cimentícia sem prejudicar o desempenho hidráulico do concreto. Para que isso seja possível, duas condições devem ser satisfeitas. A primeira condição consiste na manutenção da porosidade de projeto definida no processo de dosagem (Etapa IV). O segundo critério que deve ser atendido é garantir a consistência adequada da pasta de cimento, independente da modificação realizada na matriz cimentícia. Para atender este último critério, neste estudo foi proposto um procedimento de ajuste da consistência da pasta de cimento, possibilitando assim a otimização da mistura de concreto permeável.

8.1 AJUSTE DE CONSISTÊNCIA DA PASTA DE CIMENTO

Conforme exposto anteriormente, a porosidade no estado fresco é um parâmetro de interesse na dosagem do concreto permeável, uma vez que esta afeta diretamente a resistência mecânica e a condutividade hidráulica. Embora ambas as propriedades sejam importantes no desempenho de um pavimento permeável, a eficiência hidráulica é um fator limitante na aplicação do material. Caso um concreto permeável seja desenvolvido com baixa condutividade hidráulica ou, ainda, sujeito ao efeito de escoamento da pasta e colmatção dos poros, o material deixará de ser funcional. Por outro lado, o concreto deve apresentar resistência mecânica suficiente para resistir aos esforços oriundos do pavimento. Dessa forma, a dosagem do concreto permeável deve equilibrar as duas propriedades para garantir um desempenho adequado.

Para um determinado tipo de agregado e energia de compactação, a condutividade hidráulica do concreto permeável será controlada principalmente pela dosagem de pasta de cimento, ou seja, a porosidade de projeto. Conforme abordado anteriormente, uma porosidade mínima pode ser definida em função do desempenho hidráulico desejado. No entanto, a resistência mecânica para essa porosidade pode

não ser suficiente para a aplicação do material. Nesse caso deve ser considerado como alternativa o aperfeiçoamento mecânico da matriz cimentícia. Na literatura já foram reportados estudos com o intuito de modificar as propriedades da pasta de cimento, visando um desempenho mecânico superior do concreto permeável. Já foram desenvolvidos estudos avaliando a adição de fibras (AKAND; YANG; WANG, 2018), adições ao cimento (ADIL; KEVERN; MANN, 2020), inclusão de agregado miúdo (BONICELLI; GIUSTOZZI; CRISPINO, 2015) e aditivos superplastificantes ou modificadores de viscosidade (DAI *et al.*, 2020). Se não controladas, essas opções podem modificar significativamente tanto a consistência como o volume de pasta de cimento na mistura. Isso pode ocasionar alterações indesejadas nas propriedades do concreto permeável, como a redução da porosidade e da condutividade hidráulica. Além disso, consistências de pasta inadequadas podem gerar defeitos na produção do concreto permeável, como a falha na cobertura dos agregados ou o escoamento da pasta pelos poros. Além do desempenho hidráulico, esses defeitos também podem ocasionar em menor resistência mecânica.

Dessa forma, o aperfeiçoamento mecânico por meio da modificação da matriz cimentícia deve ser acompanhado de um estudo de consistência da pasta de cimento para garantir a manutenção do desempenho hidráulico do concreto permeável. Neste estudo foi proposta uma metodologia para controlar a consistência da pasta de cimento em misturas sujeitas à variação da relação a/c e do teor de areia. Em conjunto com o método do grau de compactação, o ajuste de consistência da pasta tem o objetivo de desenvolver misturas de concreto permeável com diferentes matrizes cimentícias, mantendo-se as propriedades reológicas constantes.

8.1.1 Descrição da Metodologia

Neste estudo o controle da consistência da matriz cimentícia foi realizado por meio do índice de consistência, que é um parâmetro já empregado na caracterização de pastas de cimento e argamassas. Para o desenvolvimento desta metodologia foram adotadas as seguintes premissas:

- a) Para cada tipo de agregado existe um índice de consistência padrão (ICp) da pasta de cimento para promover o recobrimento dos grãos de forma homogênea;

- b) Diferentes matrizes cimentícias podem apresentar mesmo comportamento reológico no concreto permeável, desde que o índice de consistência seja equivalente;
- c) A relação a/c de uma matriz cimentícia pode ser ajustada desde que não ocorra prejuízo a sua consistência. Aditivos plastificantes podem ser utilizados com esse intuito;
- d) Agregados miúdos se comportam como adições à pasta de cimento, sendo incorporadas no seu volume (como as adições geralmente são pequenas, neste estudo será mantida a nomenclatura de pasta de cimento, independente da presença de agregado miúdo). A consistência deve ser verificada na pasta já contendo as adições.

O índice de consistência padrão (ICp) da pasta de cimento pode ser considerado o valor referente a uma pasta de cimento produzida com a relação a/c obtida no teste de drenagem da pasta, conforme descrito no item 7.1.3. Todas as modificações realizadas na matriz cimentícia devem, então, ser corrigidas com o uso de aditivos para garantir a manutenção da mesma consistência de pasta. O índice de consistência pode ser determinado por meio do ensaio de abatimento de um corpo de prova troncocônico em uma mesa para índice de consistência, conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019). Uma vez que não existe um procedimento normatizado para a mistura e análise de pastas de cimento contendo aditivos, neste estudo foi realizado uma adaptação para o preparo das misturas cimentícias. A determinação do índice de consistência padrão (ICp) para os concretos permeáveis contendo ou não agregado miúdo está descrita a seguir:

I) Determinação do Índice de Consistência Padrão (ICp)

- a) Determinar a relação a/c ideal pelo teste de drenagem da pasta, descrito no item 7.1.3;
- b) Separar 1500 g de cimento, a quantidade de água referente à relação a/c ideal e areia conforme o teor pré-definido, quando esta for utilizada;
- c) Realizar a mistura mecânica da pasta de cimento: adicionar a água e cimento na cuba do misturador e realizar a mistura por 60 s em velocidade baixa. Caso seja utilizado agregado miúdo, este deve ser adicionado gradualmente nos 30 s finais deste intervalo. Na sequência, alterar para

velocidade rápida e realizar a mistura por 30 s adicionais. Desligar o equipamento por 90 s e realizar a raspagem das paredes internas da cuba nos primeiros 30 s, ficando em repouso na sequência. Após esse intervalo, realizar a mistura final da pasta por 60 s na velocidade rápida;

- d) Determinar o índice de consistência padrão, conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019), representado pelo diâmetro médio da base do tronco de cone de pasta de cimento, após o abatimento.

Após a obtenção do IC_p, a consistência da pasta de cimento deve ser corrigida em função do tipo e teor de modificação realizada na matriz cimentícia. Conforme será exemplificado neste estudo, duas modificações que podem ser empregadas na dosagem de concretos permeáveis são a redução da relação a/c e a adição de agregado miúdo. A correção da consistência para essas duas situações pode ser realizada conforme descrito a seguir:

II) Correção da Consistência da Pasta de Cimento

- a) Selecionar as relações a/c ou teores de agregado miúdo a serem avaliados na dosagem de concreto permeável;
- b) Para cada relação a/c ou adição de areia, selecionar um teor de aditivo inicial para determinação do índice de consistência. O teor inicial deve ser compatível com o tipo de aditivo, faixa de redução da relação a/c ou adição de areia;
- c) Realizar a mistura mecânica da mistura, conforme procedimento descrito no passo I. O aditivo deverá ser previamente misturado com a água, devendo ser considerado também como parte da relação a/c;
- d) Determinar o índice de consistência pelo abatimento do molde troncocônico, conforme passo I. Uma vez que o efeito do aditivo pode variar com o tempo de mistura da pasta de cimento, recomenda-se repetir o teste de consistência após mistura do material por 60 s adicionais, logo após o primeiro abatimento. Esse procedimento deve ser repetido caso seja constatado aumento no índice de consistência em função do tempo. Em caso de variação do IC com o tempo, adotar o valor máximo como referência;

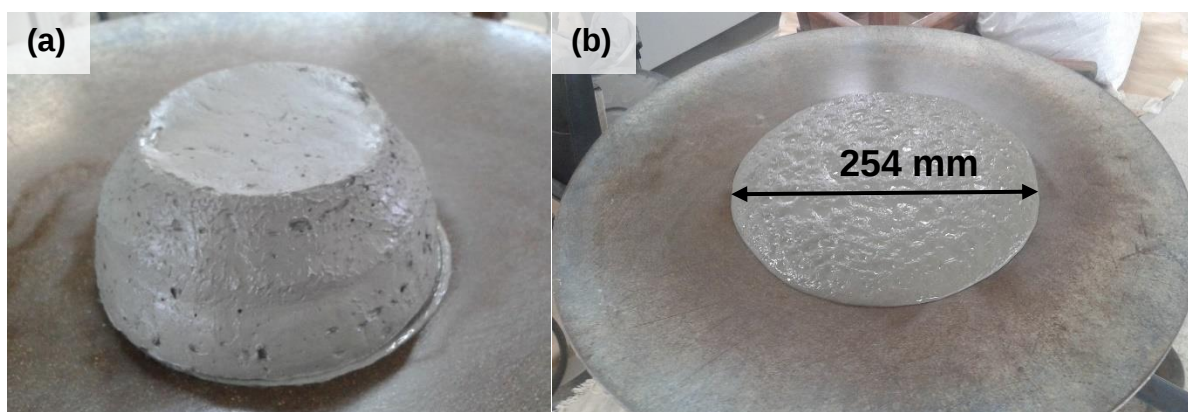
- e) O teor de aditivo deve ser ajustado em tentativas experimentais até que o índice de consistência coincida com o $IC_p \pm 5$ mm.

Após a determinação do teor ideal de aditivo, a pasta de cimento apresentará a consistência exigida para a cobertura eficiente dos agregados sem ocorrência de escoamento nos poros. O traço de cada mistura de concreto permeável deve ser corrigido aplicando-se o método do grau de compactação, visto que alterações na relação a/c e no teor de agregado miúdo alteram as frações volumétricas da pasta de cimento. Esse ajuste não se restringe a essas duas alterações, devendo ser realizado também para demais tipos de adições ao cimento.

8.1.2 Ajuste para Relação a/c Variável

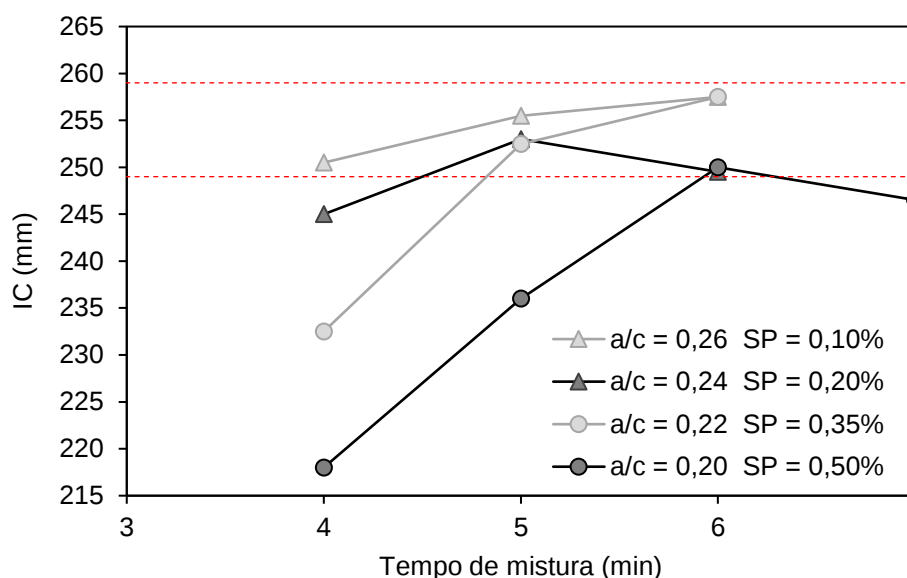
Para demonstrar o procedimento de ajuste da consistência da pasta de cimento para concretos de relação a/c variável foram elaboradas misturas utilizando-se o pedrisco como agregado graúdo (caracterizado conforme 7.1.4). Nessa campanha experimental foi utilizado cimento CII F-32 e um aditivo superplastificante a base de policarboxilato para controlar a consistência da pasta de cimento. A relação a/c foi variada de 0,20 a 0,28 utilizando-se incrementos de 0,02. Conforme definido anteriormente, a relação a/c ótima para o pedrisco foi de 0,28. Dessa forma, o primeiro passo foi a definição do IC_p . Uma pasta de cimento foi misturada de forma mecânica, sendo submetida ao teste de consistência. Na Figura 82 está ilustrado aspecto visual da pasta de cimento durante a execução do ensaio.

Figura 82 – Corpo de prova troncocônico (a) após moldagem e (b) após abatimento



A partir do teste de consistência da pasta de cimento, foi obtido um IC_p de 254 mm. Portanto, para as demais relações a/c foi realizada a dosagem de aditivo superplastificante com o intuito de ajustar o índice de consistência para um valor equivalente 254 ± 5 mm. Na Figura 83 está ilustrado o índice de consistência para o teor de aditivo definido nas pastas de cimento com relação a/c variando de 0,20 a 0,26.

Figura 83 – Índice de consistência para pastas de cimento com a/c de 0,20 a 0,26



Nota: Linhas horizontais representam tolerância de ± 5 mm em relação ao IC_p

Conforme exposto na Figura 83, para todas as pastas de cimento houve um acréscimo do índice de consistência em função do tempo de mistura mecânica. Esse efeito pode ser atribuído à ação do aditivo superplastificante, que ocorreu gradualmente durante a mistura da pasta. Como o tempo de mistura de concretos (total de 8 minutos) é superior ao tempo de mistura da pasta de cimento, essa análise garante maior segurança na definição do teor de aditivo. Para as quatro relações a/c analisadas neste estudo, o teor de aditivo adotado apresentou índice de consistência máximo compreendido no intervalo 254 ± 5 mm.

Para analisar o comportamento da pasta de cimento no concreto permeável, foram desenvolvidas misturas com porosidade de projeto de 30%. O método do grau de compactação foi aplicado para cada relação a/c, realizando o devido ajuste no volume de pasta de cimento para compensar as características da matriz cimentícia.

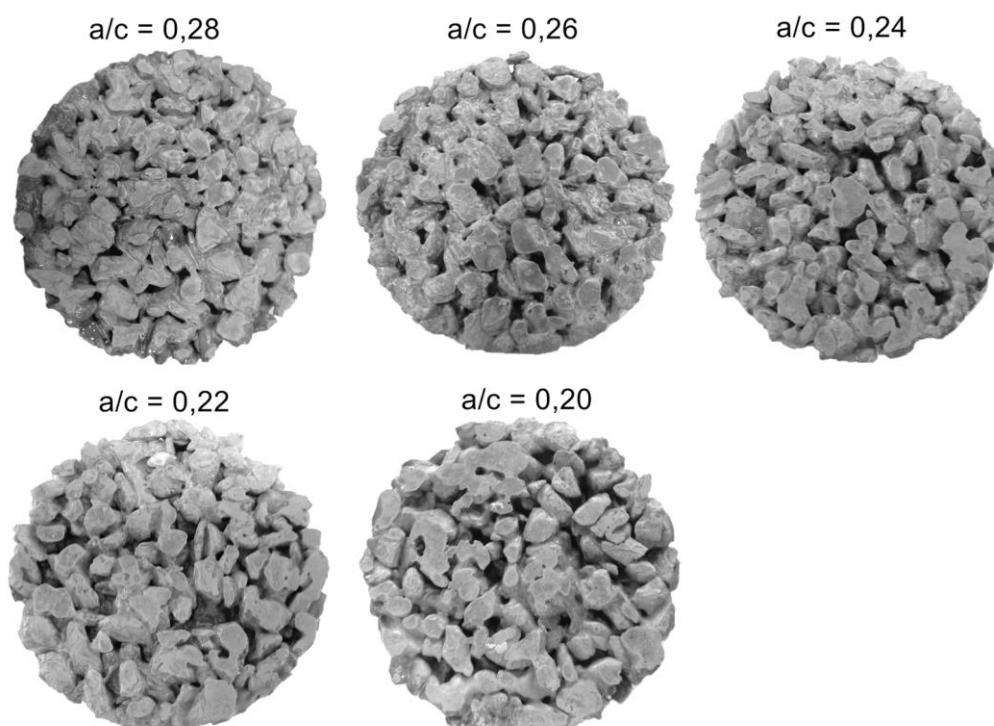
Na Tabela 20 estão descritos os traços obtidos após a aplicação do teste de compactação.

Tabela 20 – Resultados do teste de compactação das misturas com relação a/c variável

Parâmetro		0,28	0,26	0,24	0,22	0,20
Densidade teórica (g/cm ³)	d_t	2,82	2,83	2,84	2,84	2,85
Consumo de cimento (kg/m ³)	C_{cim}	261,0	268,9	279,9	304,5	328,0
Teor de aditivo (%)		0,00	0,10	0,20	0,35	0,50
Consumo de agregado (kg/m ³)	C_{agg}	1643,0	1645,1	1642,7	1619,8	1601,5
Grau de compactação efetivo	$G_{c,ef}$	0,950	0,952	0,950	0,937	0,9262
Traço final		1 : 6,29	1 : 6,12	1 : 5,87	1 : 5,32	1 : 4,88

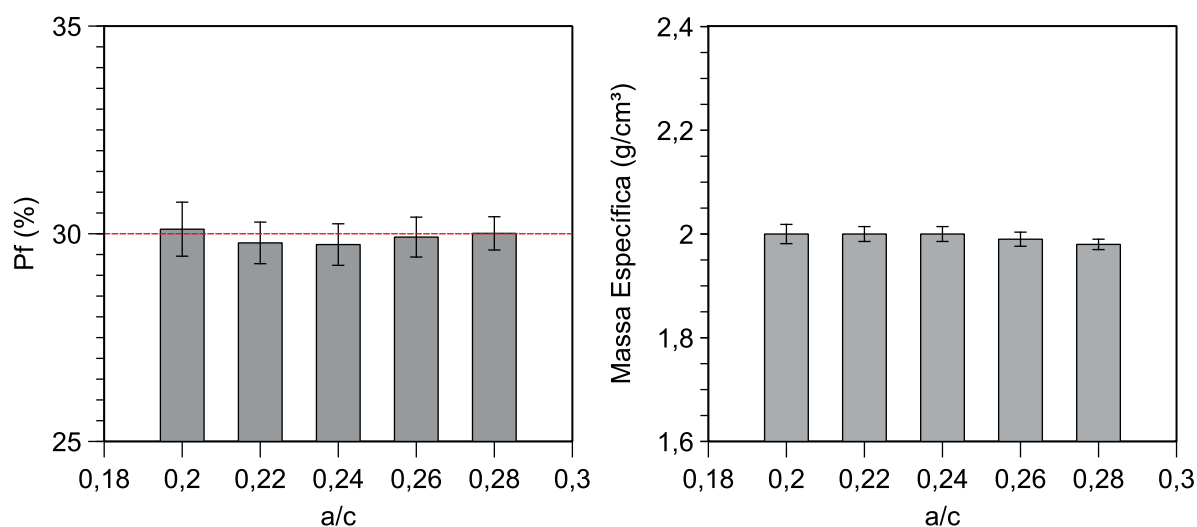
Conforme descrito na Tabela 20, o traço variou significativamente na redução da relação a/c de 0,28 para 0,20. Uma vez que há menor conteúdo de água na pasta de cimento, há um consumo de cimento superior para manter a porosidade fixa. No entanto, observa-se que pela ação do aditivo superplastificante a consistência da pasta foi suficiente para promover cobertura homogênea dos agregados sem a ocorrência de escoamento. Isso pode ser observado pela análise visual da base dos corpos de prova, conforme ilustrado na Figura 84.

Figura 84 – Aspecto visual das bases dos corpos de prova com relação a/c de 0,20 a 0,28



É possível notar na Figura 84 que em nenhuma amostra houve escoamento da pasta de cimento na base do corpo de prova, sendo observada a presença de poros bem definidos. Isto indica que o teor de aditivo foi adequado, não havendo risco de colmatção e de prejuízo ao desempenho hidráulico do concreto permeável. A caracterização das misturas no estado fresco está ilustrada na Figura 85.

Figura 85 – Porosidade e massa específica no estado fresco das misturas com relação a/c variável



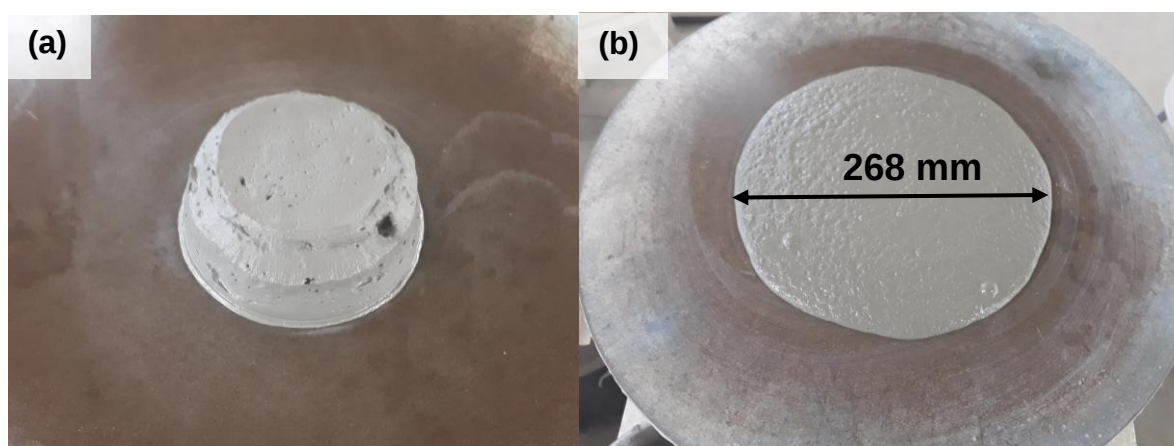
Conforme ilustrado, foi possível atingir a porosidade de projeto (30%) em todas as misturas, de forma independente da relação a/c. Tanto o ajuste da consistência como a correção do traço por meio do grau de compactação foram essenciais para isso. É importante notar que se a relação g/c fosse mantida constante, haveria uma variação significativa do volume de pasta de cimento. Como consequência, haveria um aumento da porosidade que poderia acabar resultando em uma redução do desempenho mecânico. A massa específica no estado fresco manteve-se aproximadamente constante em todos os concretos desenvolvidos. Conforme a Tabela 20, a redução de água na mistura ocasionou um aumento sucinto da densidade teórica, porém, devido ao baixo volume de pasta de cimento na mistura esse efeito não impactou significativamente a massa específica no estado fresco.

8.1.3 Ajuste para Adição de Areia Variável

Para demonstrar o ajuste de consistência em concretos com agregado miúdo, foram desenvolvidas misturas utilizando-se pedrisco como agregado graúdo. Foi

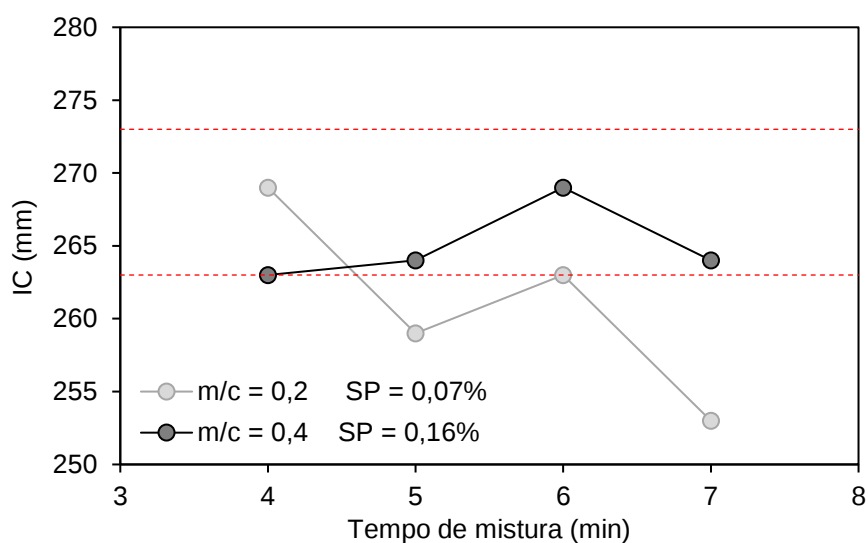
utilizado cimento CII F-32 e aditivo superplastificante a base de policarboxilato para realizar a correção da consistência. Além do traço de referência utilizou-se misturas com teor de agregado miúdo de 20 e 40% (m/c de 0,2 e 0,4, respectivamente) em relação à massa de cimento. A relação a/c ótima obtida para a mistura manteve-se como 0,28. Foi realizado o teste de índice de consistência padrão, obtendo-se um índice ICp de 268 mm, conforme ilustrado na Figura 86.

Figura 86 – Corpo de prova troncocônico da pasta contendo agregado miúdo (a) após moldagem e (b) após abatimento



Para os teores de agregado miúdo m/c de 0,2 e 0,4, foi realizada a dosagem de aditivo superplastificante para gerar uma consistência de 268 ± 5 mm. Utilizando-se 0,07 e 0,16% de aditivo, obteve-se índices de consistência máximos compreendidos nessa faixa para as duas misturas, conforme ilustrado na Figura 87.

Figura 87 – Índice de consistência para pastas de cimento com m/c variando de 0,0 a 0,4



Nota: Linhas horizontais representam tolerância de ± 5 mm em relação ao ICp

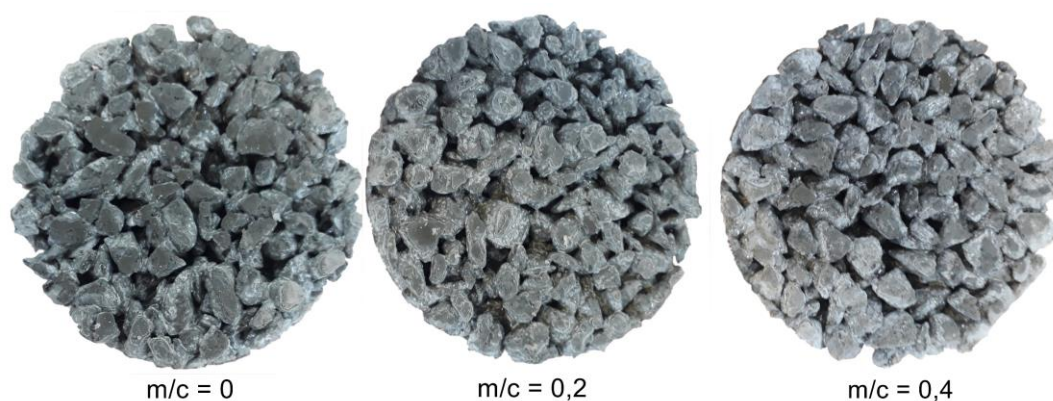
Para verificar a dosagem de aditivo e consistência da pasta de cimento definidas, foram desenvolvidas misturas de concreto com porosidade de projeto de 30%. Em cada teor de agregado miúdo foi realizada a correção do traço por meio da aplicação do teste de compactação. Os traços finais obtidos após a correção do grau de compactação constam na Tabela 21.

Tabela 21 – Resultados do teste de compactação das misturas com relação m/c variável

Parâmetro		0,0	0,2	0,4
Densidade teórica (g/cm ³)	d_t	2,81	2,83	2,84
Consumo de cimento (kg/m ³)	C_{cim}	277,7	241,3	219,5
Teor de aditivo (%)		0,00	0,07	0,16
Consumo de agregado (kg/m ³)	C_{agg}	1614,6	1624,5	1618,4
Grau de compactação efetivo	$G_{c,ef}$	0,944	0,950	0,946
Traço final		1 : 5,81	1 : 6,73	1 : 7,37

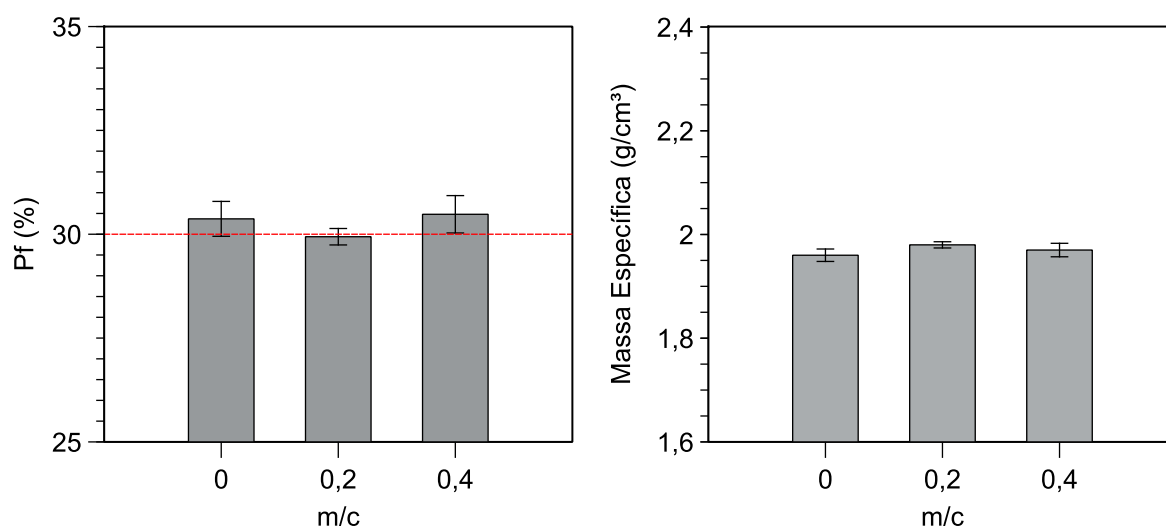
Na Tabela 21 é possível notar que o traço das misturas variou significativamente pela adição de agregado miúdo. Uma vez que a areia compõe parte do volume da pasta, houve uma redução do consumo de cimento. Ainda que as características da matriz cimentícia tenham se alterado, observa-se que o grau de compactação das misturas foi similar. Isto indica que a presença do agregado miúdo não prejudicou a compactação do concreto permeável, uma vez que a consistência da pasta foi mantida constante. Independentemente do teor de agregado miúdo utilizado, foi possível produzir os concretos permeáveis com cobertura homogênea dos agregados. Na Figura 88 é possível visualizar o aspecto da base dos corpos de prova produzidos com cada relação m/c.

Figura 88 – Aspecto visual da base dos corpos de prova produzidos com teor variável de agregado miúdo (m/c)



Na Figura 88 é possível constatar que não houve escoamento da pasta de cimento próximo a base dos corpos de prova, confirmando assim a dosagem de aditivo em cada mistura. As três séries de concreto permeável também foram caracterizadas no estado fresco, conforme exposto na Figura 89.

Figura 89 – Porosidade e massa específica no estado fresco das misturas produzidas com relação m/c variável



Na Figura 89 é possível notar que a porosidade de projeto (30%) foi atingida nas três misturas. Nota-se que a inclusão de agregado miúdo não alterou significativamente a porosidade, uma vez que o traço foi corrigido no teste de compactação. À medida que o agregado miúdo foi incluído na mistura, a quantidade de cimento foi reduzida proporcionalmente para manter o volume de pasta constante no concreto permeável. O controle da consistência da pasta também é fundamental para que não ocorra o seu escoamento nos poros do concreto, levando ao tamponamento dos poros. A massa específica no estado fresco não apresentou variação significativa, resultando em valor médio de 1,97 g/cm³.

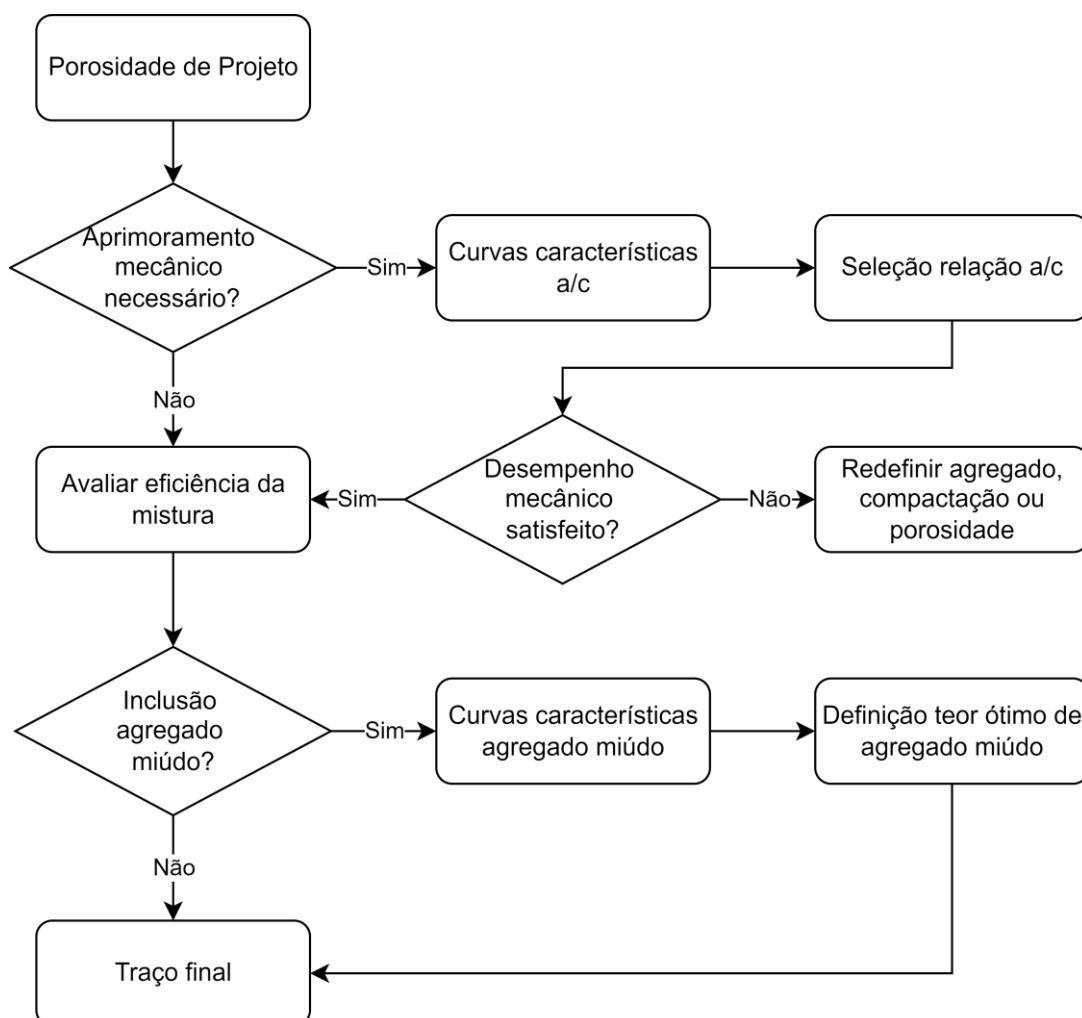
Conforme abordado neste tópico, foi possível alterar as propriedades da matriz cimentícia do concreto permeável, mantendo ainda características adequadas na produção do material. O ajuste de consistência de pasta proposto neste estudo permitiu controlar a reologia da matriz cimentícia, ainda que a relação a/c ou o teor de agregado miúdo tenha variado. Esse controle permitiu o desenvolvimento de misturas de concreto permeável com características distintas, porém garantindo cobertura homogênea dos agregados sem a ocorrência de defeitos como o escoamento da pasta. A metodologia proposta, então, complementa o método do grau de

compactação permitindo uma abrangência no desenvolvimento de misturas de concreto permeável. Baseando-se nos conceitos abordados nestes tópicos é possível sistematizar a dosagem do material, conforme será abordado a seguir.

8.2 PROCEDIMENTO DE OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS

Conforme apresentado, a matriz cimentícia de um concreto permeável pode ser alterada mantendo-se a porosidade fixa. Alterações como redução da relação a/c ou a inclusão de agregado miúdo tornam-se possíveis, desde que realizado o ajuste da reologia da pasta de cimento. Dessa forma, o procedimento de ajuste de consistência proposto, em conjunto com o método do grau de compactação, permite estabelecer um método de otimização de misturas de concreto permeável. Na Figura 90 estão representadas as etapas do processo de otimização de misturas.

Figura 90 – Principais etapas da otimização de misturas de concreto permeável



Conforme ilustrado, a otimização do concreto permeável é realizada após definida uma porosidade de projeto (selecionada em função dos critérios mecânicos e hidráulicos). Caso essa mistura não atenda ao critério de desempenho mecânico para a aplicação do concreto permeável, uma etapa de aprimoramento mecânico pode ser conduzida. Neste estudo foi proposta a utilização da relação a/c como forma de controlar a resistência da matriz cimentícia e, conseqüentemente, do concreto permeável. Um modelo de previsão de resistência pode ser estabelecido em função da relação a/c para avaliar o potencial de otimização da mistura. Uma vez que a consistência do concreto permeável é corrigida, a relação a/c torna-se um parâmetro de controle do desempenho mecânico do material. Porém o ajuste da quantidade de água na mistura possui limitações. Uma determinada resistência pode não ser alcançada nessa fase de aprimoramento, sendo necessário avaliar outras opções, como: redefinir o agregado, ajustar a energia de compactação, redefinir a porosidade de projeto ou avaliar outras formas de aprimoramento da matriz cimentícia.

Após realizar a etapa de aprimoramento mecânico também é essencial verificar a eficiência no consumo de cimento da mistura. Caso a quantidade de cimento na mistura seja excessiva, uma otimização pode ser realizada pela inclusão de agregado miúdo. A adição de pequenos teores de agregado miúdo pode reduzir o consumo de cimento, aumentando a eficiência da mistura. Mantendo-se a porosidade fixa, é possível construir curvas de dosagem do agregado miúdo para definir um teor ideal, que não prejudique o desempenho mecânico do material. Finalizada a etapa de otimização, obtém-se o traço final da mistura de concreto permeável para a porosidade de projeto selecionada.

8.2.1 Controle da Relação a/c

Segundo Xie *et al.* (2020), a resistência do concreto permeável depende principalmente de dois fatores: a resistência da matriz cimentícia e a área de pasta de cimento nas zonas de contato entre agregados. Se a porosidade de uma mistura for mantida constante, as características das zonas de contato não são alteradas significativamente, uma vez que o volume de pasta de cimento disponível é o mesmo. Dessa forma, uma possibilidade para o aprimoramento mecânico do concreto permeável é pela manipulação da resistência da matriz cimentícia.

Conforme abordado anteriormente, o aperfeiçoamento mecânico da matriz cimentícia pode ser realizado por diferentes técnicas, sendo a alteração da relação a/c a mais tradicional. Neste estudo focou-se neste método para o controle da resistência mecânica do concreto permeável, porém a metodologia pode ser adaptada para as demais técnicas. Para uma mistura de concreto permeável com determinada porosidade de projeto, a relação a/c pode ser alterada livremente, partindo-se das seguintes premissas:

- a) A reologia da pasta de cimento pode ser mantida constante pelo uso de aditivos e o controle do índice de consistência da pasta;
- b) As misturas de concreto permeável apresentam mesmo comportamento frente à energia de compactação, desde que mantido a consistência da pasta de cimento;
- c) A relação a/c não interfere a condutividade hidráulica, desde que a porosidade da mistura seja mantida constante;
- d) A resistência mecânica pode ser aperfeiçoada sem alterar a porosidade, desde que seja possível reduzir a relação a/c ainda mantendo quantidade de água suficiente para a hidratação do cimento.

Embora para concretos convencionais a relação entre a quantidade de água na mistura e a resistência mecânica seja compreendida pela Lei de Abrams, para o concreto permeável essa relação não é válida. De acordo com Xie *et al.* (2020) e Zhong e Wille (2016), a resistência do concreto permeável varia linearmente com a resistência da matriz cimentícia, considerando que a porosidade é mantida fixa. Por outro lado, Cui *et al.* (2017) verificaram uma relação não-linear entre a relação a/c e a resistência mecânica do concreto permeável. Segundo os autores, se a quantidade de água na mistura for muito pequena os produtos de hidratação do cimento não se formam completamente, não havendo aumento da resistência mecânica. Dessa forma, os autores verificaram a existência de uma relação a/c ótima, que ainda proporciona hidratação eficiente do cimento.

Portanto, após a seleção de uma porosidade de projeto, a resistência mecânica ainda pode ser ajustada, até certo limite, pela redução da relação a/c. Para um determinado tipo de agregado e cimento, a relação a/c máxima é delimitada pelo teor ideal definido no teste de drenagem da pasta. Relações a/c inferiores devem ser selecionadas dentro de uma faixa coerente para compor uma curva característica do

desempenho mecânico. Assumindo que o grau de compactação do concreto permeável é mantido constante, o volume de pasta de cimento necessário para desenvolver as misturas com relação a/c variável será aproximadamente constante. Assim, é necessário corrigir o traço do concreto para compensar a alteração na proporção entre os constituintes da pasta (água, cimento e agregado miúdo, quando utilizado). Essa correção pode ser realizada aplicando-se o método do grau de compactação e realizando o teste experimental em cada mistura.

Após a elaboração das misturas e sua caracterização, é possível construir uma curva característica de resistência em função da relação a/c adotada. Conforme mencionado, não há consenso a respeito da relação entre ambas as propriedades, sendo necessário avaliar em cada caso o modelo de maior representatividade. A relação a/c pode, então, ser ajustada em função do desempenho mecânico desejado para o concreto permeável. No entanto, esse ajuste é limitado pela quantidade mínima de água na mistura para promover a hidratação do cimento. A condutividade hidráulica, por sua vez, deve se manter aproximadamente constante, uma vez que a porosidade não é alterada.

Deve-se levar em consideração que a redução da quantidade de água na mistura ocasiona um aumento proporcional do consumo de cimento no concreto. Considerando um volume de pasta de cimento constante e que o teor de agregado miúdo não é alterado nesta fase de dosagem, a variação no consumo de cimento pode ser descrita pela Equação 33.

$$A_{\text{cim}} = \frac{a/c_0 - a/c}{\left(\frac{1}{d_{\text{cim}}} + a/c + \frac{m/c}{d_{\text{agm}}} \right)} \quad (33)$$

Em que:

A_{cim} – Acréscimo estimado no consumo de cimento (%);

a/c_0 – Relação a/c da mistura inicial;

a/c – Relação a/c da mistura analisada.

A curva de consumo de cimento pode ser representada por um modelo baseado no consumo de cimento inicial (mistura com a/c de referência) e o acréscimo de cimento estimado (Equação 33), conforme apresentado na Equação 34.

$$C_{\text{cim,a/c}} = C_{\text{cim,0}} \cdot (1 + A_{\text{cim}}) \quad (34)$$

Sendo:

$C_{\text{cim,a/c}}$ – Consumo de cimento estimado na mistura com relação água/cimento a/c;

$C_{\text{cim,0}}$ – Consumo de cimento da mistura de referência, com relação a/c inicial.

Considerando uma mistura desenvolvida sem agregado miúdo, a variação da relação a/c de 0,28 para 0,20, por exemplo, ocasionaria em um aumento de aproximadamente 15% no consumo de cimento. Nas misturas contendo agregado miúdo essa variação é atenuada de forma proporcional ao teor m/c, conforme pode ser interpretado na Equação 33. Portanto, o ajuste da relação a/c deve ser realizado somente quando necessário um desempenho mecânico superior, evitando-se variações excessivas no conteúdo de água. É importante notar que outras técnicas de aprimoramento da matriz cimentícia podem ser avaliadas de forma individual ou combinada, desde que as premissas assumidas neste método sejam atendidas.

8.2.2 Inclusão de Agregado Miúdo

Após a definição da porosidade de projeto e da relação a/c em função do desempenho desejado, ainda é possível realizar a otimização da mistura com o intuito de reduzir o consumo de cimento. Uma forma simples de realizar isso é por meio de pequenas adições de agregado miúdo. Poucos estudos foram desenvolvidos analisando o efeito do agregado miúdo nas propriedades do concreto permeável, sendo que as conclusões tradicionais indicam que há aumento da resistência mecânica acompanhado de redução de condutividade hidráulica. No entanto, a abordagem tradicional da adição de agregado miúdo possui inconvenientes, como:

- a) A adição de areia é realizada como um teor em relação à massa total de agregado. Com a variação da porosidade as misturas apresentarão variação na proporção agregado miúdo/cimento, alterando as características da pasta de cimento;
- b) O agregado miúdo é incluído sem correção da porosidade. Portanto, o aprimoramento mecânico não pode ser atribuído totalmente à adição do material;

- c) A consistência da pasta de cimento não é corrigida em função do teor de agregado miúdo. Devido à maior demanda de água, a mistura pode apresentar falha no recobrimento dos agregados.

Embora o aprimoramento mecânico sempre seja desejável na dosagem do concreto permeável, a maior contribuição na adição de agregado miúdo está na redução do consumo de cimento. Além disso, a redução da porosidade e da condutividade hidráulica não é um efeito desejado após definido o desempenho hidráulico de projeto. Dessa forma, a otimização da mistura proposta neste estudo é realizada mantendo-se a condutividade hidráulica inicial da mistura convencional. Para isso, deve ser realizado o ajuste da consistência da pasta de cimento acompanhado da correção do traço para manter a porosidade fixa. A dosagem de agregado miúdo na mistura de concreto permeável parte das seguintes premissas:

- a) O agregado miúdo é totalmente incorporado na pasta de cimento, sendo a sua adição definida como um teor em relação à massa de cimento (relação m/c);
- b) Concretos com mesma relação m/c apresentam matrizes cimentícias com as mesmas características, independentemente da porosidade do concreto;
- c) A pasta de cimento com adição de agregado miúdo ainda mantém reologia adequada para cobertura do agregado graúdo, desde que seja realizado o ajuste da consistência;
- d) A condutividade hidráulica não é prejudicada pela adição de areia, desde que mantida a consistência de pasta de cimento e porosidade da mistura;
- e) Pequenas adições de agregado miúdo podem ser realizadas sem prejudicar o desempenho mecânico do concreto permeável.

Assumindo que o ajuste da consistência da pasta de cimento mantém o comportamento do concreto permeável ao esforço de compactação, pode-se considerar que o grau de compactação será aproximadamente constante, mesmo com a adição do agregado miúdo. Dessa forma, o volume total de pasta de cimento também é constante, havendo uma redução de cimento proporcional ao teor de agregado miúdo. Considerando essas premissas, o potencial de redução no consumo de cimento (R_{cim}) pode ser estimado em função do teor de agregado miúdo m/c, conforme descrito pela Equação 35.

$$R_{\text{cim}} = \frac{m/c}{d_{\text{agm}} \left(\frac{1}{d_{\text{cim}}} + a/c + \frac{m/c}{d_{\text{agm}}} \right)} \quad (35)$$

A curva de consumo de cimento pode ser construída por uma função relacionando o consumo inicial (mistura sem adição) e o potencial de redução R_{cim} (Equação 35), conforme apresentado na Equação 36.

$$C_{\text{cim},m/c} = C_{\text{cim},0} \cdot (1 - R_{\text{cim}}) \quad (36)$$

Sendo:

$C_{\text{cim},m/c}$ – consumo de cimento estimado na mistura com teor de agregado miúdo m/c

$C_{\text{cim},0}$ – consumo de cimento da mistura sem adição de agregado miúdo, estimado pela Equação 32.

A resistência mecânica pode ser afetada pela inclusão do agregado miúdo na mistura, porém não há consenso sobre esse efeito. Conforme observado na Etapa III, a resistência mecânica do concreto permeável não forma uma relação bem definida com o consumo de cimento para uma mesma porosidade. Esse efeito foi observado principalmente nas misturas com maior teor de pasta (porosidade de 20%). Nas misturas com maior porosidade a resistência mecânica foi mais sensível a variações no consumo de cimento. Portanto, o agregado miúdo pode ser utilizado em pequenas adições para compor parte do volume de pasta, não comprometendo a resistência da matriz cimentícia e do concreto permeável. No entanto, o teor máximo irá variar com a porosidade do concreto, devendo ser analisado em cada mistura. Baseando-se nos resultados da Etapa III, é esperado que nos concretos com maior volume de pasta ocorra uma maior tolerância na adição de agregado miúdo. Assim, a relação m/c ótima corresponde ao valor máximo que não apresente prejuízo ao desempenho mecânico do concreto permeável. Embora a porosidade seja mantida constante nesse processo, a condutividade hidráulica também deve ser medida com o intuito de garantir a manutenção do desempenho hidráulico selecionado na fase inicial de dosagem.

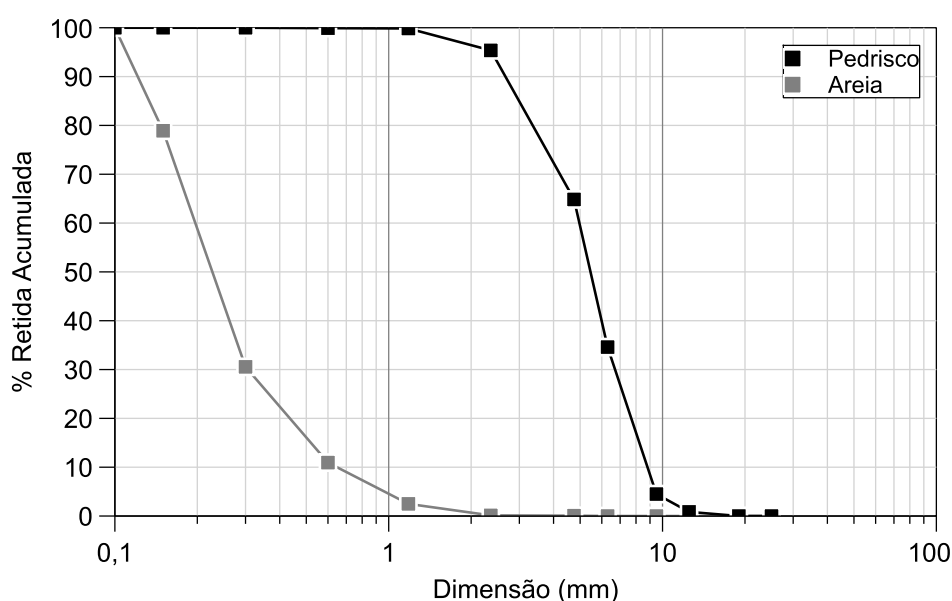
Para definir a quantidade ideal de agregado miúdo devem ser selecionados teores iniciais, recomendando-se valores dentro da faixa usual reportada na literatura.

O teor de areia comumente empregado nas pesquisas está compreendido entre 5 e 10% em relação à massa de agregado gráúdo, correspondendo a relações m/c na ordem de 0,2 a 0,4 (ALIABDO; ELMOATY; FAWZY, 2018; IBRAHIM *et al.*, 2020; SAHDEO *et al.*, 2020). Para cada teor selecionado é necessário ajustar a consistência da pasta de cimento conforme a seção 8.1 e corrigir a relação g/c aplicando-se o método do grau de compactação.

8.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS

As duas fases de otimização da mistura foram conduzidas para as misturas de concreto permeável desenvolvidas na Etapa IV, na aplicação do método de dosagem proposto. Foi empregado cimento CII F-32 como aglomerante e pedrisco como agregado gráúdo. Para correção da consistência foi empregado um aditivo superplastificante a base de policarboxilato. No estudo de dosagem de agregado miúdo foi utilizada uma areia de origem natural, com densidade no estado seco de $2,62 \text{ g/cm}^3$ e distribuição granulométrica ilustrada na Figura 91.

Figura 91 – Distribuição granulométrica do agregado gráúdo e miúdo



As metodologias para aperfeiçoamento mecânico e inclusão de agregado miúdo foram realizadas para porosidades de projeto de 20, 25 e 30% com o intuito de aplicar o procedimento na faixa usual de dosagem do concreto permeável. Essas duas

fases de otimização foram realizadas de forma independente, a partir das misturas de referência das porosidades de projeto analisadas.

8.3.1 Controle da Relação a/c

Para exemplificação da fase de aperfeiçoamento mecânico foi avaliada como opção a redução da relação a/c de 0,28 a 0,20, com variações de 0,02. Por meio da metodologia para ajuste de consistência da pasta de cimento (Seção 8.1), obteve-se um índice de consistência padrão (ICp) de 254 ± 5 mm. Para cada relação a/c foi determinado o teor ideal de aditivo superplastificante para manter a consistência constante. Na sequência, o método do grau de compactação foi aplicado para realizar a correção dos traços e manter a porosidade de todas as misturas fixa. Na Tabela 22 estão relacionados os traços corrigidos em função da relação a/c de cada mistura e os parâmetros de dosagem.

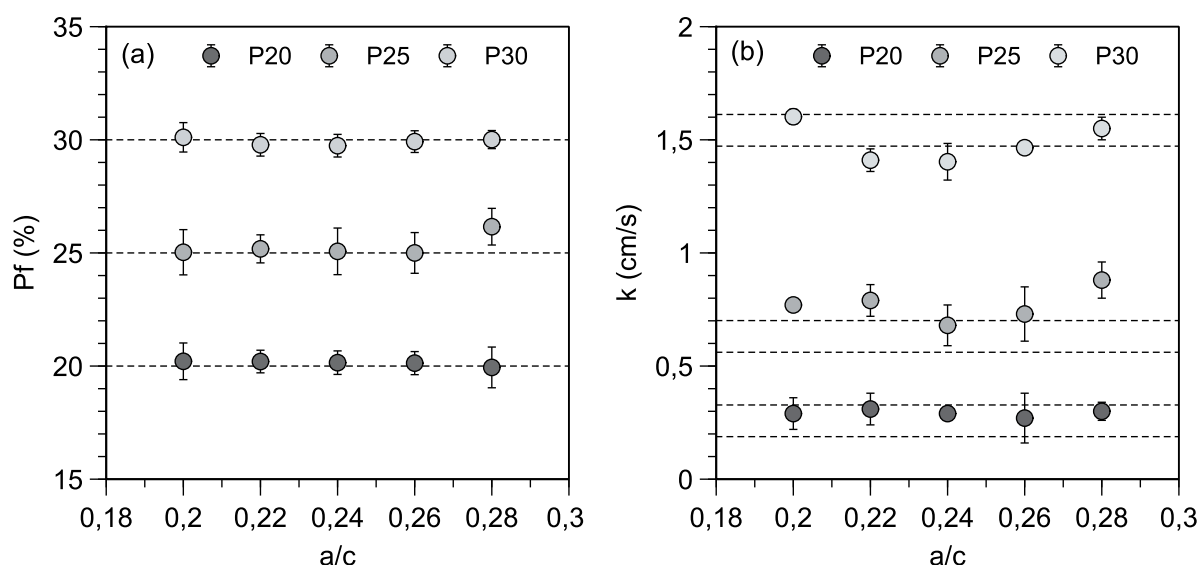
Tabela 22 – Traços corrigidos pelo método do grau de compactação e parâmetros de dosagem

Série	a/c	g/c	SP (%)	d_t (g/cm ³)	$G_{c,ef}$	V_P (%)
P20	0,28	3,61	0,00	2,73	0,932	26,7
	0,26	3,58	0,10	2,75	0,938	26,2
	0,24	3,40	0,20	2,76	0,933	26,4
	0,22	3,21	0,35	2,77	0,926	26,8
	0,20	2,94	0,50	2,78	0,910	27,7
P25	0,28	4,99	0,00	2,79	0,947	19,6
	0,26	4,51	0,10	2,79	0,945	20,9
	0,24	4,22	0,20	2,79	0,936	21,4
	0,22	3,90	0,35	2,80	0,936	22,3
	0,20	3,80	0,50	2,82	0,928	21,9
P30	0,28	6,29	0,00	2,82	0,950	15,6
	0,26	6,12	0,10	2,83	0,953	15,5
	0,24	5,87	0,20	2,84	0,954	15,7
	0,22	5,32	0,35	2,84	0,940	16,4
	0,20	5,19	0,50	2,86	0,940	16,2

Conforme apresentado na Tabela 22, a redução na relação a/c resultou em um incremento na relação g/c para compensar a variação na densidade da matriz cimentícia. O grau de compactação das misturas foi constante para reduções de a/c até 0,24, indicando que a mistura de concreto apresentou o mesmo comportamento

frente ao esforço de compactação. Nas misturas com relação a/c de 0,22 e 0,20 houve uma maior variabilidade no $G_{c,ef}$, o que pode ser atribuído à pequena quantidade de água presente na mistura. Ainda que a consistência de pasta tenha sido corrigida, houve maior resistência à compactação nessas misturas. A caracterização de porosidade e condutividade hidráulica das três misturas está ilustrada na Figura 92.

Figura 92 – (a) Porosidade no estado fresco e (b) condutividade hidráulica das misturas com relação a/c variável

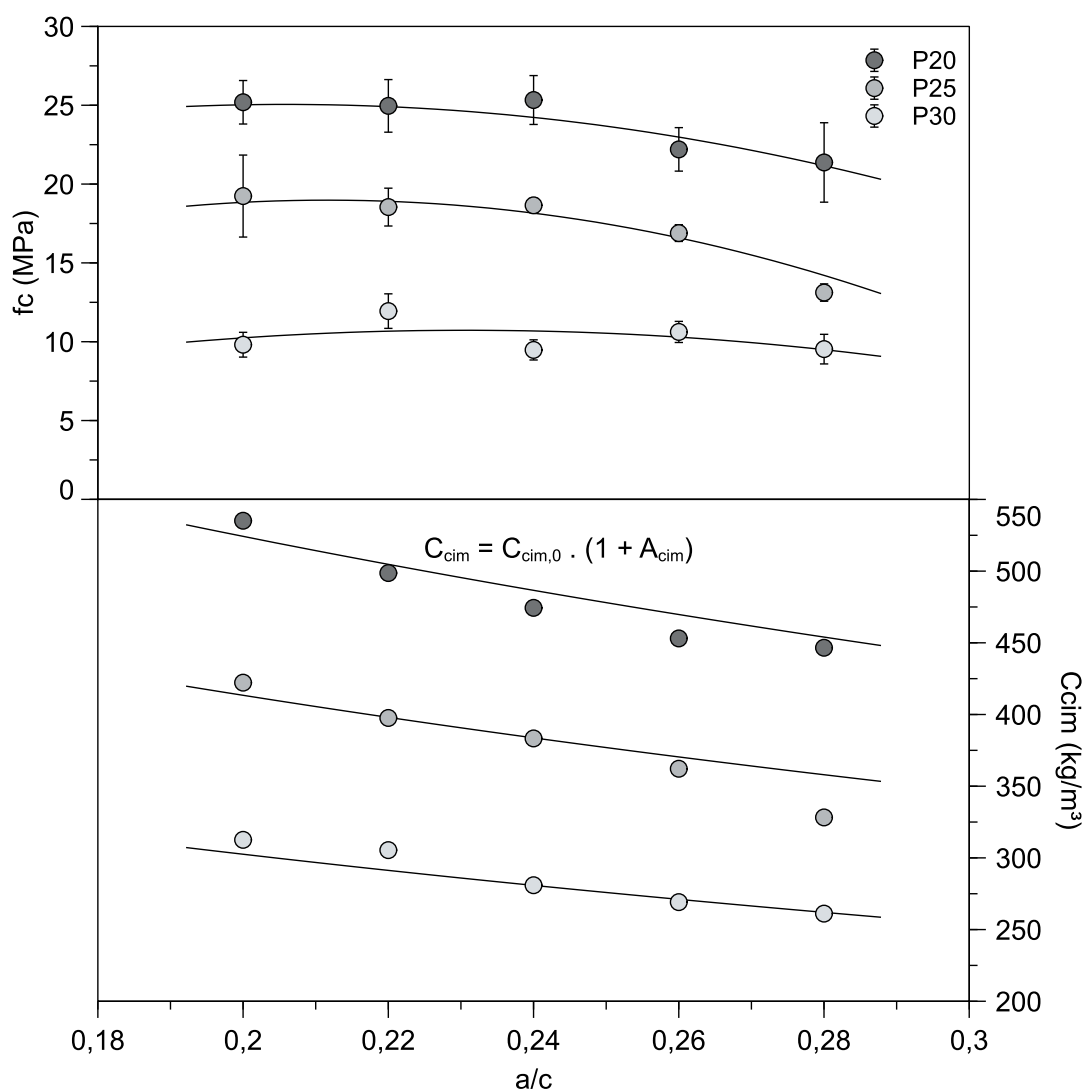


Notas: Linhas representam em (a) porosidades de projeto e em (b) faixa de condutividade hidráulica de projeto considerando erro padrão do modelo.

Observa-se na Figura 92a que as porosidades no estado fresco corresponderam aos valores de projeto em todas as relações a/c . Conforme já discutido anteriormente, houve uma divergência significativa apenas no traço de referência da mistura P25. Na Figura 92b estão ilustrados os resultados de condutividade hidráulica em comparação a faixa de condutividade hidráulica de projeto (estimada pelo modelo ilustrado na Figura 81) considerando o erro padrão do modelo. Para as misturas P20 a condutividade hidráulica se manteve constante em todas as relações a/c , garantindo assim a manutenção do desempenho hidráulico após o aperfeiçoamento mecânico. Nas misturas P25 o traço de referência apresentou condutividade hidráulica superior ao valor de projeto, uma vez que sua porosidade foi superior a 25%. Nos traços com redução da relação a/c a porosidade não diferiu significativamente de 25%, apresentando condutividades mais próximas da faixa de projeto. Para as misturas P30 houve uma maior variabilidade no coeficiente de

permeabilidade dos concretos permeáveis, havendo um resultado inferior ao valor de projeto nas misturas com a/c de 0,24 e 0,22. Essas discrepâncias podem ter ocorrido devido à variabilidade natural do processo de compactação, principalmente nas misturas com pouca disponibilidade de água. Após verificadas a porosidade e condutividade hidráulica das misturas, a relação a/c ideal pode ser escolhida nas curvas características, conforme ilustrado na Figura 93.

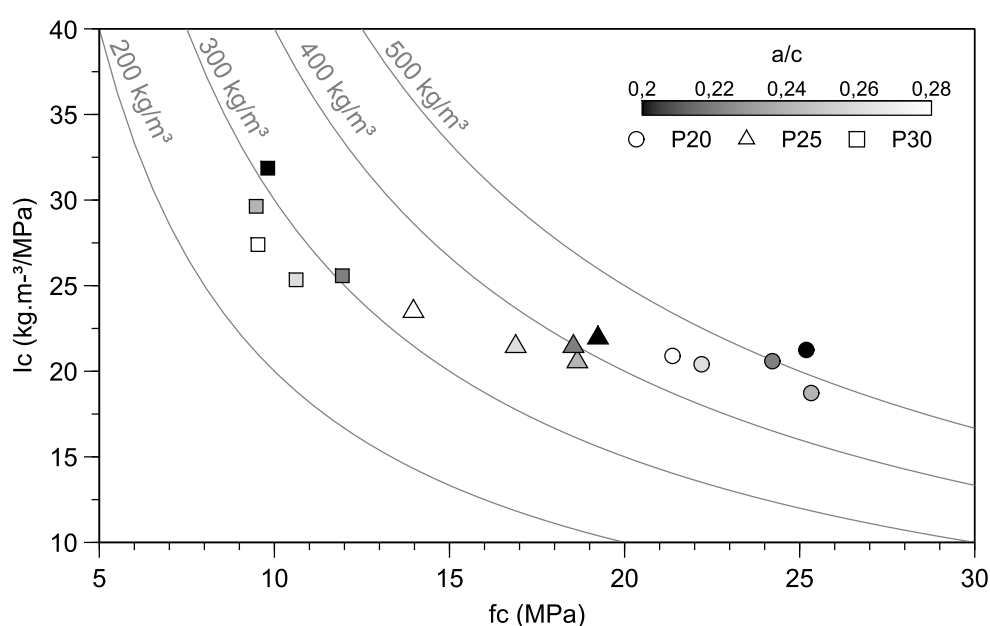
Figura 93 – Curvas de resistência à compressão e consumo de cimento em função da relação a/c



Conforme observado na Figura 93, nas três porosidades de projeto foi possível obter um aperfeiçoamento mecânico do concreto permeável pela redução da relação a/c. Na série P20 e P25 houve um desempenho mecânico máximo nas misturas com relação a/c de 0,20, gerando acréscimos de resistência à compressão de 17,9 e

37,7%, respectivamente. Na série P30 houve um desempenho máximo quando a relação a/c de 0,22 foi utilizada, proporcionando ganho de 25,3% na resistência à compressão. O acréscimo de resistência obtido com a redução da quantidade de água na mistura foi acompanhado de um incremento no consumo de cimento, conforme ilustrado na Figura 93. No entanto, a intensidade de consumo de cimento é mantida aproximadamente constante. Na Figura 94 está ilustrado o I_c das misturas com relação a/c variável.

Figura 94 – Intensidade de consumo de cimento das misturas em função da resistência à compressão



Na Figura 94 é possível observar que, em geral, a intensidade no consumo de cimento é mantida fixa mesmo com a redução da relação a/c. Isto indica que o aprimoramento mecânico é realizado com eficiência similar ao traço de referência, porém com a vantagem de manter um desempenho hidráulico similar. Embora a redução de porosidade também aumente o desempenho mecânico do concreto, há um impacto imediato na condutividade hidráulica. Considerando a mistura P20, por exemplo, a redução na relação a/c de 0,28 para 0,20 ocasionou um aumento da resistência à compressão de 21,4 MPa para 25,2 MPa. Analisando os modelos na Figura 81, esse aprimoramento mecânico também seria possível pela redução de porosidade para 17,5%. Porém, a condutividade hidráulica seria reduzida em aproximadamente 47%, podendo limitar a sua aplicação.

Para os materiais e método de compactação empregados nesta etapa experimental, o aprimoramento mecânico foi limitado à relação a/c de 0,20, uma vez que a redução desta pode prejudicar a hidratação do cimento pela insuficiência de água na mistura. O aumento da resistência mecânica além deste ponto somente será possível por meio de outras opções, como:

- a) Uso de adições ao cimento;
- b) Utilizar agregados que permitam redução adicional de porosidade, mantendo ainda um desempenho hidráulico mínimo;
- c) Ajustar a energia de compactação.

8.3.2 Inclusão de Agregado Miúdo

Uma vez que a consistência padrão da pasta de cimento já foi alcançada com uma quantidade de água baixa, a otimização das misturas foi realizada mantendo-se a relação a/c inicial de 0,28. Aplicando-se a Equação 35 para os materiais empregados neste estudo, obtém-se o potencial de redução no consumo de cimento, conforme descrito pela Equação 37.

$$R_{\text{cim}} = \frac{m/c}{(1,565 + m/c)} \quad (37)$$

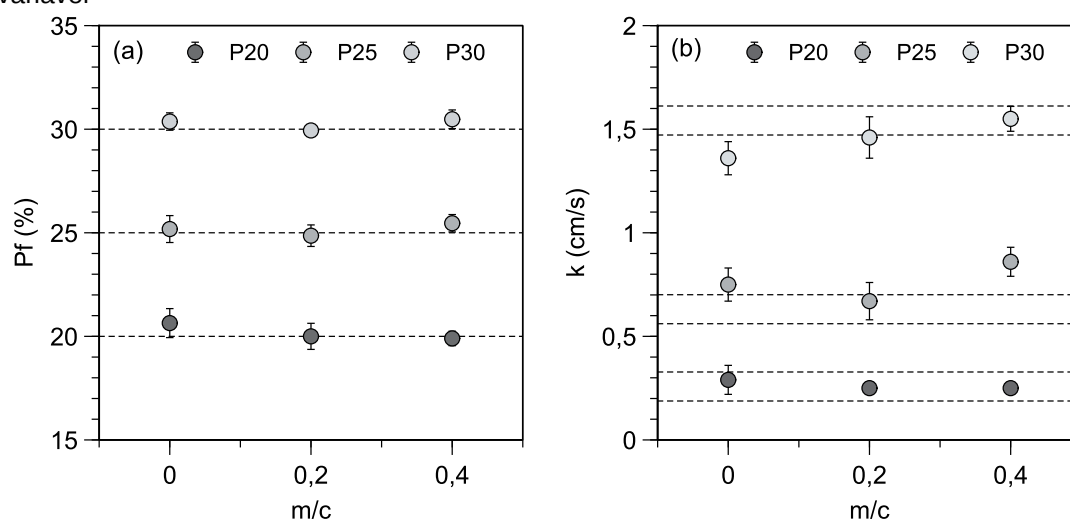
Para esta etapa adotou-se teores de agregado miúdo de 20 e 40% em relação à massa de cimento na mistura, valores dentro da faixa usual reportada na literatura. Aplicando-se a Equação 37, verifica-se um potencial em reduzir o consumo de cimento em 11,3 e 20,4%, respectivamente. Se o desempenho mecânico e hidráulico do concreto permeável for mantido, qualquer teor de agregado miúdo utilizado será vantajoso. Como a adição de agregado miúdo altera significativamente a reologia da pasta de cimento, foi realizado um novo ajuste de consistência. Por meio do procedimento descrito em 8.1 obteve-se teores de aditivo superplastificante de 0,07 e 0,16% para compensar a adição de 20 e 40% de agregado miúdo, respectivamente. O método do grau de compactação foi aplicado para corrigir o traço em função do teor de agregado miúdo m/c, sendo os parâmetros de dosagem apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Traços corrigidos e parâmetros de dosagem em função do teor de agregado miúdo

Série	m/c	g/c	SP (%)	d_t (g/cm ³)	$G_{c,ef}$	V_P (%)
P20	0,0	3,50	0,00	2,72	0,926	27,0
	0,2	3,82	0,07	2,74	0,922	27,8
	0,4	4,24	0,16	2,76	0,923	27,9
P25	0,0	4,37	0,00	2,77	0,936	21,9
	0,2	4,80	0,07	2,78	0,933	22,4
	0,4	5,45	0,16	2,80	0,931	21,9
P30	0,0	5,81	0,00	2,81	0,939	16,5
	0,2	6,73	0,07	2,84	0,951	16,3
	0,4	7,37	0,16	2,85	0,940	16,4

Conforme descrito na tabela, a adição de agregado miúdo impactou de forma significativa a relação g/c, evidenciando a redução de cimento na mistura. Verifica-se também que a presença do material fino ocasiona um aumento sucinto na densidade teórica da mistura. Devido a correção da consistência de pasta e ao teor de agregado miúdo ser limitado a 40% em massa, o grau de compactação foi similar em cada mistura. Houve uma variação superior apenas na série P30 com adição de 20% de areia. Observa-se que o volume de pasta de cimento foi mantido constante em cada série de concreto, uma vez que a porosidade foi mantida constante. Os concretos permeáveis foram produzidos com os traços finais descritos na Tabela 23 e caracterizados. A porosidade no estado fresco e o desempenho hidráulico podem ser observados na Figura 95.

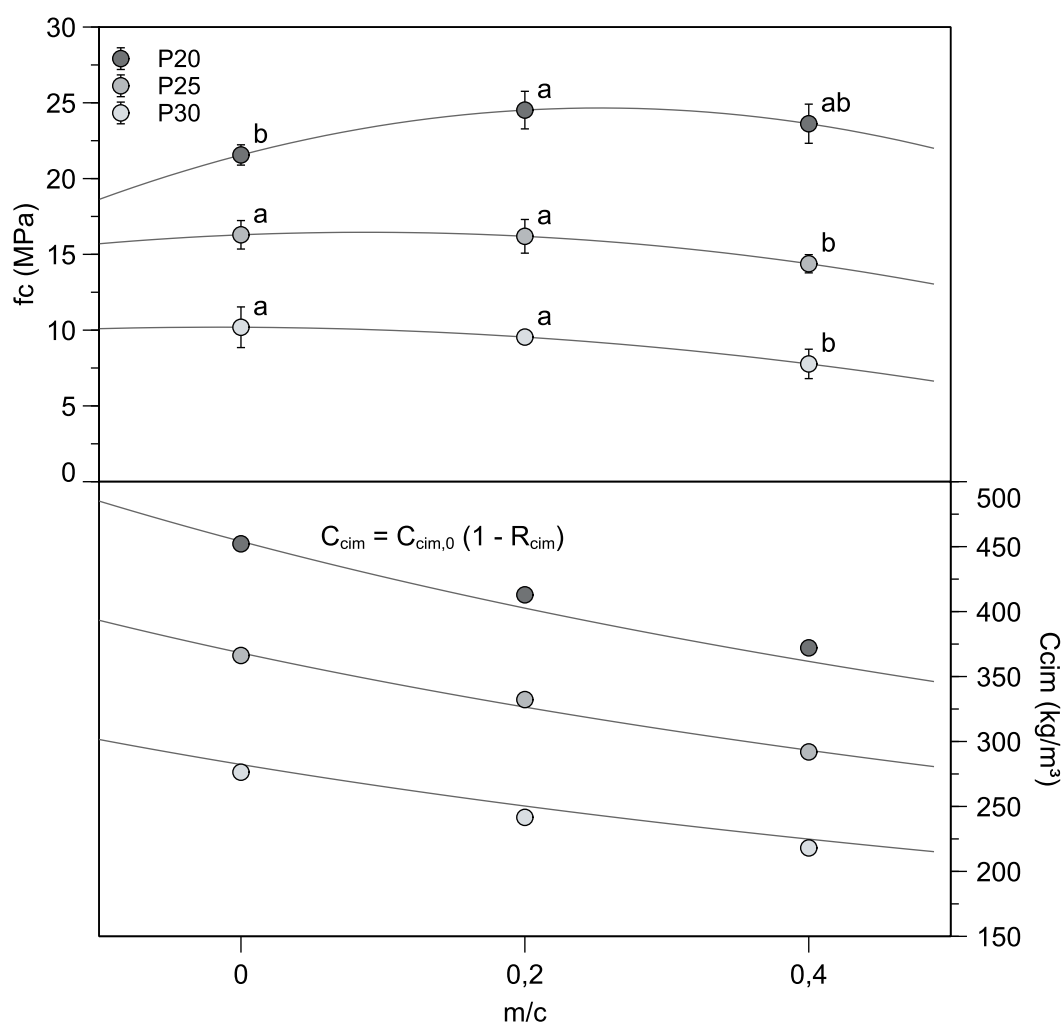
Figura 95 – (a) Porosidade no estado fresco e (b) condutividade hidráulica das misturas com relação m/c variável



Notas: Linhas representam em (a) porosidades de projeto e em (b) faixa de condutividade hidráulica de projeto considerando erro padrão do modelo.

Na Figura 95a é possível identificar que em cada série de concreto permeável foi possível manter a porosidade fixa, independente do teor de agregado miúdo. Como consequência, a condutividade hidráulica foi similar nas misturas pertencentes à mesma série, conforme ilustrado na Figura 95b. Na série P20 o desempenho hidráulico apresentou pouca variação, sendo compreendido na faixa de dosagem $0,30 \pm 0,07$ cm/s. Para as séries P25 e P30 a inclusão de areia causou uma variação superior, porém o efeito foi positivo. Houve aumento na condutividade hidráulica, o que pode ser atribuído a alteração nas características dos poros, uma vez que a porosidade foi constante e a compactação ocorreu de forma similar em todas as misturas. O desempenho mecânico e consumo de cimento em função do teor de areia podem ser observados na Figura 96.

Figura 96 – Curvas de resistência à compressão e consumo de cimento em função da relação m/c

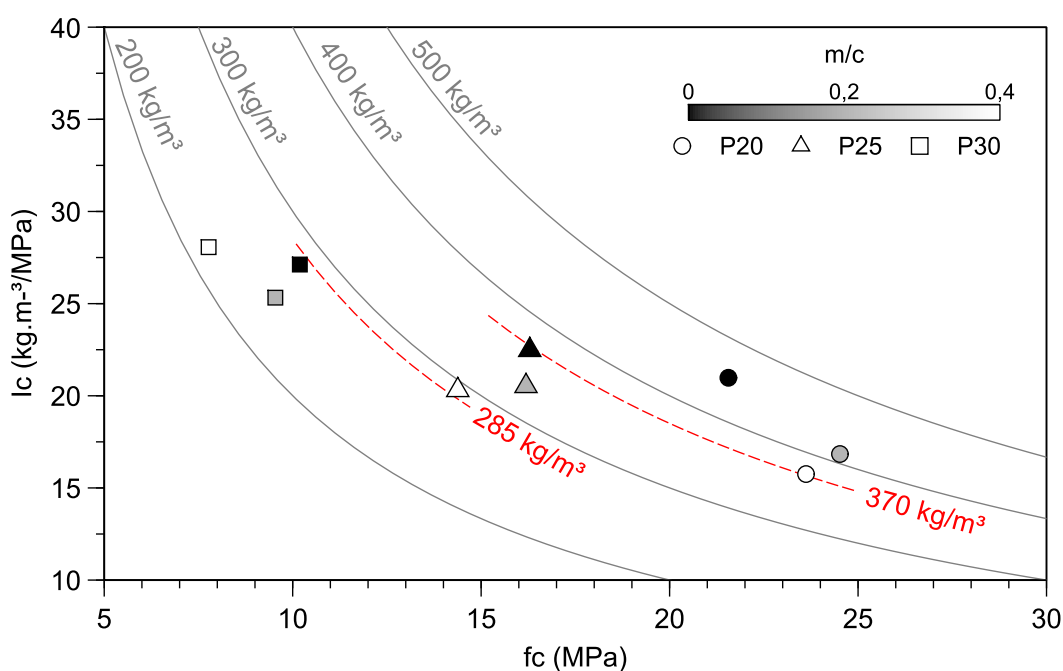


Nota: Pontos pertencentes a mesma série seguidos de mesma letra não diferem estatisticamente no Teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

Na Figura 96 é possível notar que a inclusão de até 20% de agregado miúdo na mistura não afetou significativamente a resistência à compressão dos concretos permeáveis. Para a série P20, o teor m/c de 0,2 proporcionou ainda um aprimoramento mecânico significativo. Houve incremento de 13,8% na resistência à compressão média, ainda que o consumo de cimento tenha se reduzido em 8,7%. Ainda para esta porosidade de projeto, o uso de 40% de areia mantém esse aprimoramento com uma redução de cimento de 17,7% em relação ao traço de referência. Nas séries P25 e P30 não houve uma resistência mecânica superior pela adição de 20% de agregado miúdo, porém o consumo de cimento foi reduzido em 9,3 e 12,6%, respectivamente. Embora a relação m/c de 0,4 proporcione a maior eficiência no uso de cimento, para essas misturas houve prejuízo ao desempenho mecânico.

Analizando o consumo de cimento, em todas as misturas houve diferença significativa entre os resultados obtidos para cada teor de agregado miúdo. É possível notar também que o consumo de cimento de cada mistura foi próximo aos valores estimados pelo modelo (Figura 96). Dessa forma, esse modelo pode ser empregado de forma auxiliar na fase de seleção de porosidade de projeto e do aperfeiçoamento mecânico. Em relação à intensidade no uso do cimento, a adição de agregado miúdo também torna o concreto permeável mais eficiente, conforme ilustrado na Figura 97.

Figura 97 – Intensidade no consumo de cimento das misturas contendo adição de agregado miúdo



Conforme ilustrado, foi possível reduzir consideravelmente a intensidade no consumo de cimento das três misturas analisadas. A mistura P20 com 40% de agregado miúdo apresentou consumo de cimento (aproximadamente 370 kg/m³) similar à mistura P25 de referência, porém com um I_c inferior. O mesmo pode ser observado comparando-se a série P25 com 40% de areia e a mistura P30 de referência (consumo de cimento de 285 kg/m³). Isso demonstra que a redução da porosidade do concreto permeável não exige um acréscimo de cimento significativo na mistura. Caso a condutividade hidráulica não seja o fator limitante, pode-se partir de uma porosidade de projeto menor e controlar o teor de agregado miúdo para ajustar o desempenho mecânico. Dessa forma, obtém-se uma mistura com melhor aproveitamento do aglomerante, apresentando desempenho mecânico similar ou até mesmo superior. Portanto, esses resultados demonstram que há um grande potencial no uso de agregado miúdo na dosagem de concretos permeáveis.

8.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A OTIMIZAÇÃO DE MISTURAS

A principal dificuldade na dosagem de concretos permeáveis é a relação inversa entre resistência mecânica e condutividade hidráulica. A resistência mecânica do material acaba sendo limitada por uma porosidade mínima associada ao desempenho hidráulico desejado. No método proposto neste estudo foi demonstrado que é possível realizar um aperfeiçoamento mecânico alterando-se as propriedades da matriz cimentícia. No concreto permeável também é possível utilizar a relação a/c como uma variável de dosagem, porém é necessário um controle superior quando comparado ao concreto convencional. A principal implicação na alteração da relação a/c é na consistência da pasta de cimento. Pastas com consistência inadequada podem levar a defeitos de produção do concreto, como a colmatação dos poros e a falta de aderência entre os grãos do agregado. Nesse contexto, nesta proposta de dosagem foi apresentada uma metodologia para definir a consistência de pasta padrão e mantê-la constante em matrizes cimentícias distintas. Em conjunto com o método do grau de compactação, torna-se possível manipular as características da pasta de cimento para gerar o aperfeiçoamento mecânico do concreto permeável. E isso é realizado com a manutenção do mesmo desempenho hidráulico, evitando-se também defeitos de produção.

No decorrer deste estudo também foi possível identificar que o concreto permeável apresenta por natureza um consumo de cimento elevado. Na literatura o material foi denominado inicialmente como “concreto sem finos”, sendo comum no meio científico estudos que analisam misturas sem agregado miúdo. O uso de agregado miúdo no concreto permeável é tradicionalmente associado a um desempenho hidráulico inferior. No entanto, neste estudo foi possível demonstrar que a adição de agregado miúdo não prejudica a condutividade hidráulica, uma vez que houve o controle de porosidade e da consistência da pasta. A dosagem de agregado miúdo apresentada neste capítulo demonstrou que a inclusão de areia proporciona um meio de otimizar as misturas, reduzindo consideravelmente o consumo de cimento. Isso torna-se mais importante nas misturas de baixa porosidade, quando um desempenho mecânico elevado é desejado. Dessa forma, a presença de agregado miúdo no concreto permeável pode ser cada vez mais necessária visando a eficiência do material. Um teor mínimo, por exemplo, pode ser utilizado por padrão no início da dosagem, ainda sendo possível otimizar a mistura após a definição da porosidade de projeto e a fase de aperfeiçoamento mecânico.

Portanto, com o método de dosagem proposto neste estudo foi possível estabelecer fundamentos para a elaboração de misturas de concreto permeável. O método do grau de compactação e o ajuste da consistência de pasta de cimento, em conjunto, permitiram controlar as principais variáveis de dosagem, sendo procedimentos adaptáveis aos materiais e métodos de compactação empregados. Além disso, os parâmetros de entrada do método consistem em caracterizações usuais de agregados, simplificando o processo de dosagem e correlação com as propriedades do concreto permeável.

9 CONCLUSÕES

9.1 CONCLUSÃO GERAL

A principal contribuição deste estudo foi a proposta de um método de dosagem de concreto permeável providenciando um procedimento sistemático para controlar três principais fatores: (a) porosidade de projeto; (b) relação a/c e (c) teor de agregado miúdo. A partir desses fatores é possível também controlar as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável, permitindo a dosagem de uma mistura que atenda a requisitos para sua aplicação. A principal característica do método é a sua flexibilidade nas condições experimentais. Essa metodologia pode ser aplicada para agregados com características distintas, técnicas e energias de compactação variáveis e concretos contendo adições à matriz cimentícia. Esse ajuste é possível por meio do grau de compactação e do índice de consistência padrão, que podem ser determinados experimentalmente para as condições locais de cada estudo. Essa é uma grande contribuição ao desenvolvimento de misturas de concreto permeável, uma vez que as limitações quanto ao tipo de agregado são superadas. Dessa forma, o controle de porosidade torna-se um processo sistematizado, dispensando-se o uso de ábacos restritos ou o ajuste da energia de compactação para dosagem do concreto permeável. Além de fornecer um embasamento para controlar os parâmetros usuais de dosagem, o método apresentado ainda permite modificações da matriz cimentícia visando a manutenção da porosidade e, conseqüentemente, do desempenho hidráulico do material. Embora foram abordados apenas o controle da relação a/c e a adição de agregado miúdo, o método pode ser expandido para considerar outras modificações da matriz cimentícia.

9.2 CONCLUSÕES ESPECÍFICAS

No decorrer das campanhas experimentais foram obtidos resultados com potencial contribuição à literatura de concreto permeável, esclarecendo conceitos necessários ao estabelecimento de uma metodologia de dosagem. A seguir foram relacionadas as conclusões específicas obtidas neste estudo:

- a) A cura do concreto permeável exige maior controle devido a maior suscetibilidade do material à lixiviação. A cura úmida sugerida neste estudo

oferece condições para a hidratação do cimento sem risco de lixiviação dos componentes da pasta. É possível replicar essa condição para a produção de peças pré-moldadas de concreto permeável, além de se aproximar das condições que ocorrem em campo na execução de pavimentos *in loco*;

- b) A energia de compactação pode ser utilizada como uma forma de otimizar misturas de concreto permeável, maximizando o desempenho mecânico sem prejudicar excessivamente a condutividade hidráulica. Se for possível seu ajuste, deve-se definir a energia ótima de compactação para produzir misturas com a maior eficiência possível;
- c) A condutividade hidráulica de concretos permeáveis é uma das propriedades essenciais para garantir a sua funcionalidade, sendo essencial caracterizá-la corretamente. Os permeâmetros de carga variável e constante, em geral, apresentam resultados similares, porém com variações atribuídas as diferenças construtivas de cada equipamento. O permeâmetro de carga variável permite maior flexibilidade no ajuste da carga hidráulica, sendo uma vantagem operacional. O anel de infiltração, por sua vez, é um procedimento que tem potencial em se tornar um padrão na aferição do desempenho hidráulico. O método de aproxima se aproxima da técnica de medição da taxa de infiltração em campo e é facilmente reproduzido em laboratório por sua simplicidade;
- d) A porosidade no estado fresco é um parâmetro que contribui para a dosagem e o controle de misturas de concreto permeável. Conforme constatado neste estudo, essa porosidade mede principalmente os vazios intergranulares, que são responsáveis pelo desempenho mecânico e hidráulico do material. Por ser aferida ainda no estado fresco, essa propriedade permite um controle da mistura no momento da compactação. Essa porosidade também pode ser correlacionada com as propriedades dos materiais constituintes com maior facilidade;
- e) A seleção de agregados compõe uma etapa essencial na dosagem de concretos permeáveis. As propriedades mecânicas e hidráulicas são afetadas diretamente, bem como a eficiência no uso de cimento. Embora composições uniformes sejam usualmente associadas ao concreto permeável, os agregados convencionais oferecem desempenho inicial satisfatório. Ajustes nos

agregados podem ser realizados para otimizar a dosagem do concreto permeável;

- f) A dosagem de concretos permeáveis pode ser realizada por procedimentos teórico-experimentais partindo-se do controle da porosidade no estado fresco e da consistência da pasta de cimento. O método do grau de compactação desenvolvido neste estudo possibilitou o desenvolvimento de misturas com porosidade fixa a partir da caracterização do índice G_c . Esse coeficiente permite correlacionar os fatores intervenientes da compactação do concreto permeável com as propriedades dos materiais constituintes. A vantagem do método consiste na caracterização do grau de compactação em um teste experimental, podendo ser reproduzido para diferentes métodos e energias de compactação, além de ser aplicável a diferentes agregados. No método é definido um procedimento sistemático para a correção de traços de concreto permeável, eliminando ajustes por meio da energia de compactação ou por tentativas experimentais;
- g) A dosagem de concretos permeáveis proposta permitiu a correlação das propriedades relevantes do material por meio da porosidade no estado fresco. Uma vez que a porosidade pode ser ajustada com facilidade pelo método do grau de compactação, as propriedades mecânicas e hidráulicas podem ser controladas da mesma forma. A porosidade de projeto é definida inicialmente pela condutividade hidráulica desejada, uma vez que o desempenho hidráulico depende diretamente da disponibilidade de poros no concreto. O desempenho mecânico, por sua vez, pode ser ajustado por meio da porosidade (desde que respeitado o desempenho hidráulico exigido) e das propriedades da matriz cimentícia;
- h) Na composição de concretos permeáveis a inclusão de agregado miúdo é necessária para evitar um consumo de cimento excessivo na mistura. Ao contrário do observado na literatura, concretos permeáveis contendo agregado miúdo não são prejudicados no que se refere ao desempenho hidráulico, caso ocorra controle de porosidade e consistência de pasta de cimento. Um teor mínimo pode ser empregado desde o início do processo de dosagem, sendo avaliadas adições superiores em função das características mecânicas da mistura.

9.3 PERSPECTIVAS FUTURAS

Nesta pesquisa foi proposto um método de dosagem e otimização de misturas de concreto permeável, adaptando-se conceitos e relações apresentadas anteriormente na literatura. A metodologia proposta foi aplicada experimentalmente neste estudo para uma série de porosidades, materiais e energias de compactação. Os resultados obtidos demonstraram o potencial do método para controlar as propriedades do concreto permeável. No entanto, esta tese consistiu apenas em uma fase inicial da dosagem de concretos permeáveis, sendo fundamental a continuidade da pesquisa para validar e aperfeiçoar o método proposto. A seguir estão relacionados aspectos não abordados neste estudo, sendo sugeridos como pesquisas futuras:

- a) Validação do método do grau de compactação para diferentes condições experimentais, variando-se: o tipo de cimento; a origem mineralógica e forma dos grãos do agregado graúdo e o método de compactação. Deve ser analisado o efeito dessas variáveis no grau de compactação efetivo das misturas de concreto permeável;
- b) Aplicação do método do grau de compactação para a caracterização da resistência à tração na flexão do concreto permeável e relacionar o método de dosagem com o dimensionamento estrutural de pavimentos;
- c) Validação do método de dosagem para a produção, caracterização e otimização de elementos pré-moldados de concreto permeável para uso na pavimentação;
- d) Caracterização do concreto permeável moldado em campo e o estabelecimento de correlações com a compactação do material em laboratório. Ainda é necessário aproximar as características da produção do material em campo e laboratório;
- e) Definição do teor máximo de agregado miúdo na composição do concreto permeável. A dosagem de agregado miúdo ainda necessita de aprofundamento, sendo fundamental extrapolar os teores atualmente adotados e avaliar o comportamento mecânico do concreto permeável. Também é necessário agregados miúdos com diferentes características.

REFERÊNCIAS

- ADIL, G.; KEVERN, J. T.; MANN, D. Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 247, 118453, 2020.
- AGAR-OZBEK, A. S. *et al.* Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 480-490, 2013.
- AKAND, L.; YANG, M.; GAO, Z. Characterization of pervious concrete through image based micromechanical modeling. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 547-555, 2016.
- AKAND, L.; YANG, M.; WANG, X. Effectiveness of chemical treatment on polypropylene fibers as reinforcement in pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 32-39, 2018.
- AKKAYA, A.; ÇAĞATAY, I. H. Investigation of the density, porosity, and permeability properties of pervious concrete with different methods. **Construction and Building Materials**, v. 294, 123539, 2021.
- ALSHAREEDAH, O.; HAIDER, M. M.; NASSIRI, S. Correlating laboratory and field compaction levels to achieve optimum in situ mechanical properties for pervious concrete pavements. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 10, 04020278, 2020.
- ALIABDO, A.; ELMOATY, A. E. M. A.; FAWZY, A. M. **Construction and Building Materials**, v. 193, p. 105-127, 2018.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-10 Report on pervious concrete**. ACI, 2010.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 209R-92 Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures**. ACI, 1992.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C33M: Standard Specification for Concrete Aggregates**. West Conshohocken: ASTM, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C127: Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate**. West Conshohocken: ASTM, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C150M: Standard Specification for Portland Cement**. West Conshohocken: ASTM, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C192M: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory**. West Conshohocken: ASTM, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C944M: Standard Practice for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method.** West Conshohocken: ASTM, 2012a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1688M: Standard test method for density and void content of freshly mixed pervious concrete.** West Conshohocken: ASTM, 2014a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1701M: Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete.** West Conshohocken: ASTM, 2014b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1747M: Standard test method for determining potential resistance to degradation of pervious concrete by impact and abrasion.** West Conshohocken: ASTM, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1754M: Standard Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete.** West Conshohocken: ASTM, 2012b.

ASPHALT INSTITUTE. **MS-2 Asphalt mix design methods.** 7 ed. Lexington: ASPHALT INSTITUTE, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738 Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739 Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211 Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215 Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222 Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778 Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916 Agregado Miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248 Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

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, 2015.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS; ABEDA, 2008.

BHUTTA, M. A. R.; TSURUTA, K.; MIRZA, J. Evaluation of high-performance porous concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 67-73, 2012.

BHUTTA, M. A. R. *et al.* Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1243-1248, 2013.

BILAL, H. *et al.* Influence of silica fume, metakaolin & SBR latex on strength and durability performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 275, 122124, 2021.

BITTENCOURT, S. V.; MAGALHÃES, M. S.; TAVARES, M. E. da N. Mechanical behavior and water infiltration of pervious concrete incorporating recycled asphalt pavement aggregate. **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, e00473, 2021.

BONICELLI, A. *et al.* Laboratory analysis for investigating the impact of compaction on the properties of pervious concrete mixtures for road pavements. **Advanced Materials Research**, v. 723, p. 409-419, 2013.

BONICELLI, A.; GIUSTOZZI, F.; CRISPINO, M. Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 102-110, 2015.

BONICELLI, A.; PÉREZ-OSORIO, A.; FUENTES, L. Evaluating the incidence of mix design parameters and compaction on the properties of pervious concrete mixtures for urban pavements: a statistical approach. **Materials Science and Engineering**, v. 471, p. 1-10, 2019.

BRAKE, N. A.; ALLAHDADI, H.; ADAM, F. Flexural strength and fracture size effects of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 536-543, 2016.

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

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 627-637, 2016b.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Pore structure characterization of pervious concrete using x-ray microcomputed tomography. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 6, p. 1-11, 2018a.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Methodology to develop pervious concrete mixtures for target properties emphasizing the selection of mixture variables. **Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements**, v. 144, n. 3, p. 1-10, 2018b.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Investigation on flexural strength and stiffness of pervious concrete for pavement applications. **Advances in Civil Engineering Materials**, v. 7, n. 2, 20170015, 2018c.

CHINDAPRASIRT, P. *et al.* Cement paste characteristics and porous concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 894-901, 2008.

ĆOSIĆ, K. *et al.* Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 69-76, 2015.

COSTA, F. B. P. *et al.* Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests. **Revista Ibracon de Estrutura e Materiais**, v. 11, n. 5, p. 1151-1159, 2018.

COSTA, F. B. P. *et al.* Pervious concrete for desired porosity: Influence of w/c ration and a rheology-modifying admixture. **Construction and Building Materials**, v. 268, 121084, 2021.

CROUCH, L. K.; PITT, J; HEWITT, R. Aggregate effects on pervious Portland cement concrete static modulus of elasticity. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 19, n. 7, p. 561-568, 2007.

CROUCH, L. K. *et al.* Variability of fresh and hardened voids of pervious concrete. In: BROWN, H. L.; OFFENBERG, M. **Pervious Concrete**. West Conshohocken: ASTM, 2012. p. 52-68.

CRUZ, J. C. de la; CAMPO, J. M. del; COLORADO, D. Comparative study on porosity and permeability of conventional concrete and concrete with variable proportions of natural zeolite additions. **Journal of Construction**, v. 14, n. 3, p. 72-78, 2015.

CUI, X. *et al.* Experimental study on the relationship between permeability and strength of pervious concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 11, p. 1-9, 2017.

DAI, Z. *et al.* Multi-modified effects of varying admixtures on the mechanical properties of pervious concrete based on optimum design of gradation and cement-aggregate ratio. **Construction and Building Materials**, v. 233, 117178, 2020.

DAMINELI, B. L. *et al.* Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 555-562, 2010.

DEBNATH, B.; SARKAR, P. P. Permeability prediction and pore structure feature of pervious concrete using brick as aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 213, p. 643-651, 2019.

DEBNATH, B.; SARKAR, P. P. Pervious concrete as na alternative pavement strategy: a state-of-art review. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 21, n. 12, 2018.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. London: E & FN Spon, 1999.

DELATTE, N. **Concrete pavement design, construction and performance**. Abingdon: Taylor & Francis, 2008.

DEO, O; NEITHALATH, N. Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features. **Materials Science and Engineering A**, v. 528, n. 1, p. 402-412, 2010.

DINGMAN, S. L. **Physical Hydrology**. 3. ed. Illinois: Waveland Press, 2014. 643 p.

ELANGO, K. S. *et al.* Properties of pervious concrete – A state of the art review. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 2422-2425, 2021.

ELANGO, K. S.; REVATHI, V. Fal-G binder pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 91-99, 2017.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DÚ BÉTON. **Structural Concrete – Textbook on behavior, design and performance**. Lausanne: FIB, 1999.

FU, T. C. *et al.* The influence of aggregate size and binder material on the properties of pervious concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2014, p. 1-17, 2014.

GAEDICKE, C.; MARINES, A.; MIANKODILA, F. A method for comparing cores and cast cylinders in virgin and recycled aggregate pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 494-503, 2014.

GAEDICKE, C. *et al.* A method to correlate splitting tensile strength and compressive strength of pervious concrete cylinders and cores. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 271-278, 2016.

GIUSTOZZI, F. Polymer-modified pervious concrete for durable and sustainable transportation infrastructures. **Construction and Building Materials**, v.111, p. 502-512, 2016.

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, 2013.

GRUBEŠA, I. N. *et al.* Draining capability of single-sized pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 252-260, 2018.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M. Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete. **Materials and Structures**, v. 49, p. 521-536, 2016.

HASELBACH, L. M.; FREEMAN, R. M. Vertical porosity distributions in pervious concrete pavement. **ACI Materials Journal**, v. 103, n. 6, p. 452-458, 2006.

HWANG, S. S.; CORTÉS, C. M. M. Properties of mortar and pervious concrete with co-utilization of coal fly ash and waste glass powder as partial cement replacements. **Construction and Building Materials**, v. 270, 121415, 2021.

HUANG, J. H.; LUO, Z.; KHAN, M. B. E. Impact of aggregate type and size and mineral admixtures on the properties of pervious concrete: An experimental investigation. **Construction and Building Materials**, v. 265, 120759, 2020.

HUANG, J. *et al.* Evaluation of pore size distribution and permeability reduction behavior in pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 290, 123228, 2021.

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

IBRAHIM, H. A.; RAZAK, H. A.; ABUHATA, F. Strength and abrasion resistance of palm oil clinker pervious concrete under different curing method. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 576-587, 2017.

IBRAHIM, H. A. *et al.* Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of construction and demolition waste as aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 253, 119251, 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17785-1: Testing methods for pervious concrete – Part 1: Infiltration rate**. Geneva: ISO, 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17785-2: Testing methods for pervious concrete – Part 2: Density and void content**. Geneva: ISO, 2018.

JEBLI, M. *et al.* Influence of leaching on the local mechanical properties of an aggregate-cement paste composite. **Cement and Concrete Composites**, v. 73, p. 241-250, 2016.

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

KABAGIRE, K. D.; YAHIA, A. Modelling the properties of pervious concrete using a full-factorial design. **Road Materials and Pavement Design**, v. 19, n. 1, p. 1-17, 2016.

KAYHANIAN, M. *et al.* Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. **Journal of Environmental Management**, v. 95, n. 1, p. 114-123, 2012.

KEVERN, J. T.; WANG, K.; SCHAEFER, V. R. A Novel Approach to Characterize Entrained Air Content in Pervious Concrete. **Jornal of ASTM International**, v. 5, n. 2, p. 1-10, 2008.

KEVERN, J. T.; SCHAEFER, V. R.; WANG, K. The effect of curing regime on pervious concrete abrasion resistance. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 37, n. 4, p. 337-342, 2009.

KEVERN, J. T.; BIDDLE, D.; CAO, Q. Effects of Macrosynthetic Fibers on Pervious Concrete Properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 9, p. 1-6, 2015.

KHANKHAJE, E. *et al.* Properties of quiet pervious concrete containing oil palm kernel shell and cockleshell. **Applied Acoustics**, v. 122, p. 113-120, 2017.

KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, R. Clogging in permeable concrete: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 193, p. 221-233, 2017.

KIM, H. K.; LEE, H. K. Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete. **Applied Acoustics**, v. 71, n. 7, p. 607-615, 2010.

KOVÁČ, M.; SIČÁKOVÁ, A. Pervious concrete as an environmental solution for pavements: Focus on key properties. **Environments**, v. 5, n. 1, p. 1-9, 2018.

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

LIAN, C.; ZHUGE, Y. Optimum mix design of enhanced permeable concrete – na experimental investigation. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 12, p. 2664-2671, 2010.

LÓPEZ-CARRASQUILLO, V.; HWANG, S. Comparative assessment of pervious concrete mixtures containing fly ash and nanomaterials for compressive strength, physical durability, permeability, water quality performance and production cost. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 148-158, 2017.

LUND, M. S. M. *et al.* Self-compacting pervious concrete mix design for permeable concrete soakaway rings. **Advances in Civil Engineering Materials**, v. 7, n.1, p. 340-352, 2018.

MARTIN III, W. D.; KAYE, N. B.; PUTMAN, B. J. Using image analysis to measure the porosity distribution of a porous pavement. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 210-217, 2013.

MARTIN III, W. D.; KAYE, N. B.; PUTMAN, B. J. Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 78-84, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEININGER, R. C. No-fines pervious concrete for paving. **Concrete International**, v.10, p. 20-27, 1988.

MEULENYZER, S.; STORA, E.; PEREZ, F. Impact of Pervious Concrete Porosity on Permeability by 3D Image Analysis. In: BROWN, H. L.; OFFENBERG, M. **Pervious Concrete**. West Conshohocken: ASTM, 2012. p. 27-51.

MOHAMMED, B. S. *et al.* Properties of nano-silica modified pervious concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 8, p. 409-422, 2018.

MONTES, F.; VALAVALA, S.; HASELBACH, L. M. A new test method for porosity measurements of Portland cement pervious concrete. **Journal of ASTM International**, v. 2, n. 1, 2005.

MULLIGAN, A. N. **Attainable compressive strength of pervious concrete paving systems**. 2005, 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – University of Central Florida, Orlando, 2005.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION. **Materials and Mix Design**. Disponível em: <<http://www.perviouspavement.org>>. Acesso em: 3 abr. 2019.

NEITHALATH, N.; SUMANASOORIYA, M.; DEO, O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. **Materials Characterization**, v. 61, n. 8, p. 802-813, 2010.

NEPTUNE, A. I.; PUTMAN, B. J. Effect of Aggregate Size and Gradation on Pervious Concrete Mixtures. **ACI Materials Journal**, v. 107, n. 6, p. 625-631, 2010.

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

NIJP, J. J. *et al.* A modification of the constant-head permeameter to measure saturated hydraulic conductivity of highly permeable media. **MethodsX**, v. 4, p. 134-142, 2017.

OBLA, K. H. Pervious concrete – An overview. **The Indian Concrete Journal**, v. 84, m. 8, p. 9-18, 2010.

ÖZ, H. Ö. Properties of pervious concretes partially incorporating acidic pumice as coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 601-609, 2018.

ONI, B.; XIA, J.; LIU, M. Mechanical properties of pressure moulded fibre reinforced pervious concrete pavement brick. **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, e00431, 2020.

PANDA, R. P.; DAS, S. S.; SAHOO, P. K. Na empirical method for estimating surface area of aggregates in hot mix asphalt. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v. 3, n. 2, p. 127-136, 2016.

PARK, S. B. *et al.* A study on the seawater purification characteristics of water-permeable concrete using recycled aggregate. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 10, p. 658-665, 2010.

PUTMAN, B. J.; NEPTUNE, A. I. Comparison of test specimen preparation techniques for pervious concrete pavements. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3480-3485, 2011.

RANGELOV, M. *et al.* Using carbon fiber composites for reinforcing pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 875-885, 2016.

RAJ, J. L.; CHOCKALINGAM, T. Strength and abrasion characteristics of pervious concrete. **Road Materials and Pavement Design**, v. 21, n. 8, 2019.

ROZIÈRE, E. *et al.* Durability of concrete exposed to leaching and external sulfate attacks. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 1188-1198, 2009.

SAHDEO, S. K. *et al.* Effect of mix proportion on the structural and functional properties of pervious concrete paving mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 255, 119260, 2020.

SHAN, J. *et al.* Pore characteristics of pervious concrete and their influence on permeability attributes. **Construction and Building Materials**, v. 327, 126874, 2022.

SHEN, P. *et al.* Conceptual design and performance evaluation of high strength pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 269, 121342, 2021.

SCHAEFER, V. R. *et al.* **Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates**. Ames: National Concrete Pavement Technology Center, 2006.

SONEBI, M; BASSUONI, M. T. Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 147-154, 2013.

SONEBI, M; BASSUONI, M.; YAHIA, A. Pervious concrete: Mix design, properties and applications. **RILEM Technical Letters**, v. 1, p. 109-115, 2016.

SRIRAVINDRARAJAH, R.; WANG, N. D. H.; ERVIN, L. J. W. Mix design for pervious recycled aggregate concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 6, n. 4, p. 239-246, 2012.

SRIVASTAVA, R.; JAIN, A. **Engineering Hydrology**. Chnnai: McGraw Hill Education Private Limited, 2017. 408 p.

SULEIMAN, M. T. *et al.* Effect of compaction energy on pervious concrete properties. In: Proceedings of the 2006 NRMCA Concrete Technology Forum – Focus on Pervious Concrete, 2006, Nashville. **Anais...** Nashville: NRMCA, 2006.

TARNAI, M. *et al.* Design, construction and recent applications of porous concrete in Japan. In: Our World in Concrete & Structures, 28., 2003, Singapore. **Anais...** Singapore: CI-Premier PTE LTD, 2003. p. 121-130.

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

THIRUVENGADAM, M.; KUMAR, G. N. P.; SIVAKUMAR, D. Validity of Darcy and Forchheimer equations of porous medium flow. **Pollution Research**, v. 33, n.3, p. 511-518, 2014.

TIJANI, M. A.; AJAGBE, W. O.; AGBEDE, O. A. Combined reusing of sorghum husk ash and recycled concrete aggregate for sustainable pervious concrete production. **Journal of Cleaner Production**, v. 343, 131015, 2022.

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, 2015.

TORRES, A.; HU, J. An Alternate Test Method for the Void Content of Pervious Concrete. **Advances in Civil Engineering Materials**, v. 5, n. 1, p. 24-45, 2016.

WEST, D. *et al.* Quantifying the non-linear hydraulic behavior of pervious concrete. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 44, n. 6, p. 2172-2181, 2016.

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, 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, 103693, 2020.

XU, G. *et al.* Investigation on the properties of porous concrete as road base material. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 141-148, 2018.

YAHIA, A.; KABAGIRE, K. D. New approach to proportion pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 62, p. 38-46, 2014.

YAP, S. P. *et al.* Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 155-165, 2018.

YEIH, W.; CHANG, J. J. The influences of cement type and curing condition on properties of pervious concrete made with electric arc furnace slag as aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 813-820, 2019.

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

YU, F. *et al.* Study on the pores characteristics and permeability simulation of pervious concrete based on 2D/3D CT images. **Construction and Building Materials**, v. 200, p. 687-702, 2019b.

YU, F. *et al.* A modified mix design method for pervious concrete based on Mohr-Coulomb failure criterion. **Construction and Building Materials**, v. 269, 121801, 2021.

ZAETANG, Y. *et al.* Influence of mineral additives on the properties of pervious concrete. **Indian Journal of Engineering & Materials Sciences**, v. 24, p. 507-515, 2017.

ZHANG, Z. *et al.* Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 112-118, 2017.

ZHANG, J. *et al.* Numerical study on seepage flow in pervious concrete based on 3D CT imaging. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 468-478, 2018.

ZHANG, G. *et al.* Properties of pervious concrete with steel slag as aggregates and different mineral admixtures as binders. **Construction and Building Materials**, v. 257, 119543, 2020.

ZHANG, Y. *et al.* Comparative laboratory measurement of pervious concrete permeability using constant-head and falling-head permeameter methods. **Construction and Building Materials**, v. 263, 120614, 2020.

ZHENG, M.; CHEN, S.; WANG, B. Mix design method for permeable base of porous concrete. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 5, n. 2, p. 102-107, 2012.

ZHONG, R.; WILLE, K. Material design and characterization of high performance pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 51-60, 2015.

ZHONG, R.; WILLE, K. Compression response of normal and high strength pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 177-187, 2016.

ZHONG, R. *et al.* Influence of pore tortuosity on hydraulic conductivity of pervious concrete: Characterization and modeling. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 1158-1168, 2016.