

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA**

**PATRÍCIA PEREIRA**

**Desenvolvimento experimental e caracterização de concretos permeáveis  
para o controle do escoamento superficial**

**Lorena  
2021**



**PATRÍCIA PEREIRA**

**Desenvolvimento experimental e caracterização de concretos permeáveis  
para o controle do escoamento superficial**

**Dissertação apresentada à Escola de  
Engenharia de Lorena da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de Mestre em  
Ciências do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Materiais na área de  
concentração de Materiais Convencionais e  
Avançados.**

**Orientador: Profº Drº Sebastião Ribeiro**

**Versão Corrigida**

**Lorena**

**2021**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES  
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,  
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado  
da Escola de Engenharia de Lorena,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Pereira, Patrícia

Desenvolvimento experimental e caracterização de  
concretos permeáveis para o controle do escoamento  
superficial / Patrícia Pereira; orientador Sebastião  
Ribeiro - Versão Corrigida. - Lorena, 2021.  
96 p.

Dissertação (Mestrado em Ciências - Programa de Pós  
Graduação em Engenharia de Materiais na Área de  
Materiais Convencionais e Avançados) - Escola de  
Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo.  
2021

1. Concreto permeável. 2. Porosidade. 3.  
Permeabilidade. 4. Compactação. 5. Escoamento  
superficial. I. Título. II. Ribeiro, Sebastião,  
orient.

## DEDICATÓRIA

À minha mãe Lígia e minha filha Maitê



## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe Lígia, que me ensinou o valor da educação e sempre me fez enxergar o quanto eu era capaz de alcançar meus objetivos, mas que não seria fácil e que, portanto, nunca deveria desistir.

À minha filha Maitê, com quem aprendo diariamente e para quem quero ser um exemplo de mãe, mulher e profissional.

À Maria das Graças e Joaquim que me deram suporte para que eu pudesse me dedicar à esta pesquisa.

E, ao meu orientador, Dr. Sebastião Ribeiro, que me deu apoio, sempre com muita paciência e dedicação, ao desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Centro Universitário Salesiano – Unisal Lorena, onde confeccionei os corpos de prova de concreto permeável e realizei os ensaios.

Às empresas BASF e Tecnosil, que forneceram parte dos insumos para confecção das amostras de concreto permeável.

E acima de tudo DEUS, que sempre me concedeu sabedoria, para tomar as decisões certas, e saúde em meio à tantas adversidades.



## EFÍGRAFE

“Lute com determinação, abrace a vida com paixão, perca com classe e vença com ousadia, porque o mundo pertence a quem se atreve e a vida é muito bela para ser insignificante” (Charles Chaplin).



## RESUMO

PEREIRA, Patrícia. **Desenvolvimento experimental e caracterização de concretos permeáveis para o controle do escoamento superficial**. 2021. 96 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2021.

O concreto permeável é caracterizado pela presença de vazios interconectados, apresentando porosidade, entre 18% a 35%, que resulta em resistências à compressão na faixa de 2,8 a 28 MPa, de modo a permitir a passagem de água através da matriz de concreto, mantendo uma permeabilidade de 0,14 a 1,22 cm/s. Em função da baixa resistência mecânica seu uso limita-se, à pavimentos em áreas de veículos leves, estacionamentos, elementos de drenagem, passeios e calçadas. Esta dissertação visou determinar experimentalmente as propriedades mecânicas e hidráulicas deste tipo de concreto para diferentes dosagens de matérias-primas e níveis de compactação. A fase experimental foi dividida em 2 etapas, na etapa preliminar foram definidas a faixa granulométrica dos agregados graúdos, o tratamento de superfície do topo e base dos CPs e foi possível validar o processo de confecção das amostras de concreto permeável. Na segunda etapa foram variados a relação água/cimento (a/c) em 0,35, 0,30 e 0,265 e o método de adensamento, onde as amostras foram adensadas pela compactação por meio da queda de soquete padrão de 4,5 kg a 15 cm de altura. Avaliou-se as propriedades dos concretos permeáveis para 5, 15 e 26 golpes do referido soquete padrão. Todas as misturas ensaiadas atenderam à faixa de resistência preconizada pelo ACI (*American Concrete Institute*), que deve estar compreendida entre 2,8 a 28 MPa. A mistura M2-c, confeccionada com a menor relação água/cimento (a/c=0,265), obteve a maior resistência à compressão axial. Em valores percentuais o ganho de resistência à compressão em relação ao menor valor encontrado (M2-a) foi de 8,2% e 4,7% para as dosagens M2-c e M2-b, respectivamente. Os resultados de permeabilidade para as dosagens M2-a, M2-b e M2-c foram muito próximos entre si, compreendidos entre 0,637 a 0,656 cm/s, e obedecendo aos parâmetros do ACI, que estipula um coeficiente K entre 0,14 a 1,22 cm/s, para concretos permeáveis. Quanto ao adensamento, as amostras compactadas com 26 e 15 golpes do soquete padrão revelaram um ganho de resistência à compressão axial de 86% e 67%, respectivamente em relação ao nível mais baixo de energia, no caso 5 golpes. E, mantendo os parâmetros de massa específica e permeabilidade dentro dos limites estabelecidos pelas normas de referência adotadas neste estudo. Quando se compara a resistência à compressão axial à mistura M2-c, cujo processo de compactação foi realizado a partir da haste de adensamento, tem-se um ganho de 9%, 82% e 103% para as misturas onde foram aplicados respectivamente, 5, 15 e 26 golpes. Por fim, a partir das dosagens analisadas pode-se afirmar que a mistura M2d-26, caracterizada por uma relação a/c=0,265 e compactação com 26 golpes por camada, foi a que obteve o melhor desempenho, atendendo à permeabilidade mínima e mantendo-se dentro das faixas aceitáveis de massa específica e porosidade e obtendo a maior resistência à compressão axial das misturas ensaiadas neste estudo.

**Palavras-chave:** Concreto Permeável. Porosidade. Permeabilidade. Compactação. Escoamento Superficial.



## ABSTRACT

PEREIRA, Patrícia. **Experimental development and characterization of pervious concrete for the control of runoff**. 2021. 96 p. Dissertation (Master of Science) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2021.

Pervious concrete is characterized by the presence of interconnected voids, with porosity range from 18% to 35%, which results in compressive strengths, in the range from 2.8 to 28 MPa, in order to allow the passage of water through the matrix of concrete, maintaining permeability from 81 to 730L/min/m<sup>2</sup>. Due to the low mechanical strength, its use is limited to pavements in areas of light vehicles, parking lots, drainage elements and sidewalks. This thesis determines experimentally the mechanical properties of this type of concrete for different dosages of raw materials and levels of compaction. An experimental phase was divided into 2 stages, in the preliminary stage a granulometric band of the coarse aggregates, the surface treatment of the top and the base of the samples was defined and it was possible to validate the process of making the pervious concrete. In the second stage, the water/cementitious materials ratio (w/cm) was varied by 0,35, 0,30 and 0,265. The method of consolidation was also changed, where the samples were densified by compaction by means of the standard socket drop from 4.5 kg to 15 cm from height. The properties of pervious concretes were evaluated for 5, 15 and 26 strokes of the referred standard socket. All tested mixtures met the resistance range recommended by the ACI, which must be between 2.8 to 28 MPa. The M2-c mixture, made with the lowest water / cementitious material ratio (w/cm = 0.265), obtained the highest compressive strength. In percentage values, the gain in compressive strength in relation to the lowest value found (M2-a) was 8.2% and 4.7% for the dosages M2-c and M2-b, respectively. Percolation rate results for the mixtures proportions M2-a, M2-b and M2-c were close to each other, ranging from 0.637 to 0.656 cm / s, and in compliance with the ACI parameters, which stipulates a coefficient (K) between 0.14 to 1.22 cm / s, for pervious concrete. As for the consolidation, the samples compacted with 26 and 15 strokes of the standard socket showed a gain of compressive strength of 86% and 67%, respectively in relation to the lowest level of consolidation, in the case 5 strokes. And, keeping the parameters of unit weight and permeability within the limits established by the reference standards adopted in this study. When the compressive strength is analyzed to the M2-c mixture, whose compaction process was performed with a rod, there is an increase of 9%, 82% and 103% for the mixtures where they were applied respectively, 5, 15 and 26 strokes. Finally, from the analyzed dosages it can be said that the M2d-26 mixture, characterized by a ratio of w/cm = 0.265 and compaction with 26 strokes per layer, was the one that obtained the best performance, given the percolation ratio and maintaining within the acceptable ranges of unit weight and porosity and obtaining the greatest compressive strength on of the mixtures tested in this study.

**Keywords:** Pervious Concrete. Porosity. Permeability. Compaction. Surface Runoff.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Hidrograma da bacia rural e depois de urbanizada .....	29
Figura 2 – Distribuição espacial da percentagem de área impermeável dos distritos da zona urbana de São Paulo, calculada com base nos valores médios do ND da imagem ETM-SAVI .....	31
Figura 3 – Inundação ribeirinha à margem do Rio Paraitinga .....	32
Figura 4 – Inundação em trecho da Avenida São João, na região central de São Paulo .....	33
Figura 5 – Amostra de concreto permeável .....	34
Figura 6 - Pavimento de concreto permeável com drenagem da água infiltrada por tubulação .....	36
Figura 7 – Relação entre índice de vazios e massa específica do concreto permeável fresco .....	41
Figura 8 – Relação entre módulo de elasticidade e a resistência à compressão de amostras de concreto permeável.....	44
Figura 9 – Sistema de poros do concreto permeável.....	45
Figura 10 – Seção transversal do concreto permeável, ilustrando a porosidade da estrutura.....	47
Figura 11 – Avaliação da relação água/cimento em função da consistência, (a) com relação a/c baixo, (b) com relação a/c ótimo e (c) com relação a/c alto.....	52
Figura 12 – Sistema de pavimento permeável com infiltração total.....	55

Figura 13 - Processo de adensamento de pavimento de concreto permeável .....	57
Figura 14 – Fluxograma do procedimento experimental .....	61
Figura 15 – Prensa elétrica utilizada nos ensaios de resistência à compressão dos CPs.....	63
Figura 16 – Esquema do equipamento para ensaio de permeabilidade .....	64
Figura 17 – Concreto Permeável (a) estado fresco traço M2 e (b) Corpo de Prova traço M1-a.....	66
Figura 18 – Corpo de Prova com tratamento de superfície por retificação .....	67
Figura 19 – Permeômetro de carga variável .....	68
Figura 20 – Matérias-primas constituintes do Concreto Permeável (a) agregado graúdo, (b) cimento CP-III-40-RS, (c) sílica ativa e (d) aditivo superplastificante.....	71
Figura 21 – Moldagem da esfera de concreto permeável, traço M2-c, para uma condição de relação a/c ótima.....	72
Figura 22 – Superfície lateral dos CPs confeccionados com o traço M2-b (a) CP-02, (b) CP-03 e (c) CP-06.....	72
Figura 23 – Superfície de topo dos CPs confeccionados com o traço M2-c, após retificação.....	73
Figura 24 – Superfície lateral dos CPs revestida por filme plástico.....	74
Figura 25 – Soquete de Adensamento de CPs de Concreto Permeável.....	75

Figura 26 – Fluxograma dos traços de concreto permeável confeccionados na etapa 2.....	76
--	----



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Proporções tipicamente usadas na confecção de concreto permeável.....	51
Tabela 2 – Traços de concreto permeável na etapa preliminar.....	59
Tabela 3 – Traços de concreto permeável na etapa 2.....	62
Tabela 4 – Quantidade de insumos por traço, utilizados na confecção dos CPs na etapa 2.....	70
Tabela 5 – Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão - Traço M1-a e M1- b.....	78
Tabela 6 – Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão e Permeabilidade em função da variação da relação a/c.....	83
Tabela 7 – Resultados dos Ensaios de Resistência à Compressão, Massa Específica, Permeabilidade e Porosidade efetiva em função do número de golpes aplicados na compactação dos CPs de concreto permeável.....	85



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparativo dos Resultados de Resistência à Compressão.....	83
Gráfico 2 – Relação entre Massa Específica e Resistência à Compressão para Adensamento com 5, 15 e 26 golpes.....	85
Gráfico 3 – Variação de Resistência à Compressão em função do nível de compactação.....	86
Gráfico 4 – Relação entre Resistência à Compressão e Permeabilidade em função do nível de compactação.....	88
Gráfico 5 – Relação entre Massa Específica e Permeabilidade em função do nível de compactação.....	89
Gráfico 6 – Relação entre Porosidade e Massa Específica em função do nível de compactação.....	90



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BAKFAA	<i>Backcalculation of Federal Aviation Administration</i>
BASF	<i>Badische Anilin &amp; Soda Fabrik</i>
BGS	Brita Graduada Simples
CP	Cimento <i>Portland</i>
CP	Corpo de Prova
CPA	Camada Porosa de Atrito
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
DEMAR	Departamento de Engenharia de Materiais
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
EEL	Escola de Engenharia de Lorena
ETM	<i>Enhanced Thematic Mapper</i>
EUA	Estados Unidos da América
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Técnica Brasileira
ND	Número Digital
PMSP	Prefeitura do Município de São Paulo
PVC	Policloreto de Vinila
RCC	Resíduo da Construção Civil
SAVI	<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i>
UNISAL	Centro Universitário Salesiano de São Paulo
UL	<i>Underwrites Laboratories</i>
ULC	<i>Underwrites Laboratories of Canada</i>
USP	Universidade de São Paulo



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
2.1	IMPERMEABILIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES E DRENAGEM URBANA .....	28
2.1.1	Impactos da urbanização .....	28
2.2.2	Impermeabilização dos espaços urbanos .....	30
2.2.3	Drenagem urbana .....	31
2.2.4	Inundações .....	32
2.2.1	Caracterização e Desenvolvimento do Concreto Permeável .....	34
2.2.2	Aplicações do Concreto Permeável .....	35
2.2.3	Matérias-primas do Concreto Permeável.....	37
2.2.3.1	Agregados .....	37
2.2.3.2	Materiais Cimentícios .....	39
2.2.3.3	Água .....	39
2.2.3.4	Adições e Aditivos .....	40
2.2.4	Propriedades do Concreto Permeável .....	40
2.2.4.1	Resistência à Compressão Axial .....	40
2.2.4.2	Resistência à flexão .....	42
2.2.4.3	Módulo de elasticidade.....	43
2.2.4.4	Porosidade .....	44
2.2.4.5	Permeabilidade.....	46
2.2.4.6	Propriedades no Estado Fresco .....	48
2.2.4.7	Absorção acústica .....	48
2.2.4.8	Colmatação .....	49
2.2.4.9	Durabilidade .....	50
2.2.5	Estudo da Confeção e Dosagem do Concreto Permeável .....	50

2.2.5.1	Mistura do Concreto Permeável .....	51
2.2.5.2	Adensamento do Concreto Permeável .....	52
2.2.5.3	Cura do Concreto Permeável.....	54
2.2.6	Confecção de Pavimentos Permeáveis .....	54
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	59
3.1	Etapa 1 - Estudo Preliminar .....	65
3.2	Etapa 2 da Pesquisa.....	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	78
4.1	Etapa Preliminar .....	78
4.2	Etapa 2 da Pesquisa.....	82
4.4.1	Avaliação dos resultados em função da variação da relação a/c .....	82
4.2.2	Avaliação dos resultados em função da variação do nível de compactação .....	84
5	CONCLUSÃO .....	91
	REFERÊNCIAS .....	93

## 1 INTRODUÇÃO

A ação antrópica no meio ambiente causa uma série de desequilíbrios na natureza, no entanto é no meio urbano que estes impactos podem ser mais graves, resultando não apenas em perdas materiais e ambientais, mas também de vidas humanas. O elevado crescimento demográfico, sem planejamento, experimentado no Brasil a partir da década de 60, onde a população migrou das áreas rurais para as cidades em busca de oportunidades de trabalho e melhores condições de vida, fez a população urbana saltar de 45,08% para 84,36% (IBGE, 2017).

Junto à densificação populacional das grandes cidades vieram principalmente os processos de verticalização de moradias, canalização e retificação de rios e impermeabilização do solo. Tais processos trouxeram como consequências o aumento do escoamento superficial, o aumento da frequência e intensidade das inundações, a redução da alimentação dos aquíferos e rios.

As soluções em geral adotadas, que se baseiam no aumento da capacidade das redes de drenagem, não têm se mostrado eficientes para o escoamento pluvial. Além de serem dispendiosas, apenas transferem a problemática das águas pluviais de montante para jusante. Alternativas voltadas para o controle do escoamento superficial e favorecimento da infiltração das águas pluviais, por meio de concretos permeáveis, têm se mostrado mais eficientes (HOLTZ, 2011).

Desta forma, torna-se necessário o desenvolvimento de concretos permeáveis com índice de vazios suficientes para atender aos critérios de permeabilidade estabelecidos pelo “American Concrete Institute” (ACI), que varia de 0,14 a 1,22 cm/s, mantendo a resistência à compressão do concreto dentro de limites que permitam a sua utilização em pavimentos, calçadas, estacionamentos e assim justifiquem a sua utilização (ACI, 2010).

No Brasil os estudos acerca do assunto ainda são escassos e a única norma regulamentadora existente, a NBR 16416 (2015), aborda os pavimentos permeáveis de forma generalizada, incluindo na mesma diretriz revestimentos intertravados, placas de concreto e concretos permeáveis moldados “in loco”. A especificação quanto à dosagem, procedimentos executivos, métodos de ensaio,

manutenção e desempenho a longo prazo dos concretos permeáveis, é ainda insuficiente, sendo necessário recorrer às normas e pesquisas internacionais.

Outro entrave à utilização do concreto permeável é o fato do seu elevado índice de vazios, fundamental para obter a permeabilidade deste material, ser o principal fator redutor da resistência mecânica deste tipo de concreto. Por isso é particularmente interessante o estudo experimental do concreto permeável, fazendo-se o uso de aditivos e adições que proporcionem a melhora das propriedades mecânicas tornando-o tecnicamente viável e mantendo-se a permeabilidade de modo que este tipo de concreto seja realmente uma alternativa eficaz na redução do escoamento superficial principalmente nas áreas urbanas.

A primeira etapa desta pesquisa teve o objetivo de confeccionar Corpos de Prova (CP) de concreto permeável com diferentes faixas granulométricas de agregado graúdo, a fim de determinar qual agregado resultaria na melhor resistência à compressão, visando também a aspectos executivos deste concreto, que se diferencia profundamente dos concretos convencionais, incluindo mistura, adensamento, cura e preparação da superfície para o ensaio de compressão axial.

Na segunda etapa foram testados concretos permeáveis com diferentes relações água/cimento ( $a/c$ ) e fazendo-se uso de aditivos plastificantes. Também foi adotado nesta etapa o uso da sílica ativa, em um teor de 10% da massa do aglomerante.

Para a mistura que apresentou o melhor desempenho em função da relação  $a/c$ , estudou-se o efeito do adensamento do concreto permeável, por meio da compactação com um soquete, onde variou-se o número de golpes dados por este dispositivo. Ainda no estado fresco determinou-se a massa específica aparente de cada mistura, e após moldagem os CPs tiveram o seu índice de vazios determinado e foram submetidos a ensaios de compressão uniaxial. Por fim calculou-se a permeabilidade das diferentes dosagens do concreto utilizando-se um permeômetro de carga variável.

A partir desta pesquisa experimental foi possível desenvolver um traço de concreto permeável com melhores propriedades mecânicas, que podem atender tanto às necessidades de controle do escoamento superficial por meio de sua permeabilidade e ao mesmo tempo alcançarem resistência mecânica suficiente para serem empregadas em calçadas, praças, parques, pisos para armazenamento de água, camadas de base para pavimentos de ruas e rodovias.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GERAL

Desenvolver e testar diferentes dosagens de concretos permeáveis a fim de identificar a mistura com máxima resistência à compressão a uma taxa de permeabilidade dentro das diretrizes de norma.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinação de um traço preliminar, por meio da confecção de corpos de prova experimentais, com o objetivo de estabelecer a dosagem de materiais e os procedimentos mais adequados para uma máxima resistência à compressão;

Avaliar os efeitos da variação da relação água/cimento e uso de aditivos superplastificantes em concretos permeáveis;

Definir o procedimento de preparação de superfície das amostras para realização dos ensaios de resistência à compressão;

Realizar ensaios para aferir a massa específica, porosidade, resistência à compressão e permeabilidade em corpos de prova de concreto permeável;

Sistematizar um processo de confecção, adensamento, cura de concretos permeáveis e preparação da superfície destes CPs;

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 IMPERMEABILIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES E DRENAGEM URBANA**

#### **2.1.1 Impactos da urbanização**

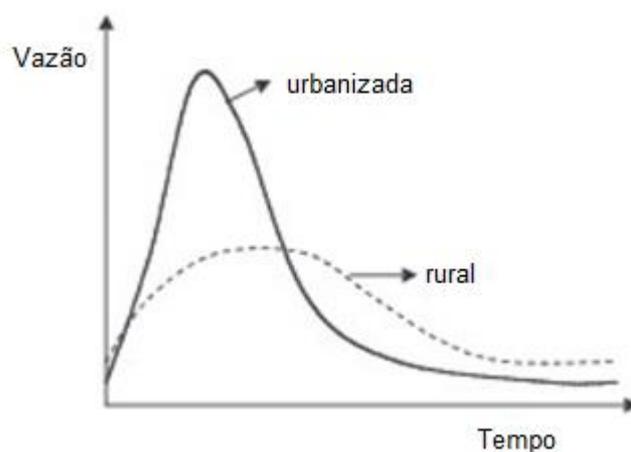
A urbanização desenfreada e sem planejamento que ocorreu no Brasil a partir da década de 60, onde segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a população urbana representava 45,08% e dados publicados pelo mesmo instituto que apontavam para uma população urbana no Brasil em 2017 de 84,70%, reforçam a ideia de que os problemas de drenagem urbana presentes nas cidades estão diretamente associados à ocupação desordenada do solo. O mesmo instituto mostra que este percentual é ainda mais expressivo, ficando acima da média brasileira, em alguns estados como Rio de Janeiro (97,4%), São Paulo (96,6%) e Distrito Federal (95,3%) (IBGE, 2020).

Ainda, de acordo com recentes diretrizes do IBGE as transformações que ocorreram no campo e nas cidades nos últimos 50 anos demandam abordagens multidimensionais na classificação territorial, a urbanização deve levar em conta não apenas os processos migratórios como também o fenômeno da peri-urbanização tanto pela difusão do modo de vida urbano quanto pela construção de novas zonas residenciais. Deste modo o IBGE (2017) propõe uma nova tipologia do espaço rural e urbano no Brasil, em consonância com metodologias e critérios observados em outros países, na proposta neste estudo nota-se que 76,0% da população brasileira se encontra em municípios considerados predominantemente urbanos, correspondendo somente a 26,0% do total de municípios, este índice ainda é bastante alto e revela a elevada densidade populacional brasileira e o intenso processo de urbanização.

Como implicações deste processo de urbanização relacionam-se o aumento das vazões máximas, elevação nos volumes de escoamento e antecipação dos picos de cheia em função da impermeabilização das superfícies, à medida que os fluxos de água chegam mais rapidamente e com mais energia aos rios, como pode ser visto na figura 1 (LAMB, 2014; ACCIOLI, 2005). A impermeabilização das superfícies além diminuir a umidade do solo levando a um rebaixamento do nível

do lençol freático, redução do escoamento de água nos rios e o aumento no lançamento de resíduos sólidos nos corpos hídricos, transportados pelas superfícies no início das chuvas, também aumenta o escoamento por condutos e canais artificiais, que em geral não se encontram dimensionados para este volume de escoamento superficial, levando a elevação no número de ocorrências e da intensidade das inundações nas áreas de grande concentração urbana tanto em frequência quanto em intensidade (ACCIOLI, 2005).

Figura 1 – Hidrograma da bacia rural e depois de urbanizada



Fonte: Tucci (2008).

As ações antrópicas, no ambiente urbano impulsionadas pela ocupação do solo e pelo crescimento do mercado imobiliário tem promovido mudanças significativas no ciclo hidrológico, interceptando algumas das etapas deste processo. A impermeabilização das superfícies, geralmente por pavimentos asfálticos e de concreto, impede por completo a infiltração da água para o subsolo, de forma a alterar o encaminhamento da água da chuva, sobrecarregando o sistema de drenagem urbana, que em muitos casos já é bastante deficiente.

O maior problema da urbanização reside na forma desorganizada, mal planejada e muitas vezes desastrosa com que é implementada. Para Tucci (2008) algumas estruturas urbanas não privilegiam o escoamento natural das águas, tais como:

Pontes e taludes que obstruem o escoamento;

Redução da seção do escoamento por meio de aterros de pontes e para construções em geral;

Deposição e obstrução de rios, canais e condutos por lixos e sedimentos;  
Projetos e obras de drenagem inadequadas, com diâmetros que diminuem à jusante, drenagem sem esgotamento, entre outros.

Além disso a ocupação de encostas, retirada de sua cobertura vegetal, a retificação e o fechamento dos cursos fluviais, o assoreamento dos canais e a ampliação da rede de drenagem pluvial e de abastecimento de água e esgoto também foram intensificados pelo processo de ocupação urbana (COSTA; CONCEIÇÃO; AMANTE, 2018).

### **2.2.2 Impermeabilização dos espaços urbanos**

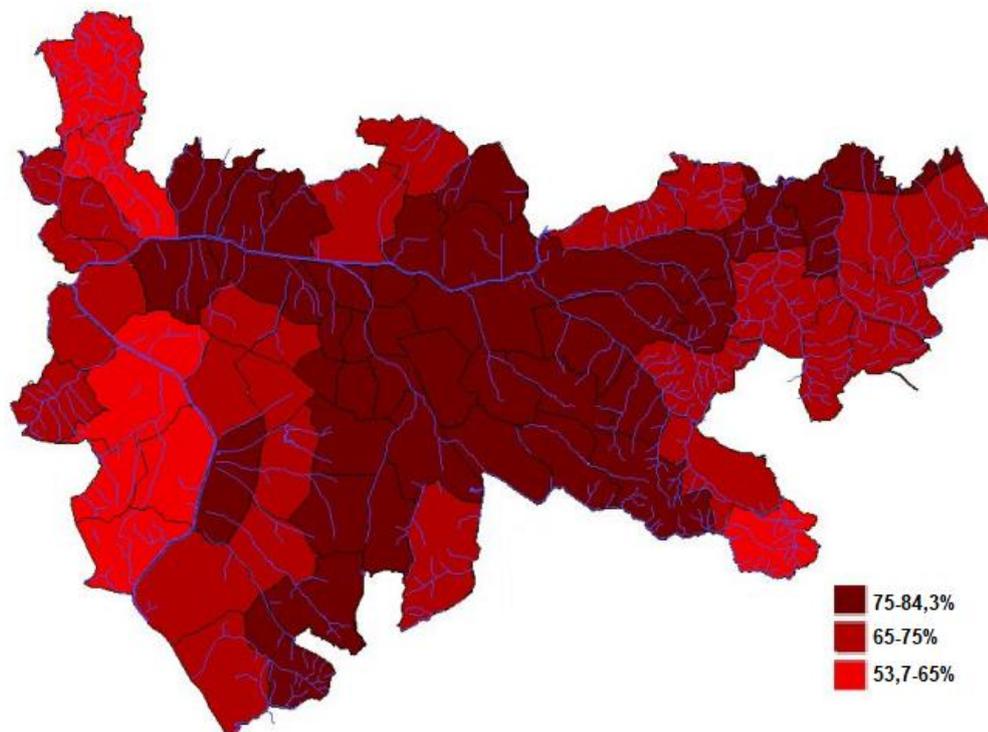
A densificação da população nos grandes centros de desenvolvimento econômico leva à necessidade da verticalização das construções, pavimentação de grande número de vias de acesso para possibilitar a mobilidade, criação de extensas áreas de estacionamento, retirada da cobertura vegetal para evitar o assoreamento dos rios e a impermeabilização da área de bacia, resultando na perda da capacidade natural de infiltração do solo, elevando o escoamento superficial e transferindo esta vazão que deveria ser absorvida pelo solo para o sistema pluvial (HOLTZ, 2011).

Os resultados da aplicação do método de estimativa da impermeabilização do solo a partir combinação de dados demográficos e de sensoriamento remoto para a zona urbana de São Paulo, mostraram valores entre o mínimo de 53,7% para o distrito Jaraguá, e o máximo de 84,3% para o distrito Brás. As taxas com maior impermeabilização encontram-se nos distritos da zona central e leste, acompanhando as bacias hidrográficas do rio Tietê e seus afluentes da margem esquerda, como o Tamanduateí e o Aricanduva, justamente as regiões com ocorrência frequente de eventos de alagamento, como pode ser observado na figura 2. As regiões que apresentaram menor impermeabilização, correspondem àquelas em que predomina o uso estritamente residencial e com presença marcante da arborização urbana, das praças e jardins residenciais. A identificação das áreas impermeáveis foi realizada a partir do Número Digital (ND) que foi comparado com sítios de referência, ou seja, áreas permeáveis conhecidas. Para

áreas impermeáveis, portanto, com permeabilidade de 0%, associou-se ND zero (JACINTO; ALMEIDA; GOVEIA, 2009).

Os dados gerados pelo sensoriamento remoto podem se tornar uma importante ferramenta de apoio no monitoramento e controle da impermeabilização dos solos nas grandes cidades e dos sítios urbanos em expansão, a fim de auxiliar na promoção do desenvolvimento urbano sustentável.

Figura 2 – Distribuição espacial da porcentagem de área impermeável dos distritos da zona urbana de São Paulo, calculada com base nos valores médios do ND da imagem ETM-SAVI



Fonte: Jacinto, Almeida e Goveia (2009).

### 2.2.3 Drenagem urbana

O sistema de águas urbanas tem como objetivos principais a conservação da saúde humana e meio ambiente. Consiste no abastecimento de água, disposição e tratamento de esgotos, drenagem urbana e inundações ribeirinhas e a gestão dos sólidos totais, que é a soma dos sólidos gerados pela erosão do solo, em razão do efeito da precipitação, escoamento e os resíduos sólidos produzidos pela população, que acabam por obstruir os sistemas de drenagem potencializando eventos catastróficos (TUCCI, 2008).

Como solução a gestão pública continua a insistir em adotar estratégias de aumentar a capacidade da rede de drenagem, o que resolve o problema apenas pontualmente, pois transfere os pontos de alagamento para jusante (HOLTZ, 2011). É neste cenário que se buscam alternativas que favoreçam o processo de infiltração, como o uso de pavimentos permeáveis.

#### 2.2.4 Inundações

Como consequência da massiva ocupação do solo, aliada à impermeabilização das superfícies e ao planejamento e dimensionamento deficiente da drenagem urbana, ocorrem em situações de precipitação mais elevada as inundações.

Tucci (2008) classifica as inundações em dois tipos. Inundações de áreas ribeirinhas, que são um processo natural, resultado da variabilidade temporal e espacial da precipitação e do escoamento na bacia hidrográfica, que ocorrem no leito maior dos rios, afetando principalmente a população de baixa renda que ocupa muitas vezes irregularmente a margem dos rios, exemplificada pela figura 3.

Figura 3 – Inundação ribeirinha à margem do Rio Paraitinga



Fonte: G1 (2016).

Já inundações em razão da urbanização, como a mostrada na figura 4, são aquelas que ocorrem devido à incapacidade da drenagem urbana em função da impermeabilização do solo, canalização do escoamento ou obstruções ao escoamento, provocando o aumento da vazão máxima.

Figura 4 – Inundação em trecho da Avenida São João, na região central de São Paulo



Fonte: Folha de São Paulo (2019).

Dentre as consequências negativas das inundações, que são cada vez mais frequentes, dificultando o cotidiano dos moradores, tornando o tráfego caótico e intransitável e inundando muitas casas durante os eventos estão a veiculação de doenças, a degradação da qualidade da água, maiores custos de utilidades públicas e perdas e prejuízos às populações que sofrem com as inundações. A situação é ainda mais grave para os habitantes ribeirinhos, que sofrem mais com as perdas materiais e muitas vezes são forçados a deixar suas casas durante a estação chuvosa (LAMB, 2014).

Como solução, a gestão pública adota estratégias de aumentar a capacidade da rede de drenagem, construindo galerias, canais, canaletas, tubulações, bocas de lobo, represas, etc. Em geral onerosas e que resolvem o problema apenas pontualmente, pois transfere os pontos de alagamento para jusante, estas são medidas de controle classificadas como estruturais. Já as medidas não-estruturais são soluções gerenciais, mais baratas, que procuram intervir nas causas que podem originar ou agravar o problema. Algumas destas medidas de controle baseiam-se na implementação de áreas de infiltração para receber a água de áreas impermeáveis e recuperar a capacidade de infiltração da bacia, por meio de detenções e retenções<sup>1</sup> (HOLTZ, 2011; TAVARES; KAZMIERCZAC, 2016).

---

(1) Detenções são reservatórios urbanos mantidos secos como uso do espaço integrado à paisagem urbana, enquanto que as retenções são reservatórios com lâmina de água utilizados não somente para controle do pico e volume do escoamento, como também da qualidade da água.

## 2.2 CONCRETO PERMEÁVEL

### 2.2.1 Caracterização e Desenvolvimento do Concreto Permeável

O *American Concrete Institute* (ACI) descreve o concreto permeável como uma mistura de cimento *portland* com agregado graúdo, pouco ou nenhum agregado miúdo e água, podendo assim como nos concretos convencionais receber aditivos e adições, desta forma resultando em um concreto de abatimento baixo ou zero. Esta combinação de insumos produz um material de consistência endurecida, com vazios interconectados, estes abrangendo tamanhos de 2 a 8 mm, de modo que a água flua facilmente entre seus poros, como mostra a figura 5. O teor de vazios pode variar de 15 a 35%, de modo a permitir a passagem de água através da matriz de concreto, mantendo uma permeabilidade de 81 a 730 L/min/m<sup>2</sup> ou 0,14 a 1,22 cm/s. Quanto à resistência à compressão e à massa específica, estas devem estar compreendidas entre 2,8 a 28 MPa e 1600 a 2000 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente (ACI, 2010).

Figura 5 – Amostra de concreto permeável



Fonte: BASF (2010).

O fato de os concretos permeáveis possuírem maior índice de vazios, justamente o que permite que a água flua facilmente através do concreto, é o que reduz sua massa específica e conseqüentemente sua resistência mecânica, por isso a sua utilização ainda é restrita.

O uso deste tipo de concreto se difundiu após a Segunda Guerra Mundial, principalmente na Europa, devido à escassez de cimento e à abundância de resíduos de construção. Já na década de 70 passou a ser utilizado nos EUA, em função do alto desenvolvimento urbano e aumento das áreas impermeáveis, como solução para mitigar as inundações (LAMB, 2014).

No Brasil os estudos experimentais acerca do assunto ainda são escassos e a única norma regulamentadora publicada pela ABNT, NBR 16416 Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos, é muito ampla, pois aborda diversos tipos de pavimentos permeáveis. A referida norma é omissa em requisitos fundamentais para se especificar um concreto permeável, como: dosagem, procedimentos executivos, métodos de ensaio, manutenção e desempenho à longo prazo dos concretos permeáveis, que aqui ainda são enquadrados como concretos especiais, dificultando a sua utilização (ABNT, 2015).

### **2.2.2 Aplicações do Concreto Permeável**

O ACI (2010) relaciona algumas aplicações do concreto permeável, dentre as quais destacam-se:

- Pavimentos permeáveis para calçadas, estacionamentos e grandes áreas externas;
- Ruas de baixo tráfego;
- Pisos para armazenamento de água;
- Camadas de base para pavimentos de ruas, rodovias e aeroportos;
- Superfícies como: praças, parques, quadras de tênis, pisos para zoológicos e celeiros;
- Paredes com propriedades térmicas e acústicas;
- Cabeceiras de pontes, muros de arrimo e estabilização de encostas;
- “Decks” de piscinas;
- Quebra-mares;
- Estações de tratamento de esgoto;
- Revestimentos de poços de água e
- Recifes artificiais onde a estrutura aberta do concreto permeável é inspirada na estrutura dos recifes.

Geralmente, nos concretos permeáveis não é utilizado reforço com barras de aço, pois os poros existentes neste tipo de concreto levariam a um processo de corrosão das armaduras.

Lamb (2014) confeccionou e realizou ensaios em protótipos de grelhas em concreto permeável para uso na drenagem urbana, em substituição às grelhas em ferro comumente utilizadas. A autora concluiu ser viável técnica e economicamente esta tecnologia. A figura 6 ilustra este tipo de solução.

Figura 6 - Pavimento de concreto permeável com drenagem da água infiltrada por tubulação



Fonte: Pini (2011).

Pesquisas desenvolvidas pela Universidade de São Paulo (USP) levaram à construção de um estacionamento de 1.600 m<sup>2</sup>, em parceria com a Prefeitura do Município de São Paulo (PMSP). Tendo sido metade da área executada com um sistema de pavimento drenante de asfalto permeável e camada porosa de atrito (CPA) e o outro feito com blocos intertravados de concreto permeável. Os blocos permeáveis absorveram a maior parte da água, sendo que o rejunte usado para unir as peças também tinha propriedades drenantes. Os dados continuam sendo coletados principalmente em relação à colmatagem (PINI, 2011; VIRGILLIS, 2009).

Ainda na USP, Batezini (2013) desenvolveu sua pesquisa em pavimentos permeáveis aliando um estudo experimental à uma análise mecanicista, a fim de determinar uma relação entre a tensão atuante e a tensão resistente, de forma a melhor entender o comportamento destas estruturas e assim prever a adequada aplicabilidade do material. Tais análises foram aprofundadas empregando-se

softwares de análise de comportamento estrutural de pavimentos, para avaliar os efeitos de cargas de veículos em termos de tensões, deformações e deflexões.

Por meio da retroanálise de bacias de deflexão e modelos preliminares de análise de resistência à fadiga o autor avaliou o comportamento estrutural para diferentes espessuras de camadas de revestimento de concreto permeável, empregando os softwares EverFE, BAKFAA, ABAQUS. Observou-se em campo deflexões de 3 a 7 vezes àquelas observadas em pavimentos rígidos convencionais. Quando comparadas aos pavimentos semi-rígidos e flexíveis as deflexões mantiveram-se semelhantes. A comparação feita entre os resultados dos softwares utilizados e os dados obtidos pelo autor deste estudo e outros autores que desenvolveram pesquisas cujos parâmetros se assemelhavam aos de Batezini mostrou ser viável a aplicação de softwares de retroanálise em pavimentos de concreto permeável (BATEZINI, 2019).

### **2.2.3 Matérias-primas do Concreto Permeável**

#### **2.2.3.1 Agregados**

A graduação de agregados graúdos normalmente utilizada deve estar compreendida entre 9,5 a 19 mm, com relação à forma podem ser aplicados tanto os naturais (seixo) ou britados, de massa unitária normal (1520 a 1680 kg/m<sup>3</sup>) e leve, inferior a 1120 kg/m<sup>3</sup> (ACI, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Estudos mostram que a adição de até 10% de areia, de granulometria menor que 2,4 mm, pode melhorar a resistência e a durabilidade do concreto permeável quando comparado à mistura contendo um único tamanho de agregado, aumentando a resistência à compressão e mantendo a taxa de permeabilidade dentro do índice permitido pela norma americana (SONEBI; BASSUONI; YAHIA, 2016).

Assim como para o concreto convencional, no concreto permeável também deve-se evitar agregados lamelares e alongados, sob o risco de perda de resistência, e deseja-se que a sua superfície esteja livre de poeira e argila, de forma que não afete a ligação pasta-agregado ou a hidratação do cimento. A umidade do agregado no momento da mistura pode ser satisfeita pela condição

superfície seca saturada. O agregado seco pode resultar em uma mistura com falta de trabalhabilidade e inadequado para aplicação e compactação, enquanto agregados saturados causam o entupimento dos poros, pelo escoamento da pasta de cimento anulando a função pretendida para o material (TAVARES; KAZMIERCZAC, 2016).

Os agregados reciclados de RCC (Resíduo da Construção Civil) são outra opção a ser empregada em concretos permeáveis. Entretanto, como são heterogêneos e possuem uma porosidade mais elevada que os agregados de rochas, podem levar a uma redução na resistência à compressão, porém, a porosidade presente nos agregados reciclados pode ser uma vantagem, ao aumentar a permeabilidade do concreto, visto que permite o fluxo de água pelos espaços vazios entre os agregados e pelos agregados, o que não ocorre nos agregados naturais. Ensaio de caracterização de agregados mostram que os agregados reciclados possuem maior absorção de água 7,91%, contra 1,33% do agregado natural. Também resultam em agregados com maior módulo de finura 6,78 mm e 1,77 mm, respectivamente para o reciclado e natural e massa específica menor sendo de 2,30 g/cm<sup>3</sup> o agregado reciclado e 2,84 g/cm<sup>3</sup> o natural. Ressalta-se ainda o impacto positivo no meio ambiente, devido à redução na extração e processamento dos agregados obtidos a partir de rocha, assim como o uso de áreas de deposição clandestinas destes resíduos, reduzindo gastos da administração pública e privada com gerenciamento do entulho (TAVARES; KAZMIERCZAC, 2016).

No estudo conduzido por Tavares e Kazmierczac (2016), verificou-se que nos concretos permeáveis onde foi realizada a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto (ARC) houve redução significativa na resistência à compressão. Os autores realizaram a análise da microestrutura do concreto permeável com ARC, por meio de microscópio eletrônico de varredura e notaram que a matriz cimentícia do ARC se mantinha na zona de transição formando uma ligação mais fraca, porosa e com pequenas fissuras. Os poros e fissuras também proporcionaram uma tendência no aumento do consumo de água na mistura, exigindo uma maior quantidade de água na zona de transição da nova matriz com o agregado reciclado. Tais fatores levaram à perda significativa na resistência mecânica, visto que nos concretos confeccionados com agregado

natural, para um consumo de cimento de 400 kg/m<sup>3</sup>, o estudo obteve um valor de  $f_{ck}=21,83$  MPa, contra 11,63 MPa para o concreto permeável elaborado com ARC.

### 2.2.3.2 Materiais Cimentícios

Os materiais cimentícios, que consistem em um pó fino e pulverulento com propriedades aglutinantes são, juntamente com a água, os responsáveis pela formação da pasta de cimento que irá promover, após seu endurecimento, a ligação entre os agregados. Poderá ser empregado no concreto permeável qualquer cimento do tipo *portland*, sendo recomendável aglomerantes com baixo calor de hidratação como o cimento CP-III, devido à baixa relação água/cimento da mistura (ABCP, 2018). Deseja ainda que o cimento seja resistente à sulfatos, o que é o caso do CP-III, principalmente se a aplicação se tratar de pavimento, pois a matriz cimentícia estará em contato frequente com a água, podendo resultar em reações deletérias do material.

A fim de se melhorar as propriedades da matriz cimentícia é recomendado o uso de adições de cinzas volantes até um valor de 10%, a fim de evitar a baixa resistência à compressão nas primeiras idades do concreto e sílica ativa restrita a 5%, pois valores superiores a este teor atuam acelerando o início do tempo de pega, ambos devem ser substituídos em relação à massa de cimento (SONEBI; BASSUONI; YAHIA, 2016).

### 2.2.3.3 Água

Outra característica fundamental na produção de concretos permeáveis e que permite a obtenção da permeabilidade é a relação água/cimento. Segundo o ACI a relação *a/c* dever estar entre 0,27 a 0,30, desde que utilizados aditivos modificadores de viscosidade, podendo chegar até 0,40 (LAMB, 2014; ACI, 2010). O endurecimento e desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto somente são possíveis devido à reação química entre o cimento e a água. Notadamente esta reação é exotérmica e para que ocorra a hidratação completa do C<sub>3</sub>S (silicato tricálcico) e C<sub>2</sub>S (silicato dicálcico) são necessários 24 e 21%, respectivamente, de água em relação à massa de cimento. O restante da água é

adicionado ao sistema, utilizada para dar trabalhabilidade ao concreto fresco e auxiliar na formação da pasta ou argamassa que tem a função de envolver os agregados graúdos. A quantidade de água da mistura deve ser estritamente controlada, sendo a água utilizada para umedecer e dar brilho ao concreto, sem que esta flua pelo agregado (METHA; MONTEIRO, 2014).

#### 2.2.3.4 Adições e Aditivos

Dependendo da relação água/cimento ( $a/c$ ), aditivos modificadores de viscosidade também podem ser usados para melhorar a estabilidade, reduzir o tempo de descarga do concreto e melhorar a aplicação e a consolidação (SONEBI; BASSUONI; YAHIA, 2016).

O uso de agentes poliméricos pode aumentar a resistência à compressão e à tração. As emulsões poliméricas podem preencher mais vazios, aumentando assim a resistência mecânica do concreto permeável, em contrapartida a permeabilidade é reduzida (BATEZINI, 2019).

O reforço com fibras como as de vidro, carbono, sintéticas e naturais, também pode ser usado para melhorar as propriedades mecânicas deste tipo de concreto, à medida que melhora as propriedades da pasta na interface com o agregado. O uso de reforço ou fibras metálicas não é adequado ao concreto permeável, uma vez que a estrutura de poros abertos proporciona condições favoráveis à corrosão (SONEBI; BASSUONI; YAHIA, 2016).

### 2.2.4 Propriedades do Concreto Permeável

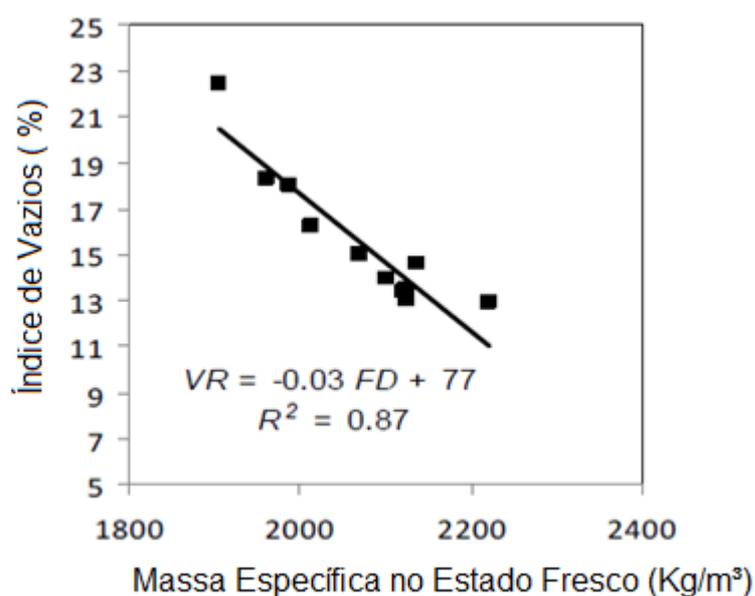
#### 2.2.4.1 Resistência à Compressão Axial

A resistência à compressão, em concretos, é um parâmetro que afere o carregamento máximo que o material pode suportar até a ruptura. Em materiais frágeis, como os cerâmicos, é uma propriedade bastante desejada visto que a resistência à tração e à flexão são bem inferiores.

A contrapartida do concreto permeável ainda reside no fato de a elevada porosidade, entre 15% a 35%, resultar em uma baixa resistência mecânica, na faixa de 2,8 a 28 MPa de resistência à compressão (ACI, 2010).

Estudos realizados por Sonebi e Bassuoni (2010) relacionam o índice de vazios com a massa específica do concreto permeável no estado fresco, conforme pode ser observado na figura 7, limitando seu uso a pavimentos em áreas de veículos leves, estacionamentos, elementos de drenagem, passeios e calçadas.

Figura 7 – Relação entre índice de vazios e massa específica do concreto permeável fresco.



Fonte: Sonebi e Bassuoni (2010).

A resistência da matriz e a resistência da ligação entre os agregados e a pasta de cimento é um fator decisivo na resistência à compressão do concreto permeável. Zhong e Wille (2016) estudaram a influência de matrizes de resistência normal (29 MPa), de alta resistência (61 MPa) e de ultra alta resistência (174 MPa) na porosidade e na resistência à compressão do concreto permeável. Na primeira etapa da pesquisa os autores definiram e ensaiaram as matrizes acima citadas adotando as relações a/c de 0,55, 0,45 e 0,22 respectivamente. A partir destas matrizes confeccionaram os CPs das misturas de concreto permeável variando: a relação agregado/cimento (2,5, 3,0 e 3,5) e o tamanho dos agregados (1,19mm, 2,38 mm e 4,75 mm). Desta foram obtidos resultados de resistência à compressão de até 65,8 MPa, 23,4 MPa e 23,3 MPa, respectivamente para os traços elaborados com matriz de ultra alta resistência, alta resistência e resistência normal. O

parâmetro com maior influência sobre a resistência à compressão axial foi a faixa granulométrica adotada, sendo que quanto menor esta faixa maior foi a resistência mecânica encontrada. A relação agregado/cimento pouco influenciou nos resultados finais (ZHONG; WILLE, 2016).

#### 2.2.4.2 Resistência à flexão

Em estruturas como pavimentos os parâmetros de resistência à flexão e módulo de elasticidade são propriedades fundamentais a serem consideradas, pois são afetadas pela massa específica e porosidade do material. Referências apontam para valores de resistência à flexão da ordem de 1 a 3,8 MPa (METHA; MONTEIRO, 2014). Diretrizes normativas nacionais indicam resistências mínimas à tração na flexão de 1 MPa e 2 MPa, respectivamente para tráfego de pedestres e veículos leves (ABNT, 2015). Enquanto o ACI (2010) não estabelece valores para este parâmetro, mas mostra que misturas de concreto permeável usando agregados com dimensão de 6 a 10 mm e porosidade de 25% alcançaram resistência à flexão de 3 MPa. Esta norma ainda traz uma relação entre a resistência à compressão e resistência à flexão que é determinada pela equação 1.

$$f_r = 0.083f_c^{2/3} \quad (1)$$

Onde:

$f_c$  é a resistência à compressão (MPa);

$f_r$  é a resistência à flexão (MPa).

Observa-se também que a relação entre a resistência à compressão e à tração na flexão diminui à medida que a porosidade do concreto aumenta, levando à conclusão que a resistência à tração na flexão é mais sensível à porosidade do que a resistência à compressão (BETEZINI, 2019).

### 2.2.4.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade em concretos permeáveis é fortemente influenciado pela massa específica do material. Estudos relatam que para concretos com porosidade de 25%, o módulo de elasticidade médio é de 16.000 MPa. Entretanto as referências em relação a esta propriedade são escassas devido a dificuldade de obtenção do parâmetro experimentalmente, pois as irregularidades presentes nos CPs de concreto permeável dificultam a realização dos ensaios (BATEZINI, 2013).

Quando comparado aos concretos convencionais o módulo de elasticidade dos concretos permeáveis é inferior, o que se justifica pelo elevado índice de vazios. A NBR 6118 apresenta valores estimados de módulo de elasticidade apenas em função da resistência característica à compressão do concreto. Tomando-se como base um concreto de 20 MPa, cuja resistência à compressão está em faixa mais próxima à dos concretos permeáveis, tem-se que o módulo de elasticidade vale 21 GPa (ABNT, 2014).

Na impossibilidade da realização de ensaio que determine o módulo de elasticidade de forma direta, o ACI (318-19) sugere para concretos convencionais a equação 2:

$$E_e = 33 * \rho_c^{1,5} \sqrt{f_c} \quad (2)$$

Onde:

$E_e$  é o módulo de elasticidade estático;

$\rho_c$  é a massa específica do concreto;

$f_c$  é a resistência à compressão.

Outros autores desenvolveram equações similares à sugerida pelo ACI, com alguma variação do termo constante, mas todas elas calculadas a partir da massa específica e resistência à compressão. Para concretos permeáveis foi determinado a partir de ensaios experimentais um valor maior do termo constante, como pode ser observado na equação 3 (GOEDE, 2009). A figura 8, mostra a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto permeável.

$$E_e = 39,1 * \rho_c^{1,5} \sqrt{f_c} \quad (3)$$

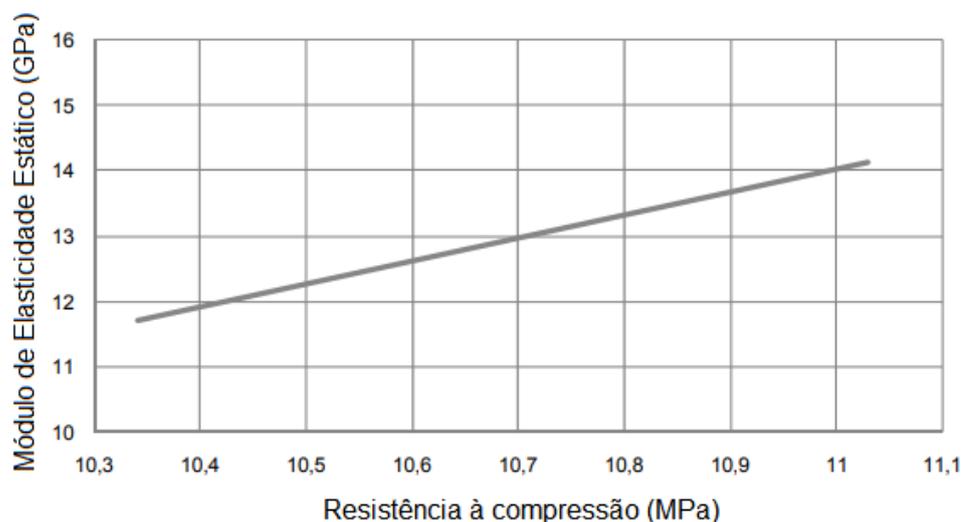
Onde:

$E_e$  é o módulo de elasticidade estático;

$\rho_c$  é a massa específica do concreto;

$f_c$  é a resistência à compressão.

Figura 8 – Relação entre módulo de elasticidade e a resistência à compressão de amostras de concreto permeável



Fonte: Goede (2009).

#### 2.2.4.4 Porosidade

A porosidade afeta tanto as propriedades hidráulicas quanto mecânicas e pode chegar a 15%, para concretos permeáveis de baixa porosidade e ultrapassar 30% para elevadas porosidades. Teores da ordem de 20% garantem simultaneamente boas características de resistência e permeabilidade (BATEZINI, 2019).

O sistema de poros do concreto permeável compreende os vazios entre os agregados e os poros da matriz. A porção volumétrica dos poros abertos, ou seja, interconectados, é definida como porosidade efetiva, que é responsável pela permeabilidade do material. A equação 4 pode ser usada para determinação da porosidade efetiva (ZHONG; WILLE, 2016):

$$\phi_e = \left[ 1 - \left( \frac{M_1 + M_2 - M_3}{\rho_w V_T} \right) \right] * 100\% \quad (4)$$

Onde:

$\phi_e$  é a porosidade efetiva da amostra;

$M_1$  é a massa da amostra seca em estufa;

$M_2$  é a massa do recipiente cheio de água;

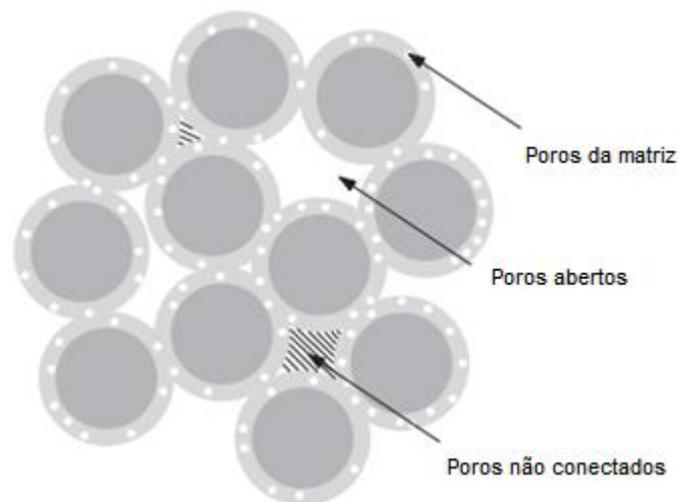
$M_3$  é a massa do recipiente com a amostra saturada com água no mesmo nível de  $M_2$ ;

$\rho_w$  é a massa específica da água;

$V_T$  é o volume da amostra.

Já a porosidade total considera os poros fechados, ou seja, não conectados e poros da matriz, conforme ilustra a figura 9 e está relacionada às propriedades mecânicas deste tipo de concreto.

Figura 9 – Sistema de poros do concreto permeável



Fonte: Zhong; Wille (2016).

Yahia e Kabigire (2014) determinaram a porosidade de amostras cilíndricas de concreto permeável a partir da equação 5.

$$V_r = \left[ 1 - \left( \frac{W_2 - W_1}{\rho_w Vol} \right) \right] * 100\% \quad (5)$$

Onde:

$V_r$  é o volume real de vazios no concreto;

$W_1$  é a massa da amostra de concreto seca em estufa;

$W_2$  é a massa da amostra saturada;

$\rho_w$  é a massa específica da água a 20°C;

Vol é o volume da amostra.

Ainda segundo a NBR 9778, o índice de vazios ( $i$ ) pode ser obtido a partir da relação entre os volumes de poros conectados e o volume total, utilizando-se para sua determinação a equação 6 abaixo:

$$i = \left( \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \right) \times 100 \quad (6)$$

Onde:

$M_{sat}$  é a massa do corpo de prova saturado (kg);

$M_s$  é a massa do corpo de prova seco em estufa (kg);

$M_i$  é a massa do corpo de prova saturado, imerso em água (kg);

#### 2.2.4.5 Permeabilidade

A permeabilidade é a característica mais importante deste material. Entretanto estes valores de permeabilidade são bem superiores à capacidade de infiltração da maior parte dos solos e por isso é importante que ao se dimensionar um pavimento em concreto permeável, procure se obter a melhor relação permeabilidade x resistência à compressão, levando em conta parâmetros como:

Permeabilidade da base e sub-base;

Permeabilidade do concreto;

Resistência à compressão do concreto;

Vazão de pico.

Em aplicações de pavimentos e estacionamentos é preciso manter as mesmas propriedades de permeabilidade do concreto também para as camadas de base e sub-base. Não são necessárias grandes profundidades à instalação da estrutura, pois o pavimento possui grande área e armazena água como um

piscinão. Este sistema foi implementado em um projeto de estacionamento construído na USP, onde as camadas granulares de base e sub-base foram executadas com espessura total de 35 cm (VIRGILLIS, 2009).

A adoção de uma única faixa granulométrica de agregado é essencial para manter a estrutura de empacotamento das partículas suficientemente baixa de modo a desenvolver uma porosidade aberta na matriz, como mostrado na figura 10. Em geral, o tamanho de agregado graúdo relativamente uniforme é preferível para taxas de infiltração máximas. A adição de pequenas quantidades de areia pode melhorar a resistência à compressão quando comparada com misturas contendo apenas agregado graúdo, entretanto a permeabilidade é reduzida (SONEBI; BASSUONI; YAHIA, 2016).

A resistência do concreto endurecido é criada pela ligação entre a pasta de cimento e o agregado. Existem muitos fatores que afetam a resistência do concreto permeável, incluindo o teor de cimento, relação água cimento ( $a/c$ ), nível de compactação e graduação e qualidade do agregado. Para otimizar a dosagem do concreto permeável, um equilíbrio entre a resistência e a permeabilidade é o fator

Figura 10 – Seção transversal do concreto permeável, ilustrando a porosidade da estrutura.



Fonte: Sonebi, Bassuoni, Yahia (2016).

chave. É geralmente aceito que a resistência à compressão está relacionada à resistência da pasta com o agregado e índice de vazios. Pode também ser notado

que a técnica de compactação afeta o volume de vazios. A massa específica do concreto permeável varia de 1600 a 2000 kg/m<sup>3</sup>, o que é relativamente mais baixo que o concreto convencional devido ao volume significativamente maior de vazios (SONEBI; BASSUONI; YAHIA, 2016).

#### 2.2.4.6 Propriedades no Estado Fresco

Com estas características o concreto permeável no estado fresco tem consistência firme caracterizada por *slump* zero e sendo assim ele precisa de algum esforço de compactação para atingir as propriedades mecânicas desejadas, sem afetar a permeabilidade que é fortemente dependente da sua porosidade aberta (volume de vazios). A compactação do concreto permeável tem o objetivo de criar uma forte ligação entre a pasta de cimento e as partículas de agregados e promover uma superfície suavemente aceitável, sem comprometer a permeabilidade (ACI, 2010).

A massa específica é o principal parâmetro de controle de qualidade a ser empregado nas misturas “in loco”, visto que pode ser correlacionada às propriedades hidráulicas e mecânicas do material, além de ser um ensaio simples de ser executado (ACI, 2010; BATEZINI, 2019).

#### 2.2.4.7 Absorção acústica

A presença de poros interconectados deste material atua tanto na redução do ruído como na absorção do mesmo, pois minimizam o bombeamento de ar entre o pneu e a superfície do revestimento e a absorção do som ocorre pela fricção interna entre o movimento das moléculas de ar e as paredes dos poros (METHA; MONTEIRO, 2014).

O coeficiente de absorção acústica é medido por meio de um tubo de impedância, que determina a capacidade de um material absorver o som. Este coeficiente varia de 1 para materiais puramente absorventes até 0 nos casos de materiais completamente reflexivos. Este índice para os concretos convencionais varia de 0,03 a 0,05; já no concreto permeável a absorção acústica para misturas

com baixo índice de vazios é de 0,1, mas pode chegar próximo de 1 para dosagens com volume e tamanho de poros ótimos (ACI, 2010).

#### 2.2.4.8 Colmatação

A água que passa através do pavimento permeável carrega consigo diferentes graus de resíduos solúveis e insolúveis, poluentes ou não. Estes detritos acabam se depositando na superfície ou próximos a ela e ao longo do tempo as partículas mais finas causam a obstrução dos poros do concreto permeável. A este entupimento que leva à perda da permeabilidade do material dá-se o nome de colmatação. A proliferação de algas, de plânctons, de fito-plânctons e de diversas bactérias, também pode estar associadas à colmatação e contribuir para a diminuição da capacidade de infiltração da estrutura (LAMB, 2014; ACI, 2010).

Cuidados também devem ser tomados durante a execução e dimensionamento de estruturas em concreto permeável. Pinto (2011) notou que em seis meses de monitoramento foi possível notar sinais de colmatação e por isso sugere a utilização de trincheiras de infiltração, implantadas geralmente em sistemas viários, estacionamentos, parques e jardins. As trincheiras constituem-se em longas valetas implantadas a profundidades de 0,90 a 3,70 m, preenchidas com material granular e envoltas por material fino ou geotêxtil, que têm a função mitigar a colmatação.

Lamb (2014) desenvolveu dispositivos para avaliar a colmatação dos poros, onde simulou longos períodos de infiltração de água carreando sedimentos. Nesta simulação após 3:30 h da placa de concreto permeável estar submetida a um fluxo de água carregada de sedimentos foi possível observar a formação de uma lâmina de água, indicando uma redução das propriedades hidráulicas do material.

Entretanto não existe uma padronização para este tipo de ensaio, ou orientação acerca da concentração de partículas sólidas dispersas na água, o que dificulta uma comparação de resultados, mas alerta com relação à necessidade de manutenção e limpeza deste tipo de concreto.

#### 2.2.4.9 Durabilidade

A manutenção dos pavimentos em concreto permeável consiste na remoção dos detritos por lavagem sob pressão que é um método bastante eficaz, mas deve-se ter cuidado para não usar muita pressão e danificar o concreto permeável. Outro método é a aspiração à vácuo, extraíndo os contaminantes e detritos dos vazios do pavimento. O sistema mais eficaz, no entanto, é a combinação das duas técnicas, usando a aspiração a vácuo após a lavagem sob pressão. O ACI (2010) recomenda que se proceda uma verificação mensal da superfície com relação à limpeza de detritos e sedimentos e uma varredura a vácuo conforme a necessidade. Anualmente o concreto permeável deve ser inspecionado a fim de se certificar que não estão ocorrendo processos de deterioração ou lascamentos, e corrigi-los quando necessário.

O concreto permeável apresenta bom desempenho e durabilidade quando aplicado como revestimento de pavimentos de tráfego leve, mas é bastante influenciado pela porosidade que leva a uma redução em sua vida útil quando comparado aos concretos convencionais. Outros parâmetros que influenciam a durabilidade do material é o clima, pois em regiões temperadas os ciclos de gelo-degelo tendem a gerar tensões que levam à redução das propriedades mecânicas e da durabilidade. Ainda, aditivos e adições podem aumentar a vida útil do pavimento de concreto permeável (BATEZINI, 2019).

#### 2.2.5 Estudo da Confecção e Dosagem do Concreto Permeável

Para o concreto permeável, as proporções de seus insumos, como o teor agregado/cimento e relação água/cimento, devem ser cuidadosamente determinados, pois estas conferem-lhe as propriedades mecânicas requeridas em cada aplicação (ACI, 2010).

Os insumos utilizados no concreto permeável são os mesmos utilizados no concreto convencional, com a exceção do agregado miúdo, que não é desejado na mistura, ou tolerado em pequenas proporções. O quadro 1, mostra alguns valores de teores de insumos mais usados em misturas de concreto permeável, segundo Metha e Monteiro (2014).

Tabela 1 - Proporções tipicamente usadas na confecção de concreto permeável

<b>Materiais</b>	<b>Proporções (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Cimento	270 a 415
Agregado	1190 a 1480
Relação água/cimento	0,27 a 0,34
Relação agregado/cimento	(4 a 4,5):1
Relação agregado miúdo/graúdo	(0 a 1):1

Fonte: Metha e Monteiro (2014).

### 2.2.5.1 Mistura do Concreto Permeável

O ACI (2010) descreve que a mistura deve começar imediatamente após a adição do cimento ao agregado, porém não detalha os procedimentos e tempos de mistura para a confecção do concreto permeável (VIRGILLIS, 2009). Portanto serão detalhados abaixo métodos de mistura propostos por dois autores que obtiveram sucesso em seus resultados.

Schaefer *et al.* (2006) analisaram vários procedimentos de mistura durante suas pesquisas e concluíram que a metodologia de preparo afeta as características finais do concreto permeável. Os autores comprovaram que, para a obtenção de melhores propriedades mecânicas e hidráulicas, que foram adotadas também por Batezini (2013) em suas pesquisas, deve-se adotar a seguinte metodologia:

- a. Despeja-se todo o agregado no misturador juntamente com 5% de da massa total de cimento a ser utilizada no concreto;
- b. Misturam-se os materiais por 1 minuto;
- c. Adicionam-se o restante do cimento e a água no equipamento;
- d. Mistura-se por 3 minutos;
- e. Deixa-se a mistura em repouso por 2 minutos;
- f. Mistura-se, novamente, por 2 minutos.

O método apresentado por Lamb (2014), que foi adaptado a partir do procedimento detalhado por Schaefer *et al* (2006), obteve resultados satisfatórios. Na proposta de Lamb (2014) o agregado é misturado junto com parte da água, o

que garante que a superfície do agregado esteja umedecida quando o cimento for adicionado, desta forma facilitando a ligação da matriz cimentícia com o agregado.

Seguem as etapas de mistura realizadas pela autora:

- a. Coloca-se o agregado no misturador juntamente com 56% da massa de água;
- b. Misturam-se os materiais por 1 minuto;
- c. Adiciona-se o cimento ao misturador;
- d. Mistura-se por mais 2 minutos;
- e. Colocam-se os 44% restantes da água;
- f. Mistura-se por 2 minutos;
- g. Deixa-se a mistura repousar por mais 3 minutos.

Como já dito a relação água/cimento é determinante nas propriedades dos concretos e principalmente nas do concreto permeável, por isso durante a mistura é necessário avaliar se a relação a/c está adequada. A relação de água utilizada deve ser suficiente para umedecer e dar brilho ao concreto, sem que a pasta de cimento flua por entre os vazios formados pelo agregado. Para fins práticos, pode-se verificar esta condição moldando-se amostras de concreto em formato esférico com as mãos, como mostra as Figuras 11-a, 11-b e 11-c (PINI, 2011).

Figura 11 – Avaliação da relação água/cimento em função da consistência, (a) com relação a/c baixo, (b) com relação a/c ótimo e (c) com relação a/c alto.



Fonte: Tennis, Lemming e Akers (2004).

#### 2.2.5.2 Adensamento do Concreto Permeável

A energia utilizada durante o processo de adensamento do concreto permeável pode influenciar suas propriedades de resistência mecânica, porém

pouco interfere em sua condutividade hidráulica. No processo de adensamento em concretos permeáveis, os corpos de prova cilíndricos, de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, devem ser preenchidos em três camadas iguais, aplicando-se 25 golpes em cada camada e aplicando vibração mecânica por 5 segundos em cada uma das camadas (BATEZINI, 2019).

Batezini (2013) ressalta que o tempo de vibração mecânica deve ser reduzido, a fim de se evitar a segregação da pasta de cimento do corpo de prova, fenômeno que ocorre devido ao baixo teor de aglomerante desta mistura. A vibração mecânica em excesso pode acarretar no entupimento dos poros do concreto, resultando na perda da sua principal propriedade, que é a permeabilidade (METHA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com o relatado por Holtz (2011), em CPs de pequena dimensão a compactação é consideravelmente mais difícil, o que pode favorecer o desenvolvimento de defeitos e resultar em um acúmulo de pasta junto à superfície da forma, o que pode prejudicar ao ensaio de permeabilidade.

Outros autores vêm estudando uma metodologia de compactação dos CPs de concreto permeável similar à compactação em CPs de misturas asfálticas, onde se propõe o adensamento por meio de um martelo ou soquete. Parâmetros como altura de queda, massa do martelo e número de golpes variam de acordo com cada pesquisa, entretanto nota-se que os autores mantêm a compactação em 3 camadas e utilizam um soquete com base ligeiramente menor que o diâmetro interno do molde do CP de concreto. O número de camadas adotado pela maioria dos autores é justificado pela dificuldade em se adensar um concreto com baixa relação a/c, como é o caso do concreto permeável. Somam-se a este fato às dimensões reduzidas dos moldes dos CPs, o que leva à necessidade de adensar as amostras em 3 camadas.

Rangelov *et al.* (2017) usaram um martelo proctor padrão de 2,5 kg e adotaram uma altura de queda de 30,50 cm para compactar CPs de concreto permeável. O número de golpes foi definido em função da massa específica no estado fresco que se desejava obter.

Algumas pesquisas apontam para a utilização do dispositivo “marshall hammer”, cuja especificação do dispositivo deve estar adequada às diretrizes da AASHTO T245 ou DNIT. De acordo com os autores as amostras podem ser

adensadas segundo procedimentos de alta ou baixa compactação. Para alta compactação os moldes são preenchidos em 3 camadas e compactados com 26 golpes em cada camada. Para baixa compactação são utilizados 5 golpes por camada. Independente do nível de compactação a operação é realizada em até 20 minutos, por meio de dispositivo com massa de 4540 g e o diâmetro do soquete de 76,9 mm e altura de queda de 15 cm. A última camada deve ser preenchida de modo que o concreto exceda a fôrma e assim quando compactado fique aproximadamente no mesmo nível do topo da forma. Não é permitido adicionar mais concreto à última camada (SILVA *et al.* 2018).

### 2.2.5.3 Cura do Concreto Permeável

Devido à sua estrutura de poros abertos a secagem do concreto permeável começa prontamente após a mistura. Por isso o ACI recomenda que o processo de cura deste concreto inicie-se dentro de 20 minutos após o processo de adensamento. Em caso de condições climáticas desfavoráveis, como altas temperaturas, ventos fortes ou baixa umidade relativa do ar, deve-se aspergir água sobre o concreto para que este volte a ter a aparência brilhante e metálica (ACI, 2010).

Em seguida, os corpos de prova de concreto permeável devem ser colocados em câmara úmida, com temperatura controlada de 23° C e umidade relativa de 98% ou, em casos de ausência deste equipamento, devem ficar submersos até o momento da realização dos testes de resistência à compressão axial (LAMB, 2014; HOLTZ, 2011).

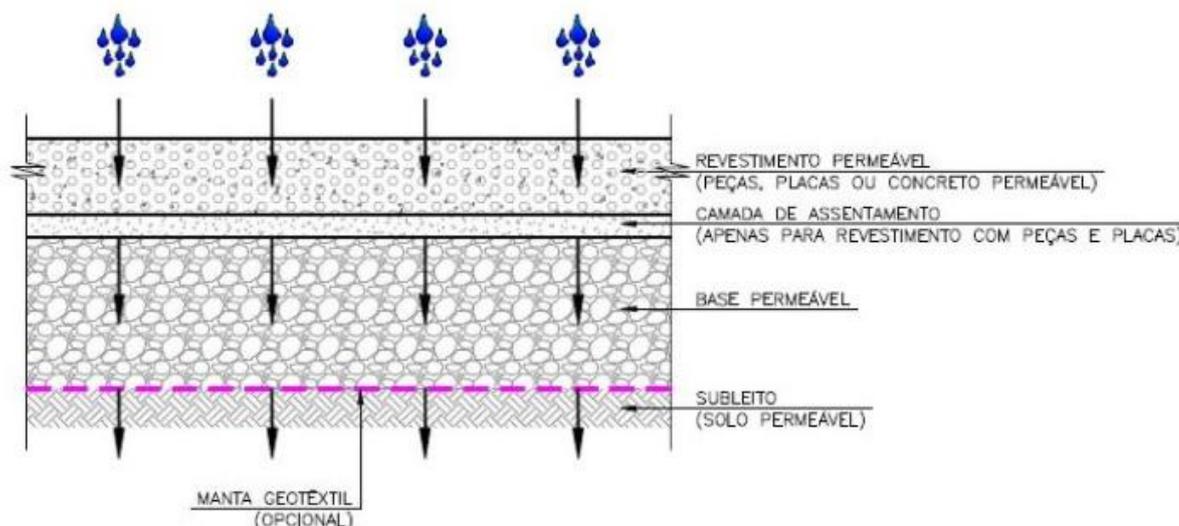
### 2.2.6 Confeção de Pavimentos Permeáveis

O pavimento permeável é um dispositivo que tem por finalidade a infiltração das águas de escoamento superficial através de superfície drenante, a fim de armazenar a água infiltrada em reservatórios ou para que a água retorne ao solo. Existem algumas particularidades que devem ser observadas, e que diferem da confecção de CPs, devido ao efeito de escala.

Todo o processo construtivo de pavimentos feitos a partir de concreto permeável deve seguir os planos e especificações indicadas em projeto

previamente elaborado. Estes, por sua vez, necessitam ser bem detalhados e adequados às necessidades do cliente e seguir rigorosamente as regulamentações locais (ACI, 2010). A Figura 12 mostra a configuração da estrutura do pavimento de concreto permeável.

Figura 12 – Sistema de pavimento permeável com infiltração total



Fonte: ABNT, 2015.

O subleito uniforme, previamente preparado e com a correta elevação são essenciais para a construção de um bom pavimento. O topo da camada, que deve ter uma altura de 150 mm, deve ser composto de material arenoso ou pedregulhoso, com não mais que 10% de silte ou argila. O subleito deve estar devidamente compactado, de forma a ter-se uma camada consistente, com boas propriedades mecânicas e boa taxa de permeabilidade (ACI, 2010).

O projeto do pavimento deve prever uma camada de sub-base permeável com espessura de 150 a 300 mm, possuindo grãos de solo com tamanho máximo de 25 mm, podendo ser depositados ou fazerem parte da constituição natural do solo, este, assim como o subleito, deve ter uma composição em sua maioria de materiais granulares (areia ou pedregulho), que devem ter suas camadas compactadas antes da aplicação do concreto permeável (TENNIS, 2004).

É importante ressaltar que as camadas e materiais a serem utilizados em um pavimento permeável devem atender concomitantemente às necessidades hidráulicas, mas sem deixar de seguir as normas e os métodos reconhecidamente aceitos para o dimensionamento de pavimentos, como recomenda a ABNT e DNIT.

A NBR 16416 (2015) impõe algumas exigências para o projeto de pavimentos permeáveis.

- condições de implantação, utilização do pavimento e interferências em geral;
- capacidade de suporte do solo, determinada pelo índice de suporte califórnia, conforme ABNT NBR 9895;
- coeficiente de permeabilidade do subleito, conforme a ABNT NBR 13292 ou a ABNT NBR 14545, dependendo do tipo de solo;
- consideração da condição saturada do solo no caso de sistemas com infiltração total ou parcial;
- medição do nível do lençol freático, sendo necessário que a parte inferior da base do pavimento deve estar no mínimo a 0,6 m de distância do nível mais alto do lençol;
- as áreas de contribuição não podem exceder em até cinco vezes as áreas permeáveis do pavimento;
- declividade máxima de 5% para as áreas permeáveis;
- declividade máxima de 20% para as áreas de contribuição, cabendo ao projetista determinar a necessidade de implantar dispositivos redutores de velocidade;
- resistência mecânica mínima do revestimento;
- massa específica do concreto permeável moldado "in loco";
- detalhamento das juntas longitudinais e transversais, quando for o caso, do concreto permeável moldado no local;
- avaliação do risco de contaminação do lençol d'água, mantendo-se a distância de no mínimo 30 m de fontes de captação de água subterrânea.

Virgillis (2009), quando desenvolveu uma pista experimental em concreto permeável, adotou em seu projeto de pavimentação camada de 15 cm de base de brita graduada simples (BGS) sobre macadame hidráulico (brita 3) de 15 cm, implantados sobre 5 cm de pó de pedra e geomembrana.

Devido à baixa quantidade de água presente e à alta porosidade do material, cuidados com as camadas de solos devem ser tomados previamente à concretagem para garantir que o pavimento não seque prematuramente, perdendo resistência. As camadas do subleito e da sub-base devem estar úmidas, porém não saturadas, congeladas, ou enlameadas, para que a água presente no concreto necessária às reações de hidratação do cimento não seja por elas absorvida (ACI, 2010; BATEZINI, 2019).

O concreto permeável deve ser descarregado depois de, no máximo, uma hora após o início de sua mistura, podendo este tempo ser estendido para uma hora e meia, com o uso de retardadores de pega. Ambientes com temperaturas elevadas e com ventos fortes têm efeitos mais pronunciados durante a construção do pavimento e devem ser levados em consideração (ACI, 2013).

Existem variadas técnicas para se realizar o processo de concretagem dos pavimentos de concreto permeável, estas devem atender às necessidades do local

de trabalho. Deve ser observado que o concreto permeável, devido à sua baixa trabalhabilidade, não pode ser bombeado, logo o acesso ao local da pavimentação precisa de planejamento prévio. Cada carga de concreto será visualmente inspecionada para que sejam verificadas sua consistência e o revestimento dos agregados pela pasta de cimento. Neste tipo de concreto o ensaio de abatimento do tronco de cone não é aplicado. Para garantir o controle de qualidade do concreto permeável deve-se realizar a medição da sua massa específica, como já abordado.

As fôrmas do pavimento podem ser feitas de madeira, plástico ou aço e devem possuir a profundidade do pavimento projetado e resistência e estabilidade o suficiente para sustentar o concreto permeável e os equipamentos da concretagem (ACI, 2010).

O ACI (2010) recomenda que a confecção do concreto deve ocorrer o mais próximo possível do local onde será aplicado, processo que é feito usualmente, direcionando a calha de descarga do caminhão misturador e depositando-se o concreto diretamente na sub-base e, em seguida o material deve ser espalhado manualmente para o preenchimento total das fôrmas.

O processo de adensamento do concreto deve começar imediatamente após a concretagem e nivelamento do concreto sendo realizado através de rolo de aço leve nos sentidos longitudinal e transversal. O rolo de adensamento deve ter dimensão e massa para que este aplique uma pressão vertical de 0,07 MPa sobre o pavimento, como demonstra a figura 13 (ACI, 2010).

Figura 13 - Processo de adensamento de pavimento de concreto permeável



Fonte: Tennis, Lemming e Akers (2010).

Batezini (2019) empregou em seu estudo experimental um rolo de metal vazado preenchido por areia com massa total de 68 kg/m, produzindo uma pressão de 0,07 MPa sobre o pavimento. O concreto permeável foi compactado com aproximadamente 10 passadas do rolo, em alguns casos foram necessários mais passadas para eliminar as ondulações presentes na superfície.

Devem ser tomados cuidados extras e controle total durante o processo de cura do pavimento de concreto permeável. Portanto, logo após o processo de adensamento, deve-se iniciar o processo de cura do pavimento. Para isto, ele deve ser protegido com uma manta de polietileno de espessura mínima de 0,15 mm durante 7 dias ininterruptos, até finalmente ser liberado para uso. A norma preconiza também, que, em situações de clima desfavorável para a concretagem, como temperaturas elevadas e ventos fortes, deve-se aspergir no pavimento água, para devolver hidratação, garantindo a aparência metálica e brilhante (ACI, 2010).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa foi constituída por uma etapa preliminar, que teve por objetivo testar uma série de misturas de concretos permeáveis, e definir o traço que apresentasse os resultados mais satisfatórios em termos de resistência à compressão. Os traços confeccionados tiveram apenas agregados graúdos, cujas faixas granulométricas utilizadas foram de 9,5 a 19 mm e 4,75 a 9,5 mm, respectivamente britas 1 e 0, segundo classificação comercial.

O aglomerante utilizado nas misturas foi o cimento tipo *portland* CP-III-40 RS marca CSN, devido ao seu baixo calor de hidratação, que é algo desejável em misturas com baixa relação água/cimento (*a/c*), além de maior durabilidade, impermeabilidade da matriz cimentícia e resistência em meios agressivos e em contato com umidade, obtidas em função da escória de alto-forno presente neste tipo de cimento (CSN, 2020).

Para a dosagem das matérias-primas foi estabelecida uma relação água/cimento de 0,35, pois nesta primeira etapa não se utilizou aditivo plastificante. A relação cimento/agregado (*c/m*) foi de 1:4, ou seja, uma parte de aglomerante (cimento + sílica) para 4 partes de agregado, conforme tabela 2 e figura 14.

Tabela 2 – Traços de concreto permeável na etapa preliminar

Traços de concreto permeável			
Traço	Agregado (kg) 4,75 a 9,5 mm	Agregado (kg) 9,5 a 19 mm	Macrofibra (g)
M1-a	15	0	0
M1-b	0	15	0
M1-c	15	0	33
M1-d	0	15	33

Fonte: Próprio autor

Os insumos utilizados foram medidos pela sua massa, tendo sido utilizados em cada traço 3,75 kg de cimento e 1,31 kg de água, de modo a atender à relação água/cimento de 0,35. Os outros insumos que variaram de acordo com o traço denominados de M1-a com agregado variando de 4,75 a 9,5 mm e sem macrofibra, M1-b com agregado variando de 9,5 a 19 mm e sem macrofibra, M1-c com

agregado variando de 4,75 a 9,5 mm e macrofibra e M1-d com agregado variando de 9,5 a 19 mm e macrofibra, estão especificados na tabela 2.

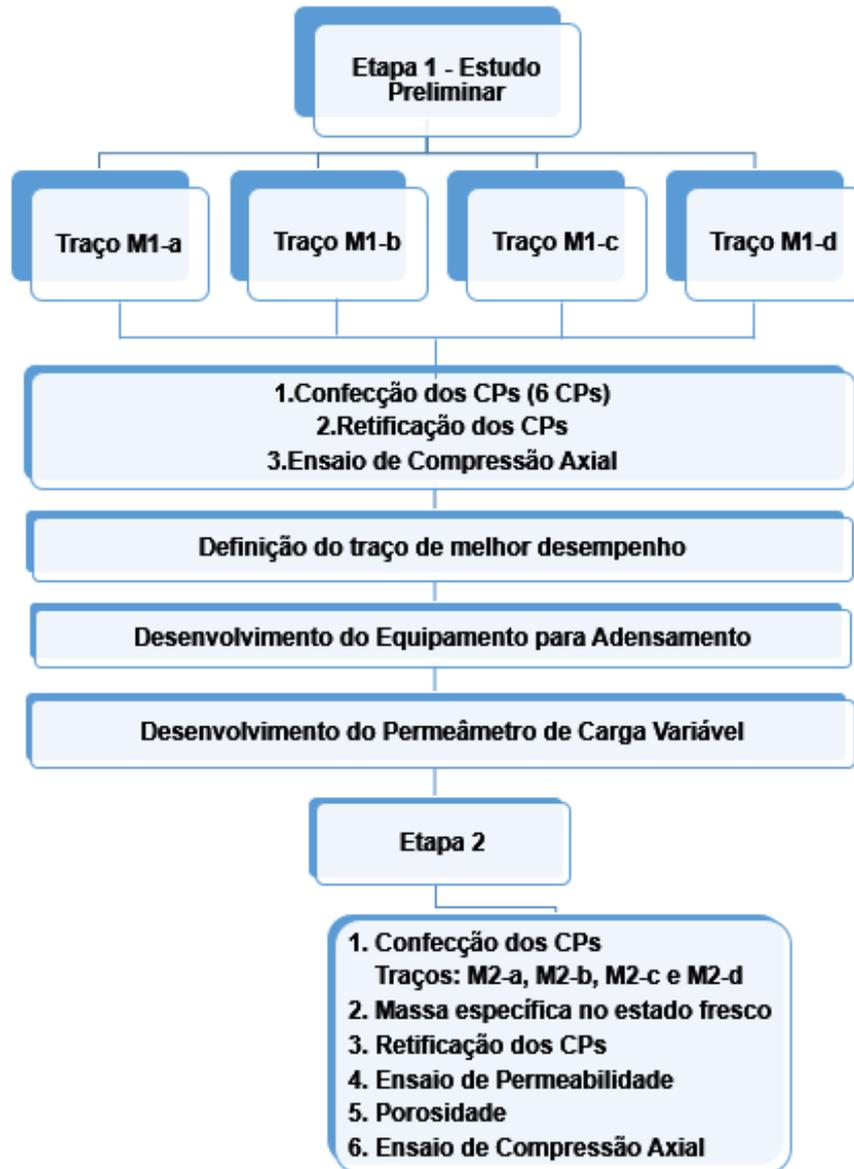
Outro parâmetro estudado nesta etapa foi o efeito da adição de macrofibras de polipropileno ao concreto permeável, sendo que para as misturas M1-c e M1-d foram adicionados 4 kg de fibra por m<sup>3</sup> de concreto, conforme indicação do fabricante que estabelece um consumo de 1,8 a 12 kg para cada m<sup>3</sup> de concreto. A fibra estrutural TUF-STRAND-SF, é composta por um “blend” de polipropileno/polietileno e podem ser utilizadas em uma variedade de aplicações para substituir com sucesso as fibras de aço e as telas soldadas. A escolha por este tipo de fibra se dá pelo fato da sua resistência à corrosão e alcalinidade, por ser um reforço não-magnético e não-condutivo. Estas propriedades são desejáveis em função das características de elevada porosidade do concreto em estudo (VIAPOL, 2019).

O fabricante Viapol (2019), relaciona ainda outras vantagens do uso das macrofibras de polipropileno:

- Resistências equivalentes à telas soldadas e fibras de aço fornecido através de cálculos de engenharia;
- Melhor controle da retração, inibindo o surgimento de fissuras e reduzindo a segregação;
- Fornecer reforço tridimensional ao concreto;
- Em concretos projetados reduz o desgaste dos equipamentos e reflexão;
- Aumenta durabilidade, resistência à fadiga e à tenacidade;
- Reduz a exsudação no concreto;
- Reduz do custo operacional quando comparado com telas soldadas;
- Fácil adição e alta dispersão no concreto;
- Atende à ASTM C1116 e testado de acordo com as normas ASTM C1399, ASTM C1550 e ASTM C1609;
- Aplicável para projetos conforme a ACI 360 R-10;
- Certificado para uso pela UL/ULC para a série D900 de *Steel Decks* como alternativa para tela soldada (CBXQ.R13773);

A partir do estudo da etapa preliminar, foi avaliado todo o processo de confecção dos CPs conforme citado no fluxograma da figura 14 e obtidos os resultados de resistência à compressão axial. Para a segunda etapa foram adotadas melhorias no processo e a realização de estudo aprofundado para o traço de melhor desempenho. O traço de melhor desempenho foi aquele que visualmente se apresentou homogêneo, com superfície brilhante e atendeu ao critério de relação a/c ótima, no seu estado fresco. Já no estado endurecido o parâmetro que prevaleceu foi a resistência à compressão, estando o melhor desempenho relacionado à maior resistência à compressão.

Figura 14 – Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: Próprio autor

Foram confeccionados, para cada uma das dosagens definidas na tabela 2, 6 CPs cilíndricos de concreto permeável nas dimensões de 10 x 20 cm, diâmetro e comprimento respectivamente, segundo determina a NBR 5738 (ABNT, 2015).

Na segunda etapa de estudos, incorporou-se aos traços de concreto permeável um teor de 10% de sílica ativa, do fabricante Tecnosil. A sílica ativa foi dosada em relação à massa de aglomerante, com a função de melhorar a interação física e química com o cimento *portland*, modificando a reologia dos compósitos do concreto, argamassa e pasta no estado fresco e conferindo propriedades especiais relacionadas à durabilidade e ao desempenho mecânico no estado endurecido, e

assim aumentando a resistência na interface entre a pasta e o agregado. Esta matéria-prima é obtida nas indústrias de ferrosilício e silício metalúrgico, onde o quartzo é reduzido pelo carbono em altas temperaturas, resultando na produção do monóxido de silício gasoso (SiO), que se condensa a temperaturas mais baixas, formando o dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) (CARMO; PORTELLA, 2008).

Para o aprofundamento da pesquisa considerou-se necessária a realização dos traços do estudo preliminar para um universo maior de amostras, sendo confeccionados 9 CPs cilíndricos para cada dosagem. O traço escolhido foi o M1-b, e a ele adicionou-se 10% de sílica ativa em relação à massa de cimento, e a mistura passou a ser denominada M2-a, todos os demais parâmetros foram mantidos.

Nas misturas posteriores, identificadas por M2-b e M2-c, foram reduzidos os parâmetros de relação água/cimento, sendo analisadas as relações a/c iguais à 0,30 e 0,265, respectivamente, conforme tabela 3. Para possibilitar esta redução da relação a/c, foi necessário valer-se do uso de aditivos redutores de água. Para esta etapa da pesquisa foi adotado aditivo superplastificante, que é capaz de reduzir a água de amassamento de uma determinada mistura entre 20 a 30%. Estas substâncias químicas aumentam a trabalhabilidade, por meio de moléculas com extremidades laterais com cargas negativas, onde uma das extremidades adere aos grãos de cimento positivo e a outra com carga negativa fica exposta. E a repulsão eletrostática entre as cargas negativas afasta os grãos de cimento envoltos pelo aditivo, facilitando a trabalhabilidade. Ou mantendo a trabalhabilidade e reduzindo o consumo de água o que leva a um aumento da resistência (METHA; MONTEIRO, 2014).

Tabela 3 – Traços de concreto permeável na etapa 2

TRAÇO	RELAÇÃO A/C	ÁGUA (kg)	ADITIVO PLASTIFICANTE (g)
M2-a	0,35	2,013	0
M2-b	0,30	1,750	23
M2-c	0,265	1,524	23

Fonte: Próprio autor

O aditivo incorporado às misturas M2-b e M2-c foi o “master glemium 51”, do fabricante BASF (2015), que recomenda a utilização de um teor de 0,2 a 1,0 % em relação à massa de cimento.

A confecção dos CPs e os ensaios de resistência à compressão da 1ª e 2ª etapas foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil nas dependências do UNISAL – Centro Universitário Salesiano de São Paulo – unidade Lorena-SP. Os CPs foram submetidos a ensaios de compressão uniaxial realizados aos 28 dias após a concretagem das amostras, em uma prensa elétrica modelo FT 01, com capacidade máxima de 100,00 t, da marca FORTEST, conforme figura 15.

Figura 15 – Prensa elétrica utilizado nos ensaios de resistência à compressão dos CPs

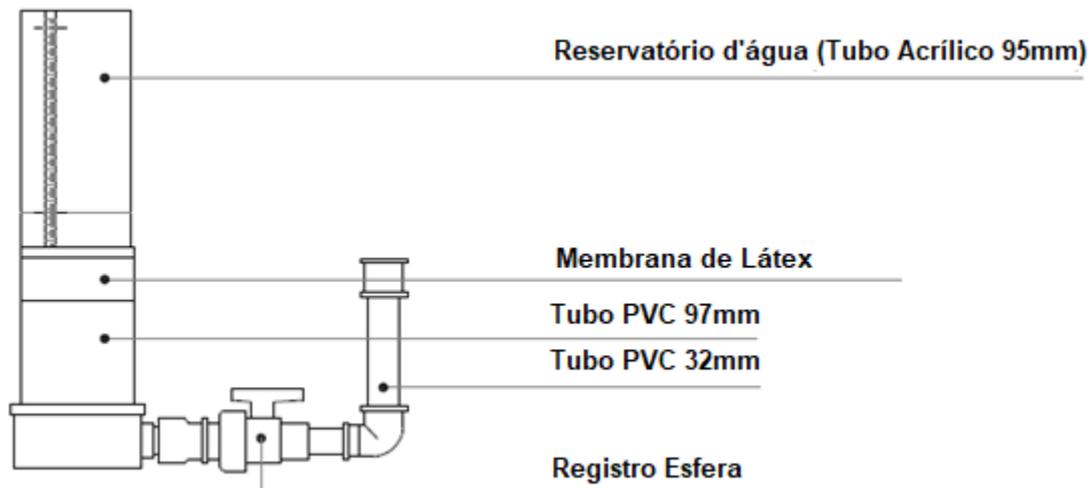


Fonte: Próprio autor

Antes da realização do ensaio de resistência à compressão, as amostras foram tratadas, passando por processo de retificação de superfície, que foi realizado no laboratório de processamento cerâmico do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR) da Escola de Engenharia de Lorena (EEL) da Universidade de São Paulo (USP).

Para a obtenção dos dados referentes à permeabilidade do concreto permeável, para as dosagens estudadas foi utilizado um permeâmetro de carga variável. O sistema constitui-se de um conjunto de tubos cilíndricos: o tubo superior é usado como reservatório de água e o inferior recebe a água que flui pela amostra. Entre estes tubos o CP de concreto permeável é encaixado. O CP é envolto em uma membrana de material impermeável, de modo que o fluxo lateral seja totalmente impedido e que a água percole verticalmente pela amostra. O tubo inferior fica conectado a outro horizontal, munido de uma válvula, quando a válvula está aberta a água do reservatório flui através do concreto permeável, que se encontra saturado, sendo registrada a variação de nível em um intervalo de tempo, por meio de uma mangueira transparente (LAMB, 2014; TAVARES; KAZMIERCZAC, 2016). O coeficiente de permeabilidade foi calculado pela Lei de Darcy, conforme equação 7. A figura 16, apresenta um esquema de equipamento proposto por Lamb (2014).

Figura 16 – Esquema do equipamento para ensaio de permeabilidade



Fonte: Lamb (2014).

$$K = \frac{aH}{A\Delta t} \log\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (7)$$

Onde:

$K$  é o coeficiente de permeabilidade, em centímetro por segundo;

$\Delta t$  é dado pela diferença entre os instantes  $t_2$  e  $t_1$ , em segundos;

$h_1$  é a altura da lâmina de água no início do ensaio, instante  $t_1$ , em centímetros;

$h_2$  é a altura da lâmina de água no final do ensaio, instante  $t_2$ , em centímetros;

$a$  é a área interna do reservatório de água, em centímetros quadrados;

$H$  é a altura do corpo de prova, em centímetros;

$A$  é a área do corpo de prova, em centímetros quadrados.

### 3.1 Etapa 1 - Estudo Preliminar

Foram confeccionados, para cada uma das dosagens definidas na tabela 1, 6 CPs cilíndricos de concreto permeável nas dimensões de 10 x 20 cm, diâmetro e comprimento respectivamente, segundo determina a NBR 5738 (ABNT, 2015).

Os traços de concreto permeável foram elaborados no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Centro Universitário Salesiano de São Paulo – UNISAL-Lorena, onde foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

Cimento CP-III-40 RS, marca CSN

Agregado graúdo: faixa de 4,75 a 9,5 mm

Agregado graúdo: faixa de 9,5 a 19 mm

Água de abastecimento local

Betoneira de capacidade de 120 L

Moldes cilíndricos metálicos 10 x 20 cm

Balança de precisão

Colher para concreto para fôrma 10 x 20 cm

A confecção do concreto e moldagem das amostras seguiram as diretrizes de Lamb (2014) e da NBR 5738:2015, e estão detalhadas abaixo:

- a) Adicionou-se 15 kg do agregado graúdo, na betoneira previamente umedecida, com 60% da massa de água e misturou-se por um minuto;
- b) Em seguida foram acrescentados 3,75 kg de cimento e misturou-se por mais 2 minutos;

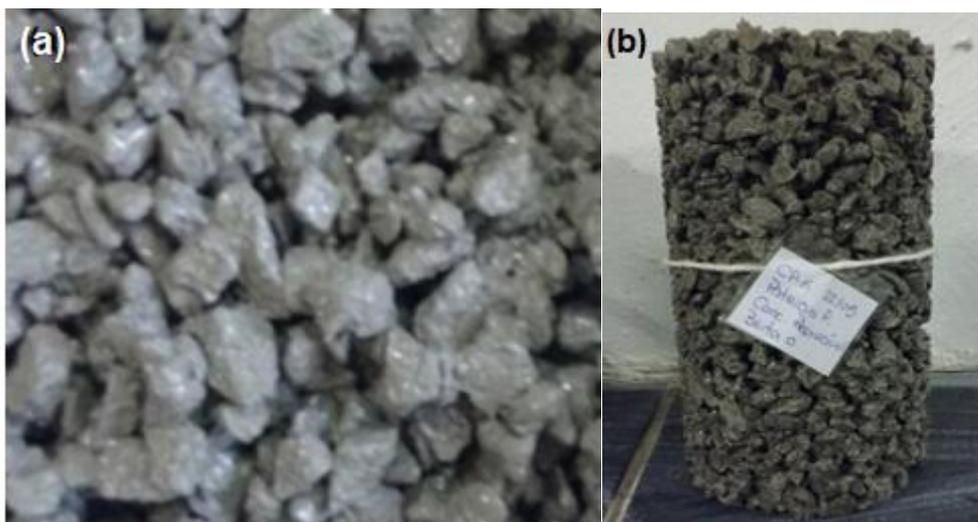
- c) E por fim adicionou-se os 40% restantes de água e misturou-se a massa por mais 2 minutos;
- d) Deixou-se a mistura repousar por mais 3 minutos e depois foram moldados os CPs cilíndricos.
- e) Aos traços M1-c e M1-d foram incorporadas as macrofibras de polipropileno após a etapa “c”.

A moldagem foi realizada em moldes metálicos, que tiveram a sua superfície revestida internamente com fina camada de óleo mineral, a fim de facilitar a desmoldagem das amostras. O concreto foi inserido dentro da fôrma cilíndrica em 2 camadas e compactado manualmente, por meio da haste de adensamento com 12 golpes por camada. Não foi utilizada mesa vibratória no adensamento a fim de evitar que a pasta de cimento fluísse pelos poros obstruindo-os.

Após 24 h da mistura e moldagem os CPs foram desmoldados e colocados em processo de cura submersos em um tanque com água até o 28º dia a partir da confecção do concreto.

Nas figuras 17 (a) e (b) podem ser observadas respectivamente, a mistura de concreto permeável para o traço M1-b no seu estado fresco e o CP desformado da dosagem confeccionada conforme traço M1-a.

Figura 17 – Concreto Permeável (a) estado fresco traço M1-b e (b) Corpo de Prova traço M1-a.



Fonte: Próprio Autor

Após processo de cura, onde as amostras permaneceram submersas, os CPs foram submetidos ao ensaio de compressão axial, que é um importante

parâmetro para estudo das propriedades dos concretos. Entretanto os resultados obtidos são diretamente afetados pelo método de regularização das superfícies em contato com a prensa. Por isso, para que ocorra uma distribuição uniforme de tensão no topo e base dos CPs e com isso os resultados de resistência à compressão sejam confiáveis, as duas extremidades dos CPs receberam um acabamento superficial para que se tornarem planas, lisas e perpendiculares ao eixo longitudinal da peça. Sendo assim, metade dos CPs das misturas denominadas M1-a e M1-b, tiveram seu topo retificado como mostra a figura 18, por uma retificadora horizontal da marca Ferdimat. O rebolo utilizado no processo segue a especificação K-14A1-200-15-3-31,7-D126-Winter. A outra metade não teve a sua superfície retificada, onde se fez o uso de discos de neoprene de dureza shore 70, sob base metálica. Com o objetivo de comparar os dois processos de preparação da superfície e garantir que não houvesse o desprendimento dos agregados.

Figura 18 – Corpo de Prova com tratamento de superfície por retificação



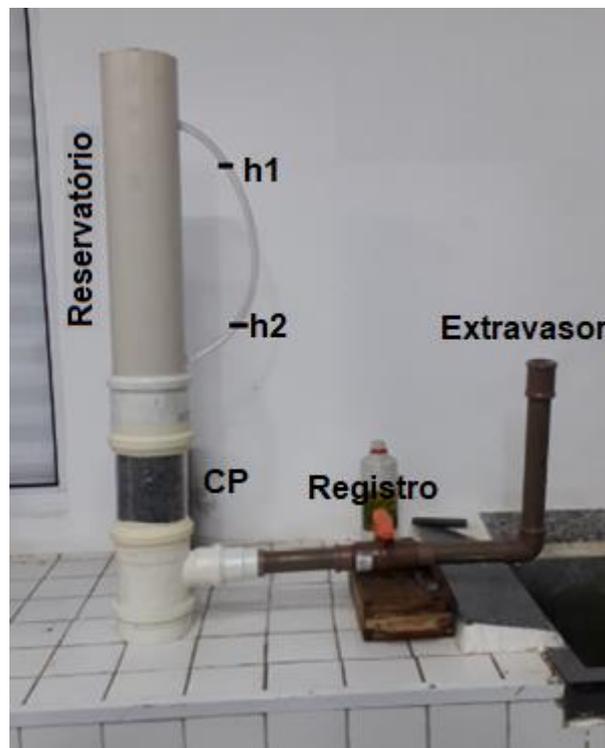
Fonte: Próprio Autor

Os traços M1-c e M1-d confeccionados com macrofibra de polipropileno não apresentaram o desempenho esperado no estado fresco, pois a inserção da fibra

prejudicou a trabalhabilidade e conseqüentemente a moldagem dos CPs, além de formar ninhos de fibra no meio do concreto.

Os CPs da etapa preliminar não foram submetidos ao ensaio de permeabilidade, entretanto nesta fase da pesquisa foi desenvolvido e confeccionado o permeâmetro de carga variável que foi utilizado no ensaio de permeabilidade nos traços da 2ª etapa, conforme figura 19. O permeâmetro foi baseado no esquema proposto por Lamb (2014) e construído com conexões e tubos em PVC. O equipamento é constituído por um trecho superior, que é o reservatório de água, em tubo de PVC de 100 mm. Sob o reservatório foi encaixada a amostra de concreto permeável, devidamente revestida por um filme plástico. As extremidades do tubo de PVC de 100 mm são munidas de bolsa e anel de vedação para evitar a perda de água durante o ensaio. A parte abaixo da amostra é composta por tubo de PVC de 100 mm e redução para 32 mm, onde foi acoplado um registro esfera de 32 mm que é o responsável pelo controle do fluxo de água que percola pela amostra. Por fim, foi deixado um tubo extravasor, cujo nível deve estar acima do topo do CP e abaixo da altura  $h_2$  da lâmina de água.

Figura 19 – Permeâmetro de carga variável



Fonte: Próprio Autor

O ensaio de permeabilidade é repetido 3 vezes para cada CP e o coeficiente K de cada amostra é obtido pela média aritmética da diferença  $\Delta t$  das 3 repetições, que é introduzida na equação 7. O valor final da permeabilidade de cada traço é resultado da média do coeficiente K de 3 amostras da mesma mistura.

### **3.2 Etapa 2 da Pesquisa**

A etapa preliminar foi muito importante para se testar o procedimento de confecção do concreto permeável e avaliar se a relação a/c adotada resultaria em um concreto permeável com as características desejáveis para uma mistura no estado fresco e se seria possível moldar e desformar adequadamente os CPs. Se seria possível confeccionar as amostras em um período inferior a uma hora, como determinam as normas e estudos de outros autores. Entretanto, como os resultados se mostraram pouco conclusivos e com elevado desvio-padrão, no que diz respeito aos resultados de resistência à compressão das misturas, além do fato de ter sido utilizado um número pequeno de amostras, decidiu-se confeccionar um traço similar a uma das misturas da etapa preliminar, mas agora utilizando 9 amostras para análise.

O primeiro traço a ser elaborado foi identificado como M2-a, e levou na sua mistura agregado graúdo na faixa de 4,75 a 9,5 mm. Ao cimento foi adicionado um teor de 10% de sílica em relação à massa de aglomerante e quanto à relação água/cimento foi mantida o  $a/c = 0,35$ , haja vista que não se fez uso de aditivos plastificantes. Os procedimentos para confecção e moldagem do concreto permeável foram os mesmos adotados na etapa preliminar, que seguiram as diretrizes propostas por Lamb (2014) e da NBR 5738:2015, sendo a sílica adicionada à mistura juntamente com o cimento.

Para as misturas seguintes procurou-se reduzir a relação água/cimento, entretanto isso só foi viável a partir do uso de um aditivo superplastificante, onde para o presente estudo foi utilizado o “master glemium 51”, do fabricante BASF, a um teor de 0,40% em relação à massa de cimento. O teor adotado foi definido mediante os resultados apresentados por Batezini (2019), que ao incorporar um teor de 0,70% de aditivo redutor de água observou a segregação da mistura, caracterizada por movimento descendente da pasta de cimento após a

compactação dos CPs, provocando o entupimento dos poros do concreto na face inferior da amostra levando à perda da permeabilidade.

O autor testou diversas dosagens com proporções de aditivos variando entre 0,25% e 0,47% e constatou que com o aumento do teor de aditivo as taxas de infiltração eram reduzidas, mas as resistências à compressão sofriam aumento e encontrou um traço com as melhores características tanto mecânicas quanto hidráulicas com a adoção de 0,35% de aditivo, para misturas com cimento *portland* CP-III (BATEZINI, 2019). A partir das conclusões do autor e procurando definir uma taxa que o autor não tivesse explorado, adotou-se para a presente pesquisa a quantidade de 0,40% de superplastificante “master glemium 51” em relação à massa de aglomerante.

A relação água/cimento adotada para os traços seguintes foram de 0,265 e 0,30, respectivamente para os traços denominados por M2-c e M2-b, conforme tabela 3 anteriormente apresentada.

A quantidade de insumos foi redefinida em função da necessidade do aumento no número de amostras. A tabela 4 resume a quantidade de insumos utilizadas em cada uma das misturas realizadas na etapa 2 de estudos, ou seja, traços M2-a, M2-b e M2-c.

Tabela 4 – Quantidade de insumos por traço, utilizados na confecção dos CPs na etapa 2

TRAÇO	AGLOMERANTE (kg)		AGREGADO (kg)	RELAÇÃO A/C	ÁGUA (kg)	ADITIVO PLASTIFICANTE (g)
	CIMENTO (kg)	SÍLICA (kg)				
M2-a	5,17	0,58	23,00	0,35	2,00	0
M2-b	5,17	0,58	23,00	0,30	1,75	23
M2-c	5,17	0,58	23,00	0,265	1,52	23

Fonte: Próprio autor

Quanto à confecção do concreto permeável foi observado para todos os traços que o agregado foi completamente envolvido pela pasta de cimento, que aparentava superfície brilhante e metálica e que não houve segregação da pasta de cimento e nem obstrução dos poros.

O tempo de confecção das amostras de concreto permeável, incluindo a mistura das matérias-primas, moldagem e adensamento do mesmo, foi inferior a

uma hora, o que está de acordo com as normas e autores pesquisados neste estudo.

Para o traço M2-b não foi possível moldar a esfera de concreto com as mãos, como orienta o ACI, pois para esta mistura a relação a/c com o uso de aditivo apresentou-se ligeiramente alto, contudo, não o suficiente para obstruir os poros do concreto e impedir a realização dos ensaios de permeabilidade e resistência à compressão.

A figura 20 mostra a dosagem das matérias-primas utilizadas na confecção dos CPs e na figura 21 pôde ser constatada uma boa condição da relação água/cimento, para a mistura M2-c, por meio da moldagem de uma esfera em concreto permeável.

A moldagem e adensamento das amostras seguiram o mesmo procedimento realizado na etapa preliminar, ou seja, compactação em 2 camadas e adensamento por meio da haste com 12 golpes por camada. Entretanto na desforma dos CPs observou-se que na superfície lateral formaram-se espaços vazios como mostra a figura 22.

Figura 20 – Matérias-primas constituintes do Concreto Permeável (a) agregado graúdo, (b) cimento CP-III-40-RS, (c) sílica ativa e (d) aditivo superplastificante.



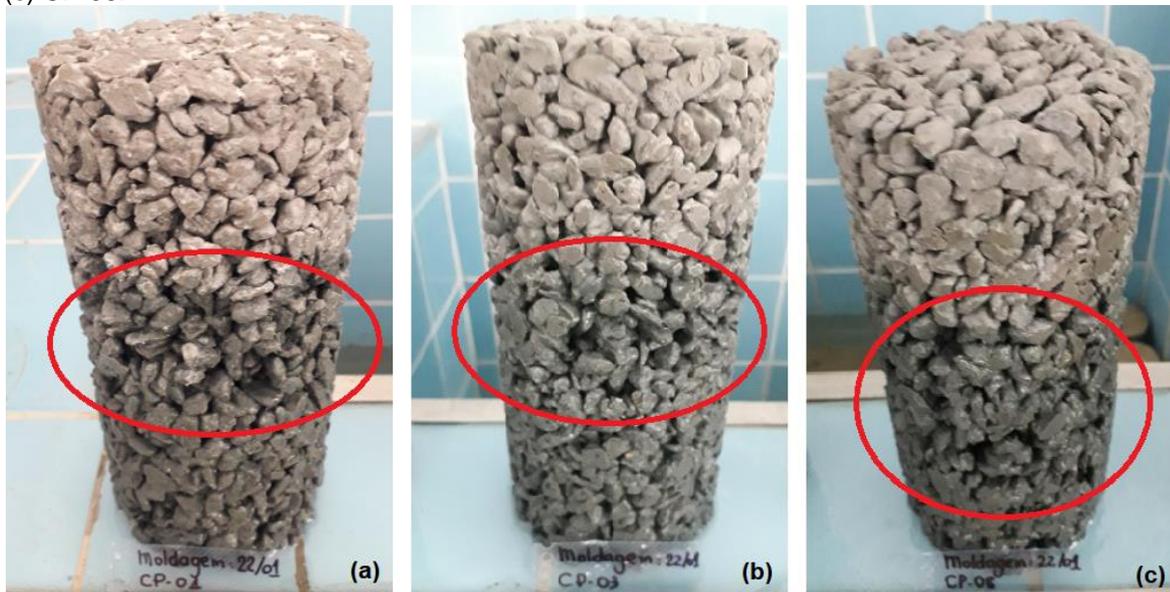
Fonte: Próprio autor

Figura 21 – Moldagem da esfera de concreto permeável, traço M2-c, para uma condição de relação a/c ótima.



Fonte: Próprio autor

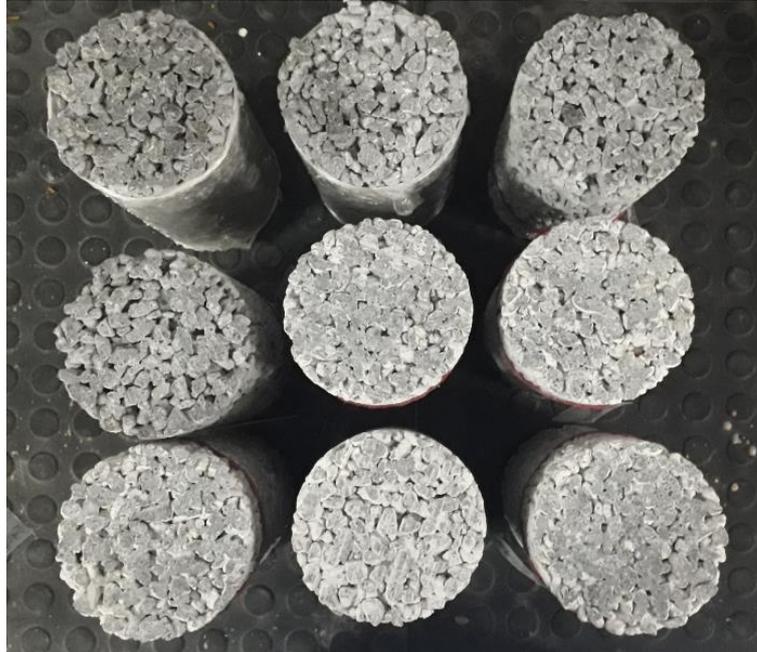
Figura 22 – Superfície lateral dos CPs confeccionados com o traço M2-b (a) CP-02, (b) CP-03 e (c) CP-06.



Fonte: Próprio autor

Da mesma forma como adotado para a etapa preliminar e seguindo exatamente os mesmos procedimentos, as amostras passaram por 28 dias de cura. Os CPs tiveram seu topo e base retificados, conforme mostra a figura 23, referente ao grupo M2-c e posteriormente foram submetidos ao ensaio de compressão uniaxial.

Figura 23 – Superfície de topo dos CPs confeccionados com o traço M2-c, após retificação



Fonte: Próprio autor

A resistência à compressão das amostras confeccionadas foi medida no Laboratório de Materiais de Construção Civil do UNISAL – Centro Universitário Salesiano de São Paulo – unidade Lorena-SP, por meio de uma prensa elétrica modelo FT 01, com capacidade de 100,00 t, da marca FORTEST e de acordo com a NBR 5739 (2018). O cálculo da resistência à compressão foi obtido pela relação força máxima por área da seção transversal do CP, de acordo com a equação 8.

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

Onde:

$f_c$  é a resistência à compressão (MPa);

$F$  é a força máxima alcançada (N);

$D$  é o diâmetro do CP (mm).

Para o ensaio de permeabilidade foram utilizados 3 CPs de cada traço, e para cada CP o ensaio foi realizado 3 vezes, onde o tempo utilizado para o cálculo do coeficiente de permeabilidade foi a média destes 3 valores.

A fim de garantir o fluxo vertical da água pelo interior do CP e de modo a não haver perda de água pela superfície lateral da amostra, a mesma foi revestida por película plástica com o auxílio de um soprador térmico, que garantiram a estanqueidade das paredes laterais, conforme figura 24.

Posteriormente o CP foi encaixado no permeâmetro, nos encaixes entre o tubo de PVC e a amostra foram utilizados em cada extremidade anéis de vedação, para não haver perdas que levassem a distorções nos resultados. Primeiramente a amostra foi saturada, e permaneceu neste estado por 15 minutos, posteriormente o reservatório foi completado com água até o nível  $h_1$ . Após estabilização, o registro de saída foi aberto de modo que a água começou a fluir pelo concreto permeável até o nível  $h_2$ . Imediatamente à abertura da válvula foi registrado o intervalo de tempo transcorrido para que a água no reservatório variasse do nível  $h_1$  para o nível  $h_2$ , conforme consta na figura 19.

Figura 24 – Superfície lateral dos CPs revestida por filme plástico



Fonte: Próprio autor

Dando continuidade à investigação acerca das propriedades do concreto permeável, também foi avaliado na etapa 2 de estudos o método de adensamento do concreto permeável e a energia de compactação aplicada. O procedimento aplicado foi adaptado a partir utilização do dispositivo “marshall hammer”, para adensamento de misturas asfálticas, que consiste em um soquete de 4540 g e

diâmetro de 76,9 mm (SILVA *et al.* 2018).

Para esta pesquisa foi adaptado um soquete confeccionado em tubo de PVC de 75 mm de diâmetro, preenchido parcialmente com concreto, com massa de 4520 g, conforme figura 25. Todos os CPs dos traços confeccionados foram adensados com a mesma energia, que está em função da massa do soquete e da altura de queda do mesmo, onde adotou-se uma altura de queda do dispositivo de 15 cm. Os parâmetros de massa do aparato e altura de queda foram mantidos fixos na confecção das amostras.

Variou-se, no entanto, o número de golpes aplicados a cada camada de concreto permeável utilizada para a moldagem dos CPs. Desta forma às amostras foram adensadas sob baixa, média e alta compactação, onde foram adotados, respectivamente, 5, 15 e 26 golpes do soquete padrão. Quanto ao número de camadas utilizadas para a moldagem dos CPs compactados pelo soquete foram adotadas nesta etapa da pesquisa 3 camadas, pois todos os autores que utilizaram a adensamento por soquete consideraram 3 camadas para a compactação. Portanto nesta fase de estudos além de ser alterado o tipo de adensamento de haste para soquete também foi alterado o número de camadas adensadas de 2 para 3..

Figura 25 – Soquete de Adensamento de CPs de Concreto Permeável



Fonte: Próprio autor

O traço adotado para avaliar o processo de adensamento foi o mesmo confeccionado para a mistura M2-c, ou seja, mistura 1:4 e relação a/c 0,265 e insumos de acordo com as quantidades abaixo determinadas:

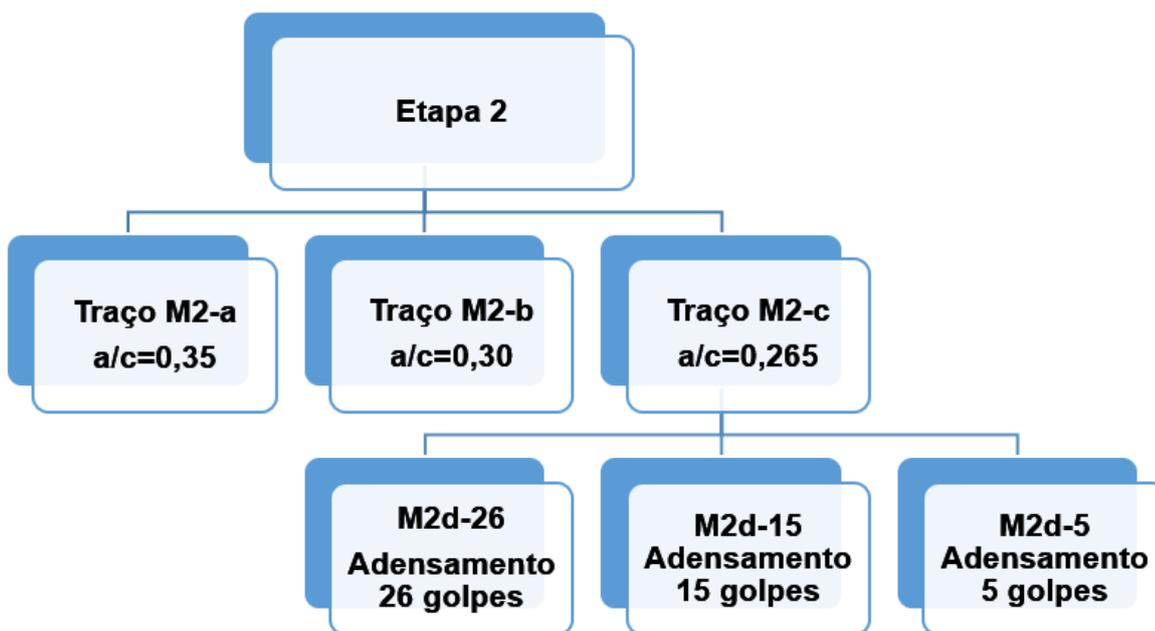
28 kg de agregado graúdo na faixa de 4,75 a 9,5 mm, comercialmente chamada de pedrisco ou brita 0;

7,00 kg de aglomerante, sendo 10% de sílica ativa (0,70 kg), marca Tecnosil, e o restante (6,30 kg) de cimento CP-III-40 RS, marca CSN;

28 g, correspondente ao teor de 0,40% da massa do aglomerante, de aditivo plastificante “master glemium 51”, fabricante BASF.

O fluxograma da figura 26, resume as misturas que foram dosadas na segunda etapa e os parâmetros que foram alterados em cada um dos traços.

Figura 26 – Fluxograma dos traços de concreto permeável confeccionados na etapa 2



Fonte: Próprio autor

Para este grupo de amostras foram confeccionados 11 CPs, sendo 3 deles utilizados para determinar a massa específica aparente no estado fresco, com o objetivo de se avaliar o efeito da compactação na massa específica e relacioná-la aos resultados de resistência à compressão. Desta forma antes da moldagem das amostras foram tomadas as massas de cada um dos moldes e

posteriormente foram medidas as massas do conjunto após a moldagem com o concreto permeável. O valor usado no cálculo foi a diferença da massa do conjunto com a massa do molde. Para a determinação da massa específica aparente no estado fresco, foi feita a relação entre a massa do concreto permeável pelo volume dos moldes dos CPs, obtendo-se o parâmetro em  $\text{kg/m}^3$ .

Os CPs usados na medição da massa específica foram também utilizados nos ensaios de determinação da permeabilidade e porosidade do concreto permeável estudado.

A porosidade das amostras foi obtida segundo o método proposto por Zhong e Wille (2016). Para tal, os CPs foram submetidos a uma estufa a temperatura  $105^\circ\text{C}$  até a sua constância de massa. Para a obtenção do parâmetro de porosidade foram medidas a massa da amostra seca em estufa ( $M_1$ ), a massa de um recipiente com água ( $M_2$ ) um nível que foi tomado como fixo e a massa do conjunto recipiente, água e amostra submersa ( $M_3$ ) com o mesmo nível de água medido para  $M_2$ .

As amostras foram introduzidas no recipiente com água de forma lenta, de modo que a água expulsasse o ar presente nos poros de concreto permeável. Somente após 30 minutos da introdução dos CPs no recipiente com água foi medida a massa  $M_3$ . O ensaio foi realizado para 3 amostras de concreto permeável, a partir das quais foi obtido a média dos resultados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Etapa Preliminar

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial nos traços M1-a e M1-b da etapa preliminar, com e sem retificação do topo, estão sintetizados na tabela 5. Com relação aos traços M1-c e M1-d, com incorporação de macrofibras de polipropileno, não se obteve trabalhabilidade suficiente para moldagem dos CPs, devido à formação de ninhos de concretagem que levaram a uma mistura com homogeneidade deficiente. Portanto, a adição de macrofibras de polipropileno no teor de 4 kg por m<sup>3</sup> de concreto, não se mostrou viável para o traço de concreto permeável em estudo.

Tabela 5 – Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão - Traços M1-a e M1-b

Traço	Preparação de Superfície	
	Retificado	Neoprene
	$f_{cm}$ (MPa)	$f_{cm}$ (MPa)
M1-a	9,98 ± 0,64	6,41 ± 0,67
M1-b	10,59 ± 1,68	5,34 ± 0,41

Fonte: Próprio Autor

Para a mistura de concreto permeável que levou em sua composição o agregado de faixa granulométrica de 9,5 a 19 mm, ou seja, traço M1-b, os resultados do ensaio revelaram que a resistência à compressão média ( $f_{cm}$ ) medida nos CPs que tiveram a sua superfície retificada foi 98,3% maior que as observadas nos CPs onde utilizou-se os discos de neoprene.

Já para a mistura cuja composição continha agregado de faixa granulométrica de 4,75 a 9,5 mm, ou seja, traço M1-a, continuou-se encontrando diferença entre ambos os métodos de regularização de superfície, entretanto essas diferenças foram menores e mostraram que resistência à compressão axial nos CPs que tiveram a sua superfície retificada foi 55,7% maior que as encontradas nos CPs onde utilizou-se os discos de neoprene.

Após a confecção dos CPs de concreto permeável observou-se que a superfície, principalmente de topo, se apresentava bastante irregular com os agregados graúdos bastante salientes, o que suscitou dúvidas com relação ao processo de retificação e a possibilidade de durante esta etapa, os agregados mais salientes do topo serem arrancados da matriz cimentícia pelo disco da retificadora. Por isso, as amostras foram divididas em dois grupos onde metade dos CPs foram ensaiados sem tratamento prévio, com o uso apenas dos discos de neoprene e a outra metade passou pelo processo de retificação. O tratamento do topo, por meio da retificação não ocasionou o desprendimento dos agregados, que se mantiveram bem aderidos à matriz cimentícia e proporcionou a condição estabelecida pela NBR 5738 para a realização do ensaio de resistência à compressão, de modo a se obter superfícies planas e perpendiculares ao eixo longitudinal do CP (ABNT, 2015).

Apropriando-se do conceito de tensões em solos, onde as forças são transmitidas partícula à partícula, Pinto (2006) considera para concretos um comportamento semelhante cujos esforços são transmitidos pelo contato direto entre os agregados e aluminatos hidratados do cimento. Devido à natureza do concreto permeável que resulta em uma superfície de topo e base com a presença de poros bastante visíveis, a transmissão das tensões ocorre por meio do contato direto agregado a agregado. É desta forma que a compressão aplicada pela prensa é distribuída pelo CP. Entretanto, quando se utiliza o disco de neoprene, que é um elastômetro, ao receber este carregamento primeiro o disco se deforma, penetrando nos vazios do concreto permeável, induzindo à ações horizontais, que podem gerar esforços adicionais de momento e cisalhamento, para os quais materiais frágeis como o concreto não apresentam elevada resistência, vindo à fratura. Este fato explica a diferença nos resultados entre os métodos de tratamento de superfície quando se utilizam agregados de faixas granulométricas diferentes. Pois nas amostras M1-b os poros presentes na superfície eram bem maiores que aqueles observados no traço M1-a, portanto o elastômetro ao ser comprimido sobre o mesmo penetrava mais nos poros da mistura M1-b, que eram maiores em comparação àqueles observados na mistura M1-a, resultando em esforços adicionais maiores também.

Corroboram com a constatação acima o fato que a ASTM detalha uma metodologia para realização do ensaio de compressão axial, utilizando-se disco de

neoprene para nivelamento do topo de corpos de prova de concreto, onde a referida norma informa que esta metodologia deve ser aplicada em concretos com resistência de 10 a 85 MPa, e relaciona as classes de resistência do concreto às especificações de dureza do neoprene. Com relação à planicidade do topo e base, a mesma referência ainda relata que não podem existir variações que excedam 5 mm, o que em um concreto permeável que leva apenas agregado graúdo em sua mistura é bem frequente tais irregularidades excederem este limite. Utilizou-se a ASTM como referência, pois, embora no Brasil o uso do disco de neoprene vem sendo cada vez mais difundido nos laboratórios de controle tecnológico do país, em função do seu baixo custo de operação, aliado à simplicidade de execução do ensaio, ainda não existe uma norma nacional para o procedimento. Batezini (2019) também adotou em sua pesquisa o processo de retificação de superfície nos CPs de concreto permeável antes de submetê-los ao ensaio de resistência à compressão axial.

Portanto, embora o disco de neoprene seja amplamente utilizado em concretos convencionais, não porosos, optou-se por dar continuidade aos estudos da etapa 2, utilizando-se a retificadora para a preparação do topo e base das amostras. O procedimento visou garantir que as superfícies de contato com a prensa se mantivessem planas e perpendiculares ao eixo longitudinal do CP, a fim de evitar qualquer interferência nos resultados de resistência à compressão.

No traço M1-a, com agregado graúdo na faixa de 4,75 a 9,5 mm as amostras que não tiveram a sua superfície preparada e por isso se fez o uso de discos de neoprene para melhor distribuição das tensões, mostraram-se com resistência à compressão 20% superior àquelas confeccionadas com agregado na faixa de 9,5 a 19,0 mm, mistura M1-b, sem tratamento de superfície. Levando-se em conta que em concretos com a superfície irregular como o concreto permeável o neoprene se deforma penetrando nos vazios do topo e base, induzindo à ações horizontais que geram esforços adicionais é de se esperar que quanto maior o tamanho dos vazios na superfície, maior serão os esforços adicionais e menor será a resistência a compressão quando comparada a amostras de mesmo traço mas com tamanho de agregados menores.

Já, quando se avaliou os CPs que receberam a retificação das superfícies de topo e base encontram-se valores de resistência à compressão bem próximos para as misturas M1-a e M1-b. Analisando os valores de desvio-padrão para os

resultados dos traços M1-a e M1-b retificados, conforme constam na tabela 5, conclui-se que a resistência à compressão não apresenta variação significativa entre as faixas granulométricas de 4,75 a 9,5 mm e 9,5 a 19,0 mm.

Os elevados desvios-padrão nos resultados, principalmente nas amostras retificadas, se devem à 2 razões prováveis: a primeira se deve ao fato de terem sido analisados apenas 3 CPs de cada traço e cada condição de preparo de superfície e o segundo fator pode estar relacionado ao processo de adensamento, visto que a mistura visualmente pareceu bastante homogênea, com os agregados perfeitamente envolvidos pela matriz cimentícia e a cura foi realizada adequadamente de acordo com as prescrições da ABNT.

No que diz respeito ao adensamento, a realização deste procedimento de forma manual e com uma haste metálica, embora seja normatizado para concretos convencionais, pode ter deixado vazios entre as camadas que foram lançadas dentro do molde metálico, pois devido à natureza do concreto permeável de baixa e praticamente nula fluidez, ao se inserir e retirar a haste da massa de concreto a mesma deixava um vazio feito pela introdução da haste, como pode ser observado na figura 22.

Desta forma, optou-se em dar continuidade aos estudos da etapa 2 tomando-se como parâmetro de tratamento da superfície a retificação e adotando-se a faixa granulométrica de 4,75 a 9,5 mm. O uso do neoprene foi preterido, mesmo apresentando menor desvio-padrão e resultados mais conservadores, devido à limitação descrita definida pela ASTM C1231-00, que indica o uso do dispositivo para concretos com resistência à compressão entre 10 e 85 MPa. Com relação à planicidade do topo e base, a mesma referência ainda relata que não podem existir variações que excedam 5 mm, o que em um concreto permeável que leva apenas agregado graúdo em sua mistura é bem frequente tais irregularidades excederem este limite.

A escolha pelo agregado graúdo compreendido entre 4,75 e 9,5 mm, foi baseada nos resultados da etapa preliminar desta pesquisa e em estudos de outros autores como Holtz e Lamb, que afirmam que o tamanho do agregado, desde que estes representem uma mesma faixa granulométrica, não influenciam na resistência à compressão do concreto (LAMB, 20104; HOLTZ, 2011). As faixas

granulométricas dos agregados são determinadas por uma série normal de peneiras estabelecidas de acordo com a NM 248 (ABNT, 2003).

Outra questão que levou a escolha do agregado de tamanho entre 4,75 a 9,5 mm foi o fato de que para materiais heterogêneos como o concreto, a dimensão do agregado é significativa em relação à amostra, sendo mais acentuado o efeito escala, por isso adotou-se o agregado de menor faixa granulométrica (COURA; BARBOSA, 2008).

Além dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão, nesta etapa preliminar foi possível verificar a aplicação dos procedimentos de confecção dos CPs propostos por Lamb e constatar que:

- a. A relação a/c de 0,35, para os traços sem incorporação de aditivos resultou em um concreto com boas características no estado fresco;
- b. Analisando-se visualmente a mistura ela apresentou-se homogênea, com superfície brilhante e os agregados estavam envoltos pela matriz cimentícia;
- c. O processo de adensamento por haste metálica não é um procedimento adequado aos concretos permeáveis, pois deixa vazios em sua superfície e, portanto, deve ser avaliada outra forma de adensamento e
- d. A confirmação da viabilidade em se utilizar o processo de retificação do topo da amostra, sem prejuízo ou perda de agregados da superfície.

## **4.2 Etapa 2 da Pesquisa**

### **4.4.1 Avaliação dos resultados em função da variação da relação a/c**

A tabela 6 e gráfico 1 trazem os resultados do ensaio de resistência à compressão média ( $f_{cm}$ ) dos traços M2-a, M2-b e M2-c, onde se variou a relação a/c, sendo adotados respectivamente os seguintes valores 0,35; 0,30 e 0,265. Para os traços M2-b e M2-c foi utilizado aditivo superplastificante. Ainda na tabela 6 seguem os resultados de permeabilidade das amostras.

Todas as misturas ensaiadas atenderam à faixa de resistência à compressão preconizada pelo ACI, que deve estar compreendida entre 2,8 a 28 MPa. Os traços M2-b e M2-c, os quais em função da redução da relação a/c receberam aditivo

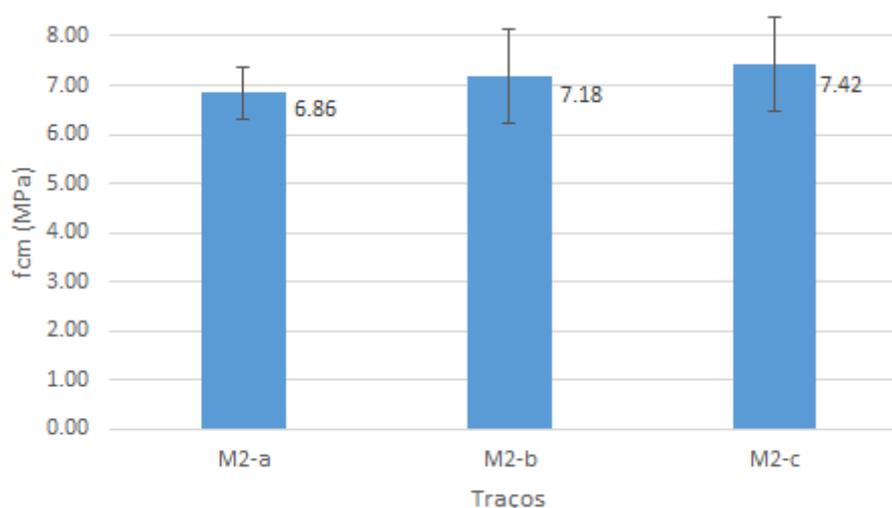
superplastificante apresentaram melhor desempenho em relação à dosagem M2-a, sem aditivo. O melhor resultado foi obtido para a mistura M2-c, seguida pelo traço M2-b e M2-a, os percentuais de ganho de resistência à compressão em relação ao menor valor encontrado (M2-a) foram de 8,2% e 4,7% para as dosagens M2-c e M2-b, respectivamente.

Tabela 6 – Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão e Permeabilidade em função da variação da relação a/c

Traço	$f_{cm}$ (MPa)	K (cm/s)
M2-a	$6,86 \pm 0,46$	$0,650 \pm 0,025$
M2-b	$7,18 \pm 0,95$	$0,637 \pm 0,044$
M2-c	$7,42 \pm 0,95$	$0,656 \pm 0,050$

Fonte: Próprio Autor

Gráfico 1 – Comparativo dos Resultados de Resistência à Compressão



Fonte: Próprio Autor

Os traços M2-b e M2-c, quando comparados, não mostraram diferença significativa nos resultados de resistência à compressão, pois seus resultados médios estavam dentro do desvio-padrão. Porém, quando se analisa o processo de confecção um fato importante precisa ser considerado para escolha do traço para o qual será analisado o efeito da compactação. A avaliação da relação a/c em função da consistência por meio da moldagem da esfera de concreto, que no caso

do traço M2-b não foi possível moldar a esfera devido à relação a/c estar acima da ideal. Por isso o traço considerado o de melhor desempenho, levando em conta aspectos quantitativos e qualitativos foi o traço M2-c.

Batezini (2019) confeccionou uma série de traços, dentre eles o traço identificado por Rf. O autor utilizou na composição da mistura cimento CP-III e agregado graúdo na faixa granulométrica de 4,75 a 9,5 mm, e uma relação cimento/agregado de: 1:4,44, relação a/c de 0,30 e um teor de aditivo superplastificante de 0,25%. O resultado obtido no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias foi de 5,67 MPa. No presente estudo o  $f_{cm}$  do concreto permeável alcançou 7,42 MPa (M2-c), ou seja, 31% superior ao relatado por Batezini, levando-se em conta que o traço atual foi confeccionado com um teor de cimento maior em relação ao agregado, no caso 1:4 e com menor relação a/c = 0,265, era de se esperar que este superasse os resultados de Batezini, entretanto os dados corroboram para a confirmação dos resultados desta pesquisa.

Os resultados dos ensaios de permeabilidade das amostras de concreto permeável atenderam à faixa determinada pelo ACI, compreendida entre 0,14 a 1,22 cm/s para o coeficiente de permeabilidade. A variação da permeabilidade em função da relação a/c foi insignificante, sendo o menor coeficiente ( $K=0,637$  cm/s) encontrado para a mistura com relação a/c = 0,30. Enquanto que para as misturas com relação a/c iguais à 0,35 e 0,265 alcançou-se permeabilidade K de 0,650 e 0,656, respectivamente, como pode ser verificado na tabela 6.

#### **4.2.2 Avaliação dos resultados em função da variação do nível de compactação**

Os resultados obtidos aplicando-se o adensamento por meio do soquete padrão, para os níveis de compactação baixo, médio e alto, onde foram aplicados respectivamente 5, 15 e 26 golpes do soquete padrão, estão explicitadas na tabela 7. A tabela 7 sintetiza os resultados médios e seus respectivos desvios-padrão, para a resistência à compressão, massa específica, permeabilidade e porosidade efetiva.

Tabela 7 – Resultados dos Ensaios de Resistência à Compressão, Massa Específica, Permeabilidade e Porosidade efetiva em função do número de golpes aplicados na compactação dos CPs de concreto permeável.

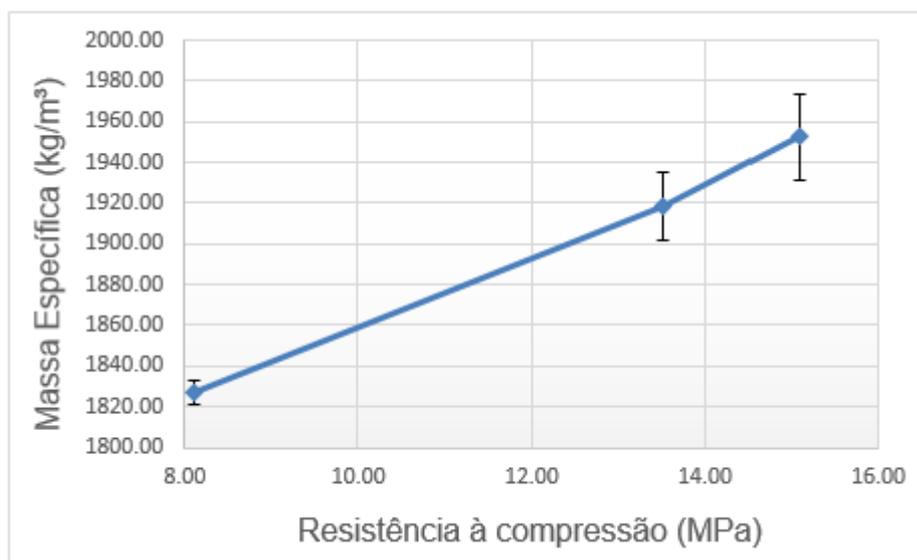
Traço	Nº de golpes	$f_{cm}$ (MPa)	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	K (cm/s)	Porosidade (%) efetiva
M2d-5	5	8,10 ± 0,90	1827,21 ± 5,96	0,656 ± 0,035	39,89 ± 1,21
M2d-15	15	13,51 ± 1,20	1918,55 ± 16,55	0,443 ± 0,017	35,01 ± 2,47
M2d-26	26	15,07 ± 1,41	1952,30 ± 20,85	0,220 ± 0,021	27,00 ± 1,30

Fonte: Próprio Autor

O adensamento por meio do soquete de compactação mostrou uma melhora significativa nas propriedades mecânicas e físicas avaliadas. Houve um ganho progressivo na resistência à compressão axial em função do aumento no número de golpes, durante o processo de adensamento, o que corroborou com os valores de massa específica que se apresentaram mais acentuados conforme aumentou-se o nível de compactação, como mostram os dados da tabela 7.

No gráfico 2 é possível visualizar o ganho de resistência à compressão em função do número de golpes no adensamento e da massa específica do concreto permeável no estado fresco. Comparando-se os 3 níveis de compactação observa-se um aumento de 67% na resistência à compressão e 5% na massa específica da compactação com 5 golpes para a compactação com 15 golpes.

Gráfico 2 – Relação entre Massa Específica e Resistência à Compressão para Adensamento com 5, 15 e 26 golpes

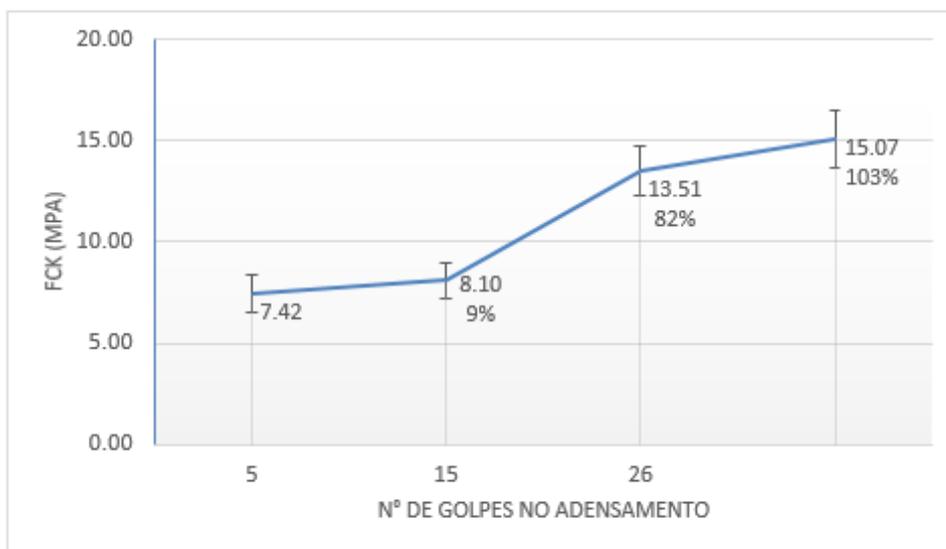


Fonte: Próprio Autor

Quando se observa o aumento nas propriedades mecânicas e físicas no adensamento de 15 para 26 golpes constata-se um crescimento menor, de 11,5% e 1,75%, respectivamente, para a resistência à compressão e massa específica. E ao se comparar o nível máximo de compactação ao mais baixo analisado nesta pesquisa, encontrou-se para resistência à compressão e massa específica um aumento de 86% e 6,85%, nesta ordem.

Ao se comparar os efeitos do modo de adensamento adotado, observa-se variações ainda mais acentuadas entre a compactação pela haste, amplamente empregada na confecção de CPs de concretos convencionais, e pelo soquete, sistema este adaptado do método “marshall hammer” de elaboração de amostras de pavimentos asfálticos. Constatou-se que os vazios deixados na massa de concreto permeável, pela haste de adensamento, utilizada em concretos convencionais, foi o principal fator que resultou na diferença nos resultados de resistência à compressão observados. No processo de compactação com o soquete padrão não foi notada a existência de vazios na superfície lateral dos CPs como ocorreu com as amostras adensadas pela haste. O gráfico 3 mostra o aumento progressivo na resistência à compressão para cada traço de acordo com o tipo de adensamento e nível de compactação.

Gráfico 3 – Variação de Resistência à Compressão em função do nível de compactação



Fonte: Próprio Autor

Comparando-se o adensamento realizado pela haste com o processo de compactação por meio do soquete, para 5 golpes do dispositivo, nota-se que os

resultados de resistência à compressão são muito próximos e estão dentro do desvio-padrão. Por isso não é possível afirmar que houve um ganho nas propriedades mecânicas e físicas para o adensamento por soquete com 5 golpes quando comparado ao método da haste.

Já para os níveis médio (15 golpes) e alto (26 golpes) em relação ao procedimento de adensamento realizado pela haste a evolução das propriedades físicas e mecânicas foram significativas. O que resultou em um ganho de resistência à compressão de 82% e 103%, respectivamente para o adensamento com 15 e 26 golpes.

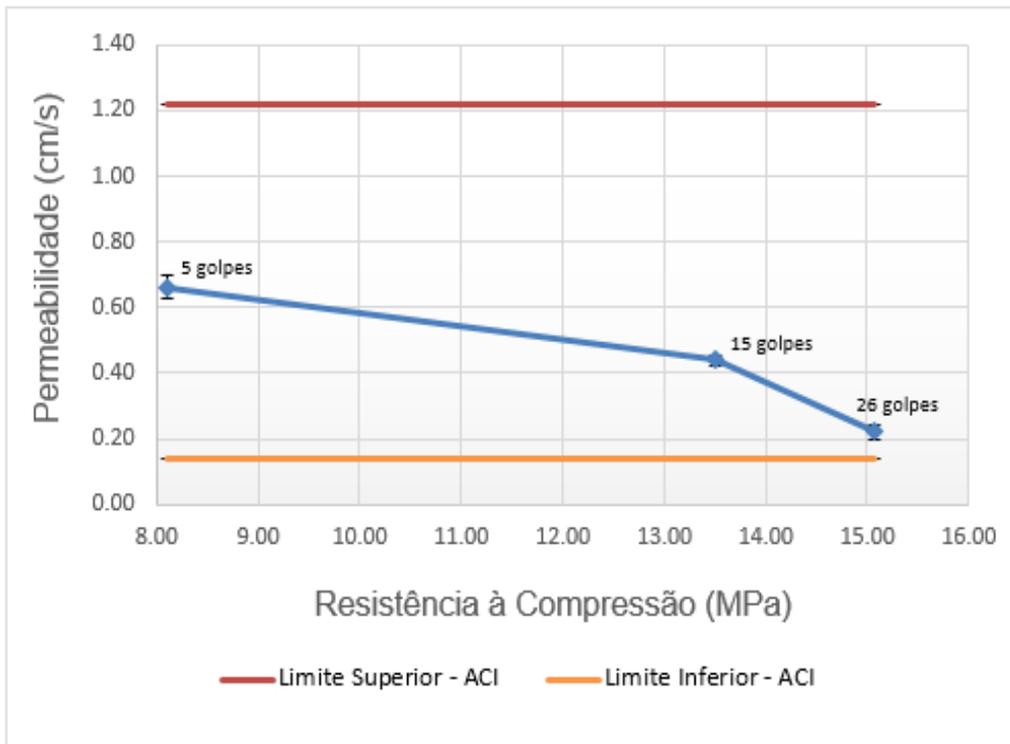
Silva *et al.* (2018) quando adensaram amostras de concreto permeável por meio de soquete padrão com 26 golpes a partir de altura de queda de 15 cm alcançaram resistência à compressão de 23 MPa. Vale ressaltar que os autores utilizaram uma relação agregado/cimento de 1:2,56; nesta pesquisa foi definida uma relação agregado/cimento de 1:4, e que devido ao elevado teor de cimento seus resultados foram superiores aos dos CPs analisados no presente estudo.

Os resultados desta pesquisa e dos autores mencionados revela a importância deste procedimento na obtenção de concretos permeável mais resistentes. Pois a compactação com o soquete distribui de maneira mais uniforme a carga aplicada à amostra, proporcionando uma adequada acomodação das partículas de agregados ao longo do corpo de prova, o que melhora consideravelmente as zonas de transição entre agregado e pasta.

Em consonância com os resultados obtidos para a resistência à compressão axial e massa específica no estado fresco, a permeabilidade das amostras ensaiadas diminuiu em função do aumento no número de golpes aplicados no adensamento, que levou a um empacotamento mais eficiente dos agregados, como consta na tabela 7 e gráfico 4.

A permeabilidade é um parâmetro fundamental nos concretos permeáveis, os resultados obtidos para tanto para o adensamento pela haste quanto por meio do soquete e para todos os níveis de compactação (5, 15 e 26 golpes) atenderam à faixa preconizada pelo ACI, que deve estar compreendida entre 0,14 a 1,22 cm/s.

Gráfico 4 – Relação entre Resistência à Compressão e Permeabilidade em função do nível de compactação



Fonte: Próprio Autor

Para Balbo e Batezini (2016), que analisaram a permeabilidade de amostras de concreto permeável com relação cimento/agregado de 1:4,44, adensadas por haste, os mesmos encontraram índices de permeabilidade de 0,63 cm/s, bem próximo dos valores obtidos para o traço M2d-5, da presente pesquisa.

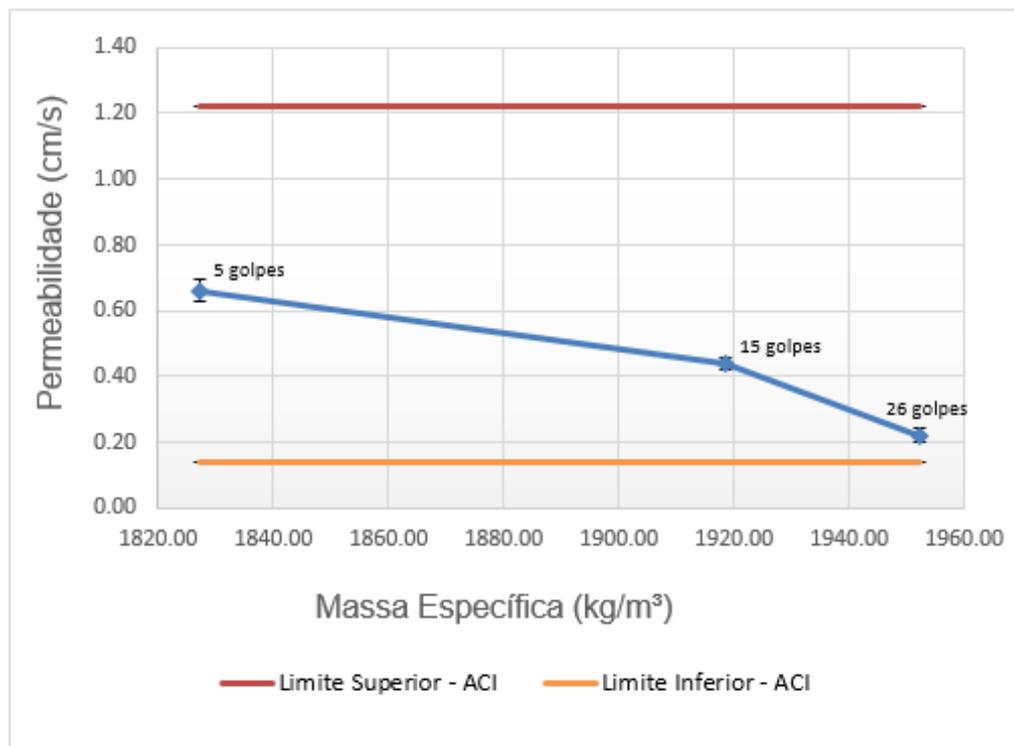
Silva *et al.* (2018) estudaram o efeito da compactação de amostras de concreto permeável por golpes de um soquete padrão de 4,5 kg, para um traço de concreto permeável cuja relação cimento/agregado foi de 2,56 e a relação a/c de 0,32. Para 26 golpes à 15 cm de altura os autores encontraram uma permeabilidade de 0,2 cm/s, o que corrobora com os resultados obtidos para o traço M2d-26.

Os resultados obtidos pelos autores acima estão em consonância com os obtidos neste estudo e colaboram para confirmar o comportamento da permeabilidade de acordo com o sistema de adensamento. Como era de se esperar a permeabilidade mostrou-se inversa à resistência à compressão e à massa específica, como pode ser constatado nos gráficos 4 e 5.

A massa específica é uma propriedade diretamente relacionada ao índice de vazios e à porosidade do material. Nesta pesquisa em função do nível de

compactação aplicado durante a moldagem dos CPs de concreto permeável, as amostras apresentaram uma diminuição na porosidade em consequência do aumento no número de golpes, que levou a um aumento da massa específica, conforme gráfico 6. A massa específica do traço de concreto permeável não apresentou um comportamento linear, houve um ganho mais acentuado quando se variou o número de golpes de 5 para 15, com um ganho de 5,0%, e quando se variou o número de golpes de 15 para 26, o ganho foi de 1,75%. Ou seja, o ganho de massa específica em concretos permeáveis vai diminuindo de acordo com o aumento de golpes na compactação de cada camada.

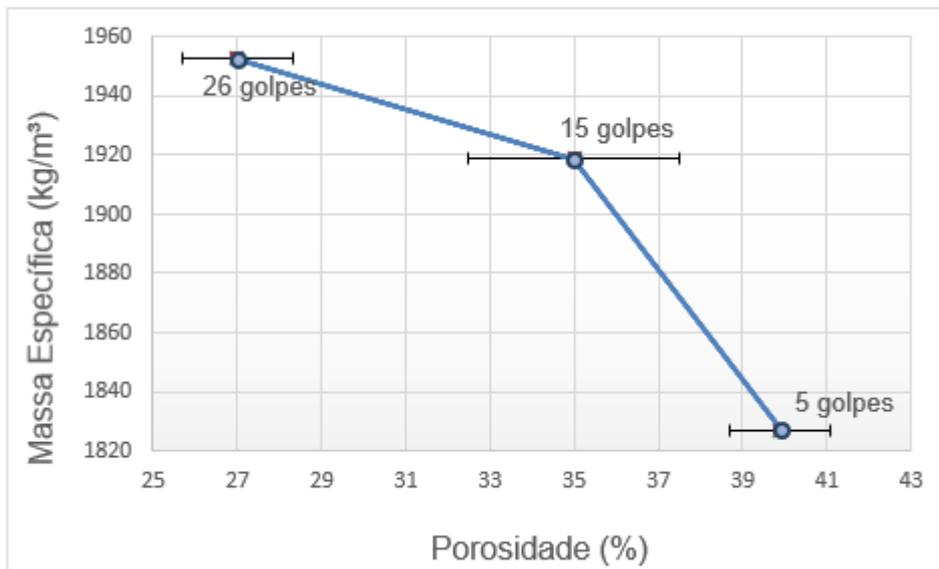
Gráfico 5 – Relação entre Massa Específica e Permeabilidade em função do nível de compactação



Fonte: Próprio Autor

Tal tendência foi também observada na porosidade dos CPs analisados, onde houve a redução da porosidade de acordo com o aumento no número de golpes. Quando se variou o número de golpes de 5 para 15, a porosidade do material reduziu 25,6%, e quando se variou o número de golpes de 15 para 26, esta redução foi 12,4%. De forma que o aumento no nível de compactação não resultou em um aumento da massa específica e redução da porosidade proporcionais, mostrando que o aumento no número de golpes influencia de maneira não-linear

Gráfico 6 – Relação entre Porosidade e Massa Específica em função do nível de compactação



Fonte: Próprio Autor

os parâmetros físicos e hidráulicos do concreto permeável sendo, portanto, necessário analisar o efeito de outros níveis de compactação, variando-se o número de golpes.

## 5 CONCLUSÃO

Considerando os resultados tanto da etapa de estudos preliminares quanto da etapa 2, todos os parâmetros obtidos nesta pesquisa atenderam aos requisitos impostos pelo ACI, para caracterizar um concreto permeável.

Entretanto o traço M2d-26, compactado com 26 golpes do soquete padrão, utilizando uma relação  $a/c=0,265$  e aditivo plastificante e com uma relação agregado/cimento de 1:4; foi o que apresentou os melhores resultados, com relação à resistência à compressão axial, mantendo-se dentro da faixa aceitável para as demais propriedades como: massa específica, permeabilidade e porosidade efetiva. Quando comparado ao traço (M2-c) que teve como única variante o processo de adensamento, que neste caso foi realizado por meio da haste o ganho na resistência à compressão foi de 103%, passando de 7,42 MPa para 15,07 MPa.

A compactação das camadas de concreto permeável por meio de golpes de um soquete padrão foi imprescindível para se alcançar traços com melhor desempenho com relação à resistência mecânica. Os experimentos revelaram que a compactação por meio da haste de adensamento, amplamente aplicada em concretos convencionais, ou seja, fluidos, não é indicada para concretos permeáveis, que possuem baixa fluidez. A alternativa de se usar processos mecânicos que envolvam vibração também não se aplica à este caso, pois resulta na segregação da pasta de cimento e obstrução dos poros junto à base dos CPs.

Fica evidente a partir da análise dos dados, que é necessário reavaliar o processo de confecção de corpos de prova deste tipo de concreto. Que precisa ser confeccionado como um material de pavimentação e não nos moldes do concreto convencional. Entretanto o assunto ainda é pouco difundido e menos ainda aplicado, principalmente no Brasil.

Não existe normatização nacional, nem internacional que oriente com relação à elaboração de amostras deste tipo de material. Devem ser desenvolvidos metodologias e equipamentos que possam avaliar com menor dispersão dos resultados a compactação dos CPs de concreto permeável, à exemplo dos métodos amplamente aplicados para pavimentos asfálticos, onde existem normas específicas para a preparação, moldagem, métodos de ensaios e especificação de

equipamentos e aparelhos para se realizar à compactação de amostras de pavimentos asfálticos.

As investigações acerca deste material não se extinguem por aqui, embora o adensamento tenha se mostrando um fator crítico na obtenção de concreto permeáveis com resistências à compressão superiores, as pesquisas ainda são escassas e incipientes.

No tocante, apenas, ao adensamento, existem inúmeras linhas de pesquisa que precisam ser exploradas como, diferentes energias de compactação com outros valores de números de golpes e alturas de queda do soquete. Estudo de um soquete para padrão, assim como de todo o aparato para se realizar tal procedimento com mais acurácia, tudo isso comparando-se tais parâmetros com pistas de testes experimentais para avaliar os resultados em escala real e reduzida.

Outro ponto importante é a moldagem de CPs em camadas como é realizada comumente, entretanto os pavimentos de concreto permeável são realizados em uma única camada, sendo outra possibilidade de aprofundamento do assunto a moldagem em camada única.

E ainda, a análise experimental de outras dosagens, aditivos e adições, uso de um percentual de agregado miúdo na mistura e avaliação do desempenho do concreto permeável a longo prazo.

## REFERÊNCIAS

ACCIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 2005. 162 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO. **AASHTO T-245-15. Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus**. 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI. **ACI 318-19. Building code requirements for structural concrete**. Farmington Hills, 2019.

\_\_\_\_\_. **ACI 522.1-13. Specification for Pervious Concrete Pavement**. Farmington Hills, 2013.

\_\_\_\_\_. **ACI 522R-10. Report on pervious concrete**. Farmington Hills, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM C-1221-00: Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens Using Unbonded Caps**. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **CIMENTO: diferentes tipos e aplicações**. 21 fev. 2018. Disponível em: [https://abcp.org.br/imprensa/artigos/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/#:~:text=Cimento%20CP%2DIII%20\(NBR%205.735,de%20ser%20resistente%20a%20sulfatos](https://abcp.org.br/imprensa/artigos/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/#:~:text=Cimento%20CP%2DIII%20(NBR%205.735,de%20ser%20resistente%20a%20sulfatos) . Acesso em: 17 out. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248: Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

BALBO, J. T.; BATEZINI, R. Estudo da condutividade hidráulica com carga constante e variável em concretos permeáveis. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8 , n. 3, p. 248-259, jun. 2016.

BASF. **CONCRETE technology in focus – pervious concrete**. 2015. Disponível em: [https://assets.master-builders-solutions.com/en-us/pervious%20concrete%20technology\\_ctif.pdf](https://assets.master-builders-solutions.com/en-us/pervious%20concrete%20technology_ctif.pdf). Acesso em: 29 abr. 2019.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. 2013. 133 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade São Paulo, São Paulo, 2013.

BATEZINI, Rafael. **Estudo das características hidráulicas e mecânicas de calçadas em concreto permeável em pista experimental**. 2019. 293 p. Tese (Doutorado) - Universidade São Paulo, São Paulo, 2019.

CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F. Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto. **Cerâmica**, v. 54, n. 331, p. 309-318, 2008.

COSTA, A. J. S.T; CONCEIÇÃO, R. S.; AMANTE, F. O. **Enchente Urbanas e o Crescimento da Cidade do Rio de Janeiro**: Estudo em direção de um Cartografia das Enchentes Urbanas. Rio de Janeiro: GEO/UERJ, 2018.

COURA, C. V. G.; BARBOSA, M. T. G.; DARWISH, F. Análise crítica sobre efeito tamanho em estruturas de concreto. **Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho**, n. 31, p. 20 a 28, 2008. Disponível em: <http://www.civil.uminho.pt/revista/artigos/n31/Pag%2019.pdf>. Acesso em: 09 set. 2020.

CSN. **CIMENTOS Descrição Geral**. Disponível em: [http://www.csn.com.br/conteudo\\_pti.asp?idioma=0&tipo=59832&conta=45](http://www.csn.com.br/conteudo_pti.asp?idioma=0&tipo=59832&conta=45). Acesso em: 28 out. 2017.

**FICHA técnica master glenium**. BASF. Disponível em: [https://assets.master-builders-solutions.com/pt-br/ficha\\_tecnica\\_masterglenium.pdf](https://assets.master-builders-solutions.com/pt-br/ficha_tecnica_masterglenium.pdf). Acesso em: 08 maio 2019. Acesso em: 05 fev. 2019.

**FICHA técnica TUF strand SF**. Viapol. 21 jun. 2016. Disponível em: <http://www.viapol.com.br/produtos/aditivos-e-adi%C3%A7%C3%B5es/fibras/tuf-strand-sf/>. Acesso em: 08 maio 2019.

FOLHA DE SÃO PAULO. **CHUVA provoca ao menos 26 pontos de alagamento em São Paulo**. 02 mar. 2019. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2019/03/chuva-provoca-ao-menos-26-pontos-de-alagamento-em-sao-paulo.shtml> . Acesso em: 05 maio 2019.

G1. **CHUVA causa alagamentos e interdita estradas no vale e região**. 16 jan, 2016. Disponível em: <http://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba->

[regiao/noticia/2016/01/chuva-causa-alagamentos-e-interdita-estradas-no-vale-e-regiao.html](http://regiao/noticia/2016/01/chuva-causa-alagamentos-e-interdita-estradas-no-vale-e-regiao.html). Acesso em: 05 maio 2019.

GOEDE, W. **Pervious concrete: investigation into structural performance and evaluation of the applicability of existing thickness design methods**. 2009. 198 p. Tese (Doutorado) – Washington State University, Washington, 2009.

HÖLTZ, F. C. **Uso do concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e impacto ambiental**. 2011. 138 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Áreas Urbanizadas no Brasil**. 2017. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv100643.pdf>. Acesso em: 29 maio 2018.

\_\_\_\_\_. **Síntese de Indicadores Sociais Uma Análise das Condições de Vida da População Brasileira**. 2016. Rio de Janeiro. Disponível em <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv98965.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2020.

JACINTO, L. R. C.; ALMEIDA, T. I. R.; GOVEIA, S. S. Estimativa da impermeabilização do solo urbano da cidade de São Paulo combinando dados demográficos e de sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. p. 707-714.

LAMB, G. S. **Desenvolvimento e análise do desempenho dos elementos de drenagem fabricados em concreto permeável**. 2014. 152 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

MAZONETTO, C. Concreto permeável: Alternativa para aumentar a permeabilidade de pavimentos submetidos a cargas reduzidas, sistema demanda cuidados de especificação, instalação e manutenção. **Revista Infraestrutura Urbana Pini**, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2.ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, L. L. C. A. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano**. 2011. 283 p. Tese (Doutorado) - Universidade São Paulo, São Paulo, 2011.

RANGELOV, M.; NASSIRI, S.; CHEN, Z. ; RUSSEL, M.; UHLMAYER, J. Quality evaluation tests for pervious concrete pavement's placement. International. **Journal of Pavement Research and Technology**, v10, p. 245-253, may 2017.

SCHAEFER, V. R. *et al.* **Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates**. Final Report. Center for Transportation Research and Education. Iowa State University, 2006. 85 p.

SILVA, A. A. P.; RIBEIRO, J. M.; LEAL, V. T.; SILVA, M. R. C.; CORDEIRO, L. N. P. Análise comparativa de métodos de adensamento para concreto poroso. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO*, 60., 2018.

SONEBI, M; BASSUONI, M. Pervious concrete: a sustainable drainage solution. **RILEM Technical Letter**, p. 6-14, out. 2010.

SONEBI, M; BASSUONI, M.; YAHIA, A. Pervious concrete: Mix design, properties and applications. **RILEM Technical Letter**, p. 109-115, dez. 2016.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAC, C. S. Estudo da influência dos agregados de concreto reciclável em concretos permeáveis. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9 , n. 1, p. 83-90, fev. 2016.

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

TUCCI, C. E. M. Águas Urbanas. **Revista Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p.97-112, 2008.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. 2009. 213 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade São Paulo, São Paulo, 2009.

YAHIA, A.; KABAGIRE, K. D. New approach to proportion pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 62, p.38-46, 2014.

ZHONG, R.; WILLE, K. Compression response of normal and high strength pervious concrete. **Construction and Building Materials**, n. 109, p. 177-187, 2016.