

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Análise e desenvolvimento de misturas de concreto permeável  
para aplicação em pavimentação**

**Fernanda Bianchi Pereira da Costa**

Porto Alegre  
2019

FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA

**ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE MISTURAS DE  
CONCRETO PERMEÁVEL PARA APLICAÇÃO EM  
PAVIMENTAÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre  
2019

### CIP - Catalogação na Publicação

Bianchi Pereira da Costa, Fernanda  
Análise e desenvolvimento de misturas de concreto  
permeável para aplicação em pavimentação / Fernanda  
Bianchi Pereira da Costa. -- 2019.  
181 f.  
Orientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,  
BR-RS, 2019.

1. Concreto permeável. 2. Pavimento permeável. 3.  
Drenagem urbana. I. Pinto da Silva Filho, Luiz Carlos,  
orient. II. Título.

**FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA**

**ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE MISTURAS DE  
CONCRETO PERMEÁVEL PARA APLICAÇÃO EM  
PAVIMENTAÇÃO**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Construção, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 27 de agosto de 2019.

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho  
PhD pela University of Leeds  
orientador

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Américo Campos Filho (UFRGS)**  
Dr. em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo (Brasil)

**Prof. Ângela Gaio Graeff (UFRGS)**  
PhD em Engenharia Civil pela University of Sheffield (Inglaterra)

**Prof. José Tadeu Balbo (USP)**  
Dr. em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo (Brasil)



Dedico este trabalho à todas as mulheres cientistas e pesquisadoras, pelos obstáculos na obtenção do nosso espaço.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por esta conquista e pelos benefícios que me foram concedidos. À minha família pelo amor, carinho, apoio e compreensão. Ao amor da minha vida Marcelo, pelo incentivo, companheirismo e paciência. Ao meu orientador Prof. Luiz Carlos, pela oportunidade, credibilidade e pelos ensinamentos. Agradeço aos colegas, técnicos e bolsistas do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME) que me auxiliaram na realização deste trabalho. Agradeço aos meus amigos pelos momentos de felicidade proporcionados. Por fim, agradeço aos meus colegas e amigos da UNIPAMPA pelo incentivo, momentos de alegrias e troca de conhecimento.

Só é útil o conhecimento que nos torna melhores.

*Sócrates*

## RESUMO

PEREIRA DA COSTA, F.B. Análise e Desenvolvimento de Misturas de Concreto Permeável para Aplicação em Pavimentação. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

As demandas de urbanização trazem consigo a problemática de impermeabilização do solo e a contaminação dos corpos hídricos em virtude das grandes enxurradas. O sistema de drenagem urbana em grandes cidades, mesmo quando sua capacidade é aumentada pelo poder público como forma de mitigar o problema, não contribui para uma gestão eficaz das enchentes. Assim, o grande desafio urbano atual consiste em equilibrar as demandas de desenvolvimento com as questões de sustentabilidade, sob um ponto de vista econômico, social e ecológico. Nesse sentido, o concreto permeável é um material com potencial para ser utilizado no gerenciamento de águas pluviais, uma vez que permite a percolação da água através de seus macroporos interconectados. No entanto, devido a uma série combinada de fatores, incluindo a baixa resistência mecânica, as aplicações do concreto permeável restringem-se ao uso em calçadas, estacionamentos, quadras de recreação e sub-bases para pavimentos convencionais. A implementação de pavimentos de concreto permeável, em vários países (especialmente países emergentes) continua limitada devido à carência de estudos de dosagem e procedimentos técnicos relacionados à preparação do material, método de compactação, testes e, ainda, práticas de construção. Frente às lacunas apontadas, esta pesquisa tem como foco o desenvolvimento de misturas de concreto permeável visando a ampliação da sua aplicação como revestimento para pavimentos de tráfego leve a médio. Para isso, esta tese foi dividida em três fases. A Fase 1 envolve a análise de parâmetros básicos como método de dosagem, compactação, tipo de corpo de prova e a influência da relação água/cimento e aditivo. A Fase 2 busca o aprimoramento do traço em termos mecânicos através de incorporação de materiais alternativos (sílica ativa, fibras e areia). Por fim, a Fase 3 visa contribuir com a análise do material para revestimento de pavimentos, através de análises mecânicas em placas e determinação da espessura utilizando modelos de fadiga existentes. Como resultado, verificou-se que o desempenho do concreto permeável está atrelado a variáveis como consistência, método de compactação e porosidade. Para o aumento da resistência mecânica destaca-se o uso da sílica ativa, resultando em um concreto permeável com possibilidade de uso em pavimentos de tráfego médio.

Palavras-chave: concreto permeável; pavimento permeável; sistema de drenagem urbana.

## ABSTRACT

PEREIRA DA COSTA, F.B. Análise e Desenvolvimento de Misturas de Concreto Permeável para Aplicação em Pavimentação. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The demands of urbanization bring problems related to soil impermeabilization and the contamination of water systems (e.g., rivers, aquifers) due to frequent floods. The urban drainage system in large cities, even when its capacity is increased by the public administration as a way to mitigate the problem, does not contribute to the effective management of floods. Thus, the great urban challenge is to balance development demands with sustainability issues from an economic, social and ecological point of view. In this sense, pervious concrete is a potential material to be used in the management of rainwater, since it allows percolation of water through its interconnected macropores, either for rainwater systems or for the soil itself. However, due to a large of factors, including low mechanical strength, pervious concrete applications are restricted to use in sidewalks, parking lots, playgrounds and sub-bases for conventional flooring. The implementation of pervious concrete pavements in several countries (especially in emerging-economy countries) continues to be limited due to the lack of mix design parameters and technical procedures related to material preparation, compaction method, testing, and construction practices. To fill in these gaps, this research focuses on the development of pervious concrete mixtures for pavement applications considering light to medium traffic. For this, this thesis was divided into three phases. Phase 1 involves the analysis of basic parameters such as mix design, compaction method, type of test specimen and the influence of water/cement ratio and admixture. Phase 2 aims to improve the mixture in terms of mechanical strength through the incorporation of alternative materials (i.e. silica fume, fibers and sand). Finally, Phase 3 aims to contribute to the analysis of the material for pavement coating, through mechanical analysis in slabs and thickness determination using existing fatigue models. As a result, it was verified that the performance of the pervious concrete is linked to variables such as consistency, compaction method and porosity. In order to increase the mechanical strength, it can be considered the use of silica fume, which results in a pervious concrete with the possibility of use in pavements of medium traffic.

Key-words: pervious concrete; pervious pavement; urban drainage system.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	21
1.2	JUSTIFICATIVA .....	24
1.3	OBJETIVOS DA PESQUISA .....	26
1.3.1	Objetivo Geral .....	26
1.3.2	Objetivos Específicos .....	26
1.4	DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	27
1.5	ESTRATÉGIA DE PESQUISA .....	28
1.6	ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	30
<b>2</b>	<b>PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL .....</b>	<b>32</b>
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS.....	32
2.2	BENEFÍCIOS DO USO DO CONCRETO PERMEÁVEL .....	35
2.2.1	Benefícios ambientais.....	36
2.2.2	Benefícios sociais .....	37
2.2.3	Benefícios econômicos .....	38
2.3	MATERIAIS CONSTITUINTES .....	39
2.3.1	Materiais básicos: cimento e agregados .....	40
2.3.2	Materiais cimentícios suplementares.....	42
2.3.3	Aditivos .....	45
2.3.4	Fibras .....	46
2.3.5	Polímeros .....	48
2.3.6	Sumário de características do concreto permeável e contribuições .....	50
2.4	DOSAGEM E MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO.....	51
2.4.1	Parâmetros de dosagem .....	51
2.4.2	Métodos de compactação: laboratório vs. <i>in loco</i> .....	53
2.5	ESTRUTURA DE POROS .....	56
2.5.1	Porosidade e dimensão dos poros.....	56
2.5.2	Propriedades de transporte.....	57
2.6	PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE .....	60
2.6.1	Comportamento mecânico .....	60
2.6.2	Fadiga .....	62

2.6.3	Abrasão.....	63
2.7	CRITÉRIOS PARA O PROJETO E DIMENSIONAMENTO.....	64
2.8	SÍNTESE DO CAPÍTULO E PERSPECTIVAS.....	67
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODO .....</b>	<b>70</b>
3.1	MATERIAIS EMPREGADOS .....	70
3.1.1	Materiais básicos .....	70
3.1.2	Materiais alternativos .....	72
3.1.2.1	Sílica Ativa .....	72
3.1.2.2	Areia média.....	72
3.1.2.3	Fibras de polipropileno.....	73
3.2	ENSAIOS DAS FASES 1 E 2.....	74
3.2.1	Densidade no estado fresco e endurecido.....	74
3.2.2	Porosidade .....	74
3.2.3	Taxa de infiltração .....	75
3.2.4	Permeabilidade .....	77
3.2.5	Resistência à compressão simples.....	78
3.2.6	Resistência à tração na flexão.....	78
3.2.7	Módulo de elasticidade estático.....	79
3.2.8	Cantrabro .....	80
<b>4</b>	<b>FASE 1: DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS PRELIMINARES .....</b>	<b>81</b>
4.1	MÉTODO DE DOSAGEM, PROCEDIMENTO DE MISTURA E CURA DAS AMOSTRAS .....	81
4.1.1	Procedimento de mistura e cura das amostras.....	82
4.1.2	Verificação do método do IPT/EPUSP e compactação.....	83
4.2	CORPOS DE PROVA MOLDADOS <i>VS.</i> EXTRAÍDOS E MÉTODO DE COMPACTAÇÃO.....	85
4.2.1	Moldagem da placa e extração dos corpos de prova .....	86
4.2.2	Densidade no estado fresco <i>vs.</i> endurecido .....	87
4.2.3	Densidade no estado endurecido <i>vs.</i> porosidade .....	88
4.2.4	Taxa de infiltração <i>vs.</i> porosidade .....	89
4.2.5	Permeabilidade <i>vs.</i> porosidade .....	91

4.2.6	Resistência à compressão vs. porosidade e efeito do tipo de capeamento .....	93
4.2.7	Considerações parciais .....	95
4.3	RELAÇÃO A/C, ADITIVO MODIFICADOR DE REOLOGIA E TRABALHABILIDADE.....	96
4.3.1	Densidade no estado endurecido vs. porosidade .....	100
4.3.2	Taxa de infiltração .....	102
4.3.3	Permeabilidade .....	103
4.3.4	Resistência à compressão .....	104
4.3.5	Resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático.....	106
4.3.6	Considerações parciais .....	108
4.4	VARIAÇÃO DO TEOR DE PASTA.....	109
4.5	SÍNTESE DA FASE 1.....	111
<b>5</b>	<b>FASE 2: COMBINAÇÕES DE MATERIAIS ALTERNATIVOS .....</b>	<b>114</b>
5.1	INCORPORAÇÃO DE SÍLICA ATIVA VS. RELAÇÃO A/C.....	114
5.1.1	Densidade no estado endurecido vs. porosidade .....	115
5.1.2	Taxa de infiltração .....	117
5.1.3	Permeabilidade .....	118
5.1.4	Resistência à compressão .....	119
5.1.5	Resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.....	121
5.1.6	Considerações parciais .....	124
5.2	INFLUÊNCIA DO TIPO DE FIBRA DE POLIPROPILENO .....	125
5.2.1	Densidade no estado endurecido vs. porosidade .....	127
5.2.2	Taxa de infiltração .....	128
5.2.3	Permeabilidade .....	129
5.2.4	Resistência à compressão .....	130
5.2.5	Resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.....	132
5.2.6	Abrasão.....	135
5.2.7	Considerações parciais .....	136
5.3	COMBINAÇÕES EXPERIMENTAIS .....	137
5.3.1	Densidade no estado endurecido vs. porosidade .....	139
5.3.2	Taxa de infiltração .....	140
5.3.3	Permeabilidade .....	141
5.3.4	Resistência à compressão .....	143



5.3.5	Resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.....	145
5.3.6	Abrasão.....	148
5.3.7	Considerações parciais .....	149
5.4	SÍNTESE DA FASE 2.....	150
<b>6</b>	<b>FASE 3: CONSIDERAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO.....</b>	<b>152</b>
6.1	ANÁLISES MECÂNICAS .....	152
6.2	DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO ATRAVÉS DE MODELOS DE FADIGA .....	156
6.2.1	Descrição dos modelos de fadiga .....	157
6.2.2	Comparações entre os modelos .....	160
6.2.3	Análise das espessuras do revestimento de concreto permeável.....	161
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>165</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>170</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ponto de alagamento na Zona Sul de Porto Alegre/RS. Foto: EPTC/Divulgação..	23
Figura 2 – Fluxograma da tese. ....	30
Figura 3 – Tipos de infiltração em pavimentos permeáveis (adaptado de ASCE, 2013).....	34
Figura 4 – Fluxograma de sustentabilidade do pavimento de concreto permeável (adaptado de Henderson e Tighe, 2011). ....	36
Figura 5 – Modo de ruptura do concreto permeável: concreto permeável de alta resistência (a) e concreto permeável de baixa resistência (b) (adaptado de CHEN <i>et al.</i> , 2012). ....	45
Figura 6 – Concreto permeável com relação a/c muito baixa (a), apropriada (b) e muito elevada (c) (AMDE e ROGGE, 2013).....	53
Figura 7 – Exemplo de compactação do concreto permeável com rolo – dimensão de 3,7 m e massa de 227 kg (a); e exemplo de rolo pequeno (32 kg) usado para compactar áreas menores (b) (ACI, 2010).....	55
Figura 8 – Ensaio de infiltração em pavimento de concreto permeável – exemplo realizado em vaga de estacionamento no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – LEME (AUTORA, 2018).....	58
Figura 9 – Relação entre permeabilidade e porosidade para diferentes misturas de concreto permeável (NEITHALATH <i>et al.</i> , 2010). ....	59
Figura 10 – LnS-LnN de diferentes concretos para 50% de probabilidade de falha (adaptado de CHEN <i>et al.</i> , 2013).....	62
Figura 11 – Árvore de decisão da análise estrutural e hidrológica de pavimento permeável (adaptado de ASCE, 2013). ....	65
Figura 12 – Curva granulométrica do agregado graúdo (brita 0).....	72
Figura 13 – Curva granulométrica do agregado miúdo.....	73
Figura 14 – Fibras de polipropileno: corrugada (a) e sintética estrutural (b).....	73
Figura 15 – Teste de infiltração em placa de concreto permeável. ....	76
Figura 16 – Teste de infiltração em corpos de prova cilíndricos de concreto permeável. ....	76
Figura 17 – Permeâmetro de carga variável (a) e posicionamento do corpo de prova revestido com membrana látex para realização do ensaio de permeabilidade (b). ....	77
Figura 18 – Uso de LVDT para medição da flecha de viga no ensaio de tração na flexão.....	79
Figura 19 – Máquina de abrasão Los Angeles. ....	80
Figura 20 – Compactação de corpo de prova cilíndricos com o uso do Proctor. ....	84
Figura 21 – Densidade versus porosidade de mistura teste. ....	85

Figura 22 – Consistência da mistura de concreto permeável. ....	87
Figura 23 – Corpos de prova moldados: densidade estado fresco vs. endurecido. ....	87
Figura 24 – Corpos de prova moldado vs. extraídos: densidade vs. porosidade. ....	89
Figura 25 – Corpos de prova moldado vs. extraídos: infiltração vs. porosidade. ....	90
Figura 26 – Corpo de prova moldado e extraído. ....	90
Figura 27 – Corpos de prova moldado vs. extraídos: permeabilidade vs. porosidade. ....	92
Figura 28 – Corpos de prova moldado vs. extraídos: resistência à compressão vs. porosidade. ....	93
Figura 29 – Influência da técnica de capeamento aplicada no teste de compressão axial. ....	95
Figura 30 – Consistência da mistura de concreto permeável: seca (a), ideal (b) e fluída (c)...	98
Figura 31 – Mistura de relação a/c 0,30: sem aditivo (a) e com aditivo (b).....	98
Figura 32 – Consistência do concreto permeável para diferentes relações a/c e teor de aditivo. ....	99
Figura 33 – Compactação com o uso do rolo em corpos de prova prismáticos. ....	100
Figura 34 – Relação entre densidade real e porosidade para diferentes relações a/c e teor de aditivo. ....	101
Figura 35 – Taxa de infiltração para diferentes relações a/c e teor de aditivo: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b). ....	102
Figura 36 – Permeabilidade para diferentes relações a/c e teor de aditivo: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b). ....	103
Figura 37 – Resistência à compressão para diferentes relações a/c e teor de aditivo: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).....	104
Figura 38 – Resistência à tração na flexão para diferentes relações a/c e teor de aditivo: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).....	107
Figura 39 – Consistência das misturas sem e com sílica ativa para as diferentes relações a/c. ....	115
Figura 40 – Relação entre densidade real e porosidade para as misturas sem e com sílica ativa para as diferentes relações a/c e teor de aditivo.....	116
Figura 41 – Taxa de infiltração para as misturas sem e com sílica ativa para as diferentes relações a/c e teor de aditivo: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b). ....	117
Figura 42 – Permeabilidade para as misturas sem e com sílica ativa para as diferentes relações a/c e teor de aditivo: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b). ....	118

Figura 43 – Resistência à compressão para as misturas sem e com sílica ativa para as diferentes relações a/c e teor de aditivo: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b). .....	120
Figura 44 – Imagens obtidas com microscópio estereoscópio das misturas sem e com sílica ativa para as diferentes relações a/c e teor de aditivo, após ruptura no ensaio de compressão simples. ....	121
Figura 45 – Resistência à tração na flexão para as misturas sem e com sílica ativa para as diferentes relações a/c e teor de aditivo: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).....	122
Figura 46 – Comparação entre as misturas com sílica ativa para as relações a/c e teor de aditivo avaliados no estado fresco. ....	123
Figura 47 – Consistência das misturas com sílica ativa e fibras tipo “N” e “T”.....	126
Figura 48 – Relação entre densidade real e porosidade para as misturas sem e com fibras de polipropileno tipo “N” e “T”. ....	127
Figura 49 – Aspecto superficial de corpos de prova com fibras de polipropileno “N” e “T”. ....	128
Figura 50 – Taxa de infiltração para as misturas sem e com fibras de polipropileno tipo “N” e “T”: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b). ....	129
Figura 51 – Permeabilidade para as misturas sem e com fibras de polipropileno tipo “N” e “T”: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b). ....	130
Figura 52 – Resistência à compressão das misturas sem e com fibras de polipropileno tipo “N” e “T”: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b). ....	131
Figura 53 – Imagens obtidas com microscópio estereoscópio das misturas com sílica ativa e fibra de polipropileno, após ruptura no ensaio de compressão simples. ....	132
Figura 54 – Resistência à tração na flexão para as misturas sem e com fibras de polipropileno tipo “N” e “T”: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).....	133
Figura 55 – Ensaio de tração na flexão: força vs. deslocamento para as misturas sem e com fibras de polipropileno tipo “N” e “T”. ....	134
Figura 56 – Perda de massa por abrasão vs. número de ciclos para as misturas sem e com fibra de polipropileno tipo “N” e “T”. ....	135

Figura 57 – Perda de massa por abrasão ao final dos 500 ciclos para as misturas sem e com fibra de polipropileno tipo “N” e “T”. .....	136
Figura 58 – Consistência das misturas com sílica ativa, fibra e areia. ....	138
Figura 59 – Relação entre densidade real e porosidade para as misturas com combinações de sílica ativa, fibra e/ou areia.....	139
Figura 60 – Taxa de infiltração para as misturas com combinações de sílica ativa, fibra e/ou areia: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b). .....	141
Figura 61 – Permeabilidade para as misturas com combinações de sílica ativa, fibra e/ou areia: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b). ....	142
Figura 62 – Análise visual das misturas CPS e CPSA no estado fresco. ....	143
Figura 63 – Resistência à compressão para as misturas com combinações de sílica ativa, fibra e/ou areia: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).....	144
Figura 64 – Imagens obtidas com microscópio estereoscópio das misturas CPSA e CPSAF, após ruptura no ensaio de compressão simples. ....	145
Figura 65 – Resistência à tração na flexão para as misturas com combinações de sílica ativa, fibras e/ou areia: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b). ....	145
Figura 66 – Ensaio de tração na flexão: força vs. deslocamento para as misturas com sílica ativa, fibras e/ou areia. ....	147
Figura 67 – Perda de massa por abrasão vs. número de ciclos para as misturas com sílica ativa, fibras e/ou areia. ....	148
Figura 68 – Perda de massa por abrasão ao final dos 500 ciclos para as misturas com sílica ativa, fibra e/ou areia. ....	149
Figura 69 – Posicionamento de um eixo padrão (80 kN) na placa de concreto permeável....	153
Figura 70 – Malha de elementos finitos. ....	153
Figura 71 – Variação da relação de tensão (RT) vs. espessura da placa. ....	155
Figura 72 – Distribuições das tensões na placa em função da carga de eixo padrão (80 kN). .....	156
Figura 73 – Deformações na placa em função da carga de eixo padrão (80 kN). ....	156
Figura 74 – Modelos de fadiga utilizados na determinação da espessura do concreto permeável. .....	160

Figura 75 – Comparação entre modelos de fadiga com adaptação do modelo ACPA para uma probabilidade de falha de 20%. ..... 161

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados da população brasileira.....	21
Tabela 2 – Tipos tradicionais de pavimentos permeáveis.....	33
Tabela 3 – Sumário de características do concreto permeável e contribuições.....	50
Tabela 4 – Parâmetros de entrada e saída (variáveis obtidas) dos diferentes métodos de dosagem para o concreto permeável.....	52
Tabela 5 – Técnicas de compactação utilizadas na literatura.....	55
Tabela 6 – Requisitos de resistência de pavimentos permeáveis segundo a NBR 16416 (2015). .....	61
Tabela 7 – Caracterização química, física e mecânica do cimento CP V-ARI MAX.....	71
Tabela 8 – Caracterização das fibras de polipropileno corrugada e estrutural.....	73
Tabela 9 – Variáveis de entrada e saída do método do IPT/EPUSP.....	81
Tabela 10 – Média, desvio-padrão, coeficiente de variação e análise de variância (ANOVA) dos corpos de prova moldados e extraídos (densidade e porosidade).....	89
Tabela 11 – Média, desvio-padrão, coeficiente de variação e análise de variância (ANOVA) dos corpos de prova moldados e extraídos (porosidade e infiltração).....	91
Tabela 12 – Média, desvio-padrão, coeficiente de variação e análise de variância (ANOVA) dos corpos de prova moldados e extraídos (porosidade e permeabilidade).....	93
Tabela 13 – Média, desvio padrão, coeficiente de variação e análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão (MPa) dos corpos de prova moldados e extraídos.....	94
Tabela 14 – Proporções de mistura: variação da relação a/c e teor de aditivo.....	97
Tabela 15 – Valores médios de densidade e porosidade para diferentes relações a/c e teor de aditivo.....	101
Tabela 16 – Valores médios de resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático para diferentes relações a/c e teor de aditivo.....	108
Tabela 17 – Proporções de mistura: variação do teor de pasta.....	110
Tabela 18 – Média, desvio-padrão, coeficiente de variação e análise de variância (ANOVA) das propriedades hidráulicas e mecânicas dos traços 1:4,0 e 1:3,5.....	111
Tabela 19 – Proporções de mistura: sílica ativa e variação da relação a/c.....	115
Tabela 20 – Valores médios de densidade e porosidade para as misturas sem e com sílica ativa para diferentes relações a/c e teor de aditivo.....	116
Tabela 21 – Valores médios, desvio padrão e análise de variância ANOVA para tração na flexão e módulo de elasticidade estático para as misturas com e sem sílica ativa.....	122

Tabela 22 – Proporções de mistura: sílica ativa e fibras de polipropileno.....	126
Tabela 23 – Valores médios, desvio padrão e análise de variância ANOVA para densidade e porosidade das misturas sem e com fibras de polipropileno tipo “N” e “T”.....	127
Tabela 24 – Valores médios, desvio padrão e análise de variância ANOVA para tração na flexão e módulo de elasticidade estático para as misturas sem e com fibras de polipropileno.....	133
Tabela 25 – Proporções das misturas com combinações de sílica ativa, fibra e areia.....	138
Tabela 26 – Valores médios, desvio padrão e análise de variância ANOVA para densidade e porosidade das misturas com combinações de sílica ativa, fibra e/ou areia.....	139
Tabela 27 – Análise de variância ANOVA para taxa de infiltração das misturas combinações de com sílica ativa, fibra e/ou areia.....	141
Tabela 28 – Análise de variância ANOVA para permeabilidade das misturas combinações de com sílica ativa, fibra e/ou areia.....	142
Tabela 29 – Análise de variância ANOVA para resistência à compressão das misturas com combinações de sílica ativa, fibra e/ou areia.....	144
Tabela 30 – Valores médios, desvio padrão e análise de variância ANOVA para tração na flexão e módulo de elasticidade estático para as misturas com combinações de sílica ativa, fibra e/ou areia.....	146
Tabela 31 – Parâmetros de entrada utilizados na análise mecanicista.....	154
Tabela 32 – Características e resultados dos concretos permeáveis confeccionados por Chen <i>et al.</i> (2013) e Zhou <i>et al.</i> (2016) no ensaio de fadiga.....	159
Tabela 33 – Verificação de espessuras de concreto permeável a partir dos modelos de fadiga de Chen <i>et al.</i> (2013) e Zhou <i>et al.</i> (2016).....	163
Tabela 34 – Comparação entre as espessuras de concreto permeável obtidas através dos modelos de fadiga analisados.....	163



# 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve a fundamentação teórica que subsidia a proposta de pesquisa apresentada. Primeiramente, apresenta-se a contextualização do tema, envolvendo os problemas de drenagem e gestão de águas pluviais e, posteriormente, a justificativa do estudo proposto. Na sequência, são apresentados os objetivos, delineamento e estratégia de pesquisa e a organização do trabalho.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As enchentes e inundações são problemas substanciais que envolvem inúmeras cidades do país, devido à gestão ineficaz dos escoamentos pluviais. O crescimento acelerado da população urbana nas últimas décadas contribuiu de forma eminente para tais problemas. Os efeitos desse processo atingiram todo o aparelhamento urbano relativo aos recursos hídricos, envolvendo abastecimento de água, transporte e tratamento de esgotos cloacal e pluvial (TUCCI, 1997). Além do aumento significativo na frequência de inundações, o desenvolvimento urbano brasileiro tem produzido aumento na produção de sedimentos e na deterioração da qualidade da água (POMPÊO, 2000). De acordo com a Tabela 1, é possível evidenciar o crescimento populacional do país nas últimas décadas. Entre os anos 2000 e 2010 (última atualização do censo demográfico) o aumento da parcela urbana foi de 23,32 milhões de habitantes.

Tabela 1 – Dados da população brasileira.

Ano	População (milhões de habitantes)	Parcela da população urbana (%)
1960	71,0	45,1%
1970	94,5	56,0%
1980	121,2	67,7%
1991	146,9	75,5%
2000	169,6	81,2%
2010	190,8	84,4%

Fonte: IBGE, 2010.

O problema agravante do processo de desenvolvimento urbano resulta da expansão, geralmente irregular, que ocorre sobre as áreas de mananciais de abastecimento humano, alterando de

forma negativa a sustentabilidade hídrica das cidades. Conforme Tucci (2002), destacam-se como causas do problema de expansão: (i) baixa renda econômica de grande parte da sociedade, agravada, ainda, nos períodos de desemprego e crise econômica; (ii) falta de planejamento e investimento por parte do poder público, em relação ao direcionamento da expansão urbana; e (iii) legislações conflitantes com a realidade brasileira, *i.e.*, as leis que impedem o uso de áreas de mananciais sem que o poder público compre a propriedade, são quebradas quando a população de baixa renda invade o local.

Tais demandas de urbanização trazem consigo a problemática de impermeabilização do solo – devido à construção de residências e edifícios com calçadas impermeáveis ligados por ruas pavimentadas – e a contaminação dos corpos hídricos por efluentes industriais e esgoto doméstico em virtude das grandes enxurradas, consequência da impermeabilização. Segundo Tucci (2003), com a impermeabilização do solo, na medida em que a precipitação ocorre, a água não é infiltrada, havendo, portanto, um aumento de volume a ser escoado pelos condutos, acarretando na sobrecarga do sistema de drenagem. Para o transporte de grande volume de água, é necessário que a capacidade dos condutos seja ampliada, assim como os canais ao longo de todo o trajeto dentro da cidade até um local onde o efeito de ampliação não atinja a população. No entanto, isso leva a custo insustentáveis, devido a irracionalidade de projetos.

O sistema de drenagem urbana (*i.e.*, calhas, sarjetas, bocas de lobo, tubulações enterradas, etc.) em grandes cidades, mesmo quando sua capacidade é aumentada pelo poder público como forma de mitigar o problema, não contribui para uma gestão eficaz das enchentes. Assim, o problema acaba sendo transferido para jusantes, podendo, até mesmo, incrementar o pico de cheia. Polastre e Santos (2006) explicam que, a criação de cidades associadas à explosão demográfica e à escassez de políticas governamentais adequadas para regular o desenvolvimento urbano, acarretou em um planejamento deficiente do uso do solo. As áreas de várzea necessárias para o equilíbrio de grandes corpos hídricos acabaram sendo indevidamente ocupadas, provocando uma alteração significativa nos regimes fluviais. Tal fato colabora para a perda da capacidade natural de infiltração do solo, levando ao aumento das cheias e redução do tempo de chegada das águas.

A problemática das enchentes é agravada, ainda, pela deficiência na gestão da coleta e deposição final dos resíduos sólidos. Em muitas cidades, o lixo residencial é colocado nas ruas à espera da coleta. Na ocorrência de grandes precipitações, o mesmo é geralmente carregado, bloqueando o sistema de drenagem e esgoto, aumentando o escoamento superficial. Esta

questão torna-se mais crítica, quanto mais densas são as cidades. A obstrução do sistema de drenagem é responsável, ainda, pelo aumento das doenças de veiculação hídrica, tais como a leptospirose.

Segundo os dados da Pesquisa de Informações Básicas Municipais (Munic) realizada pelo IBGE (2013), as enchentes provocadas pelas chuvas atingiram, entre os anos de 2008 e 2012, cerca de 1.543 municípios dos 5.570 existentes no país. Este valor representa 27,7% do total das cidades, deixando 1,4 milhão de pessoas desabrigadas ou desalojadas. Segundo a ONG *World Resources Institute* (WRI, 2015), o Brasil ocupa a 11ª posição entre 84 países mais afetados por enchentes fluviais, os quais se enquadram, ainda, entre os mais vulneráveis a desastres naturais e mudanças climáticas. Tais fatores, juntamente com o crescimento urbano desordenado, poderão deixar mais de 400 mil brasileiros expostos a enchentes até 2030. A Figura 1 ilustra um dos casos típicos de inundação na cidade Porto Alegre/RS.



Figura 1 – Ponto de alagamento na Zona Sul de Porto Alegre/RS. Foto: EPTC/Divulgação<sup>1</sup>

Outra grande problemática envolvendo a urbanização e densificação dos grandes centros, está relacionada ao efeito ilha de calor urbano. A mesma impermeabilização causada no solo responsável pela sobrecarga do sistema de drenagem, gera o aumento do efeito ilhas de calor. O uso de pavimentos de elevada capacidade de absorção de calor, tais como o asfalto, aliado a grandes construções e falta de vegetação, pode gerar aumentos significativos na temperatura, de até 10°C, comparado a zonas de menor poluição e maior arborização, dentro da mesma cidade.

<sup>1</sup> Disponível em: <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/chuva-provoca-alagamentos-e-afeta-o-transito-em-porto-alegre-nesta-terca-feira.ghtml>

O grande desafio urbano atual consiste em equilibrar as demandas de desenvolvimento com as questões de sustentabilidade, sob um ponto de vista econômico, social e ecológico. Para tanto, é necessário o desenvolvimento de soluções no controle do escoamento e aquecimento das cidades e/ou materiais alternativos que favoreçam o processo de infiltração, no intuito de mitigar tais problemas. Neste contexto, Tucci (2007) destaca que a principal medida deve ser a recuperação da capacidade de infiltração do solo. O autor ressalta, ainda, que existem alternativas que podem ser feitas individualmente pelos moradores, como o uso de pavimentos permeáveis, calhas de reaproveitamento da água da chuva em jardins, coberturas permeáveis, etc.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

No Brasil, assim como em demais países em desenvolvimento, o problema de drenagem é mais acentuado, principalmente devido à crescente expansão urbana. Assim, a busca por soluções inovadoras, viáveis e econômicas torna-se cada vez mais necessária, uma vez que obras de drenagem tradicionais, além de não totalizarem a resolução dos problemas, envolvem altos custos e transtornos à população.

O concreto permeável tem se tornado popular nos Estados Unidos devido a seus grandes benefícios ambientais na gestão de águas pluviais e do desenvolvimento sustentável. As razões envolvem alterações à lei *Clean Water Act* (US EPA, 1999), isto é, “Lei da Água Limpa”, que exige tanto na mitigação da quantidade de escoamento de águas pluviais, como manutenção da qualidade da água.

Mais do que apenas a drenagem de escoamento das águas de superfície, as suas vantagens incluem o tratamento da poluição da água de escoamento, carregando uma parcela significativa dos poluentes na calçada, além de contar com um tratamento natural de escoamento superficial que mantém grande parte da água até que a mesma possa infiltrar-se no solo ou subleito subjacente, contribuindo na recarga de aquíferos (Tennis *et al.*, 2004). Outros benefícios do concreto permeável incluem a redução do ruído rodoviário, melhorando a resistência à derrapagem e, também, minimizando o efeito de “ilha de calor” em grandes cidades (YANG e JIANG, 2003; TENNIS *et al.*, 2004; FERGUSON, 2005), uma vez que captura a precipitação aquecida por pavimentos convencionais, de modo que o escoamento quente não seja descarregado em águas receptoras.

O concreto permeável é um tipo especial de concreto para pavimento, composto, principalmente, de agregado graúdo racionalmente graduado e materiais cimentícios, os quais promovem uma estrutura interna de macroporos interconectados (TENNIS *et al.*, 2004; ACI, 2010; NEITHALATH *et al.*, 2010; YAHIA e KABAGIRE, 2014). O volume de poros conectados varia, tipicamente, de 15% a 35%, o que facilita a percolação de água através do material (TENNIS *et al.*, 2004; ACI, 2010; YAHIA e KABAGIRE, 2014). Apesar dos benefícios ambientais citados, o concreto permeável não é, usualmente, tão resistente mecanicamente quanto um concreto tradicional para similares espessuras. A estrutura de poros que permite com que a água flua através do material também reduz sua resistência mecânica (IBRAHIM *et al.*, 2014). Como sua resistência depende, principalmente, da sua porosidade, seu desempenho estrutural é mais variável do que em concretos tradicionais (CROUCH *et al.*, 2003). Tal fato está relacionado com a dificuldade de implementação do concreto permeável, particularmente, de tráfego leve à médio de veículos. Dessa forma, as aplicações do concreto permeável restringem-se ao uso em calçadas, estacionamentos, quadras de recreação e sub-bases para pavimentos convencionais. Além disso, a implementação de pavimentos de concreto permeável, em vários países (especialmente países emergentes) continua limitada devido a carência de normas e procedimentos técnicos relacionados à preparação do material, testes e, ainda, em práticas de construção (CHANDRAPP e BILIGIRI, 2016).

No Brasil, o concreto permeável tem sido pouco estudado como alternativa para mitigar os problemas de drenagem de água. Embora pavimentos de concreto permeável tenham sido utilizados com sucesso em vários locais nos Estados Unidos e Japão, e muitas propriedades fundamentais do material tenham sido estabelecidas, um número grande de questões não foram, ainda, completamente resolvidas. Muitos desses problemas estão relacionados ao comportamento a longo prazo do pavimento em serviço, além dos demais problemas citados no parágrafo anterior.

A escassez de pesquisas a nível nacional se estende, ainda que inicialmente, ao estabelecimento dos materiais constituintes e parâmetros de dosagem e compactação, para além do estudo do desempenho mecânico sob cargas estáticas e dinâmicas, aliado ao bom desempenho hidráulico. Tais variáveis não se encontram totalmente compreendidas (até mesmo internacionalmente), já que o comportamento do concreto permeável é muito divergente do comportamento do concreto convencional. Sendo assim, a dosagem, adensamento, além de alguns processos normativos para ensaios fornecidos pelas normas nacionais e internacionais para concreto convencional, não são possíveis de serem aplicados para o concreto permeável. Muitos procedimentos para

ensaio e avaliação, principalmente, da sua estrutura de poros, são adaptados de ensaios realizados para outros materiais permeáveis, tais como solo. Apesar de algumas normas próprias para avaliação do concreto permeável já estarem disponíveis, o método de dosagem e compactação do material são diversos na literatura, o que dificulta o estabelecimento de padrões para sua execução e refletem diretamente na consistência dos resultados.

Neste contexto, tais análises, juntamente com a aplicação de materiais adequados para o aumento do seu desempenho, são imprescindíveis quando se deseja ampliar consistentemente a aplicação do material, isto é, para além do tráfego de pedestres e estacionamento de veículos. Por exemplo, viabilizando a aplicação do material em vias de tráfego de veículos.

### 1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

Neste item são apresentados os objetivos do trabalho, subdivididos em objetivo geral, destacando o foco principal da pesquisa, e objetivos específicos, mostrando pontos individuais que buscam complementar o estudo.

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como principal objetivo o aprimoramento de misturas de concreto permeável, visando a extensão da sua aplicabilidade como material de pavimentação e, assim, contribuir na mitigação do escoamento superficial e problemas de drenagem urbana.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram delimitados e estabelecidos considerando um conjunto de fatores para atingir o objetivo geral deste trabalho, que inclui, além da incorporação de diferentes materiais para o aprimoramento da mistura, a consolidação de questões de dosagem e procedimentos laboratoriais para análise do concreto permeável. Para tanto, os objetivos foram desmembrados na seguinte ordem:

- Verificar e validar a possibilidade de obtenção de uma porosidade projetada através do controle da densidade da mistura obtida utilizando o método do IPT/EPUSP para dosagem do concreto permeável;
- Avaliar a influência do método de compactação e do tipo de corpo de prova (moldado e extraído) nas propriedades hidráulicas e mecânicas do concreto permeável.

- Verificar a influência do tipo de capeamento de corpos de prova cilíndricos de concreto permeável na resistência à compressão e no tipo de ruptura do material.
- Analisar a influência da variação da relação água/cimento e aditivo modificador de reologia na consistência e nas propriedades hidráulicas e mecânicas do concreto permeável;
- Alterar o teor de pasta da mistura no intuito de verificar possíveis ganhos de resistência mecânica;
- Estudar a combinação de materiais complementares como sílica ativa, fibra de polipropileno e areia no aprimoramento conjunto das propriedades hidráulicas e mecânicas do concreto permeável;
- Obter e comparar diferentes espessuras de revestimento de concreto permeável para pavimentação em função do tipo de tráfego solicitado, utilizando modelos de fadiga existentes.

#### 1.4 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Para contribuir com alguns fatores que ainda não se encontram bem difundidos na literatura a respeito do concreto permeável, é necessário – além de estudar parâmetros de dosagem, mistura, consistência e método de compactação – o aprimoramento de misturas afim de contribuir para o aumento do desempenho mecânico e de durabilidade sem prejuízo nas propriedades hidráulicas do material. Desta forma, este trabalho busca, em síntese, fornecer respostas para as seguintes perguntas:

- Quais variáveis devem ser controladas para que a porosidade projetada em misturas de concreto permeável seja atingida sem variância significativa?
- Existe diferença significativa entre as propriedades mecânicas e hidráulicas obtidas através de corpos de prova extraídos (simulando condições *in situ*) e corpos de prova moldados em laboratório? Qual método possui maior consistência para análise das propriedades de diferentes misturas de concreto permeável?

- Devido a superfície irregular dos corpos de prova de concreto permeável, há influência do método de capeamento no modo de ruptura e resistência à compressão do material?
- Qual a influência da relação água/cimento e consistência da mistura nas propriedades hidráulicas e mecânicas do concreto permeável?
- Existe ganho mecânico significativo quando se aumenta o teor de pasta de uma determinada mistura de concreto permeável?
- A utilização de materiais suplementares, como sílica ativa, areia e fibras aumenta o desempenho mecânico e de durabilidade de misturas de concreto permeável?
- É possível obter uma boa combinação entre o aumento do desempenho mecânico sem que as propriedades hidráulicas do concreto permeável sejam comprometidas?
- Qual o nível de tráfego de veículos pode ser submetido a mistura de melhor desempenho avaliada? Qual deve ser a espessura do revestimento do pavimento?

## 1.5 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Esta tese propõe o desenvolvimento de misturas de concreto permeável visando o aprimoramento e ampliação da aplicabilidade do material em pavimentação. Para tanto, uma série de variáveis fundamentais e básicas necessitam ser compreendidas para que o objetivo final seja alcançado. Neste sentido, o trabalho foi dividido em três fases, que visam contemplar tais definições até o desenvolvimento e estudo da viabilidade da sua aplicação. O esquema apresentado na Figura 2 mostra as etapas constituintes da pesquisa, de forma a propiciar o entendimento global do trabalho.

A “**Fase 1**” desta tese, que também pode ser apontada como fase preliminar, buscou a realização de estudos exploratórios que permitiram a obtenção/fixação de parâmetros fundamentais. Estes parâmetros incluem o estudo de variáveis na seguinte ordem: a influência do método de compactação e da utilização de corpos de prova moldados ou extraídos; a influência da relação água/cimento, do uso de aditivo e da trabalhabilidade nas propriedades do concreto permeável; e, por fim, a influência do teor de pasta. Com os resultados da Fase 1, obteve-se o traço de melhores características relativas à trabalhabilidade, desempenho mecânico e hidráulico e, ainda, a técnica mais adequada para realização dos ensaios das fases



subsequentes (corpos de prova moldados ou extraídos e suas respectivas formas de compactação). O fato de não haver técnicas padrões de moldagem e, devido a não comparabilidade dos resultados obtidos pelos diferentes trabalhos, esta fase pretendeu, sobretudo, estudar parâmetros que auxiliem na obtenção das propriedades desejadas no concreto permeável.

A “**Fase 2**” desta tese buscou explorar a incorporação de materiais alternativos, tais como fibra de polipropileno, areia, e sílica ativa nas propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável. De maneira geral, esta fase teve como objetivo a otimização do traço selecionado da fase anterior para aplicação em pavimentos. Além dos testes mecânicos e hidráulicos, esta etapa estudou o desgaste abrasivo do material como parâmetro de durabilidade. Os tipos e quantidades dos materiais adotados nesta fase foram baseados nos trabalhos citados no item 2.3 desta tese, levando em consideração os resultados de melhor desempenho e questões de economicidade.

Na “**Fase 3**”, o traço de melhor desempenho em termos mecânico, hidráulico e de abrasão (cantrabro) obtido na Fase 2, foi avaliado para aplicação como material de pavimentação, no qual espessuras de revestimento foram obtidas para situações de tráfego leve a médio, típico de vias locais e coletoras. Para isso, primeiramente foram realizadas simulações das tensões atuantes em placas de concreto permeável com auxílio de *software* de elementos finitos, cujos resultados foram comparados com os obtidos para outras misturas de concreto permeável e concreto convencional. Por fim, foram obtidas diferentes espessuras para o revestimento através de modelos de fadiga existentes para o material. Uma análise comparativa entre os modelos também foi realizada.

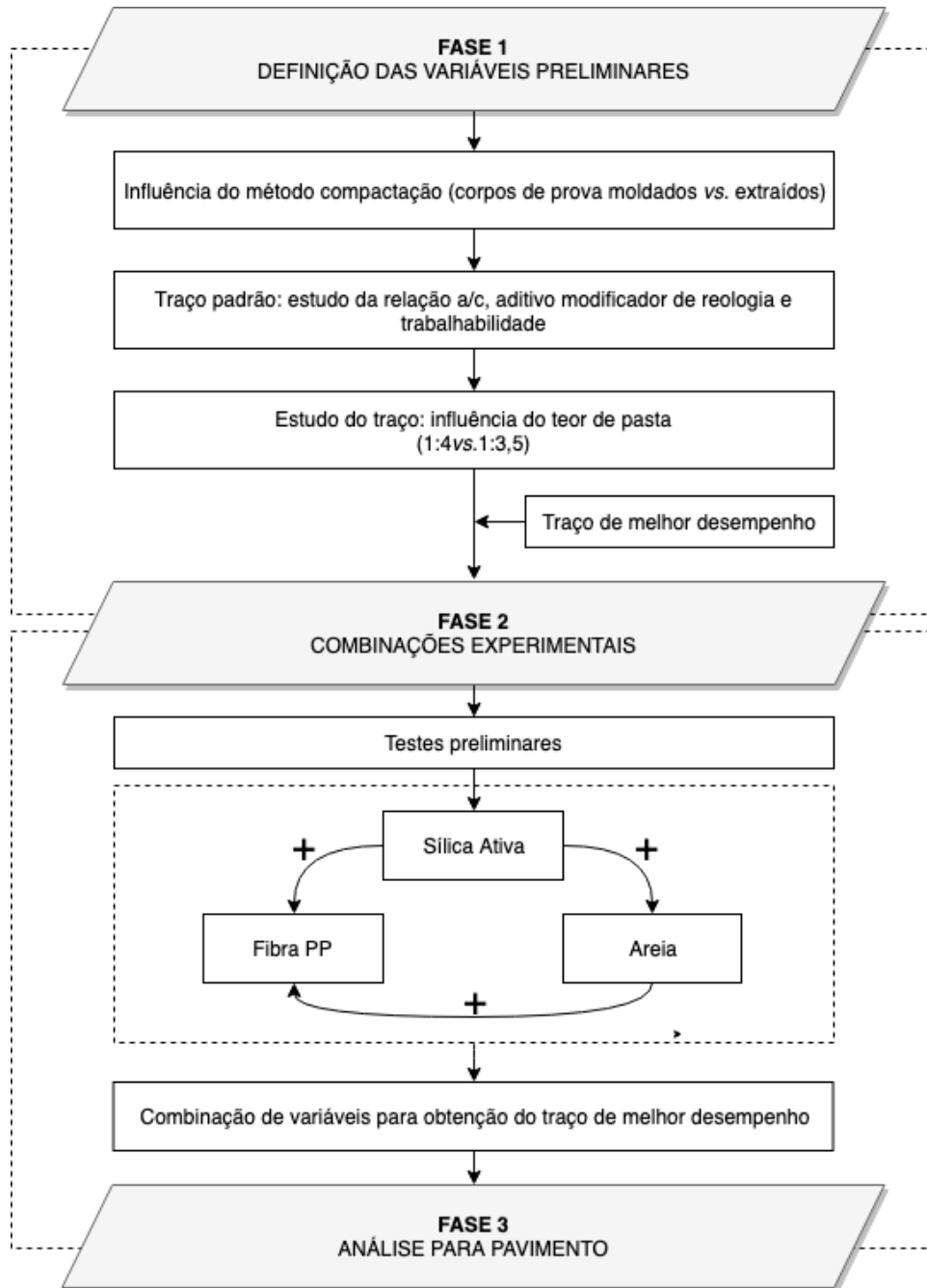


Figura 2 – Fluxograma da tese.

## 1.6 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A tese está dividida em sete capítulos. O Capítulo 1 abordou a contextualização do tema, envolvendo lacunas de pesquisa, a relevância do estudo e aprimoramento de misturas de concreto permeável e, ainda, a importância da consolidação de parâmetros básicos de dosagem e compactação, que contemplam os objetivos deste trabalho. Na sequência foram apresentados o delineamento da pesquisa e, por fim, a estratégia experimental adotada.

O Capítulo 2 aborda aspectos gerais sobre tipos de pavimentos permeáveis, benefícios do uso do concreto permeável, materiais constituintes, parâmetros de dosagem, método de compactação, propriedades hidráulicas, mecânicas e de durabilidade do material e, por fim, critérios para o dimensionamento. O capítulo traz análises e resultados obtidos por diversos autores no meio nacional e internacional que subsidiaram a escolha de variáveis deste estudo.

O Capítulo 3 apresenta os materiais utilizados nesta pesquisa, bem como a descrição dos ensaios, métodos e normas adotadas para análises das propriedades hidráulicas e mecânicas das misturas de concreto permeável. Os ensaios foram divididos pela fase na qual cada conjunto de experimentos será realizado de forma a facilitar a compreensão da estratégia adotada.

Os resultados encontram-se apresentados em três capítulos. O Capítulo 4 mostra os resultados da Fase 1, que consiste em estudos exploratórios e preliminares de definição do método de dosagem, compactação, relação água/cimento e teor de pasta. O Capítulo 5 apresenta os resultados referente a Fase 2, que compreende a avaliação de diferentes misturas contendo sílica ativa, areia e/ou fibra de polipropileno. O Capítulo 6 mostra um estudo mais aplicado referente a mistura de melhor desempenho mecânico e hidráulico obtida no capítulo anterior, abordando análises mecânicas e o cálculo da espessura do pavimento para diferentes níveis de tráfego.

Por fim, as considerações finais e conclusões da pesquisa são apresentadas no Capítulo 7. O capítulo aborda, ainda, sugestões para trabalhos futuros, visando a continuação e complementação do estudo proposto.

## 2 PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL

Este capítulo apresenta uma revisão sobre os principais conceitos relativos ao tema de pesquisa desta tese. Dessa forma, será abordado um estado-da-arte do concreto permeável, incluindo discussões sobre suas propriedades, históricos de pesquisas e desafios que ainda acercam sua concepção. Tais discussões estão relacionadas às propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade do material. Este capítulo possui, portanto, como objetivo subsidiar o entendimento, de maneira conceitual, das variáveis e estudos propostos nesta tese.

### 2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS




A maioria das cidades do mundo desenvolvido depende do sistema de rede de tubulação, que foram desenvolvidos no século XIX. Os sistemas de drenagem tradicionais capturam o escoamento pluvial através dos condutos e, posteriormente, distribuem-no para os cursos de água ou sistemas de esgotos próximos. Conforme mencionado no Capítulo 1, alguns desses sistemas tornam-se ineficazes e ineficientes e, além disso, geralmente são muito caros. Nesse sentido, o uso de pavimentos permeáveis se difundiu como uma das técnicas de controle na fonte do escoamento, possibilitando a infiltração da água no solo.

Embora existam várias maneiras de tornar a pavimentação de veículos e pedestres permeável, as três principais tecnologias primárias consistem em: camada porosa de asfalto (AP), concreto permeável (CP) e pavimento de concreto intertravado permeável (PCIP). Os pavimentos do tipo PCIP têm sido utilizados na Alemanha e em outros lugares da Europa desde o final dos anos 80 e, na América do Norte, desde 1992. Os pavimentos do tipo CP foram utilizados pela primeira vez na Flórida (Estados Unidos) no início de 1970, mesma época do surgimento de pavimentos do tipo AP (ICPI, 2008). A Tabela 2 sumariza a diferença entre os tipos de pavimento citados.

O programa de licenças de descargas pluviais *National Pollutant Discharge Elimination System* (NPDES) dos Estados Unidos, reconhece a viabilidade do uso de pavimento permeável como a Melhor Prática de Gestão – *Best Management Practice (BMP)*. Os pavimentos permeáveis também são reconhecidos como um “BMP” pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, bem como por muitas agências provinciais, estaduais e locais de gestão de águas pluviais. Os sistemas de classificação para edifícios “verdes” ou sustentáveis, como o *Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)* e *Green Globes*, nos Estados Unidos,

oferecem, ainda, crédito para projetos que usam pavimento permeável. Além disso, o pavimento permeável tornou-se um alicerce do projeto e regulamentos do desenvolvimento de baixo impacto – *low-impact development (LID)*. O objetivo do *LID* é manter e melhorar o regime hidrológico pré-desenvolvido das bacias hidrográficas urbanas e em desenvolvimento (ICPI, 2008).

Tabela 2 – Tipos tradicionais de pavimentos permeáveis.

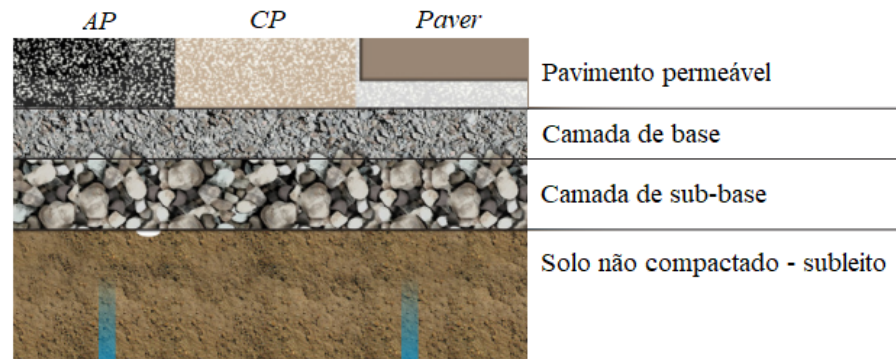
Material e Descrição	Ilustração
<p><i>Asfalto Poroso (AP)</i></p> <p>O asfalto poroso é similar ao asfalto convencional, com exceção de que os materiais finos são removidos para criar grande quantidade de vazios. Aditivos e ligantes de alto potencial são geralmente usados para fornecer maior durabilidade e prevenir segregação.</p>	
<p><i>Concreto Permeável (CP)</i></p> <p>O concreto permeável é produzido através da redução da quantidade de material fino na mistura para manter uma estrutura de poros interconectada. Apresenta aspecto mais grosseiro que um concreto convencional.</p>	
<p><i>Pavimento de Concreto Intertravado Permeável (PCIP)</i></p> <p>PCIP é feito de <i>pavers</i> de concreto intertravados que mantém a drenagem através do preenchimento de agregado entre os <i>pavers</i>. Os <i>pavers</i> não são permeáveis.</p>	

Fonte: adaptado de ASCE (2013).

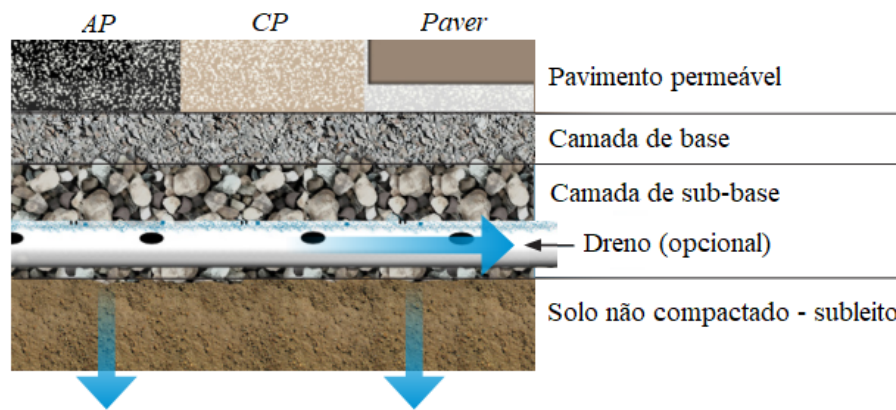
Entretanto, segundo ASCE (2013), os pavimentos permeáveis atualmente não são recomendados para usos no qual possa estar submetido a cargas elevadas (tráfego de caminhões), estradas de alta velocidade e alto volume, ou áreas que podem estar sujeitas a grande deposição de poluentes, sedimentos ou acumulação de matéria orgânica.

É importante a compreensão de que em alguns casos não é possível a infiltração total da água no solo, pois alguns solos podem perder suas características e sofrer desestruturação na presença de água, ou ainda, dependendo da região, poderá haver o risco de contaminação de aquíferos. Dessa forma, existe a possibilidade de execução de pavimentos permeáveis conforme ilustrado na Figura 3, com infiltração total no solo (a), infiltração parcial do solo (b) e sem infiltração no

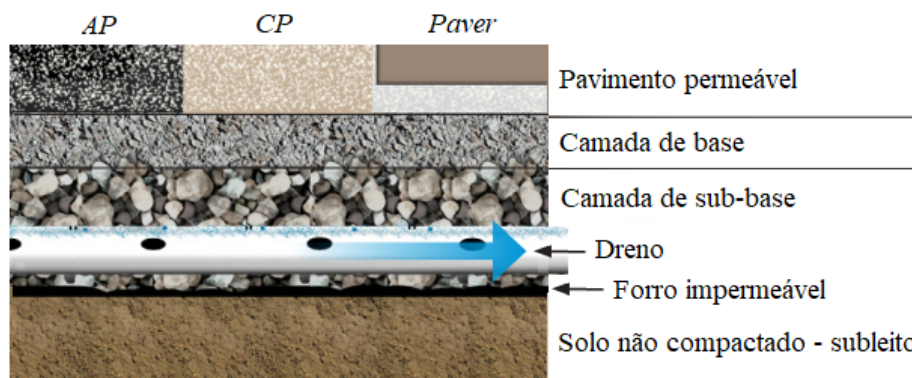
solo (c). A camada de base e sub-base pode atuar como um reservatório para água infiltrada nos casos em que não há infiltração no solo ou a infiltração é parcial.



(a) Pavimento com infiltração total no solo.



(b) Pavimento com infiltração parcial no solo.



(c) Pavimento sem infiltração no solo.

Figura 3 – Tipos de infiltração em pavimentos permeáveis (adaptado de ASCE, 2013).

Conforme a Figura 3, para os casos do uso de dreno, há a possibilidade de armazenamento da água em reservatório para utilização em fins não-potáveis, ao invés do simples direcionamento para a rede de drenagem. Para os casos de pavimentos com infiltração no solo, a sua execução somente será possível quando este solo apresentar coeficiente de permeabilidade adequado para

tal finalidade. No caso de solos muito pouco permeáveis, tais como siltes e argilas, pode ser necessário a utilização dos tubos de drenagem, de forma a evitar que a água permaneça muito tempo na estrutura do pavimento e possa acarretar na perda de suporte.

Alguns relatórios técnicos de procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis como os fornecidos pela *American Society of Civil Engineers* ASCE (2013) e pela Associação Brasileira de Cimento Portland ABCP (2010), trazem especificações para a implementação de pavimentos permeáveis. Em 2015, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a primeira norma referente a estes tipos de pavimentos, a NBR 16416 (2015), a qual estabelece requisitos mínimos exigíveis ao projeto, especificação, execução e manutenção de pavimentos permeáveis de concreto, construídos com revestimentos de peças de concreto intertravadas, placas de concreto ou pavimento de concreto moldado no local.

As vantagens da utilização do concreto permeável comparado aos demais tipos de pavimentos permeáveis citados, inclui a capacidade de redução do efeito ilha de calor, já que o asfalto possui maior capacidade de absorção de energia que o concreto e, comparado aos pavimentos intertravados, a maior capacidade de infiltração de água, já que nos casos PCIP a permeabilidade da água se dá através das juntas. Nos demais itens seguintes desta tese, são abordados apenas as características relacionadas ao concreto permeável. Detalhes dos seus benefícios estão descritos no item 2.2 a seguir.

## 2.2 BENEFÍCIOS DO USO DO CONCRETO PERMEÁVEL

Pavimentos de concreto permeável oferecem diversos benefícios quando aplicados em áreas urbanas. A sua capacidade de drenar a água da superfície do pavimento se torna abrangente em vários setores, incluindo o meio ambiente, a sociedade e a economia. A Figura 4 mostra um diagrama de fluxo de sustentabilidade de pavimentos de concreto permeável proposto por Henderson e Tighe (2011). Segundo Henderson (2012), o relacionamento mostrado na Figura 4 é exclusivo do pavimento de concreto permeável, pois nem todas as alternativas de gerenciamento de pavimentos ou águas pluviais preencherão as características apresentadas. Nos três aspectos de sustentabilidade, os benefícios que podem ser obtidos com o uso de pavimentos de concreto permeável são tanto imediatos, quanto a longo prazo.

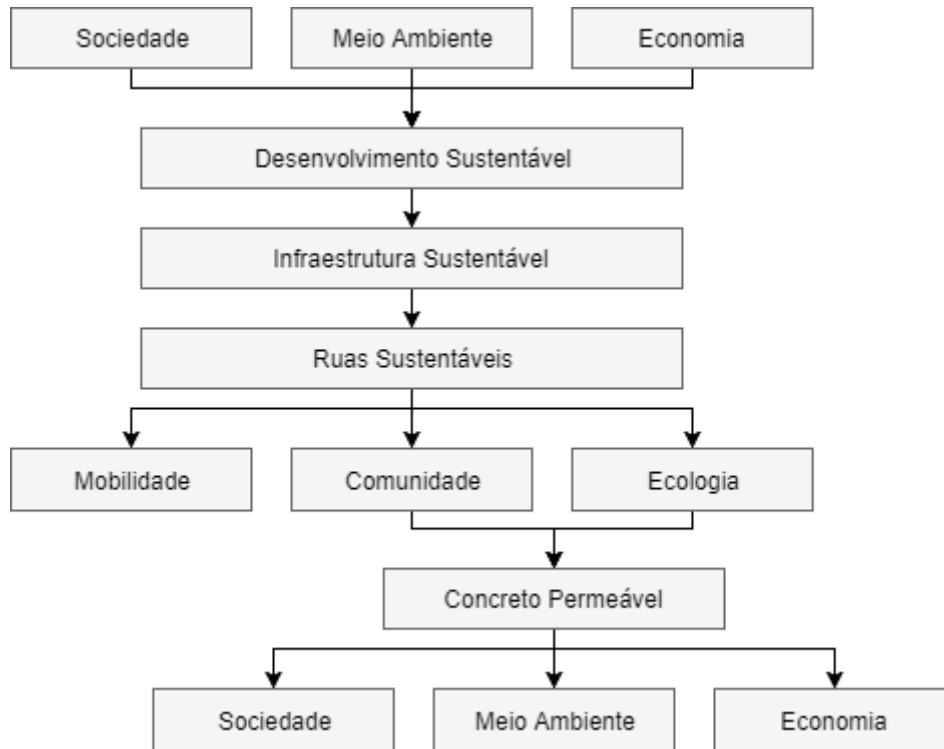


Figura 4 – Fluxograma de sustentabilidade do pavimento de concreto permeável (adaptado de Henderson e Tighe, 2011).

### 2.2.1 Benefícios ambientais

O baixo impacto no uso do concreto permeável é um dos maiores fatores atribuídos ao benefício ambiental do material. Tais benefícios estão relacionados com o controle do escoamento das águas pluviais, o restabelecimento das fontes de água subterrânea e a redução da poluição da água e do solo (TENNIS, 2004). Segundo Henderson (2012), as capacidades de drenagem do pavimento de concreto permeável acarretam em um efeito mínimo ou nulo sobre o ciclo natural da água na área.

Pavimentos permeáveis também podem servir como um uso adicional para o tratamento da qualidade das águas pluviais. Alguns estudos indicam que sistemas de pavimentos permeáveis são eficazes na remoção de metais pesados contidos na água da chuva (RUSHTON, 2001; AHIABLAME *et al.*, 2012). Uma pesquisa realizada por Haselbach *et al.* (2014), mostrou a eficiência do concreto permeável na remoção de concentrações típicas de zinco e cobre dissolvidos em águas pluviais. O trabalho forneceu uma prova de conceito da capacidade de sorção do concreto permeável para tais metais, através da sua captura física nos poros interligados do material. Um estudo realizado por Shen *et al.* (2012), também mostrou a eficiência do concreto permeável na remoção de poluentes no ar emitidos por veículos, quando



revestido com  $\text{TiO}_2$  como fotocatalisador. Segundo os autores, o  $\text{TiO}_2$  atua com a radiação UV para oxidar poluentes do ar, como óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis. A aplicação do fotocatalisador apresentou-se muito mais eficiente na superfície do concreto permeável quando comparado a sua aplicação na superfície de um concreto tradicional.

Conforme já mencionado, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), reconheceu as habilidades do pavimento de concreto permeável na redução do escoamento de águas pluviais e na atuação como ferramenta de gerenciamento ao incluí-lo como *Best Management Practice*, uma vez que o benefício da eliminação do escoamento e da manutenção do ciclo hidrológico local e natural é substancial para o ambiente circundante.

O Plano Diretor de gerenciamento de fluxo da cidade de Toronto no Canadá (*Wet Weather Flow Management Master Plan*), em 2003, também incluiu o pavimento poroso, principalmente, como método de controle de fontes para gerenciamento de águas pluviais e, ainda, como um sistema de transporte. O pavimento de concreto permeável vem, portanto, crescendo como referência em vários países como uma alternativa para gestão de águas pluviais.

### 2.2.2 Benefícios sociais

Apesar dos benefícios ambientais serem os mais ressaltantes na motivação da utilização do concreto permeável como pavimento sustentável, há, ainda, outros atributos relacionados ao material que podem aumentar a qualidade de vida da comunidade. Dentre estes benefícios, destacam-se a diminuição do efeito de ilha de calor e do ruído acústico das vias (YANG e JIANG, 2003; LORENZI *et al.*, 2015).

O efeito da ilha de calor que gera o aumento de temperatura em grandes centros urbanos, ocorre devido a capacidade de armazenamento de calor em determinadas superfícies, tais como o pavimento asfáltico. A diferença de temperatura entre uma determinada zona e outra do mesmo município pode variar significativamente devido ao efeito. Este aumento de temperatura acarreta em impactos negativos sobre a população e o meio ambiente. Neste sentido, estudos revelam que o uso do concreto permeável como pavimento armazena menos energia que sistemas tradicionais, auxiliando na mitigação do efeito de ilha de calor (KEVERN *et al.*, 2012).

A drenagem da água da chuva através do pavimentos de concreto permeável traz, também, um benefício social facilmente reconhecível pelos usuários. O movimento imediato das águas entre

os poros, faz com que a superfície do pavimento fique livre do acúmulo de água, facilitando a segurança na mobilidade de pessoas e de veículos, aumentando a resistência ao deslizamento dos pneus nas estradas e dos pedestres nas passarelas. Além disso, Segundo ASCE (2013), em países que sofrem com a ação de congelamento/descongelamento em pavimentos, o uso do concreto permeável reduz a formação de fissuras em comparação a pavimentos convencionais, além de reduzir as acumulações de gelo fino no pavimento que ocorre devido aos ciclos de fusão/recongelamento durante dias quentes com noites mais frias no inverno.

### 2.2.3 Benefícios econômicos

Segundo Henderson (2012), pavimentos de concreto permeável tem o potencial de apresentar baixo custo em seu ciclo de vida, da mesma forma que um pavimento de concreto tradicional. Este custo no ciclo de vida para pavimentos de concreto tradicional é geralmente baixo pois o concreto apresenta maior vida útil que outros pavimentos, além de requerer menor manutenção durante seu tempo de uso. Entretanto não há estudos que discutam particularmente os benefícios em relação ao custo do concreto permeável, e alguns desses estudos acabam sendo aplicáveis para condições locais (CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2016). A abordagem, portanto, do custo deste material torna-se relativa, pois depende da infraestrutura local disponível para execução e manutenção, além de mão de obra especializada. Dependendo da estrutura de poros do material (discussão abordada mais especificamente no item 2.5) é possível que sucessivas manutenções sejam necessárias, já que o material fica sujeito a colmatação e, conseqüentemente, perda de sua eficiência hidráulica.

Alguns estudos realizaram análises comparativas do custo inicial de construção entre pavimentos de concreto permeável e pavimentos tradicionais. Tais estudos mostraram que o custo inicial para o concreto permeável é maior devido a necessidade de controle dos parâmetros de design e aplicação para o atingimento da porosidade/vazios adequados (WANG *et al.*, 2010; TERHELL *et al.*, 2015).

Os benefícios relacionados ao custo de pavimentos de concreto permeável de uma forma geral, podem de fato serem obtidos, quando uma análise do custo do ciclo de vida (ACCV) for desenvolvida. Entretanto, devido à ausência de testes em larga escala, dados de performance a longo prazo, dados de custo com construção e manutenção; tem sido difícil o estudo da ACCV sem pressuposições (CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2016). No estudo realizado por Wang *et al.* (2010), sistemas de pavimentos permeáveis reduzem 30% do custo no ciclo de vida em

comparação a sistemas de convencionais de manutenção de águas da chuva usados em estradas. Os autores apontam que um projeto específico de ACCV deve ser desenvolvido monitorando os custos atuais. Em outro estudo realizado por TERHELL *et al.* (2015), baseado em dados obtidos de diversas agencias, foi observado que pavimentos de concreto permeável podem gerar economias de US\$ 64.649,00 considerando custos de instalação durante 25 anos de monitoramento comparado a pavimentos convencionais. Além disso, o benefício do pavimento permeável traria economia por não haver estação de tratamento, cujo custo de instalação seria de US\$ 3.788.856,00 e custos anuais de US\$ 66.932,61. A economia na instalação foi principalmente atribuída ao fato de que pavimentos de concreto permeável não requerem drenos laterais, cobertura, e assim por diante. Entretanto, sabe-se que este fato depende bastante do contexto no qual o pavimento é instalado, ou seja, da possibilidade de infiltração total no solo, infiltração parcial, ou da não possibilidade de infiltração, sendo necessário a utilização de drenos.

Considerando os estudos realizados na literatura, a quantidade de trabalhos relacionados à análise de custo do concreto permeável é consideravelmente limitada. Uma análise considerando os benefícios ambientais (infiltração natural, recarga de aquífero, etc.) oferecidos pelo pavimento de concreto permeável pode superar os custos quando comparado a pavimentos convencionais para tráfegos leves. Assim, o custo inicial na construção do pavimento pode ser minimizado por outros benefícios ao longo de sua vida útil. Segundo Chandrappa e Biligiri (2016), a maioria dos estudos se focam apenas nos benefícios da mitigação do escoamento superficial, mas nenhum deles têm incluído ainda os benefícios da mitigação da ilha de calor urbano. Este fato pode gerar economia de energia em grandes centros, na redução do resfriamento em edificações. Assim, menos recursos e gastos serão necessários. Além disso, a vegetação presente no local (propriedades privadas ou comerciais), como jardins e gramados, também recebe umidade natural, reduzindo a demanda de água.

### 2.3 MATERIAIS CONSTITUINTES

Nos itens subsequentes são apresentados os materiais comumente utilizados na confecção do concreto permeável e, ainda, materiais complementares (i.e., materiais cimentícios suplementares, aditivos, fibras e polímeros) cuja função é, especialmente, o aumento das propriedades mecânicas, tais como resistência à abrasão, resistência à compressão e à flexão, além do aumento da trabalhabilidade do material.

### 2.3.1 Materiais básicos: cimento e agregados

O concreto permeável é usualmente composto por cimento Portland, agregado graúdo de granulometria bem graduada, e água, que proporcionam uma estrutura interna de macroporos interconectados (TENNIS *et al.*, 2004; ACI, 2010; NEITHALATH *et al.*, 2010; YAHIA e KABAGIRE, 2014). Esta estrutura é obtida a partir da formação de uma aglomeração dos agregados por uma fina camada de pasta de cimento Portland, que os unem em certos pontos de contato. Segundo Chandrappa e Biligiri (2016), o cimento Portland *Type-I*, conforme ASTM C150 (2015), é o mais utilizado na confecção do concreto permeável. Este cimento é equivalente ao CP I-S, da NBR 16697 (2018). As dosagens típicas do material são mencionadas no item 2.4.1, que trata dos parâmetros de dosagem do concreto permeável.

Segundo ACI (2010), os agregados frequentemente utilizados no concreto permeável, tanto normal quanto leve, arredondado ou lamelar, podem ser de única dimensão (granulometria uniforme) ou graduado nas frações entre 19 e 9.5 mm. Entretanto, diversos estudos têm utilizado agregado graúdo nas dimensões entre 9.5 mm e 2.36 mm, com o intuito de aumentar a resistência mecânica (HUNG *et al.*, 2009; NGUYEN *et al.*, 2014; KEVERN *et al.*, 2009; CROUCH *et al.*, 2007; DEO e NEITHALATH, 2011). As quantidades típicas de agregado usado em diversos estudos também são apresentadas no item 2.4.1. É recomendado que os agregados usados no concreto permeável devam seguir os requerimentos previstos na ASTM D448 (2017) e ASTM C33 (2016), que fornecem limites de especificação para as propriedades que afetam o desempenho de pavimentos de concreto permeável. Por exemplo, são mencionados os limites de materiais deletérios, tais como a argila, que afetam a ligação entre os agregados e a pasta de cimento. É importante ressaltar que as propriedades físicas dos agregados para concreto permeável devem ser semelhantes às empregadas no concreto convencional.

As propriedades físicas do agregado, tais como tamanho, forma e distribuição, apresentam uma importante contribuição no controle das propriedades mecânicas, de durabilidade e características de permeabilidade dos pavimentos de concreto permeável (KEVERN *et al.*, 2010; JAIN e CHOUHAN, 2011). Além disso, o tipo de agregado afeta significativamente as propriedades do material. Embora o calcário seja o principal tipo de agregado utilizado no meio internacional na produção do concreto permeável, outros estudos têm avaliado a possibilidade de incorporação de diferentes tipos de agregados. No estudo realizado por Cosic *et al.* (2015), a utilização de agregado dolomítico resultou em um aumento da resistência mecânica para

porosidades mais elevadas quando comparado com agregados de calcário. Shu *et al.* (2011), avaliaram a influência de dois tipos de frações granulométricas de agregados de calcário e granito nas propriedades do concreto permeável. Os autores evidenciaram que as misturas de concreto permeável feitas com calcário, apresentaram menor porosidade e permeabilidade, bem como maior resistência mecânica que as misturas feitas com granito. Entretanto, vale ressaltar que neste trabalho as dosagens de cada material constituinte nas misturas de concreto permeável, tais como o consumo de cimento e areia, eram variáveis, resultando, provavelmente, em densidades diferentes para cada traço avaliado.

Agregado reciclado de construção e demolição também tem sido foco de alguns estudos. No trabalho realizado por Gaedicke *et al.* (2014), foram comparados corpos de prova moldados e extraídos feitos com três diferentes tipos de agregados (cascalho, calcário e agregado reciclado de concreto). Os resultados mostraram que, para uma porosidade igual a 20%, a resistência à compressão das misturas contendo agregado reciclado foram, em média, 8% menores que as misturas com cascalho, e 15% menores que as misturas com calcário. No trabalho de Zaetang *et al.* (2016), diferentes níveis de substituição do agregado natural (calcário) por agregado de bloco de concreto reciclado e agregado de concreto reciclado foram avaliados. Neste caso, houve um aumento na resistência mecânica e na abrasão para os diversos teores de substituição, devido à melhora da zona de transição gerada pela precipitação da pasta nos poros superficiais dos agregados reciclados.

Agregado miúdo também pode ser utilizado no concreto permeável, porém de forma limitada, já que tende a comprometer a interconectividade do sistema de poros. A incorporação do agregado miúdo pode acarretar em aumento da resistência mecânica e da densidade, mas, conseqüentemente, reduz a infiltração de água através da massa de concreto permeável (ACI, 2010). Bonicelli *et al.* (2015), avaliaram os efeitos da adição de areia fina no concreto permeável. Os autores mencionam que o desempenho do material pode ser melhorado adicionando-se uma pequena quantidade de areia fina. A areia pode levar a uma melhor resistência ao deslizamento, melhorando, também, a resistência à tração na flexão. Por outro lado, grandes quantidades de areia, juntamente com uma energia de compactação inadequada, podem levar a um conteúdo de vazios excessivamente baixo, comprometendo a capacidade de drenagem do concreto permeável. Os autores enfatizam que a incorporação de areia e a compactação do concreto permeável devem, portanto, ser analisadas de forma mais detalhada. No trabalho, foram avaliadas as substituições de 5% e 10% da massa total do agregado por areia fina em misturas de concreto permeável. A relação água/cimento também foi variada entre 0,27,

0,30 e 0,35. A quantidade de aditivo superplastificante utilizada foi aumentada para as amostras com relação a/c de 0,27. A incorporação de areia produziu resultados diferentes em relação ao teor de água. Neste caso, as misturas com maior quantidade de água obtiveram melhor comportamento estrutural. Segundo os autores, a areia “ligada” ao cimento e água proporciona uma cobertura mais espessa dos agregados. Assim, a mistura com a/c 0,27 demonstrou diminuição nas propriedades mecânicas devido à adição da areia fina. Este fenômeno foi devido ao potencial da areia em absorver a pequena quantidade de água, prejudicando as ligações químicas do cimento. A areia atuou como um fator de descontinuidade neste caso. Em relação ao teor de areia, os resultados sugeriram que a substituição do agregado graúdo por 5% de areia fina às misturas de concreto permeável proporcionou as melhores propriedades mecânicas, porém uma conseqüente redução da capacidade de drenagem.

No trabalho realizado por Yang e Jiang (2003), também foi incorporado porcentagens de areia fina na mistura de concreto permeável. Os autores testaram porcentagens de 15% e 20%, variando concomitantemente a fração granulométrica do agregado graúdo utilizado (15-30 mm, 10-20 mm e 5-10 mm). As relações água/cimento também variam de 0,33 e 0,35. As amostras apresentaram, no geral, porosidades extremamente baixas (menores que 14%) e, conseqüentemente, menores coeficientes de permeabilidade (menores que 0,09 cm/s).

Kevern *et al.* (2008) substituiu parcialmente o agregado graúdo (4,75-9,5 mm) por areia média (90% passante na peneira 2,36 mm e módulo de finura de 2,90) no valor de 7%. Como efeito da areia, a resistência à compressão e tração aumentou de 19 MPa para 21 MPa, e de 2,05 MPa para 2,55 MPa, respectivamente. Entretanto, a porosidade e permeabilidade do material reduziram de, aproximadamente, 25% para 20%, e 0,52 cm/s para 0,21 cm/s, respectivamente. A permeabilidade do material teve, portanto, um decréscimo de 60%, mas ainda se manteve maior que a permeabilidade necessária para drenar a tempestade máxima (i.e. 30,5 cm) dos últimos 25 anos da data de publicação do trabalho, nos Estados Unidos.

### 2.3.2 Materiais cimentícios suplementares

Além do cimento Portland, alguns pesquisadores têm usado materiais cimentícios suplementares, tais como a sílica ativa e a cinza volante, como substituição parcial do cimento. Entretanto, os resultados têm indicado que os efeitos destes materiais no concreto permeável não são similares aos observados no concreto convencional. Ao contrário, em alguns casos, o seu uso pode acarretar no decréscimo das propriedades de resistência do concreto permeável

após certo limite de substituição parcial, como reportado por Fu *et al.* (2014). Neste estudo realizado pelos autores, substituições parciais do cimento por 10% de sílica ativa, obtiveram melhores resultados em termos de desempenho mecânico, que as substituições de 20% e 30%.

Yang e Jiang (2003) mostraram que o uso de uma pequena porcentagem de sílica ativa (6%) e superplastificante no concreto permeável pode aumentar a resistência mecânica significativamente. Os resultados indicaram, ainda, que a sílica ativa possui melhor efeito no melhoramento das propriedades do material do que quando utilizado polímero e superplastificante. Chen *et al.* (2013) avaliaram a resistência mecânica, fratura e fadiga de dois tipos de concreto permeável: o primeiro com materiais cimentícios suplementares e o segundo modificado com polímero. No primeiro caso, foram incorporados sílica ativa e cinza volante, nas variações de 6%, 8% e 10% para sílica ativa, e 14%, 16% e 18% para cinza volante, em relação ao total de materiais cimentícios. Também foi variado a quantidade de aditivo superplastificante e relação água/cimento. Como resultado, tanto o uso de materiais cimentícios suplementares, quanto polímero, foi capaz de obter um concreto permeável de alta resistência mecânica, com valores acima de 35 MPa de resistência à compressão aos 28 dias para todas as misturas avaliadas. De maneira geral, as variações de 6% para 8% de sílica ativa, juntamente com 14% para 16% de cinza volante, não foram ressaltantes. Já as misturas com a incorporação de 10% de sílica ativa e 18% de cinza volante, apresentaram uma queda mais acentuada na resistência mecânica quando comparado as anteriores. Entretanto, é de suma importância ressaltar que, neste trabalho, a variação do total de materiais cimentícios utilizado nas misturas (i.e. soma de cimento Portland, cinza volante, sílica ativa e superplastificante), decrescia conforme o aumento da porcentagem de materiais cimentícios suplementares na mistura. Assim, é admissível que as porcentagens menores destes materiais acabaram acarretando em maiores valores de resistência mecânica, já que o consumo total de materiais cimentícios era maior, ou seja, havia maior consumo de cimento na mistura. Como consequência, torna-se difícil a comparação entre as diferentes misturas de concreto permeável estudadas pelos autores, uma vez que nenhuma variável de consumo foi fixada. Portanto, não se pode afirmar quais das porcentagens de sílica ativa e cinza volante são as mais adequadas para substituição parcial do cimento Portland em misturas de concreto permeável.

No trabalho realizado por Lian e Zhuge (2010), a adição de sílica ativa foi estudada nos valores de 7% e 10% em misturas de concreto permeável. Na mistura com 10%, a relação água/cimento foi de 0,36, sem a utilização de aditivo superplastificante. Já na mistura com 7%, a relação água/cimento foi de 0,28, com 0,8% de aditivo superplastificante. Os autores não justificam a

escolha das variáveis adotadas. A resistência à compressão média destas amostras foi de 22 MPa e 24,3 MPa, respectivamente. Os autores mencionam que, adicionando uma pequena quantidade de superplastificante nas misturas contendo sílica ativa, a trabalhabilidade e a resistência à compressão das amostras foram amplamente melhoradas. A mistura contendo 10% de sílica ativa, não foi avaliada para a mesma relação água/cimento e aditivo superplastificante. Na sequência, outras duas misturas com 7% de sílica ativa e 0,8% de aditivo foram estudadas: uma com a incorporação de areia convencional (quartzosa) e a segunda com a incorporação de partículas de dolomita (mesmo agregado graúdo utilizado) nas frações de 4,75-2,36 mm, ambas adicionadas no valor de 18%. Concluiu-se que o uso de areia aumenta a resistência à compressão do concreto permeável, sendo melhor que o uso de uma graduação densa de agregado. Em uma outra sequência do trabalho, foram variadas as relações água/cimento do traço de melhor desempenho (i.e., 7% de sílica ativa, 0,8% de aditivo e 18% de areia). Neste caso, os autores concluíram que relações água/cimento menores que 0,30 não são recomendadas, pois a sílica ativa e areia utilizadas não conseguem se combinar uniformemente com as partículas do cimento. Entretanto, os autores não avaliaram a variação/aumento do aditivo superplastificante neste caso, o que poderia facilitar a dispersão dos materiais.

Hesami *et al.* (2014) avaliaram o efeito de cinza de casca de arroz e fibras nas propriedades mecânicas do concreto permeável. As substituições parciais do cimento Portland variaram de 2%, 4%, 6%, 8%, 10% e 12% em massa. As relações água/cimento também foram variadas entre 0,27, 0,33 e 0,40. A porcentagem ótima de cinza de casca de arroz sem a presença de fibras foi de 8%, enquanto que, com a presença de fibras, essa quantidade se estende entre as porcentagens de 8% e 10%. As misturas com relação água/cimento de 0,33 também apresentaram os melhores resultados. Entretanto, vale ressaltar que a quantidade de aditivo não variou conforme a alteração na relação água/cimento, o que pode ter prejudicado a trabalhabilidade e a resistência mecânica das amostras. Em suma, os valores de resistência mecânica dos melhores traços atingiram até 30 MPa para resistência à compressão, e mais de 4 MPa para resistência à tração na flexão. A porosidade obtida para as amostras com relação água/cimento de 0,27 foram, em média, maiores que as obtidas para a relação água/cimento de 0,33. Tal fato evidencia que, possivelmente, a falta de aditivo nas misturas com menor relação água/cimento prejudicou a dispersão da mistura acarretando na maior porosidade.

De maneira geral, a incorporação de materiais cimentícios suplementares como substituição parcial ao cimento Portland não alteram as propriedades hidrológicas do concreto permeável de maneira ressaltante como ocorre na consequência de incorporação de areia, principalmente nas



frações mais finas. A utilização desses materiais nas proporções ideais costuma aumentar a resistência da zona de transição (ZT) entre a pasta e a o agregado, gerando a modificação do modo de ruptura do material, conforme mostra a Figura 5.

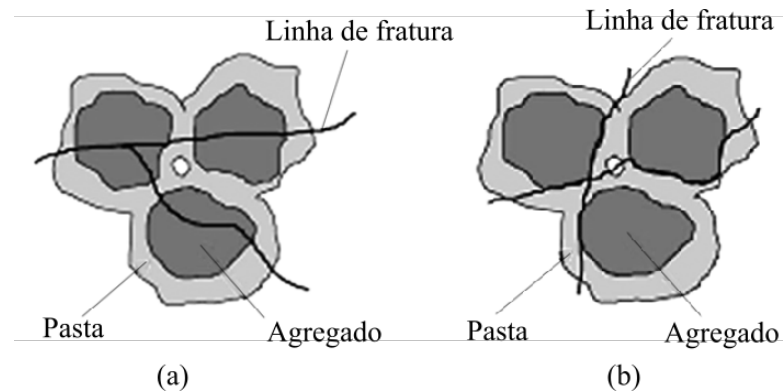


Figura 5 – Modo de ruptura do concreto permeável: concreto permeável de alta resistência (a) e concreto permeável de baixa resistência (b) (adaptado de CHEN *et al.*, 2012).

### 2.3.3 Aditivos

Conforme já evidenciado nos estudos relatados nos itens anteriores, aditivos são comumente utilizados na confecção do concreto permeável. Como o concreto permeável possui abatimento (*slump*) zero, o uso de aditivos se faz necessário para aumentar a trabalhabilidade do material sem aumentar o consumo de água na mistura (CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2016). A maioria dos estudos tem usado aditivo redutor de água e superplastificante. Entretanto, ACI (2010) sugere o uso de diferentes tipos de aditivos. Aditivos retardadores de pega são utilizados para controlar e estabilizar o processo de hidratação do cimento em misturas rígidas, como o concreto permeável. O uso de tais estabilizadores de hidratação do cimento auxilia no prolongamento do tempo de trabalho da mistura, e aditivos modificadores de viscosidade também podem ser usados para aumentar a trabalhabilidade. Com o uso de múltiplos aditivos em qualquer mistura de concreto, é recomendado que diversos testes sejam conduzidos no intuito de verificar problemas de incompatibilidade e se as propriedades desejadas no estado fresco e endurecido são atingidas.

Atualmente, está disponível no mercado aditivos que contemplam uma série de funções contidas em um mesmo produto. Uma nova tecnologia de aditivo modificador de reologia próprio para concreto permeável, confere uma melhora na reologia da pasta e no controle da hidratação dos materiais cimentícios, não sendo necessário a combinação de outros aditivos. Como vantagem, o produto confere melhor trabalhabilidade, aumenta o tempo de manuseio da

mistura e facilita o processo de compactação. A utilização do aditivo foi aplicada em trabalhos mais recentes, como o de Rangelov *et al.* (2016).

É importante ressaltar que a quantidade de água e aditivo é um fator extremamente delicado na mistura de concreto permeável. A quantidade certa de água e aditivo pode contribuir no aumento da resistência mecânica, pois está diretamente relacionada com a maneira adequada em que mistura é “acomodada” e dispersada, garantindo a porosidade projetada. No entanto, caso a mistura apresente excesso de fluidez por uma maior quantidade de água adicionada, o concreto permeável pode apresentar menor porosidade total devido à acomodação da amostra, mas com enfraquecimento da zona de transição devido ao excesso de porosidade na interface pasta/agregado. Isto indica que nem sempre o concreto com menor porosidade fornecerá a maior resistência mecânica, uma vez que a zona de transição na interface pasta/agregado pode estar prejudicada, tornando-se mecanismo de fratura.

#### 2.3.4 Fibras

A inclusão de fibras no concreto permeável tem sido avaliada em alguns estudos cujo foco é o aumento das propriedades mecânicas do material. Entretanto, assim como os materiais cimentícios suplementares, as fibras não desempenham de maneira similar, do que quando adicionadas ao concreto convencional. Há, ainda, divergências quanto ao comprimento ideal de fibra a ser utilizado no concreto permeável. Segundo ACI (2010), um projeto testando fibras sintéticas pela *SI Concrete System*<sup>2</sup>, avaliou que fibras entre 40 e 50 mm foram mais efetivas em conferir tenacidade ao concreto permeável. Por outro lado, no trabalho realizado por Kevern *et al.* (2008), fibras de polipropileno fibriladas de comprimento entre 12,7-19,1 mm apresentaram melhor desempenho mecânico (em termos de resistência à compressão e tração por compressão diametral) e permeabilidade, do que fibras de comprimento de 50 mm. Estes resultados foram obtidos para as misturas sem incorporação de areia. Já em relação à combinação de areia e fibras de ambos os comprimentos, os resultados não se mostraram, de maneira geral, positivos. Em resumo, as amostras contendo somente areia, foram melhores do que as amostras que continham ambos (areia e fibras). Entretanto, é importante frisar que neste trabalho não foi feita uma análise estatística que comprovasse se a diferença entre as amostras foi significativa.

---

<sup>2</sup> SI Concrete Systems, 2002, “Fiber-Reinforced Pervious Concrete,” Project 2120-36, Chanttanooaga, TN, Oct. 25.

No estudo realizado por Wu *et al.* (2011), a adição de fibras não mostrou efeito significativo nas propriedades mecânicas ou resistência à abrasão do concreto permeável. As fibras utilizadas foram de polipropileno monofilamento com comprimento de 19 mm, e a quantidade de fibras adicionada foi de 0,9 kg/m<sup>3</sup>. Huang *et al.* (2010), também avaliaram misturas com fibra de polipropileno (20 mm) na mesma proporção, porém fibriladas, com e sem a incorporação de areia em diferentes dosagens. Como resultado, as fibras também não apresentaram efeito significativo nas propriedades mecânicas das misturas estudadas.

Hesami *et al.* (2014), estudaram, além da incorporação de cinza de casca de arroz conforme já mencionado no item 2.3.2, a incorporação de diferentes tipos de fibras e teores. Os autores incorporaram, em volume, 0,2% de fibra de vidro (12 mm), 0,5% de fibra de aço (36 mm) e 0,3% de fibra de sulfureto de polifenileno (PPS) (50-54 mm). O aumento da resistência à flexão, não se mostrou significativo, considerando que nenhuma análise estatística foi realizada neste trabalho. Por outro lado, na resistência à compressão, as amostras contendo 8% de cinza de casca de arroz, tiveram um aumento de, aproximadamente, 17 MPa para 25 MPa, para todas as fibras utilizadas. Os autores não justificaram a escolha dos tipos de fibras e quantidade adotadas. Além disso, a utilização de fibras de aço no concreto permeável não é recomendada, dado a suscetibilidade de corrosão do material nesta situação. Bonicelli *et al.* (2016), também estudaram o efeito de diferentes tipos de fibras no concreto permeável, isto é, fibras de polipropileno (19 mm, fibrilada não estrutural), fibras de poliolefina (19 mm, monofilamento com função estrutural), fibras de polipropileno/polietileno (12 mm e 18 mm, monofilamento não-estrutural) e fibras de polipropileno de elevada tenacidade (20 mm, monofilamento com função estrutural). As quantidades de cada fibra não foram mencionadas no texto. Outras duas misturas com 5% e 10% de adição de areia média foram analisadas. Em resumo, não houve diferença nos resultados de tração por compressão diametral entre as amostras contendo fibras e as amostras contendo areia (10%). No entanto, a adição de 10% de areia resultou numa diminuição da permeabilidade quando comparado a mistura com fibra.

Rehder *et al.* (2014), avaliaram fibras de polipropileno em comprimento e proporções maiores, ou seja, 54 mm, e 0,5% e 1,0% em relação ao volume total da mistura. A fratura do concreto permeável em diferentes porosidades, como uma função das características da estrutura de poros e incorporação de fibras foram estudadas. Como conclusão, as fibras não influenciaram a resistência à compressão. A contribuição das fibras foi maior em relação a capacidade residual na flexão, para porosidades maiores.

Um material compósito de fibra de carbono (*cured carbon fiber composite material – CCFCM*) foi estudado em diferentes proporções por Rangelov *et al.* (2016). O processamento do material resultou em partículas de diferentes comprimentos que foram aplicadas como reforço em misturas de concreto permeável. Quatro diferentes tamanhos dos elementos CCFCM (combinado, grande, médio e pequeno) foram incluídos no experimento. A incorporação do material variou de 0,5%, 1,0% e 1,5% em relação ao volume total da mistura de concreto permeável. Os resultados mostraram que as misturas contendo frações combinadas e média, na quantidade de 1,5%, acarretaram em um pequeno aumento da resistência à compressão e tração por compressão diametral.

Diante do descrito, é possível notar que o efeito das fibras no concreto permeável é complexo e depende de diversos fatores. A falta de trabalhabilidade da mistura pode influenciar na dispersão das fibras, causando sua aglomeração durante o processo de mistura. A falta de pasta/argamassa também acaba proporcionando falta de ancoragem. Assim, diante dos ensaios mecânicos, as fibras acabam sendo arrancadas, não acarretando no incremento de resistência para o concreto permeável. A quantidade de areia a ser colocada na mistura, para aumentar a ancoragem da fibra, é limitado e pode alterar significativamente as funções hidráulicas do material. Diante disso, o uso da fibra e areia no concreto permeável deve ser estudado com maior enfoque, considerando as infiltrações mínimas exigidas conforme o local de aplicação.

### 2.3.5 Polímeros

Os polímeros cobrem uma grande variedade de aplicações devido às suas múltiplas peculiaridades e do potencial de proporcionar resistência e durabilidade. A utilização de polímeros no concreto permeável tem sido foco de algumas pesquisas com o intuito de aumentar a ponte de ligação entre o cimento e o agregado graúdo e conferir maior desempenho mecânico e ductilidade ao material. Yang e Jiang (2003) publicaram um dos primeiros trabalhos relacionados ao uso de polímeros no concreto permeável. Os autores utilizaram o copolímero de etileno e acetato de vinila (EVA) e o poli(álcool vinílico), nas dosagens de 15% e 30%, respectivamente; ambos em relação à porcentagem de ligante. Neste trabalho também foi avaliado a incorporação de sílica ativa, conforme já mencionado no item 2.3.2. Os autores mencionam que tanto o uso de sílica ativa quanto polímero pode contribuir positivamente nas propriedades mecânicas do material. Entretanto, o custo dos polímeros é alto devido à alta porcentagem utilizada. Com a utilização de 6% de sílica ativa, foi possível obter resistência à compressão maior que a mistura com poli(álcool vinílico) e próxima a mistura com EVA.

Adicionalmente, a mistura com EVA diminuiu a permeabilidade do concreto permeável de forma significativa em relação as demais misturas. Assim, a mistura com sílica ativa apresentou-se mais viável em termos econômicos e de desempenho (mecânico e hidráulico).

Huang *et al.* (2010) incorporaram o polímero estireno butadieno (SBR) em misturas de concreto permeável com o intuito de aumentar a resistência mecânica. O trabalho contou, ainda, com a inclusão de areia natural e fibra nas misturas. Ambos os usos de látex (polímero) e areia acabaram gerando a diminuição da porosidade e permeabilidade do concreto permeável. Entretanto, apenas a adição de látex foi capaz de aumentar a resistência à tração por compressão diametral. Neste trabalho, os autores concluíram que as fibras não apresentaram efeito significativo nas propriedades mecânicas das misturas, conforme já mencionado no item 2.3.4. Porém, nenhuma análise estatística foi realizada no trabalho. Wu *et al.* (2011) avaliaram o efeito do látex com foco na resistência à abrasão. O polímero utilizado também foi o SBR. Da mesma maneira, os autores incorporaram fibras de polipropileno e areia natural. A adição de látex também aumentou a resistência das amostras, com diminuição das propriedades hidráulicas, enquanto que as fibras não apresentaram efeito significativo.

No trabalho de Chen *et al.* (2013), o concreto permeável foi estudado com o uso de materiais cimentícios suplementares mais superplastificante, e, também, modificado polimericamente com um polímero denominado SJ-601. A composição química do material não foi informada. Conforme já mencionado no item 2.3.2, elevadas resistências mecânicas podem ser atingidas com ambos os materiais. Os autores enfatizam que, para ambos os casos, a porosidade é a variável que afeta a resistência à compressão.

Giustozzi (2016) avaliou quatro tipos diferentes de polímeros nas propriedades do concreto permeável: dois tipos de copolímero de estireno-butadieno de diferentes pH e densidade, homopolímero acetato de vinila e copolímero etileno acetato de vinila. A relação polímero/cimento estudadas variaram de 0,05 e 0,010, com exceção do copolímero de etileno vinil-acetato (único na forma de pó), que foi de 0,01. A relação água/cimento também foi variada entre 0,30 e 0,35. Os resultados mostraram que as misturas modificadas com polímero aumentaram a resistência mecânica, bem como a resistência ao deslizamento e a ciclos de gelo e degelo. Dentre eles, o homopolímero de acetato de vinila se mostrou a melhor opção. Entretanto, foi relatado que os polímeros promovem o retardo da hidratação do cimento, desenvolvendo a resistência, portanto, em longo período de cura. Por fim, os autores também avaliaram as misturas adicionando-se 5% de areia (em relação ao conteúdo total de agregados),

as quais se mostraram eficientes no aumento da resistência mecânica e, particularmente, melhores que as misturas somente com polímeros. Entretanto, problemas de drenagem e baixa porosidade puderam ser observados quando adicionado areia.

Wu *et al.* (2016) analisaram misturas de concreto permeável contendo látex EVA, aditivo incorporador de ar e fibras. Como resultados, as misturas contendo látex foram capazes de atingir maior resistência mecânica e ao processo de gelo e degelo. A mistura contendo ambos látex e fibra não apresentou aumento significativo na resistência à compressão e na resistência à tração por compressão diametral, em relação a mistura contendo somente látex. Neste trabalho a quantidade de fibras de polipropileno adicionadas foi de 0,70 kg/m<sup>3</sup>, representando um valor menor em relação ao utilizado nos trabalhos mencionados anteriormente.

### 2.3.6 Sumário de características do concreto permeável e contribuições

A Tabela 3 sintetiza alguns dos materiais incorporados no concreto permeável discutidos nos subitens anteriores e as principais contribuições obtidas pelos diversos pesquisadores.

Tabela 3 – Sumário de características do concreto permeável e contribuições.  
(continua)

Ano	Autor	Parâmetro estudado	Contribuição
2003	Yang e Jiang	Agregado de pequena dimensão Sílica ativa Superplastificante	Sílica ativa por aumentar a resistência à compressão (~50 MPa) sem perda da permeabilidade a água
2010 2011	Huang <i>et al.</i> Wu <i>et al.</i>	Tamanho do agregado Modificado polimericamente Fibra de polipropileno	2010: Uso combinado de látex, areia e fibras pode melhorar a resistência e as propriedades de drenagem do concreto permeável 2011: Melhora na resistência à compressão (25 MPa) e abrasão
2013	Chen <i>et al.</i>	Tamanho do agregado Latex (SJ-601) Sílica ativa Cinza volante	Resistência à compressão elevada (32-46 MPa) Concreto permeável modificado polimericamente apresenta maior vida de fadiga do que o concreto permeável com materiais cimentícios suplementares, já que os polímeros ajudam a reduzir a fissuração.
2014	Hesami <i>et al.</i>	Agregado (2.36-19 mm) e areia Cinza da casca de arroz Superplastificante (Glenium) Fibras: PPS, aço e vidro	Misturas com fibras de PP são melhores que as demais (30 MPa) a/c ótima = 0.33 CCA ótima = 8-10%
2015 2016	Zhong e Wille	Tamanho do agregado Sílica ativa e microsíllica Superplastificante	Elevada resistência à compressão (65 MPa) Todas HPPC series demonstraram aumento na resistência à compressão, mantendo uma condutividade hidráulica acima de 1 mm/s.

Tabela 3 – Sumário de características do concreto permeável e contribuições.  
(continuação)

Ano	Autor	Parâmetro estudado	Contribuição
2016	Bonicelli <i>et al.</i>	Fibras PP (12, 18, 19 e 20 mm) Areia (5% e 10%)	Não houve diferença nos resultados de tração por compressão diametral entre as amostras contendo fibras e as amostras contendo areia (10%). Adição de 10% de areia diminuiu a permeabilidade quando comparado as misturas com fibra.
2016	Giustozzi	4 tipos de polímero 5% de areia	As misturas modificadas com polímero aumentaram a resistência mecânica. Os polímeros promovem o retardo da hidratação do cimento, desenvolvendo a resistência em longo período de cura. Areia aumenta resistência mecânica (maior que os polímeros), entretando acarreta em problemas de drenagem.
2018	Mohammed <i>et al.</i>	Nano-silica Cinza volante	A incorporação de nano-silica aumentou a resistência à compressão sem alteração da porosidade e permeabilidade. Entretanto, a trabalhabilidade foi afetada.

FONTE: Autora (2018).

## 2.4 DOSAGEM E MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO

Os parâmetros de dosagem e método de compactação, seja *in loco* ou em laboratório, variam bastante entre pesquisas publicadas, cujo foco é a avaliação das propriedades do concreto permeável, sejam, ainda, hidráulicas ou mecânicas. Este fato ocorre, justamente, pela ausência de normas e procedimentos técnicos que padronizem tais métodos.

Nos itens a seguir serão discutidos os parâmetros de dosagem e os métodos de compactação utilizados com base uma série de referências internacionais. Estes itens têm, portanto, o objetivo de subsidiar e justificar a escolha dos procedimentos a serem adotados no programa experimental desta tese.

### 2.4.1 Parâmetros de dosagem

As misturas de concreto permeável são proporcionadas para atingir um valor projetado de porosidade, no intuito de garantir um balanço entre a capacidade de armazenamento de água do pavimento e suas propriedades mecânicas desejadas (ACI, 2010). Os diferentes métodos de dosagem e proporção de mistura para o concreto permeável encontrados em artigos científicos e recomendações técnicas, são baseados em princípios divergentes, porém com as mesmas variáveis de resposta. Alguns métodos atuais usados para a dosagem do concreto permeável

incluem: método do *American Concrete Institute* (ACI, 2010), método de Zouaghi (ZOUAGHI, 2002), método de Zheng *et al.* (ZHENG *et al.*, 2012), método de Nguyen *et al.* (NGUYEN *et al.*, 2014) e o método de Taguchi (JOSHAGHANI *et al.*, 2015). Dentre os diferentes parâmetros abordados nestes métodos, alguns deles não consideram fatores de suma importância, como a relação água/cimento (a/c) e o efeito da compactação nas propriedades do material. Isso acarreta, portanto, na aplicação de proporções de mistura não-padronizadas. No entanto, o princípio mais comum no projeto da mistura é, sumariamente, fornecer quantidade de pasta de cimento suficiente para os agregados. A Tabela 4 mostra os parâmetros de entrada e as variáveis obtidas como resposta para cada método citado.

Tabela 4 – Parâmetros de entrada e saída (variáveis obtidas) dos diferentes métodos de dosagem para o concreto permeável.

Método	Parâmetros de entrada	Variáveis obtidas
ACI (2010)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relação água/cimento</li> <li>- Relação b/b<sub>0</sub> <sup>(a)</sup></li> <li>- Volume de pasta</li> <li>- Porosidade</li> <li>- Propriedades físicas dos agregados</li> </ul>	CONSUMO: - Cimento - Água - Agregados
Zouaghi (2002)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Porosidade</li> <li>- Propriedades físicas dos agregados</li> </ul>	
Zheng <i>et al.</i> (2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permeabilidade</li> <li>- Propriedades físicas dos agregados</li> <li>- Resistência à compressão desejada</li> </ul>	
Nguyen <i>et al.</i> (2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Porosidade</li> <li>- Propriedades físicas dos agregados</li> <li>- Coeficiente <i>k</i> <sup>(b)</sup></li> </ul>	
Taguchi (2015)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Propriedades físicas dos agregados</li> <li>- Relação água/cimento</li> <li>- Porcentagem de pasta de cimento</li> </ul>	

<sup>(a)</sup> Relação determinada conforme ASTM C29/C29M<sup>3</sup> utilizada para compensar os efeitos de forma dos agregados, granulometria e densidade.

<sup>(b)</sup> Relação adimensional entre as dimensões do agregado e a espessura da pasta de cimento.

FONTE: Autora (2018).

As variáveis de entrada para os diferentes métodos apresentados na Tabela 4 podem não ser suficientes para obtenção das propriedades físicas e mecânicas desejadas, já que a energia de compactação e o procedimento adotado podem influenciar de maneira negativa na porosidade final e, conseqüentemente, na resistência mecânica. Dessa forma, segundo ACI (2010), o processo de desenvolvimento das proporções de mistura para o concreto permeável é sucessivamente repetido através de esforços de tentativa e erro. Por exemplo, uma série de

<sup>3</sup> AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate. ASTM C29/C29M, West Conshohocken, PA, 2017.



experimentos devem ser realizados em laboratório para que então possam ser testados em campo, de forma a garantir o desempenho e o comportamento esperado. No geral, a filosofia abrangente de dosagem de mistura para o concreto permeável é alcançar o equilíbrio entre a porosidade (vazios), resistência, conteúdo de pasta e trabalhabilidade.

Em relação as diferentes proporções de misturas comumente utilizadas por diversos pesquisadores, Chandrappa *et al.* (2016) mencionam os consumos de materiais entre os anos de 1995 e 2014. Os autores evidenciam que o consumo de agregado utilizado entre os diferentes trabalhos varia de 1400 kg/m<sup>3</sup> a 1800 kg/m<sup>3</sup>, com uma relação de agregado para cimento de 4:1 a 12:1. O consumo de cimento varia entre 300 kg/m<sup>3</sup> a 495 kg/m<sup>3</sup>. Adicionalmente, a relação água/cimento varia entre 0,20 e 0,42, faixa inferior quando comparada ao concreto convencional.

A relação água/cimento é um fator muito importante na obtenção das propriedades desejadas do concreto permeável, tais como a porosidade e a resistência mecânica. Uma relação água/cimento elevada reduz a adesividade da pasta com o agregado e causa a fluidez da pasta para entre os vazios da amostra, mesmo quando levemente compactada. Por outro lado, uma relação água/cimento muito baixa pode impedir a distribuição uniforme da pasta de cimento e acarretar na redução da resistência e da durabilidade do concreto permeável. Tais fatores podem ser evidenciados na Figura 6. Portanto, a correlação convencional entre a relação água/cimento e a resistência à compressão para o concreto convencional não se aplica ao concreto permeável (ACI, 2010).

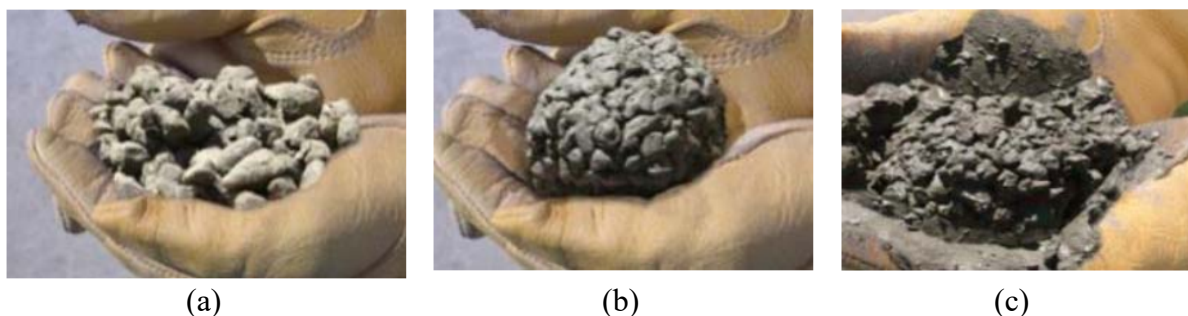


Figura 6 – Concreto permeável com relação a/c muito baixa (a), apropriada (b) e muito elevada (c) (AMDE e ROGGE, 2013).

#### 2.4.2 Métodos de compactação: laboratório vs. *in loco*

Embora a proporção de mistura seja um fator contribuinte importante, a energia e o método de compactação também afetam diretamente a porosidade (DEO e NEITHALATH, 2010), entre

outras propriedades, conforme mencionado. Segundo Ibrahim *et al.* (2014), é importante enfatizar que a porosidade desejada é alcançada por ambos os fatores, ou seja, controlando as proporções de mistura e propriedades, bem como controlando o nível de compactação.

Os métodos convencionais utilizados para o adensamento do concreto convencional não são recomendados para o uso em misturas de concreto permeável, uma vez que estes métodos podem não ser representativos (condição *in loco*) e consistentes. O método de compactação usando a haste de adensamento para concreto convencional, foi relatado como não apropriado para corpos de prova de concreto permeável (HASELBACH e FREEMAN, 2006). Ainda assim, é possível encontrar diferentes pesquisas utilizando este método. É importante frisar que, atualmente, não existem normas técnicas para avaliar a resistência à compressão e à tração na flexão de corpos de prova de concreto permeável, não havendo, portanto, procedimentos técnicos padronizados para a confecção das amostras em laboratório.

A compactação do concreto permeável, *in loco*, requer métodos alternativos aos utilizados na construção de pavimentos de concreto convencional. Conforme indicado em manuais de aplicação, tais como ACI (2010) e *Permeable Pavements: Recommended Design Guidelines* (ASCE, 2013), a compactação do concreto permeável deve ser feita através de rolo (Figura 7) aplicado na última camada do pavimento, já que o material apresenta abatimento (*slump*) próximo de zero. Neste contexto, muitos trabalhos científicos têm analisado, como alternativa de representação prática, a moldagem de placas de concreto permeável, compactados com rolo, no qual faz-se a extração de amostras cilíndricas para avaliação de suas propriedades hidráulicas e mecânicas. Entretanto, é necessário considerar os procedimentos para confecção do concreto permeável tanto na prática quanto em laboratório. Uma grande quantidade de estudos tem comparado as propriedades de corpos de prova moldados em laboratório com amostras extraídas do campo. Os métodos de moldagem em laboratório incluem pressão pneumática, mesa vibratória, compactador Marshall, compactação à mão, etc. A Tabela 5 sumariza os métodos utilizados e as principais contribuições.

Segundo Gaedicke *et al.* (2014), embora as pesquisas realizadas citadas na tabela, o método que melhor representa as propriedades do concreto permeável *in loco* varia de acordo com as características da mistura, desde o conteúdo de pasta, tipo de agregado e dimensão, até as próprias condições de compactação utilizadas em campo. Consequentemente, um método para comparar efetivamente corpos de prova cilíndricos moldados *vs.* extraídos é necessário para

controlar adequadamente a qualidade e atingir a performance do concreto permeável moldado no campo.

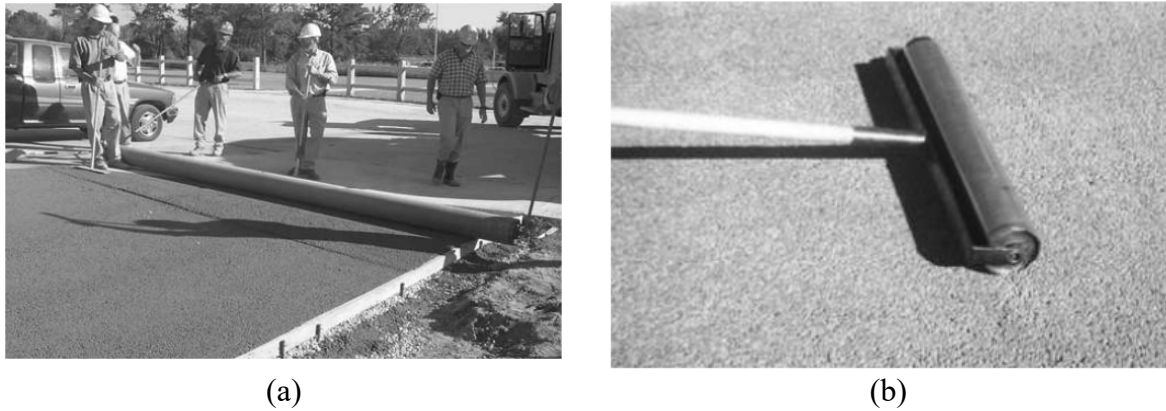


Figura 7 – Exemplo de compactação do concreto permeável com rolo – dimensão de 3,7 m e massa de 227 kg (a); e exemplo de rolo pequeno (32 kg) usado para compactar áreas menores (b) (ACI, 2010).

Tabela 5 – Técnicas de compactação utilizadas na literatura.

Referência	Método de compactação	Observações
Rizvi <i>et al.</i> (2009)	- Haste: 3 camadas de 25, 15 e 5 golpes - Proctor: 2 camadas de 20 e 10 golpes	Amostras compactadas com 10 golpes com o Proctor hammer por camada mostraram resultados mais consistentes (i.e., próximo às propriedades obtidas <i>in loco</i> ).
Mahboub <i>et al.</i> (2009)	- Prensa pneumática (0,007 MPa): 1 camada - Haste: conforme ASTM C192	O método tradicional com haste para corpos de prova cilíndricos de concreto permeável, não representam as condições obtidas com o rolo.
Brown (2010)	- Haste: 3 camadas de 25 golpes - Largar o molde a uma altura de 50 mm: conforme ASTM C29 - Compactação por porcentagem de volume - Método da massa vs. volume	O método da massa vs. volume apresenta resultados mais consistentes.
Putman e Neptune (2011)	- Haste: 3 camadas de 10, 15 e 25 golpes - Haste: 2 camadas de 25 golpes - Largar o molde a uma altura de 50 mm: conforme ASTM C 29 - Corpos de prova extraídos usando a mesma técnica <i>in loco</i>	Corpos de prova moldados com haste apresentam maior variabilidade do que os outros métodos. Os corpos de prova extraídos apresentam propriedades mais similares às obtidas <i>in loco</i> .
Gaedicke <i>et al.</i> (2014)	- Proctor: 2 camadas de 5, 10, 20 e 30 golpes - Corpos de prova extraídos de uma placa compactada com rolo (148 kg/m)	Para uma mesma porosidade, os corpos de prova extraídos apresentam menor permeabilidade e resistência à compressão quando comparados aos corpos de prova moldados.

FONTE: adaptado de Gaedicke *et al.* (2014).

De acordo com Chandrappa *et al.* (2016), a *ASTM subcommittee C09.49* propôs a utilização do soquete Proctor (mesmo utilizado para solos) para compactação de corpos de prova cilíndricos tradicionais (10 x 20 cm) em duas camadas, com vinte golpes por camada. No entanto, segundo os autores, o método pode causar a quebra de agregados na face de contato devido ao impacto do Proctor e, ainda, resultar em uma representação imprecisa, uma vez que o método de compactação no concreto permeável *in situ* é feito com rolo apenas na última camada. Por outro lado, o método pode reduzir a dispersão nos resultados devido à diminuição do efeito de porosidade vertical<sup>4</sup> (HASELBACH e FREEMAN, 2006; MARTIN III *et al.*, 2014). Gaedick *et al.* (2014) afirmam que o uso do Proctor para compactar o concreto permeável apresenta resultados mais consistentes. Contudo, ainda não há uma padronização quanto à utilização do Proctor, já que tem sido utilizado de diferentes formas, isto é, usando diferentes tipos de amostras, camadas e golpes (RIZVI *et al.*, 2009; SUMANASOORIYA e NEITHALATH, 2011; PUTMAN e NEPTUNE, 2011; DEO e NEITHALATH, 2011; GAEDICKE *et al.*, 2014; TORRES e RAMOS, 2015).

## 2.5 ESTRUTURA DE POROS

No contexto da aplicação do concreto permeável e diante do exposto até o presente item, é possível notar que as propriedades relacionadas à estrutura de poros do concreto permeável são tão importantes quanto as propriedades mecânicas. Sendo assim, desempenham papel importante na caracterização do material como um sistema de pavimentação sustentável. Conforme apresentado por Chandrappa *et al.* (2016) e dividido nos itens subsequentes, tais propriedades podem ser classificadas como: propriedades de não-transporte (relacionada com o total de poros, tamanho e distribuição) e propriedades de transporte (relacionada com a conectividade dos poros, tortuosidade, capacidade de infiltração e permeabilidade).

### 2.5.1 Porosidade e dimensão dos poros

A porosidade, definida pelo volume de vazios em relação ao volume total da amostra, é a principal característica das propriedades de não-transporte da estrutura de poros do concreto permeável. A ASTM C1688 (2014) e C1754 (2012), dentre as poucas normas específicas para o concreto permeável, são utilizadas para determinar a densidade e o conteúdo de vazios da

---

<sup>4</sup> O efeito de porosidade vertical é influenciado pelo método de compactação, ou seja, corpos de prova compactados apenas na última camada fornecem amostras com menor porosidade na face superior (face compactada) e aumento da porosidade em direção à face inferior do corpo de prova.

amostra no estado fresco e endurecido, respectivamente. Para a determinação da porosidade no estado endurecido, a norma citada não faz menção ao método de compactação a ser utilizado para obtenção do corpo de prova, conforme já mencionado anteriormente. O volume de poros conectados no concreto permeável varia, tipicamente, na faixa de 15-35%, suficiente para facilitar o fluxo de água através da camada de pavimento (TENNIS *et al.*, 2004; ACI, 2010; YAHIA e KABAGIRE, 2014).

Outras propriedades como a variação da porosidade vertical, tamanho dos poros e sua distribuição em misturas de concreto permeável são, ainda, propriedades difíceis de determinar, uma vez que se apresentam de forma aleatória e variada em uma amostra. Algumas técnicas estereológicas e morfológicas podem ser utilizadas para mensurar a distribuição dos poros no concreto permeável, conforme estudado por Neithalath *et al.* (2010). Os autores determinaram, ainda, a porosidade de várias misturas usando métodos volumétricos e de fração de área. Segundo os autores, os tamanhos de poros extraídos de todos os métodos eram relativamente próximos uns dos outros. ACI (2010) menciona que as características associadas ao tamanho dos poros, cuja faixa usual varia de 2 a 8 mm, estão relacionadas ao tipo de agregado, tamanho e distribuição e, ainda, ao método de compactação. Portanto, a estrutura de poros do concreto permeável, no que concerne à tortuosidade e dimensão, acaba tornando-se mais complexa devido à dependência minuciosa dos tipos de materiais e métodos empregados na dosagem e confecção do material.

### 2.5.2 Propriedades de transporte

As propriedades de transporte são as propriedades realmente relacionadas à função do pavimento permeável, isto é, ao transporte da água da superfície até a base do pavimento. A norma ASTM C1701 (2017), também própria para ensaio em concreto permeável, possibilita a medição da capacidade de infiltração de água do pavimento *in loco* através de um anel aderido à superfície (Figura 8). A determinação da taxa de infiltração (mm/h) é uma propriedade importante que é crítica para o gerenciamento das águas pluviais. Este ensaio tem contribuído, ainda, na determinação da redução da capacidade de infiltração do pavimento ao longo do tempo, devido ao efeito de colmatção (entupimento) dos poros, também conhecido como *clogging effect*. Estudos e previsões como esta ainda são uma lacuna de pesquisa, já que envolvem avaliações a longo prazo, dependem do meio no qual é aplicado, suas propriedades e manutenção.



Figura 8 – Ensaio de infiltração em pavimento de concreto permeável – exemplo realizado em vaga de estacionamento no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – LEME (AUTORA, 2018).

A permeabilidade também tem sido considerada no estudo da estrutura de poros do concreto permeável (YANG e JIANG, 2003; HASELBACH *et al.*, 2006; HUANG *et al.*, 2009; LIAN e ZHUGE, 2010; IBRAHIM *et al.*, 2014). O coeficiente de permeabilidade (cm/s) tem sido obtido através do mesmo ensaio realizado para solos, com permeâmetro de carga variável ou constante. Qin *et al.* (2015) evidenciaram que o permeâmetro de carga variável apresenta maiores valores de permeabilidade que o segundo. A diferença foi atribuída à não dependência da pressão aplicada no caso do permeâmetro de carga variável. Na literatura, é mais comum a utilização do primeiro em virtude da sua praticidade.

Chandrappa *et al.* (2016) destaca que a permeabilidade, sendo uma função do tamanho dos agregados, nível de compactação e quantidade de cimento, varia na faixa de 0,1 a 2,0 cm/s. Esta taxa também foi mencionada anteriormente por Haselbach *et al.* (2006), os quais enfatizam ser maior do que a maioria das taxas de precipitação, sendo a superfície do concreto permeável projetada para lidar tanto com a chuva direta, quanto o escoamento superficial. Alguns trabalhos, no entanto, na tentativa de aumentar a resistência mecânica, acabam por reduzir as propriedades hidráulicas do material. No trabalho de Lian e Zhuge (2010), por exemplo, valores de permeabilidade menores que 0,09 cm/s resultaram em concretos permeáveis com porosidades de 16,5% e, para permeabilidades menores que 0,04 cm/s, as porosidades foram inferiores a 8%. Apesar de os valores de resistência à compressão apresentarem-se satisfatórios (entre 23 e 46 MPa), houve perda de funcionalidade hidráulica dos concretos produzidos, considerando

que problemas potenciais de entupimentos dos poros estão suscetíveis neste caso. A Figura 9 apresenta uma compilação feita por Neithalath *et al.* (2010), de relações entre porosidade e permeabilidade reportada em diferentes estudos, no qual é possível notar a grande variabilidade na porosidade para uma mesma mistura.

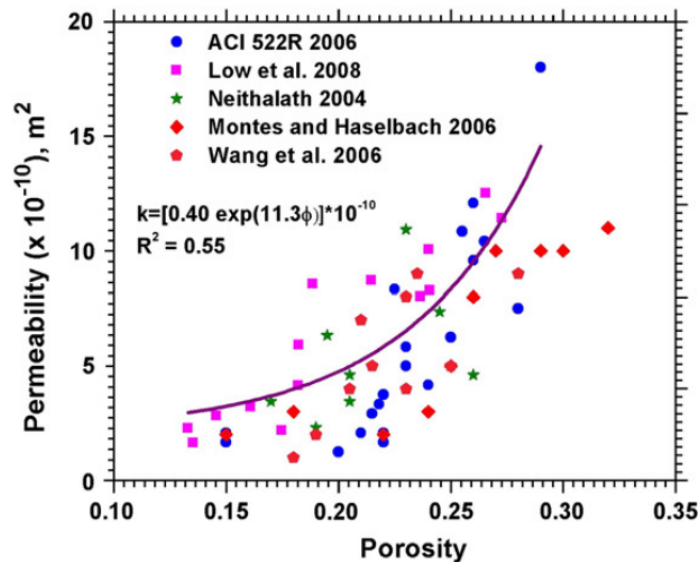


Figura 9 – Relação entre permeabilidade e porosidade para diferentes misturas de concreto permeável (NEITHALATH *et al.*, 2010).

Outro fator importante na consideração das propriedades de transporte, é a influência da variação da porosidade vertical nos resultados de infiltração e permeabilidade de corpos de prova de concreto permeável. Amostras mais compactadas na superfície, tendem a diminuir a capacidade de infiltração, devido à aglomeração do agregado com a pasta de cimento na região. Gaedicke *et al.* (2014), mostrou que os valores de permeabilidade de corpos de prova extraídos eram menores do que os compactados com o Proctor, mesmo quando os valores de porosidade eram os mesmos. As baixas permeabilidades foram associadas ao uso do rolo, o qual tende a aumentar a compactação e gerar baixa permeabilidade na superfície. Na superfície oposta à aplicação do rolo, a permeabilidade tende a ser maior. A diferença na porosidade vertical no concreto permeável também foi reportada por Haselbach e Freeman (2006).

Torres *et al.* (2015) mostraram que a espessura da pasta de cimento é, também, fator importante na permeabilidade e porosidade do concreto permeável. Ambos decrescem com o aumento da espessura da pasta, ou seja, quanto maior a espessura da pasta, menor é o espaço entre os vazios do concreto.

## 2.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE

Nos itens subsequentes serão discutidas as propriedades mecânicas do concreto permeável, as quais incluem resistência à compressão, tração na flexão e fadiga. Estudos relacionados à durabilidade do material, envolvem a resistência à abrasão e, também, ao ciclo de gelo-degelo. Este último, por não fazer parte do escopo desta tese, não será abordado.

### 2.6.1 Comportamento mecânico

A resistência à compressão e tração na flexão do concreto permeável, em virtude de dependerem de outras propriedades como porosidade e compactação, também apresentam grande variabilidade. É importante que, para avaliar tais propriedades, dado o fator mencionado, maiores quantidades de amostras sejam confeccionadas para avaliar uma mesma propriedade, diferentemente do que é feito usualmente para o concreto convencional.

Conforme já mencionado, a resistência mecânica do concreto permeável decresce com o aumento da porosidade. Segundo Chindaprasit *et al.* (2008), para porosidades de 15%, 20% e 25%, a resistência à compressão varia de 38-44, 29-35 e 15-22 MPa, respectivamente. Isto é um indicativo de que a resistência decresce aproximadamente 50% para cada 10% de incremento na porosidade. Há, portanto, um obstáculo atual na obtenção do equilíbrio entre a resistência mecânica e as propriedades hidráulicas do material, sem que o mesmo perca sua finalidade. Outros autores também mencionam a influência de outras variáveis na resistência do concreto permeável. Conforme Crouch *et al.* (2007) a resistência do material é uma função de várias variáveis, sendo mais sensível à relação agregado/cimento do que à relação água/cimento. Porém, ambas devem ser consideradas com cuidado, já que o excesso ou falta de água na mistura trazem grandes consequências, conforme mencionado no item 2.4.1. Ainda, devido ao envolvimento da pasta de cimento, o tipo de agregado também tem um papel significativo no desenvolvimento da resistência do concreto permeável, destaca Lian e Zhuge (2010). Neste sentido, o foco na resistência do agregado e no aumento da resistência da zona de transição entre a pasta e o agregado, pode ser uma solução sem que haja redução da porosidade do material e, também, da necessidade de incremento de agregado miúdo e excesso de compactação.

Atualmente não existem normas para avaliar a resistência mecânica do concreto permeável. Conforme mencionado por Chandrappa *et al.* (2016), a *ASTM Subcommittee C09.49* recomenda, para ensaios de resistência à compressão e tração na flexão, a utilização das mesmas



normas para concreto convencional, isto é, a ASTM C39 (2018) e ASTM C78 (2018), respectivamente. No entanto, segundo o relatório de especificações técnicas da *National Ready Mixed Concrete Association* (NRMCA, 2016), “*Pervious in Practice: Methods, materials, mixtures*”, por não haver normas específicas para o concreto permeável, e os métodos para concreto convencional não se aplicarem, é inadequado especificar requisitos de resistência à compressão ou usar estes testes como base de aceitação. Já a norma brasileira NBR 16416 (2015), a qual estabelece requisitos mínimos exigíveis ao projeto, especificação, execução e manutenção de pavimentos permeáveis de concreto, apresenta os requisitos de resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável (Tabela 6).

Apesar de não haver referência de projeto quanto a resistência, Tennis *et al.* (2004) menciona que os pavimento de concreto permeável colocados corretamente podem alcançar resistências acima de 3000 psi (20,5 MPa) e resistências à flexão de mais de 500 psi (3,5 MPa). Esses valores de resistência são mais do que adequados para a maioria das aplicações de pavimentação de baixo volume de tráfego, incluindo elevadas cargas por eixo para caminhões de lixo e veículos de emergência, como caminhões de bombeiros. Aplicações mais exigentes exigem projetos especiais de mistura, projetos estruturais e técnicas de colocação.

Tabela 6 – Requisitos de resistência de pavimentos permeáveis segundo a NBR 16416 (2015).

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência mecânica característica (MPa)	Método de ensaio
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 35,0^a$	ABNT NBR 9781
	Tráfego leve	80,0		
Peça de concreto permeável <sup>5</sup>	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 20,0^a$	ABNT NBR 9781
	Tráfego leve	80,0		
Placa de concreto permeável <sup>6</sup>	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 2,0^b$	ABNT NBR 15805
	Tráfego leve	80,0		
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 1,0^c$	ABNT NBR 12142
	Tráfego leve	100,0	$\geq 2,0^c$	

<sup>a</sup> determinação da resistência à compressão, conforme na ABNT 9781.

<sup>b</sup> determinação da resistência à tração, conforme na ABNT NBR 15805.

<sup>c</sup> determinação da resistência à tração na flexão, conforme na ABNT NBR 12142.

Fonte: NBR 16416 (2015).

<sup>5</sup> Peça de concreto permeável – componente pré-moldado de concreto permeável, utilizado como material de revestimento em pavimento intertravado e cujo índice de forma é igual ou inferior a 4.

<sup>6</sup> Placa de concreto permeável – componente pré-moldado de concreto permeável, utilizado como material de revestimento em pavimento permeável e cujo índice de forma é superior a 4.

*Índice de forma – relação entre o comprimento e a espessura da peça ou da placa de concreto, descontando a espessura do espaçador.*

## 2.6.2 Fadiga

Embora muitos trabalhos tenham avaliado o comportamento de misturas de concreto permeável com foco, principalmente, na permeabilidade, resistência à compressão e abrasão, estudos limitados voltaram-se à avaliação da fadiga e fratura do concreto permeável. O comportamento à fadiga é importante para pavimentos de concreto, especialmente quando submetidos a um tráfego mais intenso e, ainda, a variações de temperatura sazonal (CHEN *et al.*, 2013), sendo um importante parâmetro de projeto/dimensionamento.

Chen *et al.* (2013) estudaram as propriedades de fadiga de dois tipos de concreto permeável (i.e., com materiais cimentícios suplementares e com polímero) através de ensaios de tração na flexão. Foram utilizadas três relações de tensão (0,90, 0,80 e 0,70), com 10 Hz de frequência. Como resultado, o concreto permeável contendo polímero apresentou melhor desempenho à fadiga do que com materiais cimentícios suplementares para todos os níveis de tensão avaliados. Na Figura 10 é possível observar a comparação realizada pelos autores entre os concretos permeáveis deste estudo (PPC – modificado com polímero; SPC – com materiais cimentícios suplementares), com concreto permeável tradicional, concreto magro e um concreto convencional. O gráfico apresenta uma relação entre  $\ln S$  e  $\ln N$ , onde  $S$  refere-se ao nível de tensão sustentado pelo corpo de prova de concreto, e  $N$  refere-se ao número de ciclos sustentado pelo corpo de prova de concreto. Os dados são apresentados para uma probabilidade de falha de 50%. Observa-se que a curva de fadiga do concreto permeável PPC pode ser comparável ou até maior que a do concreto magro ilustrado, especialmente para baixas relações de tensão.

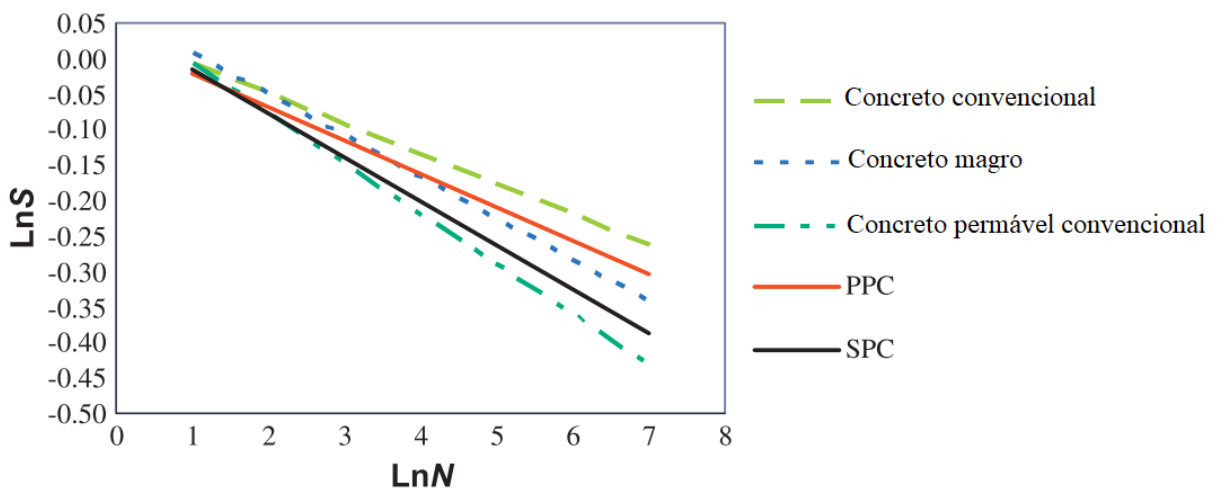


Figura 10 –  $\ln S$ - $\ln N$  de diferentes concretos para 50% de probabilidade de falha (adaptado de CHEN *et al.*, 2013).

Zhou *et al.* (2016) também avaliaram a fadiga do concreto permeável com a incorporação de polímero. Foram utilizados três tipos de agregados graúdos de granulometria uniforme (27,5 mm, 32,5 mm e 37,5 mm) para uma proporção de 1:6 (cimento:agregado) com adição de 10% de polímero em relação a massa de água. Um número total de 65 vigas de 150 mm x 150 mm x 550 mm foram confeccionadas para cada tipo de mistura. O ensaio de fadiga foi realizado através do ensaio de tração na flexão. A vida de fadiga (número de ciclos suportados pelo material) foi obtida para diferentes relações de tensão (0,65, 0,70, 0,75, 0,80 e 0,85). A frequência utilizada foi de 15 Hz. Os estudos indicam que a distribuição estatística da vida de fadiga seguiu aproximadamente a distribuição de dois parâmetros de Weibull. De acordo com a equação de fadiga, a vida de fadiga para o nível desejado da probabilidade de falha pôde ser adquirida. Quanto menor a probabilidade de falha (maior probabilidade de sobrevivência) menores valores de cargas aplicadas suportadas pelo material eram obtidas. Em suma, a classificação da vida de fadiga, considerando uma probabilidade de falha de 50%, foi melhor quanto menor o tamanho do agregado utilizado.

### 2.6.3 Abrasão

Devido a exposição dos agregados no concreto permeável, a resistência à abrasão de pavimentos de concreto permeável é um importante fator no entendimento da durabilidade ao longo da vida útil do pavimento. Segundo Dong *et al.* (2013), a resistência à abrasão do concreto permeável pode ser estudada através de três métodos: Cantabro, teste de abrasão de roda carregada, e teste de abrasão superficial. Os autores avaliaram o uso de fibra e látex no concreto permeável em relação aos três ensaios citados, no qual a combinação de látex e fibra mostrou resistência à abrasão superior para os diferentes métodos. Gaedicke *et al.* (2014) estudaram a resistência à abrasão do concreto permeável com diferentes tipos de agregados, através dos ensaios de Cantabro e abrasão superficial. As misturas de concreto permeável feitas com cascalho apresentaram menor resistência à abrasão devido a baixa aderência entre o agregado e a pasta de cimento. Adicionalmente, as misturas de concreto permeável feitas com agregado reciclado mostraram melhores resultados de resistência à abrasão, fato atribuído à melhora da zona de transição interfacial. No geral, em ambos os estudos (DONG *et al.*, 2013; GAEDICKE *et al.*, 2014), foi evidenciado que o teste Cantabro e o teste de abrasão superficial resultaram em baixo e alto coeficiente de variação nos resultados, respectivamente.

Atualmente a norma americana ASTM C1747 (2013) é a norma referente para determinação da degradação do concreto permeável devido ao impacto e à abrasão. O teste requer a utilização

do método Cantabro para abrasão, no qual a perda de massa do concreto permeável no estado endurecido é medida após 500 revoluções, expressa em porcentagem em relação a massa inicial. Outros estudos têm utilizado o método da ASTM C944 (2012) para medir a abrasão superficial do concreto permeável (KEVERN e FARNEY, 2012; BRAKE *et al.*, 2016; RANGELOV *et al.*, 2016; ZAETANG *et al.*; 2016). Este método consiste na utilização de um cortador rotativo e um dispositivo de perfuração, com uma bucha capaz de prender e rodar o cortador de abrasão a uma velocidade de 200 rpm na superfície de uma amostra. As diferenças de massas (inicial e final) também são determinadas em porcentagem. No entanto, Chandrappa *et al.* (2016) mencionam que não houve sucesso com a utilização deste método na distinção entre os diferentes tipos de misturas de concreto permeável, devido à perda relativamente baixa nas massas pela ação da abrasão apenas. Ainda assim, o teste é mais representativo do desgaste abrasivo do pavimento sob tráfego de veículos do que o Cantrabro.

O método do Cantabro foi utilizado por Shu *et al.* (2011) para comparar amostras de campo (moldadas e extraídas) com os corpos de prova confeccionados em laboratório. As misturas, feitas tanto em laboratório quanto as retiradas de campo, apresentaram uma perda de massa menor que 20%. A comparação entre o teste Cantabro com os resultados obtidos de número de vazios e resistência mecânica, mostraram que para as misturas com maior quantidade de vazios e menor resistência, a perda de massa no ensaio de abrasão foi maior. Além disso, as amostras extraídas de campo obtiveram maiores perda de massa do que as moldadas em campo devido à maior porosidade e menor resistência.

## 2.7 CRITÉRIOS PARA O PROJETO E DIMENSIONAMENTO

Os pavimentos permeáveis, por servirem como um meio de gestão de águas pluviais e uma superfície de apoio de cargas, devem ser dimensionados para tal. Assim, quando projetado um sistema de pavimento permeável, ambos requisitos estruturais e hidrológicos devem ser considerados. Conforme ASCE (2013), a espessura do pavimento permeável e da camada de reservatório de água deve ser dimensionada para suportar cargas estruturais, solos saturados, e para temporariamente armazenar o volume de água das chuvas. Cada componente deve ser especificado em relação ao tipo de pavimento, uso, região, condições do local, e objetivos do uso do pavimento. Não há uma única especificação que contemple todas as propostas. O fluxograma da Figura 11 apresenta uma análise do processo do projeto estrutural e hidrológico.

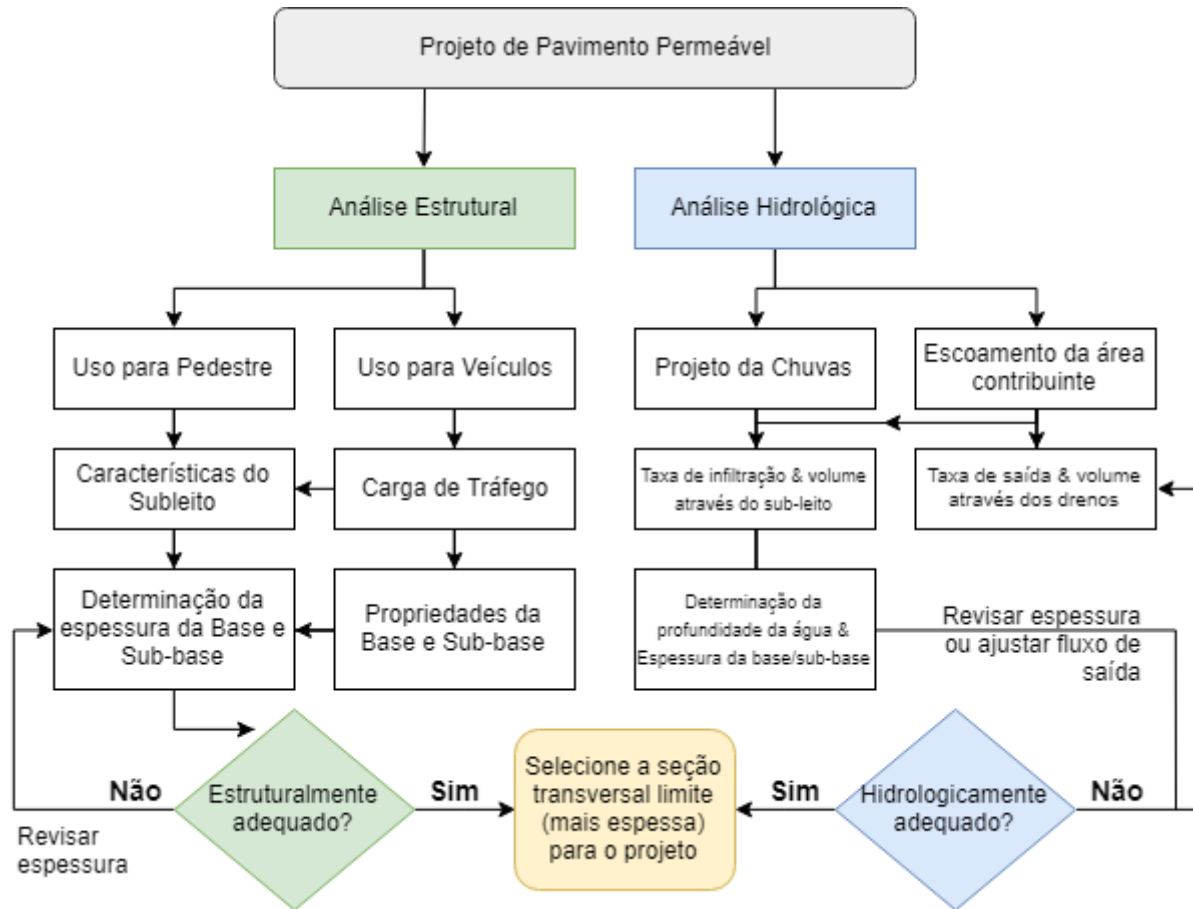


Figura 11 – Árvore de decisão da análise estrutural e hidrológica de pavimento permeável (adaptado de ASCE, 2013).

Pavimentos de concreto permeável podem ser projetados/dimensionados usando qualquer norma de procedimento para pavimento de concreto (por exemplo, *American Association of State Highway and Transportation Officials*, *Portland Cement Association*, *StreetPave*) (DELATTE, 2007). Em relação aos fatores a serem considerados no dimensionamento de pavimentos de concreto permeável, ACI (2010) cita:

*Subleito e sub-base.* A camada de sub-base fornece uma via para drenagem vertical da água para o subleito e serve, ainda, como recurso de armazenamento. O subleito fornece suporte vertical para o pavimento. Aumentando-se a rigidez de ambos, aumenta-se a capacidade de carga do sistema de pavimento como um todo. A rigidez do subleito pode ser medida através do Índice de Suporte Califórnia (CBR). No entanto, diferentemente dos pavimentos tradicionais, no qual os solos são bastante compactados para que a água não penetre, o subleito de pavimentos permeáveis é usualmente compactado para uma menor densidade do que para os pavimentos tradicionais. O grau de compactação é tipicamente de 90% considerando-se a

energia Normal. Assim, quando se especifica o nível de compactação para questões de projeto, considerações devem ser fornecidas em relação ao efeito da compactação nas propriedades hidráulicas para diferentes tipos de solos. Compactações de 90% em alguns tipos de solos argilosos pode causar uma grande redução na permeabilidade, enquanto compactar 100% de solos arenosos pode não causar efeito. É extremamente importante a análise da permeabilidade do solo após a compactação para confirmar o mesmo mantém sua capacidade estrutural e hidráulica. Segundo Tennis *et al.* (2004), a camada permeável de sub-base deve ser de 150 a 300 mm.

*Resistência do concreto permeável.* A resistência à flexão do concreto permeável é um importante fator no dimensionamento do pavimento. Entretanto, os testes para medição da resistência à flexão do material podem estar sujeitos a grande variabilidade. É comum o uso da resistência à compressão e de relações empíricas para estimar a resistência à flexão (TENNIS *et al.*, 2004). Porém, já que ambos os testes são função da porosidade do concreto permeável, o controle da densidade/compactação e porosidade do material podem ser fatores contribuintes para a estabilidade dos resultados.

*Cargas de tráfego.* A categoria de tráfego a ser considerada é o tráfego diário médio de caminhões (*average daily truck traffic* – ADTT). Assim, o tráfego previsto a ser suportado por um pavimento permeável é comumente caracterizado em termos de repetições de carga de eixo único, equivalente a 80 kN, calculado diretamente com base nas distribuições de tráfego de caminhões assumidas, cujo impacto é maior que veículos leves. Assume-se uma frequência alta de caminhões de pequeno porte e uma frequência baixa de caminhões de grande porte. Uma vez que os caminhões mais pesados, mesmo que em menores números, são os responsáveis pelo dano à fadiga do pavimento, estes devem ser considerados como base para a seleção da categoria de tráfego. A *National Ready Mixed Concrete Association* (NRMCA) sugere uma espessura de 150 mm para pavimentos permeáveis sujeitos a um baixo (menor que 5) ADTT para estacionamentos. Este valor é baseado no histórico de sucesso nos Estados Unidos. Não há padrões de espessura para aplicações em vias, porém há exemplos para baixo volume no qual a espessura do pavimento varia de 150 a 300 mm (ACI, 2010).

Em relação ao projeto hidrológico do concreto permeável, a abordagem é determinar se suas características são suficientes para infiltrar, armazenar e liberar a quantidade de água prevista (água da chuva e escoamento superficial). Assim, é necessário o conhecimento da intensidade de precipitação, a espessura e permeabilidade do pavimento de concreto permeável, inclinação

transversal e geometria, características da base, sub-base e subleito (SMITH e KRSTULOVICH, 2012). Em essência, o projeto hidrológico de pavimentos de concreto permeável deve considerar duas possíveis condições que garantam que o excesso de escoamento de água não ocorra (LEMING *et al.*, 2007): (i) baixa permeabilidade do concreto permeável, a qual é inadequada para capturar o primeiro contato com a chuva; (ii) inadequada capacidade de retenção proveniente das camadas de base e sub-base. A espessura do concreto permeável no sistema de pavimento é determinada, primeiramente, através de questões do projeto estrutural e, posteriormente, verificada e reavaliada no intuito de atender as demandas de precipitação e escoamento da região aplicada. Caso a espessura não seja suficiente, ajustes podem ser feitos na espessura do concreto permeável ou das camadas subsequentes.

Rodden *et al.* (2011) menciona o software desenvolvido pela *American Concrete Pavement Association* chamado “*PerviousPave*”, que pode ser utilizado para desenvolver projeto estrutural e hidrológico especificamente para pavimento de concreto permeável. O programa é capaz de: (i) determinar a espessura mínima do pavimento de concreto permeável baseado em questões de tráfego, vida útil e outras variáveis de entrada estruturais (tais como fadiga, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade); e (ii) determinar a espessura da sub-base/reservatório necessária para atender aos requisitos de gerenciamento das águas pluviais baseado no volume de água a ser processado pelo pavimento dentro do tempo máximo de detenção necessário.

## 2.8 SÍNTESE DO CAPÍTULO E PERSPECTIVAS

O concreto permeável tem se difundido mundialmente como uma ferramenta de gestão das águas pluviais. Não somente esta vantagem, mas outras relacionadas a redução do efeito de ilhas de calor urbano, reabastecimento de aquíferos, irrigação, redução da poluição da água, entre outros, têm alavancado ainda mais o favorecimento da utilização deste material na pavimentação. Entretanto, como visto neste capítulo, a implementação do concreto permeável, devido a falta de normas técnicas, práticas de construção e, também, do entendimento das propriedades deste material principalmente a longo prazo, tem dificultado a sua prática. Muitos trabalhos citados nesta tese, adotam diferentes práticas de preparo de misturas e de testes experimentais, assim como o método de compactação, o que dificulta a comparação entre as misturas e análise das quantidades mais adequadas de incorporação de diferentes materiais (i.e.,

fibras, materiais cimentícios suplementares, polímeros, etc.) que possam otimizar a aplicação do concreto permeável como material de pavimentação.

Dentro das questões mencionadas, o concreto permeável pode ser considerado como um material novo em aplicações de pavimentação em comparação a pavimentos de concreto convencional. Atualmente, ainda existem uma série de desafios que acercam a sua aplicabilidade que precisam ser solucionados. Chandrappa *et al.* (2016), traz um escopo futuro da pesquisa na área de pavimentos de concreto permeável a respeito das lacunas existentes:

*Exigências de especificações de mistura e de testes experimentais:* ainda não existe um método único de dosagem para o concreto permeável, uma vez que os resultados obtidos de diferentes estudos são, geralmente, não comparáveis. Os testes experimentais aplicados para o concreto convencional estão sendo aplicados para o concreto permeável, o que levou a algumas questões entre os pesquisadores devido às diferenças nas composições dos materiais.

*Correlações entre os resultados de campo e de laboratório:* a maioria dos estudos realizados em concreto permeável está confinada às condições de laboratório. Há uma lacuna no desenvolvimento de correlações laboratório-campo em termos de densidade, energia de compactação, porosidade, cura, fadiga e assim por diante. Isso certamente ajudará no desenvolvimento de metodologias apropriadas para que as questões de campo sejam reproduzidas em laboratório.

*Desenvolvimento de procedimentos padrões de projeto estrutural:* há uma grande necessidade de desenvolvimento de um método universal de projeto da espessura para um pavimento de concreto permeável, semelhante aos outros materiais de pavimentação, como concreto asfáltico ou concreto convencional. Tal fato não somente ajudará na compreensão do comportamento do material, mas também na implementação do concreto permeável em diferentes partes do mundo.

*Modelagem estrutural:* o método de elementos finitos não pode ser aplicado ao concreto permeável. Técnicas avançadas de modelagem, como métodos de elementos discretos, seriam mais apropriadas e deveriam ser exploradas.

*Manutenção e desempenho a longo prazo:* a manutenção periódica do concreto permeável é absolutamente essencial devido à sua estrutura porosa, que está sujeita a colmatação. Assim, este tipo de pavimento requer manutenção regular. Métodos de modelagem



racional, compreensão do fenômeno de entupimento dos poros, testes de laboratório e de campo podem auxiliar neste intuito. Ainda não há critérios de falha definidos para o concreto permeável e, portanto, não há limites de tempo definidos para realização da manutenção. Além disso, as técnicas existentes de recuperação em relação aos métodos estruturais precisam ser desenvolvidas. Estudar o desempenho a longo prazo e o monitoramento de pavimentos de concreto permeáveis podem completar este aspecto.

*Mitigação no efeito de ilhas de calor urbano:* embora se saiba que o concreto pode aliviar este efeito, há uma demora no estudo de qual das propriedades térmicas tem uma contribuição significativa. Portanto, um extenso estudo é necessário para entender as propriedades termofísicas de pavimentos de concreto permeável.

*Custo do ciclo de vida:* os custos iniciais e de manutenção do concreto permeável a longo prazo precisam ser coletados e divulgados para avaliar os seus benefícios e trazer recomendações para a sua implementação.

*Aplicabilidade para estradas de elevado volume de tráfego:* um concreto permeável de alta resistência precisa ser desenvolvido com desgaste abrasivo reduzido. Este material, se desenvolvido, pode certamente reduzir os efeitos colaterais gerais daqueles causados por pavimentos tradicionais e pode ser usado em várias classes de estradas, incluindo rodovias.

Este capítulo da tese discutiu diversas propriedades do concreto permeável, sendo elas mecânica, hidráulicas e de durabilidade. Conforme evidenciado, existem diversas lacunas de pesquisa na área. Os estudos mencionados indicam que o concreto permeável é um material promissor para ser usado como material de pavimentação em estradas de baixo volume de tráfego, como vias locais, calçadas para pedestres, ciclovias e, possivelmente, no futuro, em vias arteriais e rodovias. Este trabalho visa, portanto, contribuir com algumas das lacunas citadas, estudando suas propriedades, consolidando a mistura e dosagem com a aplicação de materiais locais e alternativos, avaliando procedimentos laboratoriais que possam melhor representar o desempenho do material na prática e otimizar a sua aplicação como material de pavimentação.

### 3 MATERIAIS E MÉTODO

No item 3.1, encontram-se descritos todos os materiais utilizados nesta tese independente da fase de utilização. A descrição das fases estudadas encontra-se no item 1.4 que trata do delineamento da pesquisa abordada nesta tese. As especificações dos traços e procedimento de moldagem são descritas ao longo da discussão do trabalho em suas respectivas fases, uma vez que são variáveis deste estudo. O método de dosagem e procedimento de moldagem e cura, encontram-se descritos no Capítulo 4, de definição das variáveis preliminares. Já os ensaios experimentais estão descritos no item 3.2 deste capítulo.

#### 3.1 MATERIAIS EMPREGADOS

Neste item são apresentados os materiais empregados nesta pesquisa. No item 3.1.1 encontram-se descritos os materiais básicos (cimento, pedrisco e aditivo) utilizados em todas as fases do estudo e, no item 3.1.2 são apresentados os materiais alternativos utilizados a partir da Fase 2, que incluem areia, sílica ativa e fibras de polipropileno.

##### 3.1.1 Materiais básicos

Os materiais básicos utilizados nas misturas de concreto permeável incluem cimento Portland de alta resistência inicial (CP-V ARI MAX), agregado de origem basáltica e aditivo modificador de reologia para concreto permeável. As características do cimento estão apresentadas na Tabela 7.

O agregado utilizado nesta pesquisa apresenta forma lamelar, com índice de forma de 4,3 determinado de acordo com a NBR 7809 (2008). É composto por 18% de finos, entre 2,36 e 4,75 mm<sup>7</sup>. Um estudo prévio realizado no Laboratório de Ensaio e Modelo Estruturais (LEME) mostrou que este agregado não impacta na funcionalidade hidráulica do concreto permeável (HASELBACH *et al.*, 2015). A Figura 12 apresenta a curva granulométrica do agregado, juntamente com os limites de zona ótima e utilizável estabelecidas pela NBR NM 248 (2003). O diâmetro máximo nominal é 12,5 mm, e sua massa específica e absorção de água determinadas de acordo com a NBR NM 53 (2009) é de 2,80 g/cm<sup>3</sup> e 1,3%, respectivamente. O agregado foi incorporado nas misturas na condição saturado superfície seca.

---

<sup>7</sup> A fração menor que 2,36 mm, considerada friável, foi retirada através de peneiramento do material.

O aditivo modificador de reologia usado fornece um atraso no tempo de pega e maior trabalhabilidade na mistura. Este aditivo está de acordo com os requerimentos previstos na ASTM C494 (2017), classificado como Tipo D (reductor de água e retardador). Segundo o fabricante, o aditivo deve ser adicionado no intervalo de 455 a 980 ml por 100 kg de materiais cimentícios.

Tabela 7 – Caracterização química, física e mecânica do cimento CP V-ARI MAX.

<i>Ensaio Químicos</i>			
Ensaio	UN.	Resultado	Exigências
Resíduo Insolúvel – RI	%	0,74	≤ 1,0 - NM 15/12
Perda ao Fogo – PF	%	4,13	≤ 4,5 - NM 18/12
Óxido de Magnésio – MgO	%	1,28	≤ 6,5 - NM 21/12
Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub>	%	3,21	≤ 4,5 - NM 16/12
Anidrido Carbônico - CO <sub>2</sub>	%	2,87	≤ 3,0 - NM 20/12
<i>Ensaio Físicos</i>			
Ensaio	UN.	Resultado	Exigências
Área Específica (Blaine)	cm <sup>2</sup> /g	4.613	≥ 3.000 - NM 76/98
Massa Específica	g/cm <sup>3</sup>	3,00	não aplicável - NM 23/01
Índice de Finura - #75 µm (nº200)	%	0,13	≤ 6,0 - NBR 11579/13
Resíduo na Peneira #325	%	1,12	não aplicável - NBR 9202/85
Água de consistência normal	%	29,2	não aplicável - NM 43/03
Início de Pega	minutos	151	≥ 60 - NM 63/03
Fim de Pega	minutos	211	≤ 600 - NM 65/03
Expansibilidade à quente	mm	0,00	≤ 5,0 - NBR 11582/12
<i>Ensaio Mecânicos - NBR 7215/96</i>			
Ensaio	UN.	Resultado	Exigências
Resistência à Compressão - 1 dia	MPa	28,5	14
Resistência à Compressão - 3 dias	MPa	43,5	24
Resistência à Compressão - 7 dias	MPa	48,7	34
Resistência à Compressão - 28 dias	MPa	57,9	não aplicável

Fonte: Fabricante, 2017.

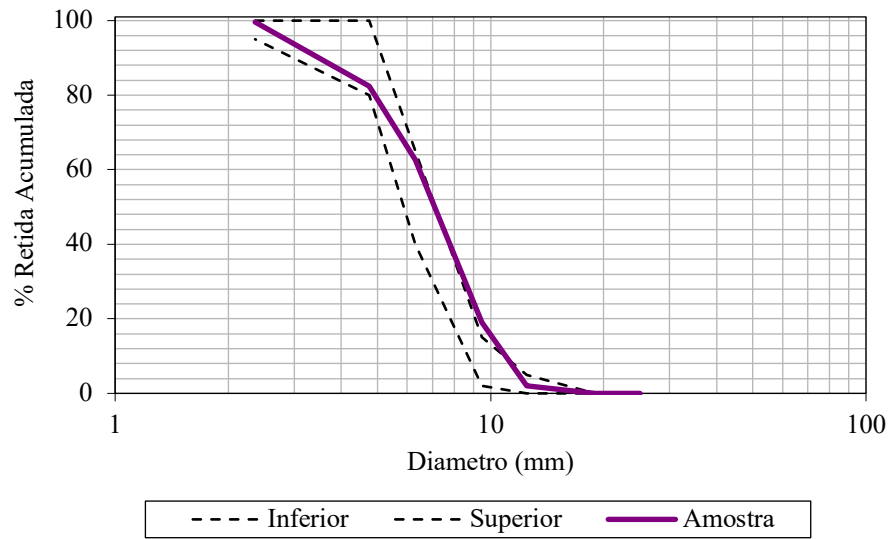


Figura 12 – Curva granulométrica do agregado graúdo (brita 0).

### 3.1.2 Materiais alternativos

Os materiais alternativos utilizados nesta pesquisa estão descritos separadamente nos subitens a seguir. Estes materiais foram incorporados a partir da Fase 2, conforme previsto na estratégia experimental desta tese.

#### 3.1.2.1 Sílica Ativa

A sílica ativa utilizada possui massa específica de  $2,27 \text{ g/cm}^3$  determinada de acordo com a NBR NM 23 (2001) e possui diâmetro médio de  $18,62 \mu\text{m}$ .

#### 3.1.2.2 Areia média

A areia média utilizada é proveniente no Rio Jacuí da cidade de Porto Alegre/RS. O agregado miúdo possui massa específica de  $2,63 \text{ g/cm}^3$ , determinada de acordo com a NBR NM 52 (2009). A curva granulométrica do material, em conjunto com os limites de zona ótima e utilizável estabelecidas pela NBR NM 248 (2003), pode ser visualizada na Figura 13. O módulo de finura do material é de 1,98 e a dimensão máxima característica é 2,36 mm.

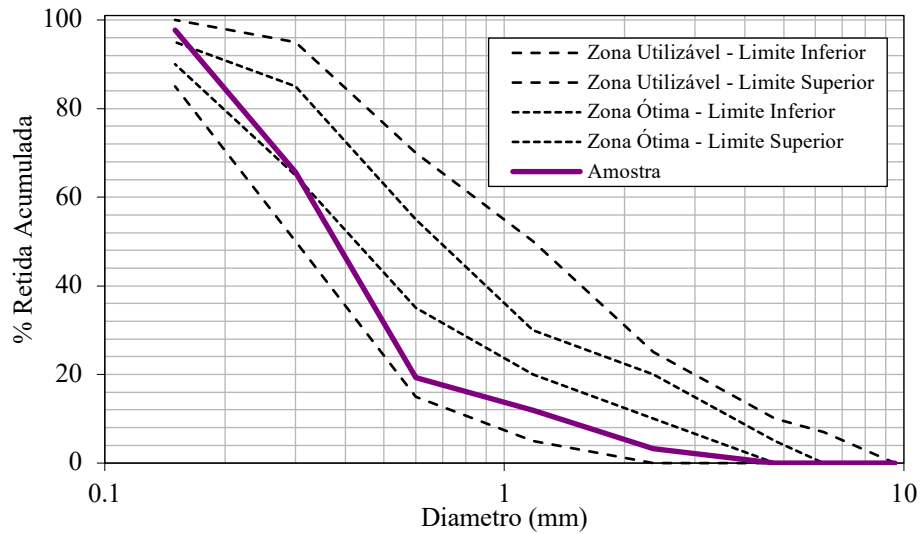


Figura 13 – Curva granulométrica do agregado miúdo.

### 3.1.2.3 Fibras de polipropileno

Os dois tipos de fibras de polipropileno aplicados nesta pesquisa estão disponíveis comercialmente no Brasil. Ambas são macrofibras com densidade de  $0,91 \text{ g/cm}^3$ . As fibras diferem em seu comprimento, diâmetro e fator de forma, conforme mostra a Tabela 8. Na Figura 14 é possível visualizar o aspecto de cada uma das fibras.

Tabela 8 – Caracterização das fibras de polipropileno corrugada e estrutural.

Fibra/Código	PP-C	PP-S
Tipo	Fibra de polipropileno corrugada	Macrofibra sintética estrutural
Comprimento	50 mm	54 mm
Diâmetro	100 $\mu\text{m}$	480 $\mu\text{m}$
Fator de Forma	500	112

Fonte: Fabricante, 2017.



(a) PP-C



(b) PP-S

Figura 14 – Fibras de polipropileno: corrugada (a) e sintética estrutural (b).

## 3.2 ENSAIOS DAS FASES 1 E 2

Nos itens subsequentes são descritos os ensaios utilizados nesta tese. Conforme já mencionado, o procedimento de moldagem, compactação, número e tipo de amostras e demais informações serão descritas em cada fase, já que foram variáveis avaliadas experimentalmente, uma vez que não há normas e padrões que estabeleçam tais procedimentos. Os ensaios comuns foram descritos neste capítulo de forma a facilitar e não tornar repetitivo suas descrições no decorrer da leitura deste trabalho.

### 3.2.1 Densidade no estado fresco e endurecido

A densidade dos corpos de prova, no estado fresco, é medida imediatamente após o preenchimento da mistura em fôrmas cilíndricas metálicas com capacidade de  $7,0 \pm 0,6$  L, e com diâmetro equivalente a 0,75 a 1,25 vezes maior que a altura do recipiente, conforme prevê a ASTM C1688 (2014). O procedimento consiste na colocação da amostra no recipiente em duas camadas iguais, compactadas verticalmente em 20 vezes/camada com a utilização do martelo Proctor. A densidade em  $\text{kg/m}^3$  é calculada como a massa da amostra (massa total menos a massa do recipiente) dividido pelo volume do recipiente. Neste trabalho, no entanto, optou-se pela determinação das densidades em corpos de prova de 10 x 20 cm (diâmetro x altura), mesmos utilizados para determinação das demais propriedades hidráulicas, a fim de possibilitar a comparação entre os resultados.

A determinação da densidade dos corpos de prova no estado endurecido foi realizada de acordo com a norma ASTM C1754 (2012). As amostras devem ser pesadas na condição seca através de dois métodos propostos. O método A, adotado nesta pesquisa, consiste em manter as amostras em uma temperatura de  $38 \pm 3$  °C em intervalos  $24 \pm 1$  h, no qual suas massas são medidas até constância em massa. As dimensões das amostras foram registradas com o uso de um paquímetro e, então, a densidade no estado endurecido, em  $\text{kg/m}^3$ , é determinada como a massa das amostras dividido pelo seu volume real. Este procedimento foi realizado de forma pragmática em todas as amostras na idade de 27 dias (1 dia antes dos ensaios de resistência mecânica).

### 3.2.2 Porosidade

A porosidade das amostras foi determinada de acordo com o procedimento proposto pela norma ASTM C1754 (2012). Este ensaio também foi realizado aos 27 dias, antes de submeter as

amostras à ruptura. Após a medição de suas massas na condição seca, conforme descrito no item anterior, os corpos de prova são submersos em água por 30 minutos. Após este período, as massas na condição submersa, com o auxílio de uma balança hidrostática, são medidas. O volume das amostras foi determinado baseado nas suas dimensões medidas com o uso de um paquímetro. A porosidade (P) é, então, calculada através da Equação 1:

$$P (\%) = \left[ 1 - \left( \frac{M_d - M_s}{\rho_w \times V} \right) \right] \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

onde  $M_d$  é a massa seca da amostra em g,  $M_s$  é a massa submersa da amostra g,  $\rho_w$  é a densidade da água em g/cm<sup>3</sup>, e  $V$  é o volume da amostra em cm<sup>3</sup>.

### 3.2.3 Taxa de infiltração

A taxa de infiltração é uma propriedade importante crítica para aplicação no gerenciamento das águas pluviais. Assim, a taxa de infiltração foi determinada de duas formas: na primeira, aplicada apenas na Fase 1, a taxa de infiltração foi medida em uma placa de concreto permeável utilizada para extração de corpos de prova. No segundo caso, a taxa de infiltração foi determinada utilizando-se os corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x altura), que foram utilizados em ambas as Fases 1 e 2.

O teste de infiltração tradicional, medido na placa de concreto permeável, foi conduzido de acordo com a norma ASTM C1701 (2017), aos 7 dias (uma semana antes da extração das amostras). Um anel de infiltração plástico (com diâmetro de 300 mm e altura de 50 mm), foi colocado no centro da placa para medir a taxa de infiltração, conforme mostra a Figura 15. O anel foi fixado na superfície da placa de concreto permeável com o uso de massa de calafetar. Um teste de pré-molhagem foi realizado, usando um total de 3,60 kg de água, mantendo-se uma coluna d'água padrão entre duas linhas marcadas no interior do anel (10 e 15 mm). O tempo medido inicia-se quando a água toca a superfície da placa até o desaparecimento total da água na superfície do concreto permeável. Conforme prevê a norma, se o tempo de pré-molhagem for menor que 30 segundos, então um total de 18 kg de água deve ser utilizado no ensaio, caso contrário, mantém-se a quantidade de 3,60 kg utilizada na pré-molhagem. O teste é repetido três vezes para obtenção de um tempo médio utilizado na determinação da taxa de infiltração.



Figura 15 – Teste de infiltração em placa de concreto permeável.

Para o teste de infiltração nos corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x altura), um plástico termoencolhível foi utilizado para selar a superfície lateral das amostras. Duas linhas de 10 e 15 mm também foram marcadas no plástico, acima da superfície superior do corpo de prova, para manter a altura da coluna d'água durante o teste. A quantidade de água colocada foi adaptada da quantidade prevista na ASTM C1701 (2017) para o diâmetro de 100 mm correspondente ao corpo de prova (Figura 16). A pré-molhagem também foi realizada, porém com uma quantidade de 1,2 kg de água. Da mesma forma que para a placa, se o tempo de pré-molhagem for menor que 30 segundos, um total de 6,0 kg de água é usado para o teste. O ensaio é repetido três vezes para obtenção de um tempo médio para a determinação da taxa de infiltração. Na Fase 1, após a extração das amostras, o mesmo teste foi realizado para comparar os resultados com o obtido na placa de concreto permeável. Os testes de infiltração em todas as amostras foram realizados aos 27 dias, anteriormente à realização dos ensaios mecânicos.



Figura 16 – Teste de infiltração em corpos de prova cilíndricos de concreto permeável.



Em ambos os casos (placa e corpos de prova cilíndricos), a taxa de infiltração ( $I$ ) é determinada de acordo com a Equação 2:

$$I \text{ (mm/h)} = \frac{K \times M}{D^2 \times t} \quad \text{(Equação 2)}$$

onde  $M$  é a massa de água infiltrada em kg,  $D$  é o diâmetro da área de infiltração em mm,  $t$  é o tempo medido relacionado a infiltração de água em s, e  $K$  é o fator necessário para conversão dos dados medidos na unidade SI. O valor de  $K$  é 4583666000.

### 3.2.4 Permeabilidade

Um permeômetro de carga variável pode ser utilizado para medir a permeabilidade do concreto permeável (KEVERN *et al.*, 2008). Conforme já mencionado no item 2.5.2, o coeficiente de permeabilidade (cm/s) pode ser obtido através do mesmo ensaio realizado para solos. Assim, para realização deste teste, foi utilizado um permeômetro de carga variável, conforme mostra a Figura 17 (a). Os corpos de prova são revestidos com uma membrana de látex para impedir que a água flua entre a parte lateral das amostras e do equipamento durante o ensaio. Este teste também foi realizado aos 27 dias. As amostras revestidas com as membranas são colocadas cuidadosamente no permeômetro, conforme Figura 17 (b).

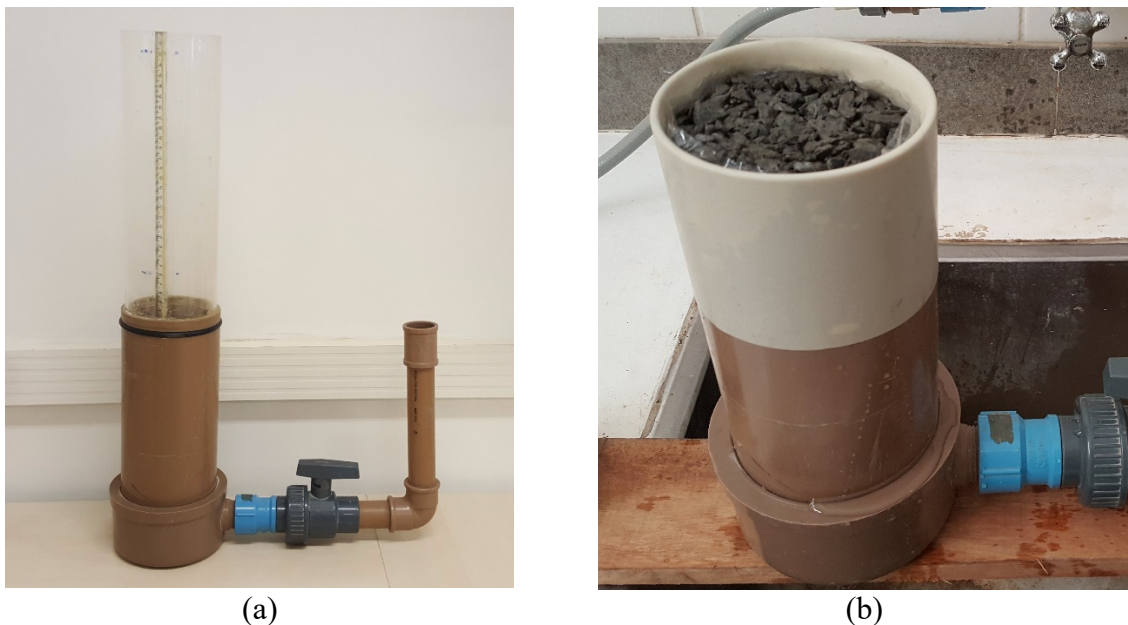


Figura 17 – Permeômetro de carga variável (a) e posicionamento do corpo de prova revestido com membrana látex para realização do ensaio de permeabilidade (b).

O tempo decorrido para que a água flua através do corpo de prova é medido a partir da altura inicial ( $h_1$ ) e final ( $h_2$ ) marcadas no tubo vertical de acrílico do permeâmetro. O coeficiente de permeabilidade ( $K$ ) é calculado usando a Lei de Darcy conforme a Equação 3:

$$K \text{ (cm/s)} = \frac{a \times L}{A \times t} \times \log_{10} \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde  $a$  é a área da seção transversal do tubo vertical em  $\text{cm}^2$ ,  $L$  é o comprimento da amostra em  $\text{cm}$ ,  $A$  é a área da seção transversal da amostra em  $\text{cm}^2$ ,  $t$  é o tempo medido da  $h_1$  para  $h_2$  em  $\text{s}$ ,  $h_1$  é o nível inicial da água igual 27  $\text{cm}$ , e  $h_2$  é o nível final da água igual a 5  $\text{cm}$ .

### 3.2.5 Resistência à compressão simples

Embora a resistência à compressão uniaxial não seja uma variável limitante para o dimensionamento de pavimentos, é importante sua verificação para análise da sua variabilidade em função das características hidráulicas do material. O teste foi conduzido de acordo com os preceitos da ABNT NBR 5739 (2007) para corpos de prova de concreto convencional. O ensaio foi realizado, portanto, na idade de 28 dias para todas as amostras estudadas de dimensões 10 x 20  $\text{cm}$  (diâmetro x altura), posteriormente à realização dos ensaios hidráulicos mencionados.

### 3.2.6 Resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão é um parâmetro fundamental na caracterização do concreto para uso em pavimentação. O ensaio de tração na flexão foi realizado de acordo com a ABNT NBR 12142 (2010), em vigas simplesmente apoiada com duas forças concentradas nos terços do vão. O ensaio foi realizado em corpos de prova prismático de dimensões 10 x 10 x 40  $\text{cm}$ , conforme recomendação da norma para pavimentos de concreto permeável ABNT NBR 16416 (2015). A resistência à tração na flexão foi determinada de acordo com a Equação 4:

$$f_{ct,f} = \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad \text{(Equação 4)}$$

onde  $f_{ct,f}$  é a resistência à tração na flexão em  $\text{MPa}$ ,  $F$  é a carga de ruptura em  $\text{N}$ ,  $l$  é a distância entre apoios em  $\text{mm}$ ,  $b$  é a largura média do corpo de prova em  $\text{mm}$ , e  $d$  é a altura média do corpo de prova em  $\text{mm}$ .

### 3.2.7 Módulo de elasticidade estático

A determinação do módulo de elasticidade do concreto permeável é, ainda, um desafio no meio acadêmico, uma vez que a instrumentação dos corpos de prova é dificultada pela superfície rugosa e porosa do material. Assim, a colagem de extensômetros (*strain gages*) para determinação da deformação torna-se inadequada. Neste trabalho, o módulo de elasticidade estático foi determinado através da medição da flecha no centro da viga no ensaio de tração na flexão a quatro pontos, utilizando a analogia de Mohr (Equação 5). Para tanto, a viga foi instrumentada com dois LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*) posicionados no centro do vão, em cada lado da viga (Figura 18). Adotou-se para o cálculo do módulo de elasticidade o valor da flecha no instante em que a carga aplicada atinge o equivalente a 70% da carga de ruptura.

$$E = \frac{23 \cdot P \cdot l^3}{108 \cdot b \cdot h^3 \cdot f} \quad (\text{Equação 5})$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade do concreto no ensaio de tração na flexão em MPa,  $P$  é a carga referente a 70% da carga de ruptura em N,  $l$  é a dimensão do vão em mm,  $b$  é a largura do corpo de prova em mm,  $h$  é a altura do corpo de prova em mm, e  $f$  é a flecha no meio do vão em mm.



Figura 18 – Uso de LVDT para medição da flecha de viga no ensaio de tração na flexão.

### 3.2.8 Cantrabro

A avaliação da resistência à abrasão do concreto permeável foi determinada de acordo com a norma ASTM C1747 (2013), própria para concreto permeável. Este método, conhecido como Cantabro, consiste na medição da perda de massa de amostras submetidas à ação combinada de impacto e abrasão, através do contato entre as próprias amostras e o tambor rotativo, também conhecido como máquina de abrasão Los Angeles (Figura 19). Este equipamento é constituído de um tambor de aço, cilíndrico e oco, de aproximadamente 500 mm de comprimento e 700 mm de diâmetro, cujo eixo horizontal permanece fixado a um dispositivo externo, que possibilita sua rotação. Neste teste, nenhuma carga abrasiva por esferas de aço é aplicada no interior do tambor. O desgaste é causado apenas pelo contato de três corpos de prova de dimensões 10 x 10 cm (diâmetro x comprimento) no interior da máquina. Para realização do ensaio, aos 28 dias, é determinado a massa inicial dos três corpos de prova secos. As amostras são, então, colocadas dentro da máquina concomitantemente. O tambor é girado a uma velocidade entre 30 e 33 rpm, até completar um total de 500 rotações. Optou-se por, a cada 100 rotações, fazer a pesagem das amostras para avaliar a perda de massa por ciclo. O resultado é expresso em porcentagem, da perda de massa dos três corpos de prova, como a razão entre as diferenças de massa (final e inicial) pela massa inicial.



Figura 19 – Máquina de abrasão Los Angeles.

## 4 FASE 1: DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS PRELIMINARES

Neste capítulo são apresentados os resultados da Fase 1. Os subitens compilam uma série de resultados mecânicos e hidráulicos que foram utilizados para determinação das variáveis preliminares deste estudo. A motivação da realização destas subdivisões deu-se em função de estudos avaliados em diversas bibliografias, nos quais ainda não foram estabelecidas questões de práticas laboratoriais e de dosagem para o concreto permeável, como já é de amplo conhecimento quanto se trata de concreto convencional.

### 4.1 MÉTODO DE DOSAGEM, PROCEDIMENTO DE MISTURA E CURA DAS AMOSTRAS

Em relação às aplicações em engenharia, o concreto permeável deve ter um certo nível de permeabilidade à água antes que sua resistência mecânica seja aumentada. Portanto, projetar o conteúdo vazios dentro do concreto permeável é a chave que afeta a propriedade geral do material. Logo, as misturas de concreto permeável são projetadas para que uma dada porosidade seja atingida. Dos diferentes métodos apresentados no item 2.4.1, obtém-se como variáveis de saída, o consumo dos materiais, tais como cimento, brita e água a serem utilizados na mistura de concreto permeável. O passo subsequente gera uma questão mais complexa, pois é necessário obter através dos consumos de materiais obtidos, uma mistura que apresente as propriedades desejadas através dos parâmetros de entrada estabelecidos. Tal fato remete à densidade da amostra e a forma de compactação, que devem ser controladas para que tais propriedades sejam atingidas.

Atualmente, o método do IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992), é utilizado para determinação do consumo dos materiais constituintes de um concreto convencional. O método é versátil, simples e capaz de fornecer respostas aos requisitos exigidos de um concreto. A Tabela 9 mostra os parâmetros de entrada e saída do método.

Tabela 9 – Variáveis de entrada e saída do método do IPT/EPUSP.

Método	Parâmetros de entrada	Variáveis obtidas
IPT/EPUSP	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Porosidade (teor de ar incorporado)</li> <li>- Proporções unitárias (traço)</li> <li>- Relação água/cimento</li> <li>- Propriedades físicas dos aglomerantes</li> <li>- Propriedades físicas dos agregados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CONSUMO:</li> <li>- Aglomerante</li> <li>- Água</li> <li>- Agregados</li> <li>DENSIDADE TEÓRICA</li> </ul>

No método, a variável porosidade mostrada na Tabela 9, é tida como teor de ar incorporado utilizada no concreto convencional, cujos valores são baixos. Para o concreto permeável a porosidade pode variar de 15% a 35%. O método foi escolhido neste trabalho, pois através dos consumos dos materiais obtidos, é possível obter a densidade teórica do concreto e utilizá-la como variável de controle para obtenção da porosidade desejada. A fórmula do consumo de cimento ( $C_c$ ) em  $\text{kg/m}^3$ , proposta pelo método, foi, portanto, utilizada para a produção do concreto permeável nesta tese, de acordo com a Equação 6.

$$C_c = \frac{1000 - V_p}{1/\gamma_c + b/\gamma_b + a/c} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde  $C_c$  é consumo de cimento em  $\text{kg/m}^3$ , 1000 refere-se ao volume de  $1 \text{ m}^3$  de concreto,  $V_p$  é o volume de poros da mistura (representado pela porosidade desejada do concreto permeável multiplicado por 1000),  $\gamma_c$  é a massa específica do cimento em  $\text{g/m}^3$ ,  $\gamma_b$  é a massa específica do agregado graúdo em  $\text{g/cm}^3$ , e  $a/c$  é a relação água/cimento.

#### 4.1.1 Procedimento de mistura e cura das amostras

O procedimento de mistura das amostras de concreto permeável difere do usualmente realizado em concretos convencionais, o qual a totalidade de materiais secos é colocada na betoneira e, posteriormente, a quantidade total de água é adicionada e o concreto é então misturado até que a mistura esteja homogênea. Através de estudos e testes preliminares realizados, verificou-se que a adição da totalidade dos materiais secos fazia com que a pasta de cimento fosse aderida na parede da betoneira quando a água era adicionada, não havendo, portanto, a integração do seu envolvimento com os agregados. Assim, o procedimento de mistura foi fixado na seguinte sequência: primeiramente a totalidade de agregado graúdo calculada é adicionada à betoneira; um pouco da água da mistura deve ser colocada no intuito de deixar a superfície do agregado umedecida, cujo objetivo é facilitar a aderência da pasta cimentícia e evitar a possibilidade de sua deposição na parede do misturador; o agregado deve, portanto, ser misturado por alguns segundos, até que a pequena quantidade de água adicionada torne sua superfície úmida; na sequência a totalidade de aglomerante (cimento Portland e/ou adições) é colocada no interior da betoneira, a qual permanece ligada enquanto a quantidade restante de água é adicionada aos poucos à mistura; após a colocação de todos os materiais, a betoneira deve permanecer em funcionamento por aproximadamente 3 minutos.

Todas as amostras estudadas nesta pesquisa foram mantidas em cura ambiente, simulando condições *in situ*. Em estudos prévios realizados no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturas (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Schwetz (2014) estudou três diferentes tipos de cura para o concreto permeável em proporções de mistura de 1:3, 1:4 e 1:5 (cimento:agregado). Como resultado, a cura imersa e a cura utilizando manta geotextil (BIDIM) não agregaram valor do ponto de vista de permeabilidade e abrasão, além de demandarem custo e complexidade de execução. Desta forma, a autora sugere a adoção da cura ambiente para o concreto permeável.

#### 4.1.2 Verificação do método do IPT/EPUSP e compactação

Embora a proporção de mistura seja um fator contribuinte, a energia de compactação também afeta diretamente a porosidade (DEO e NEITHALATH, 2010). Como mencionado por Ibrahim *et al.* (2014), é importante enfatizar que a porosidade desejada é alcançada por ambos os fatores, ou seja, controlando as proporções e propriedades, assim como controlando o nível de compactação.

Para verificação da eficácia do método na obtenção da porosidade projetada, foi realizada uma concretagem teste. Para isso, adotou-se uma proporção de mistura de 1:4 (cimento:agregado), com relação água/cimento de 0,32, usualmente utilizada em misturas de concreto permeável. Esta proporção de mistura já vem sendo estudada pelo grupo de pesquisa LEME em diversos trabalhos (SCHWETZ, 2014; HASELBACH *et al.*, 2015). A porosidade projetada foi de 20%, o que acarretou em uma densidade teórica de aproximadamente 2100 kg/m<sup>3</sup>. Para compactação dos corpos de prova cilíndricos 10 x 20 (diâmetro x altura), foi adotado o método de compactação com o uso do Proctor padrão (Figura 20).

Já que o controle das propriedades e compactação são variáveis igualmente importantes, o problema de pesquisa avaliado durante o procedimento dividiu-se em: (a) controlar a densidade do corpo de prova e utilizar a quantidade de golpes necessários para tal; ou (b) manter a quantidade de 20 golpes por camada conforme sugerido pela *ASTM subcommittee C09.49* (CHANDRAPPA *et al.*, 2016). A escolha de um dos métodos em particular, como padrão para este trabalho, implica em, no caso do método (a): ser necessário diferentes números de golpes conforme variações no traço fazendo-se o uso de outros tipos de materiais na mistura ao longo da pesquisa, o que torna incomparável os resultados; ou, no caso do método (b): não ser possível



com o número de golpes pré-definidos atingir a densidade calculada e, portanto, não obter as propriedades projetadas.



Figura 20 – Compactação de corpo de prova cilíndricos com o uso do Proctor.

Na realização da concretagem teste, verificou-se, primeiramente, se o número de golpes recomendados (20 por camada) era suficiente para atingir a densidade projetada de  $2100 \text{ kg/m}^3$ , no intuito de possibilitar o controle de ambas as variáveis, densidade e número de golpes. Neste teste preliminar verificou-se, portanto, que a densidade era alta e não foi possível, através do número de golpes recomendados, obtê-la. Em uma outra tentativa, buscou-se aumentar a porosidade projetada para 25%, o que gera uma densidade teórica de, aproximadamente,  $1970 \text{ kg/m}^3$ . Neste caso, foi possível atingir a densidade projetada, aplicando-se os 20 golpes por camada, sem interferências nas dimensões do corpo de prova. Foram moldados, então, um total de 20 amostras para verificação. A Figura 21<sup>8</sup> mostra os resultados obtidos da densidade das amostras no estado endurecido pela porosidade obtida. A porosidade média obtida foi de 25,16% com um desvio padrão de 0,48. A densidade média foi de  $1971,48 \text{ kg/m}^3$  e o desvio padrão foi de 9,38.

---

<sup>8</sup> Os gráficos desta tese são apresentados com separador decimal conforme padrão americano.



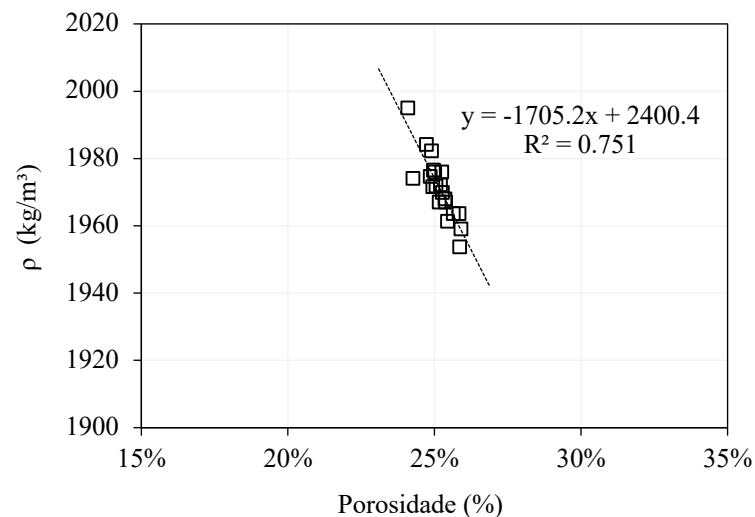


Figura 21 – Densidade versus porosidade de mistura teste.

Através dos resultados obtidos de densidade e porosidade dos corpos de prova, verificou-se que, no caso do método de compactação com o uso do Proctor em 20 golpes por camada, é possível obter a densidade e porosidade projetadas para valores ligeiramente próximos e abaixo de 2000 kg/m<sup>3</sup>, e maiores ou iguais a 25%, respectivamente. Percebe-se que tais resultados apresentaram baixo desvio padrão para esta proporção em particular, portanto é possível que variações de porosidade final possam ser obtidas fazendo-se o uso de outros traços ou diferentes materiais.

#### 4.2 CORPOS DE PROVA MOLDADOS VS. EXTRAÍDOS E MÉTODO DE COMPACTAÇÃO

O método de compactação com o uso do Proctor, apesar de apresentar uma solução frente aos métodos não aplicáveis ao concreto permeável e que são tradicionais aos concretos convencionais, não representa, de maneira íntegra, as práticas de execução de pavimentos de concreto permeável. De acordo com Chandrappa *et al.* (2016), a compactação com o uso do Proctor pode causar a quebra de agregados próximos à superfície no qual há o contato, devido ao impacto gerado pelo equipamento. Além disso, pode resultar em uma representação imprecisa, uma vez que o método de compactação do pavimento *in situ* é feito com rolo em uma única camada. Por outro lado, este método pode reduzir a dispersão nos resultados devido à diminuição do efeito da porosidade vertical (HASELBACH e FREEMAN, 2006).

Atualmente, há uma limitação de estudos comparativos entre amostras moldadas e compactadas como uso do Proctor, com amostras extraídas do campo compactadas com rolo para representar situações *in situ*. Neste sentido, nesta etapa, tem-se como objetivo: (i) verificar se o método de dosagem é também eficaz na obtenção da densidade e porosidade projetada em corpos de prova extraídos de uma placa de concreto permeável compactada com rolo; e (ii) correlacionar os resultados dos diferentes métodos de compactação (Proctor e rolo) em corpos de prova moldados e extraídos.

#### 4.2.1 Moldagem da placa e extração dos corpos de prova

Utilizando a mesma relação 1:4 (cimento:agregado), optou-se pela incorporação de um aditivo modificador de reologia e hidratação, e a diminuição da relação água/cimento para 0,26 (mínimo recomendado pela ACI 522-R-10 (2010)). Essa alteração na dosagem inicialmente proposta, foi realizada no intuito de obter outras variáveis de resposta, isto é, verificar se a incorporação do aditivo altera o atingimento das propriedades propostas pelo método de dosagem e, ainda, verificar a possibilidade de aumento do adensamento do concreto permeável para moldagem da placa.

O aditivo utilizado V-MAR VSC 500 incorpora um polímero patenteado, fabricado sob condições estritamente controladas, e atende às especificações da norma ASTM C494 (2017) como um aditivo do tipo D. Não necessita de emprego conjunto de outro aditivo para produção de concretos permeáveis. Possui características de redutor de água e retardador de pega. A dosagem utilizada foi de 980 ml por 100 kg de materiais cimentícios, de acordo com recomendações do fabricante.

A mistura de concreto permeável foi realizada em uma betoneira com capacidade de 120 litros, na sequência descrita no item 4.1.1. Devido a alteração da relação a/c para 0,26, a densidade projetada foi de 1950 kg/m<sup>3</sup>. A consistência final da mistura pode ser visualizada na Figura 22. Uma placa (650 mm de largura x 450 mm de profundidade x 200 mm de altura) e seis corpos de prova cilíndricos (100 mm de diâmetro x 200 mm de altura) foram moldados. A placa foi moldada para extração de amostras cilíndricas de mesmas dimensões das moldadas, e foi compactada usando um rolo de 48,8 kg/m, simulando o método de compactação *in situ*. A densidade da placa e dos corpos de prova moldados foi controlada. A compactação dos corpos de prova cilíndricos foi com a utilização do Proctor, conforme já descrito no item anterior. É importante enfatizar que o impacto total gerado pelo Proctor é de 50 kg por camada, similar ao

aplicado pelo rolo. A placa e os corpos de prova foram desmoldados após 48 horas e curados por 28 dias a temperatura ambiente ( $24\pm 2^\circ\text{C}$ ) e umidade relativa de  $50\pm 5\%$ . Um total de seis corpos de prova foram extraídos da placa 7 dias antes da realização dos testes experimentais.



Figura 22 – Consistência da mistura de concreto permeável.

#### 4.2.2 Densidade no estado fresco vs. endurecido

A densidade no estado fresco foi determinada apenas para os corpos de prova moldados, uma vez que não é possível avaliar a densidade no estado fresco das amostras extraídas, as quais foram retiradas da placada de concreto no estado endurecido. A densidade no estado fresco foi medida imediatamente após a moldagem. A relação entre as densidades para os corpos de prova moldados, pode ser visualizada na Figura 23.

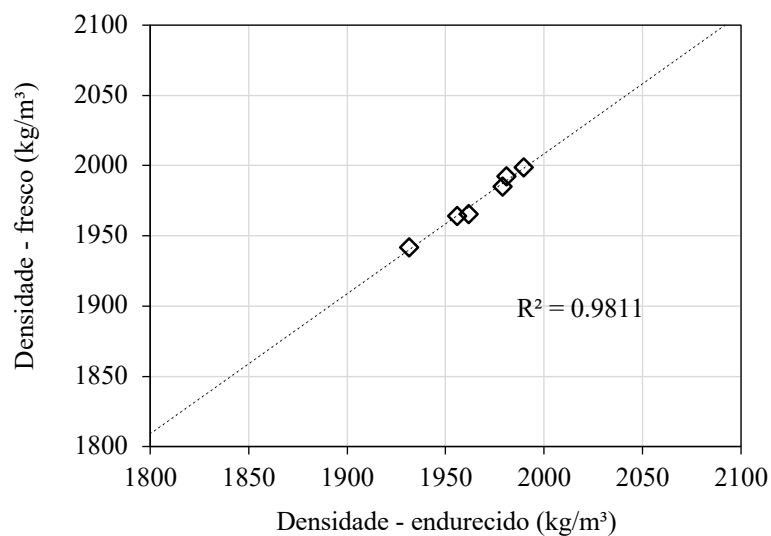


Figura 23 – Corpos de prova moldados: densidade estado fresco vs. endurecido.

É possível observar que a densidade no estado fresco foi ligeiramente maior que a densidade no estado endurecido, conforme esperado. Este fato é atribuído à perda de água pelos produtos de hidratação. No gráfico, a seguinte equação por regressão linear foi obtida:

$$D_e = 0.9843 D_f + 22.666 \quad (\text{Equação 7})$$

Onde  $D_e$  e  $D_f$  são as densidades no estado endurecido e fresco para os corpos de prova cilíndricos moldados, respectivamente. Já que o valor de  $R^2$  foi próximo de 1,0, o decréscimo médio na densidade no estado endurecido foi de apenas 0,43%. A densidade média obtida no estado fresco e endurecido foi de 1975 kg/m<sup>3</sup> e 1966 kg/m<sup>3</sup>, o que representa uma diferença média de apenas 1,21% e 0,82%, respectivamente, em relação a projetada (teórica) de 1950 kg/m<sup>3</sup>. Tal fato demonstra que o método de dosagem e compactação parecem eficientes na obtenção da densidade desejada para o projeto de mistura analisado.

#### 4.2.3 Densidade no estado endurecido vs. porosidade

A Figura 24 mostra a densidade no estado endurecido pela porosidade para os corpos de prova moldados e extraídos. Neste caso, pode-se observar que a relação entre a densidade e a porosidade é influenciada pelo método de compactação. As curvas de regressão linear apresentaram diferentes inclinações. Os corpos de prova moldados obtiveram densidades e porosidades mais próximas dos valores projetados. Por outro lado, as amostras extraídas apresentaram menores valores de densidade e, conseqüentemente, maiores porosidades. Análises de verificações adicionais com ANOVA confirmam que os corpos de prova moldados e extraídos não são similares (valor-P < 0,05) em relação à densidade e porosidade considerando o método de compactação utilizado – rolo para a placa na qual os corpos de prova foram extraídos, e o martelo Proctor para os corpos de prova moldados. Os resultados referentes às médias, desvio-padrão, coeficiente de variação e análise da variância (ANOVA) encontram-se resumidos na Tabela 10.

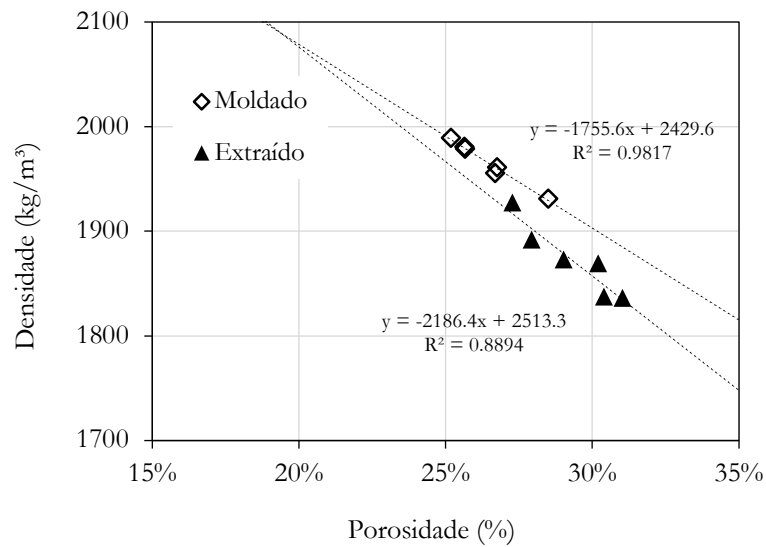


Figura 24 – Corpos de prova moldado vs. extraídos: densidade vs. porosidade.

Tabela 10 – Média, desvio-padrão, coeficiente de variação e análise de variância (ANOVA) dos corpos de prova moldados e extraídos (densidade e porosidade).

Tipo de amostra		D (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidade (%)
Moldado	Média	1966,33	0,26
	DesvPad	21,23	0,01
	CV	1,08%	4,54%
Extraído	Média	1872,78	0,29
	DesvPad	34,55	0,01
	CV	1,84%	5,09%
Moldado vs. Extraído	valor-P	0,0002	0,0039

#### 4.2.4 Taxa de infiltração vs. porosidade

A taxa de infiltração foi medida na placa de concreto permeável antes da extração das amostras. O valor médio obtido através das três medições realizadas foi de 0,35 cm/s. A Figura 25 mostra os resultados de taxa de infiltração (I) pela porosidade dos corpos de prova moldados e extraídos, que foram determinadas através do uso do plástico termoencolhível. A linha pontilhada no gráfico representa a taxa de infiltração da placa. Observa-se que a diferença na taxa de infiltração entre as amostras moldadas e as extraídas é bastante evidente, mesmo quando a porosidade se encontra na mesma faixa. Há mais variabilidade nos resultados obtidos para as amostras extraídas do que para as moldadas. O aumento da porosidade não resulta, essencialmente, em um aumento na taxa de infiltração quando trata-se de corpos de prova extraídos. Este fato pode ser atribuído ao método de compactação, isto é, o uso do rolo ocasiona uma superfície mais compacta, que pode restringir a passagem de água na face superior,

reduzindo a taxa de infiltração. A Figura 26 evidencia o efeito do método de compactação na aparência da amostra. É possível notar que o método de compactação tem influência direta na conectividade e tortuosidade dos poros (principalmente no topo). Em estudos anteriores, no qual corpos de prova moldados que foram compactados em uma única camada, comprovou-se que a porosidade aumenta ao longo da profundidade da amostra (MARTIN III *et al.*, 2014). Este fato complementa o estudo em análise, justificando a menor taxa de infiltração, com aumento da porosidade total da amostra.

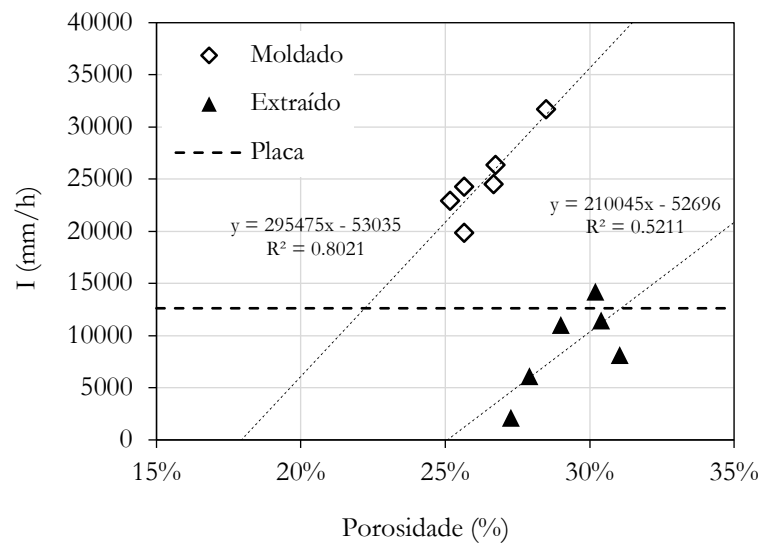


Figura 25 – Corpos de prova moldado vs. extraídos: infiltração vs. porosidade.

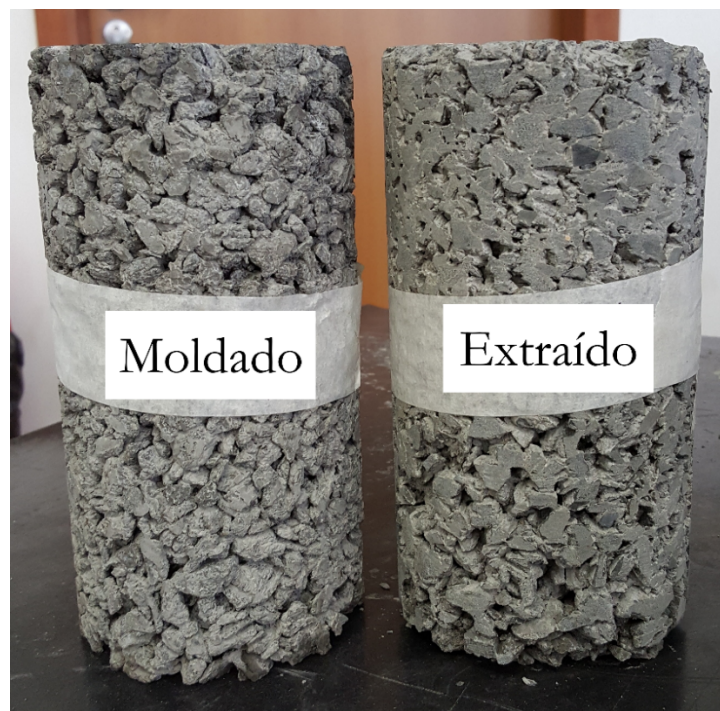


Figura 26 – Corpo de prova moldado e extraído.

A média, desvio-padrão, coeficiente de variação e análise de variância (ANOVA) referentes à taxa de infiltração obtidos para as amostras moldadas e extraídas estão listados na Tabela 11. O maior coeficiente de variação (CV) para os corpos de prova extraídos confirma a variabilidade nos resultados. O valor de  $R^2$  obtido no gráfico da Figura 25, demonstra que apenas 52% da variável dependente pode ser explicada pela regressão linear no modelo, fato que pode ser atribuído à área de contato do rolo. Durante a primeira passagem do rolo, a área de contato do mesmo com o concreto é maior, e diminui para passes subsequentes. Este fato gera a produção de uma menor pressão de compactação durante o passe inicial e aumenta para passes posteriores (KEVERN *et al.*, 2009). As diferenças de pressões causadas pela passagem do rolo podem, portanto, gerar variações na taxa de infiltração obtida entre as amostras extraídas de uma mesma placa. Isto significa que em algumas partes da placa de concreto permeável, uma superfície mais compactada pode ser obtida do que em outras regiões, fazendo com que alguns corpos de prova apresentem menores capacidade de infiltração na superfície.

Tabela 11 – Média, desvio-padrão, coeficiente de variação e análise de variância (ANOVA) dos corpos de prova moldados e extraídos (porosidade e infiltração).

<b>Tipo de amostra</b>		<b>Porosidade (%)</b>	<b>Infiltração (mm/h)</b>
Moldado	Média	0,26	24936
	<i>DesvPad</i>	0,01	0,11
	<i>CV</i>	4,54%	15,85%
Extraído	Média	0,29	8839
	<i>DesvPad</i>	0,01	0,12
	<i>CV</i>	5,09%	49,02%
Moldado vs. Extraído	<i>valor-P</i>	0,0039	0,0001

#### 4.2.5 Permeabilidade vs. porosidade

A Figura 27 mostra os resultados de permeabilidade (K) pela porosidade para os corpos de prova moldados e extraídos. O modelo para o gráfico permeabilidade vs. porosidade é, também, representado por uma relação linear. A diferença entre a permeabilidade entre os corpos de provas moldados e extraído também é evidente, mesmo quando a porosidade para as diferentes amostras encontra-se no mesmo intervalo de valores. Assim como observado para a taxa de infiltração, há uma maior variabilidade nos resultados obtidos para as amostras extraídas do que para as moldadas. A mesma razão que justifica os resultados de taxa de infiltração pode explicar os resultados obtidos para o teste de permeabilidade. A permeabilidade para os corpos de prova extraídos decresce devido ao uso do rolo como forma de compactação na placa, o que causa um

aumento da compactação no topo da amostra. A superfície de topo do corpo de prova extraído é, portanto, menos permeável, mesmo quando a porosidade é maior, a qual é conferida pela parte mais inferior da amostra.

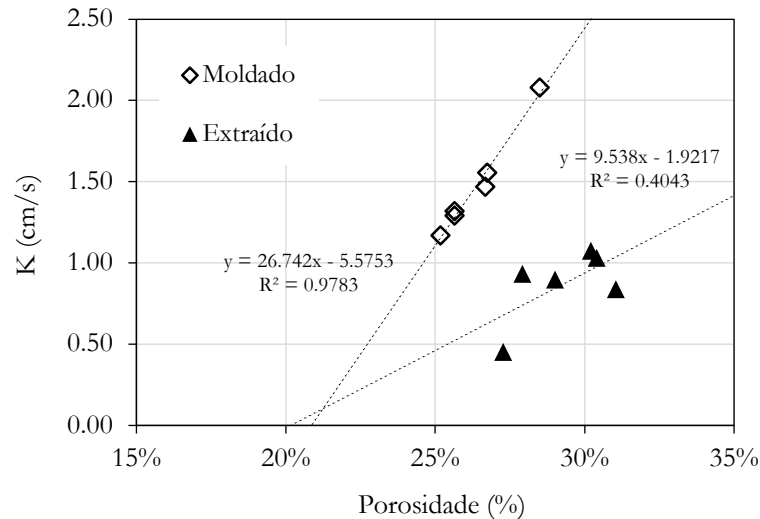


Figura 27 – Corpos de prova moldado vs. extraídos: permeabilidade vs. porosidade.

Os corpos de prova moldados e extraídos apresentaram valores na faixa de 1,17 e 2,08 cm/s e 0,84 e 1,08 cm/s, respectivamente. Ambos intervalos encontram-se de acordo com os valores observados por outros autores na literatura utilizando um permeâmetro de carga variável. Schaefer *et al.* (2006) obtiveram uma condutividade hidráulica medida entre cerca de 0,01 cm/s e 1,5 cm/s. Montes e Halselbach (2006) obtiveram um intervalo entre 0,014 cm/s e 1,19 cm/s. A Tabela 12 mostra a média, desvio-padrão, coeficiente de variação e análise de variância (ANOVA) em relação aos resultados de permeabilidade obtidos para os corpos de prova moldados e extraídos. Para ambos, o coeficiente de variação (CV) obtido foi superior a 20%. No entanto, pelo gráfico, o valor de  $R^2$  para os corpos de prova moldados foi de 0,97, o que indica que a relação entre a permeabilidade e a porosidade dos corpos de prova moldados é bem representada pelo modelo linear. Por outro lado, o modelo não é representativo para os corpos de prova extraídos, uma vez que apenas 40% da variável dependente pode ser explicada pela regressão linear. A diferença de pressão causada pela passagem do rolo também pode ser a razão pela qual há maior variabilidade dos resultados.



Tabela 12 – Média, desvio-padrão, coeficiente de variação e análise de variância (ANOVA) dos corpos de prova moldados e extraídos (porosidade e permeabilidade).

Tipo de amostra		Porosidade (%)	K (cm/s)
Moldado	Média	0,26	1,48
	<i>DesvPad</i>	0,01	0,32
	<i>CV</i>	4,54%	21,87%
Extraído	Média	0,29	0,87
	<i>DesvPad</i>	0,01	0,22
	<i>CV</i>	5,09%	25,62%
Moldado vs. Extraído		<i>valor-P</i>	0,0039

#### 4.2.6 Resistência à compressão vs. porosidade e efeito do tipo de capeamento

A Figura 28 mostra a resistência à compressão pela porosidade para os corpos de prova moldados e extraídos considerando ambos os métodos de capeamento (com argamassa polimérica e com uso de borracha Neoprene). Do total dos seis corpos de prova, três foram utilizados para cada técnica no ensaio de compressão. Através do gráfico, observa-se que, independente do método utilizado, a resistência à compressão dos corpos de prova moldados é superior a resistência obtida para os corpos de prova extraídos. Este fato pode, possivelmente, ser atribuído à diminuição da porosidade vertical pelo método de compactação utilizando o Proctor. Além disso, o procedimento de extração do corpo de prova também pode contribuir com a redução da resistência à compressão. Técnicas de extração adequadas devem ser mais bem investigadas.

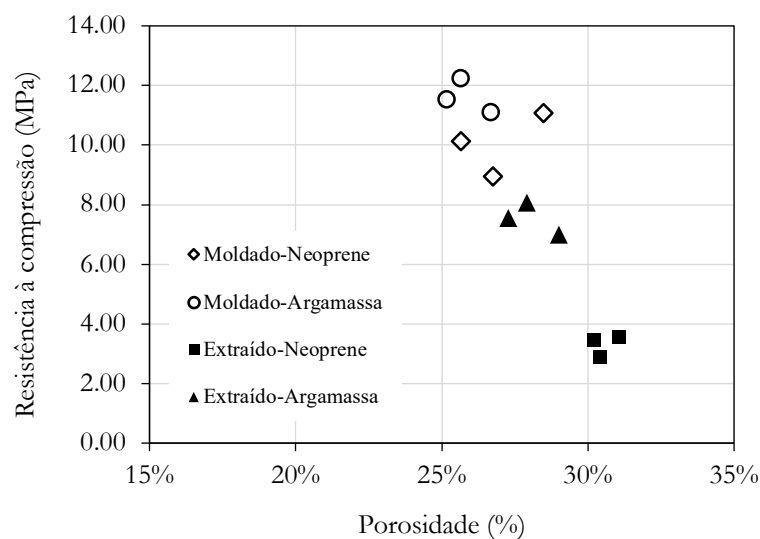


Figura 28 – Corpos de prova moldado vs. extraídos: resistência à compressão vs. porosidade.

A técnica de capeamento utilizada para o teste de compressão é, também, outro fator que influencia diretamente a resistência à compressão. Deve-se considerar que, devido à superfície não regularizada da amostra de concreto permeável, os resultados são consideravelmente afetados. Em alguns casos, isso pode causar um ou mais pontos de concentração de tensão durante o teste de compressão e, conseqüentemente, alterar o modo de ruptura do material. Este fato é mais destacado para os corpos de prova extraídos, uma vez que a superfície inferior pode ser danificada no processo de extração devido à alta porosidade nesta região da amostra.

A Tabela 13 mostra a média, desvio padrão, coeficiente de variação e análise de variância (ANOVA) para os resultados de resistência à compressão considerando ambas as técnicas. O *valor-P* obtido através da ANOVA, indica que o uso de argamassa e Neoprene não são similares em relação à resistência à compressão para os corpos de prova extraídos, mas pode ser considerado não significativo para os corpos de prova moldados (*valor-P* > 0,05). Portanto, não há influência significativa na técnica aplicada aos corpos de prova moldados na resistência à compressão. A Figura 29 mostra um exemplo da ruptura da amostra pela técnica aplicada. Quando as amostras não são capeadas com argamassa, o uso da borracha de Neoprene não é suficiente para distribuir a força de compressão, causando uma ruptura local (Figura 29-a). A Figura 29-b mostra um corpo de prova capeado com argamassa e ocorrência de ruptura entre as camadas compactadas com o uso do Proctor.

Tabela 13 – Média, desvio padrão, coeficiente de variação e análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão (MPa) dos corpos de prova moldados e extraídos.

<b>Tipo de amostra/ Tipo de capeamento</b>	<b>Argamassa</b>	<b>Neoprene</b>	
Moldado	Média (MPa)	10,06	11,63
	<i>DesvPad</i>	1,07	0,57
	<i>CV</i>	10,60%	4,91%
Argamassa vs. Neoprene	<i>valor-P</i>		0,0884
Extraído	Média (MPa)	3,31	7,54
	<i>DesvPad</i>	0,36	0,54
	<i>CV</i>	10,87%	7,16%
Argamassa vs. Neoprene	<i>valor-P</i>		0,0004



(a) Sem capeamento (Neoprene)

(b) Capeado com argamassa

Figura 29 – Influência da técnica de capeamento aplicada no teste de compressão axial.

#### 4.2.7 Considerações parciais

Neste primeiro item, estudos foram conduzidos para avaliar a influência de métodos laboratoriais utilizados para obter as propriedades desejadas do concreto permeável e comparar os dois tipos de método de compactação em corpos de prova moldados e extraídos. Este estudo contribui para a compreensão da variabilidade nos resultados de estudos em amostras de concreto permeável com base em diversos métodos laboratoriais utilizados. Assim, as seguintes conclusões podem ser fornecidas:

- O método de dosagem utilizado com controle rigoroso da densidade, foi eficiente para obter a porosidade, principalmente, para os corpos de prova moldados. A porosidade média obtida para as amostras moldadas foi de 26,39% (apenas 1,39% maior que o valor desejado) e de 29,30% para as amostras extraídas. O valor projetado de porosidade é mais difícil de se obter para as amostras extraídas devido a variabilidade horizontal da placa e, também, devido a não possibilidade de controlar eficientemente a densidade como em um corpo de prova moldado. Cuidados devem ser tomados durante a moldagem dos corpos de prova (ou seja, controlando suas massas), a fim de obter a densidade e, conseqüentemente, a porosidade projetada.
- O uso do rolo conduz a uma superfície superior mais compactada comparada ao uso do Proctor, o que acarreta na diminuição da taxa de infiltração e permeabilidade das amostras.

Além disso, o uso de apenas uma camada na compactação resulta em variações na porosidade vertical. Este fato é importante para situações *in situ*, pois promove com maior facilidade a percolação da água entre o pavimento de concreto permeável e a camada de base. No entanto, causam maior variabilidade nos resultados para análises laboratoriais. Este método de compactação também gera diferença de pressões causada pela passagem do rolo, o que também provoca variações nos resultados entre as amostras extraídas. Em aplicações reais, as diferenças na porosidade vertical do pavimento de concreto permeável são importantes quando se trata de manutenção e vida útil. Quando há o entupimento dos poros, a superfície é de fácil acesso para limpeza, enquanto a área da interface entre o pavimento e a camada de base não é possível acesso. Assim, uma maior porosidade inferior facilita a percolação de água e partículas de sedimentação.

- Os corpos de prova cilíndricos compactados com o Proctor apresentaram resultados mais consistentes devido a porosidade vertical mais uniforme. Este método foi melhor representado pelos modelos lineares utilizados nos gráficos, o que facilita a estimativa de propriedades.
- O uso de Neoprene para distribuir as tensões de compressão no ensaio, não é recomendado para corpos de prova extraídos. A técnica de uso de capeamento de argamassa leva a uma superfície mais regular e permite a distribuição uniforme de tensões nas amostras. No entanto, ambas as técnicas podem ser usadas para corpos de prova moldados devido à superfície mais regular obtida com o método de compactação, facilitando os procedimentos laboratoriais.

Em suma, o método de compactação com o uso do rolo, é mais representativo dos procedimentos *in situ*. No entanto, com a utilização de corpos de prova cilíndricos compactados com o Proctor, é possível reduzir o coeficiente de variação e possibilitar a comparação de outras variáveis – como a incorporação de fibras, aditivos e materiais cimentícios suplementares. Além disso, o procedimento torna-se mais fácil de se produzir em laboratório do que a extração de amostras.

#### 4.3 RELAÇÃO A/C, ADITIVO MODIFICADOR DE REOLOGIA E TRABALHABILIDADE

A variação da relação a/c em um concreto permeável difere de um concreto convencional, pois sua diminuição pode não acarretar o aumento da resistência mecânica. Tal fato pode ser

analisado pelo fator trabalhabilidade, pois, considerando que menores relações a/c diminuem a trabalhabilidade do material, esse fato por ser determinante na falta de adensamento e, conseqüentemente, em valores maiores de porosidade do que o projetado, acarretando em perda de resistência mecânica. Nesse sentido, a incorporação de aditivo deve ser considerada.

O aditivo a ser utilizado é um fator muito importante nas propriedades frescas do concreto permeável. ACI (2010) sugere o uso de diferentes tipos de aditivos que contemplem as necessidades do material (aumento de trabalhabilidade, viscosidade e diminuição do tempo de pega). Neste trabalho, foi utilizado um aditivo modificador de reologia próprio para concreto permeável, que confere uma melhora na reologia da pasta e no controle da hidratação dos materiais cimentícios, não sendo necessário a combinação de outros aditivos (ver item 2.3.3).

Neste item, portanto, buscou-se avaliar a influência da relação água/cimento e do aditivo nas propriedades hidráulicas e mecânicas do concreto permeável. Foram estudadas seis misturas, variando-se a relação a/c e o teor de aditivo (Tabela 14). O aditivo foi adicionado às misturas dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante. Os traços de a/c variando<sup>9</sup> de 0,24 a 0,30 foram feitos com uso de aditivo; e de 0,30 a 0,32 sem aditivo. Para o traço com relação a/c 0,30, optou-se pela mistura com e sem aditivo para referência, já que misturas preliminares com 0,30 sem aditivo já eram utilizadas em estudos prévios pelo grupo de pesquisa do LEME. As densidades teóricas (projetadas) variam de acordo com a relação a/c, conforme observado.

Tabela 14 – Proporções de mistura: variação da relação a/c e teor de aditivo.

Nomenclatura	Agregado/Cimento	Água/Cimento	Aditivo/Cimento	Dt (kg/m <sup>3</sup> )
CP-0.24	4	0,24	0,011	2017,55
CP-0.26	4	0,26	0,007	2004,67
CP-0.28	4	0,28	0,003	1992,05
CP-0.30	4	0,30	0,003	1979,68
CP-0.30-SA	4	0,30	-	1979,68
CP-0.32-SA	4	0,32	-	1967,55

Dt = Densidade teórica; SA = Sem Aditivo

É importante frisar que as quantidades de aditivos indicadas na Tabela 14, foram obtidas considerando o *slump* zero e o aspecto de consistência ideal das amostras conforme Amde e Rogge (2013) – formação de uma esfera com as mãos, a qual não se desintegra ou perde sua estrutura de poros devido à precipitação de pasta dentro dos vazios entre os agregados. A

<sup>9</sup> As variações foram adotadas de acordo com o mínimo recomendado pela ACI (2010), e comumente utilizados em misturas de concreto permeável, conforme relatado por Chandrappa *et al.* (2016) e Zhong *et al.* (2018).



consistência ideal da mistura deve ser mantida mesmo com o uso do aditivo. Como exemplo, a Figura 30 ilustra uma mistura seca, mistura com consistência ideal e uma mistura com excesso de aditivo.

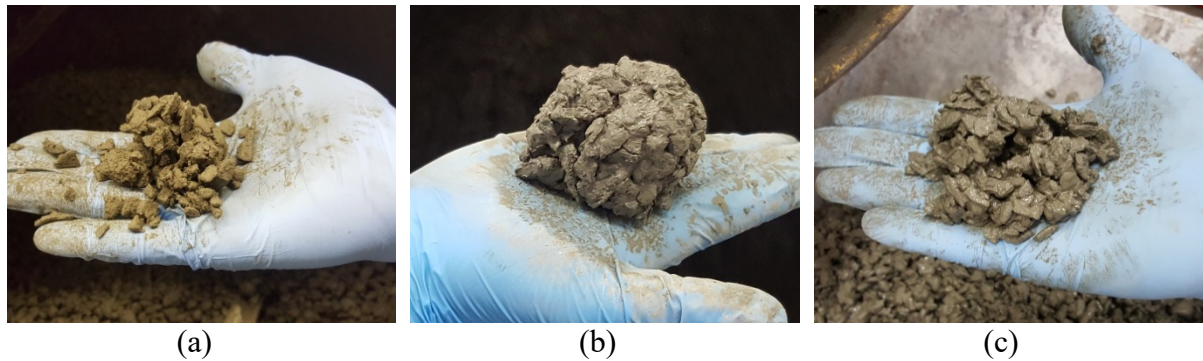


Figura 30 – Consistência da mistura de concreto permeável: seca (a), ideal (b) e fluída (c).

A mistura com relação água/cimento de 0,30 em ambos os casos (com e sem a presença de aditivo) apresentou a formação da esfera, porém com perda de trabalhabilidade e pouca capacidade de integração para o caso sem aditivo. Já para o caso com aditivo, houve uma maior precipitação da pasta nos poros da mistura. A Figura 31 apresenta o aspecto da consistência e diferença da mistura quando incorporado aditivo.

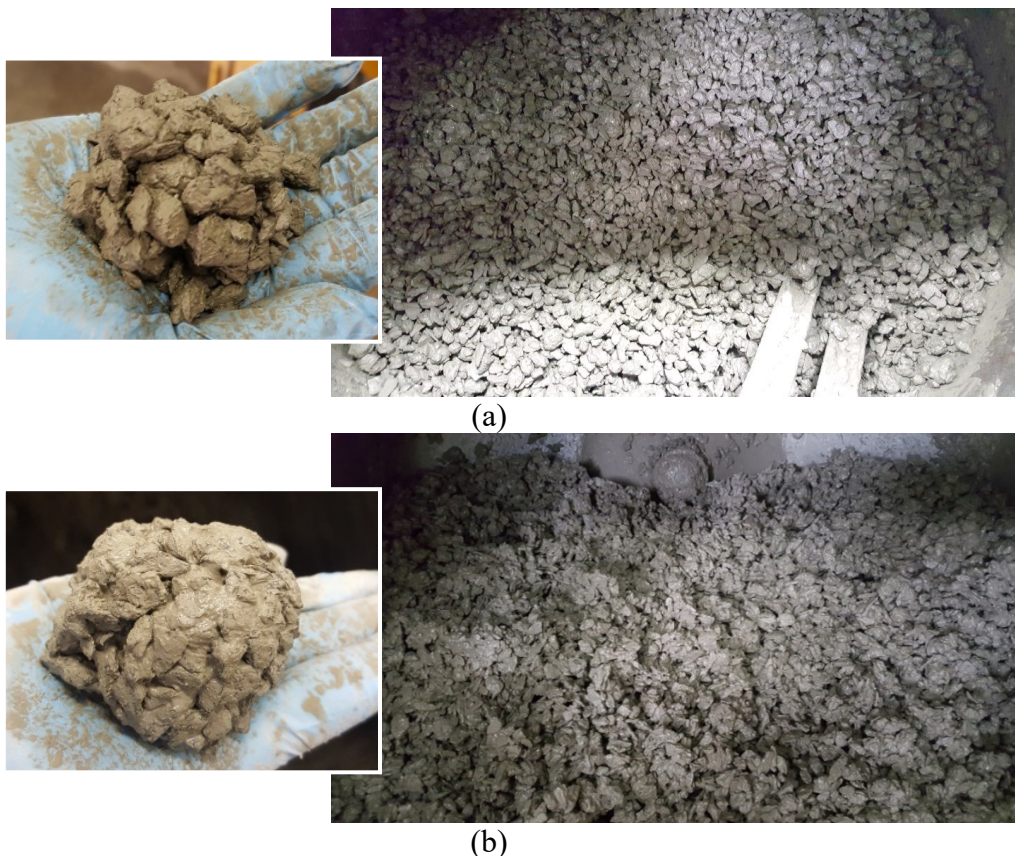


Figura 31 – Mistura de relação a/c 0,30: sem aditivo (a) e com aditivo (b).

A consistência das demais misturas podem ser visualizadas na Figura 32.

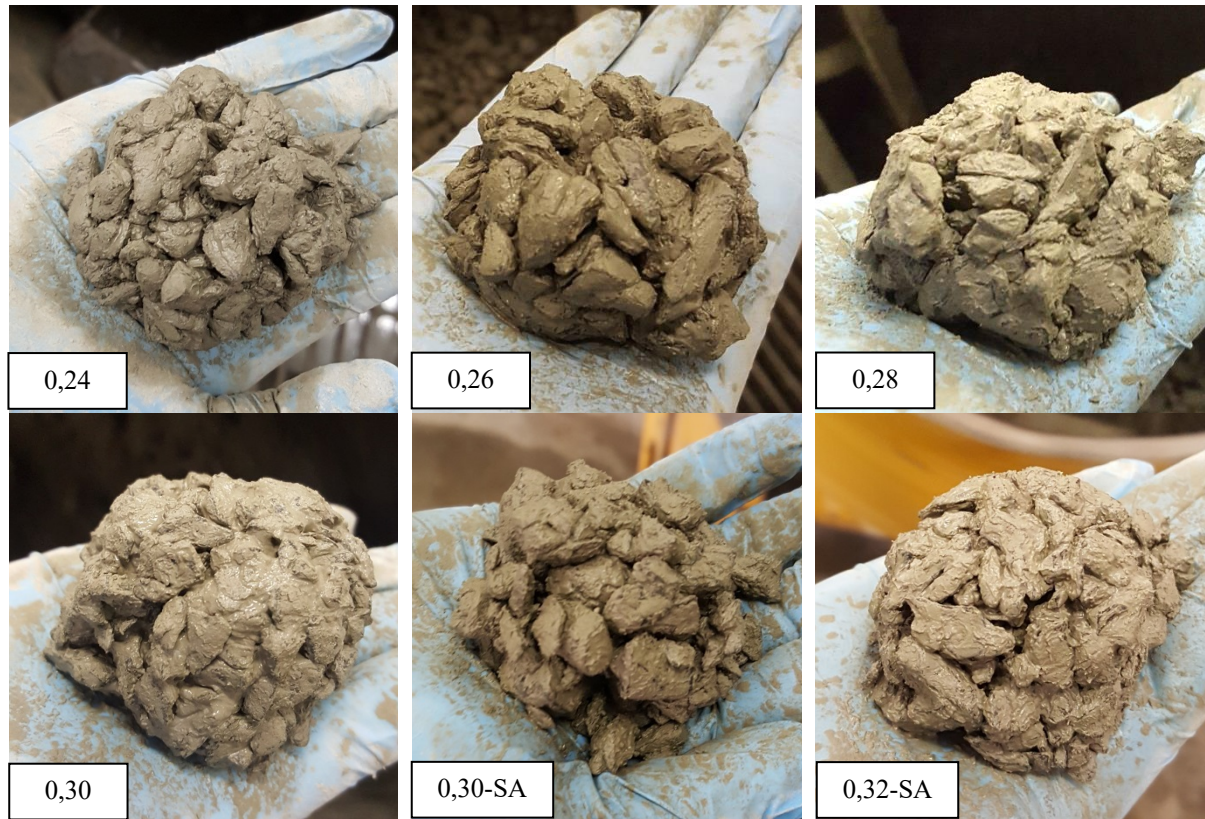


Figura 32 – Consistência do concreto permeável para diferentes relações a/c e teor de aditivo.

Foram moldados 5 corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x altura) e 5 vigas prismáticas de 10 x 10 x 40 cm (altura x largura x comprimento) para cada mistura analisada. Os corpos de prova cilíndricos foram moldados com o uso do Proctor, escolhido com base na consistência dos resultados discutidos no item 4.1 e 4.2. Embora as densidades teóricas das amostras CP-0,24 e CP-0,26 tenham ficado ligeiramente acima de 2000 kg/m<sup>3</sup>, houve a tentativa de manter o controle das densidades, porém não excedendo o método estabelecido, isto é, fixado em duas camadas de 20 golpes. A diferença entre a densidade teórica (calculada) e a densidade real obtida é discutida no item 4.3.1 a seguir.

Para os corpos de prova prismáticos, confeccionados para o ensaio de tração na flexão e módulo de elasticidade, a compactação foi feita com o uso do mesmo rolo utilizado para moldagem da placa de concreto permeável (item 4.2.1), em apenas uma camada, conforme ilustra a Figura 33. As densidades das vigas foram controladas, sendo o número de passadas do rolo, o necessário para obter a densidade projetada.





Figura 33 – Compactação com o uso do rolo em corpos de prova prismáticos.

#### 4.3.1 Densidade no estado endurecido vs. porosidade

A Figura 34 apresenta a relação entre a densidade real obtida no estado endurecido e a porosidade para cada relação a/c analisada. A Tabela 15 mostra os valores e comparativo entre a densidade teórica, densidade real e porosidade. Através dos dados apresentados, observa-se que houve uma diferença sutil na densidade projetada e na densidade real das amostras no estado endurecido, devido à perda natural da água pelos produtos de hidratação. No entanto, esta diferença foi mais acentuada para o CP-0.24, no qual houve uma redução de aproximadamente 4,2%. Este fato pode ser justificado por dois fatores aliados, isto é, a maior densidade de projeto ( $> 2000 \text{ kg/m}^3$ ) e a menor trabalhabilidade pela baixa relação a/c, o que acarretou na dificuldade de adensamento/acomodação da amostra nas fôrmas, visto que o número de golpes com o uso do Proctor era mantido constante. Tal fato também acabou por gerar o aumento da porosidade final da amostra (projetada em 25%) para 28,72%.

Para as amostras de concreto permeável com relação a/c de 0,30, o uso do aditivo influenciou significativamente. Através do gráfico e dos valores mostrados na Tabela 15, observa-se que não há coincidência entre os desvios-padrões das médias para CP-0.30 e CP-0.30-SA. Análise de variância ANOVA confirma a diferença entre ambos, obtendo-se *valor-P* de  $2,66 \times 10^{-5}$  e  $3,38 \times 10^{-4}$  para densidade e porosidade, respectivamente. Ambos menores que 0,05 (nível de significância). Assim, evidencia-se que, para a mesma densidade de projeto, o efeito do aditivo influenciou na trabalhabilidade e adensamento das amostras, fato ilustrado na Figura 34. Em resumo, a falta de aditivo para a mistura de a/c 0,30, dificultou o controle da densidade nas



fôrmas (redução de 1,95% na densidade real em relação a projetada), uma vez que o mesmo número de golpes é mantido. O contrário ocorreu devido a presença de aditivo na amostra, ou seja, a medida que a fôrma era preenchida com a mistura de concreto permeável, uma maior capacidade de fluidez foi observada. Tal fato justifica o aumento de 0,5% na densidade real em relação a projetada e, conseqüentemente, diminuição da porosidade final.

As demais amostras apresentaram variações menores que 1%, tanto para densidade e porosidade reais em relação ao projetado. Apesar da modificação reológica da matriz, a incorporação do aditivo não alterou, de modo geral, a porosidade do concreto permeável (valor médio de 26% para todas as misturas). Neste caso, o controle da densidade é o fator determinante para obtenção da porosidade projetada.

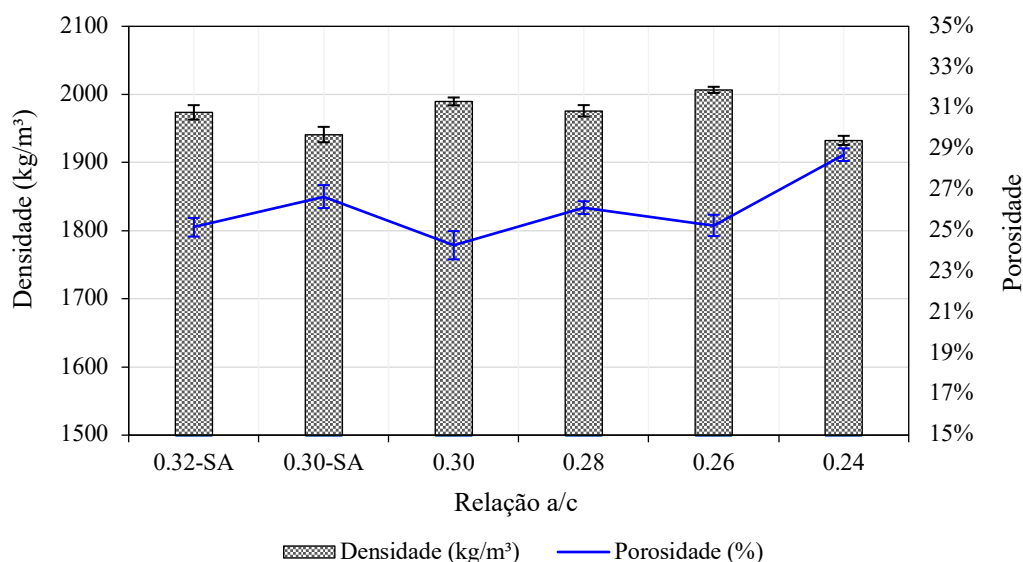


Figura 34 – Relação entre densidade real e porosidade para diferentes relações a/c e teor de aditivo.

Tabela 15 – Valores médios de densidade e porosidade para diferentes relações a/c e teor de aditivo.

Nomenclatura	D-teórica (kg/m <sup>3</sup> )	D-real (kg/m <sup>3</sup> )	DesvPad	Porosidade	DesvPad
CP-0.24	2017,55	1932,59	6,71	28,72%	0,46
CP-0.26	2004,67	2006,75	4,50	25,26%	0,56
CP-0.28	1992,05	1976,00	8,38	26,13%	0,69
CP-0.30	1979,68	1989,82	5,77	24,29%	0,31
CP-0.30-SA	1979,68	1941,17	11,31	26,67%	0,52
CP-0.32-SA	1967,55	1973,71	10,61	25,17%	0,31

### 4.3.2 Taxa de infiltração

A Figura 35 apresenta os dados de infiltração vs. porosidade para todas as misturas analisadas. Para facilitar a análise, a figura foi dividida em dois gráficos, a Figura 35 (a) mostra a distribuição para todos os corpos de prova e a Figura 35 (b) apresenta a média e o desvio padrão para cada relação a/c com e sem a presença de aditivo.

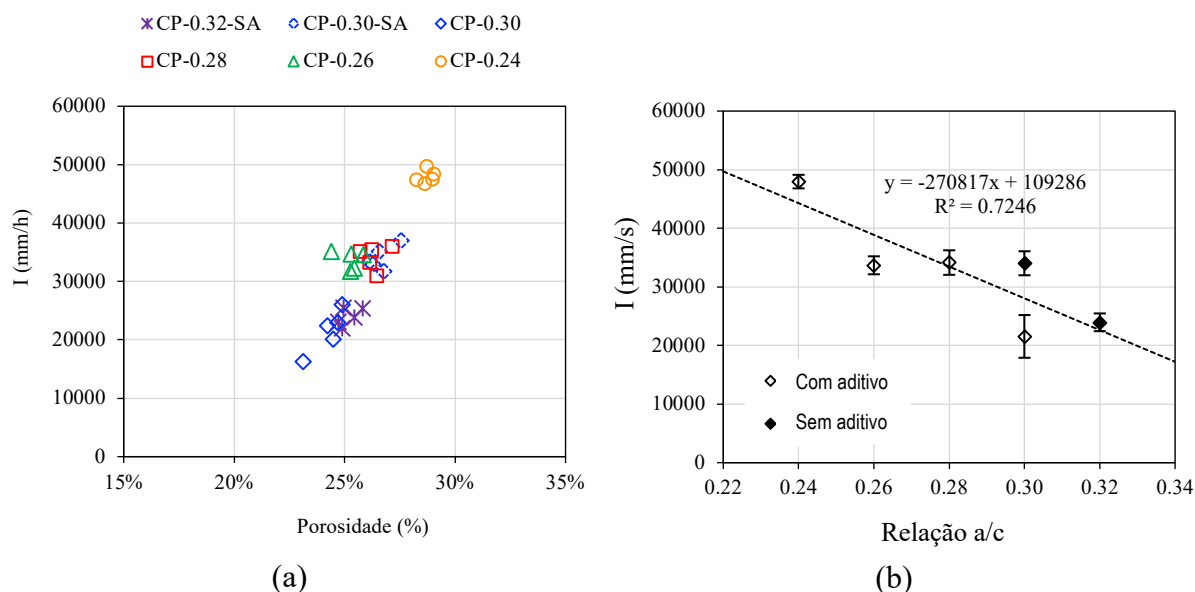


Figura 35 – Taxa de infiltração para diferentes relações a/c e teor de aditivo: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).

Da Figura 35 (a) observa-se que a taxa de infiltração aumenta com o aumento da porosidade. Este comportamento é esperado dado a uniformidade da compactação e da diminuição da porosidade vertical em corpos de prova moldados com o Proctor. Da Figura 35 (b), observa-se que há uma tendência de diminuição da taxa de infiltração com o aumento da relação a/c. O modelo linear representa 70% deste comportamento. Desconsiderando o caso particular do CP-0.24, que obteve maior porosidade devido à dificuldade adensamento, os demais traços, quando na mesma faixa de porosidade, apresentaram diferentes taxas de infiltração. Por exemplo, as amostras CP-0.26, CP-0.28 e CP-0.30-SA apresentaram maior taxa de infiltração que as amostras CP-0.30 e CP-0.32-SA, mesmo quando a faixa de porosidade é a mesma, o que indica uma provável mudança na tortuosidade dos poros gerada pelas amostras que apresentaram maior trabalhabilidade. Isto pode indicar que, misturas com maior fluidez podem acomodar-se de tal forma a dificultar a percolação da água. Assim, é importante advertir que, em se tratando de situações práticas, a fluidez do concreto permeável pode ser um fator contribuinte para a moldagem do pavimento, mas por outro lado pode representar um fator negativo para a taxa de

infiltração. Ressalta-se, portanto, a importância do controle da trabalhabilidade da mistura, de forma a manter um equilíbrio entre a fluidez do concreto sem que haja precipitação de pasta nos macroporos.

### 4.3.3 Permeabilidade

A Figura 36 apresenta os resultados de permeabilidade obtidos de acordo com a variação da relação água/cimento nas misturas de concreto permeável. Da mesma forma que para os resultados apresentados no item anterior, referente a taxa de infiltração, a Figura 36 também foi dividida em (a) e (b), mostrando a influência da permeabilidade pela porosidade, e da permeabilidade em relação a variação da relação a/c, respectivamente.

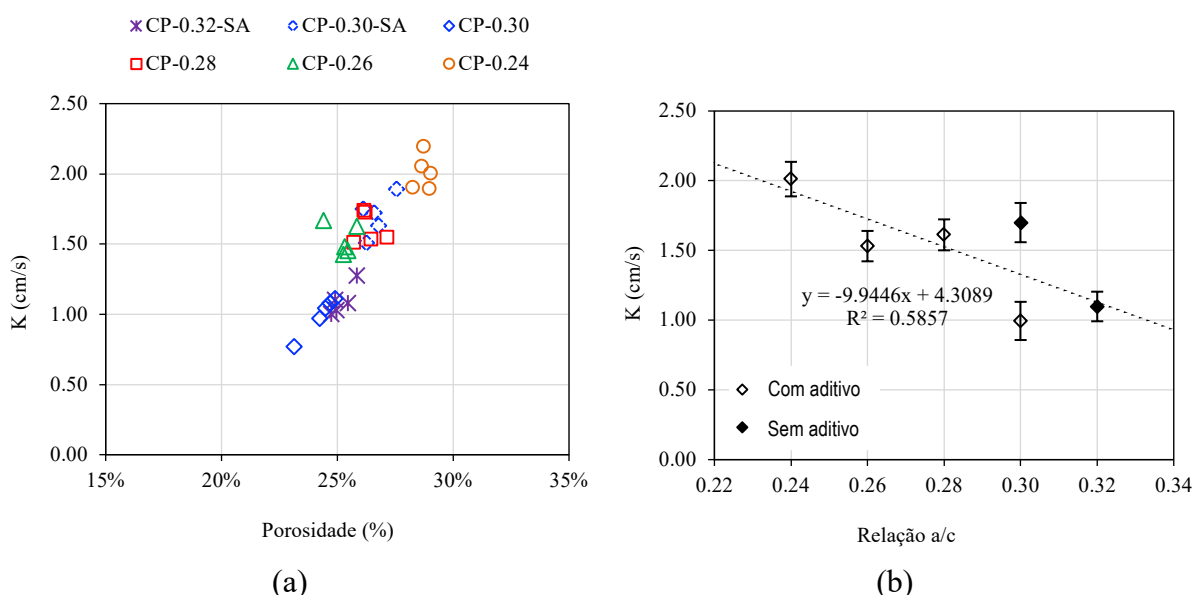


Figura 36 – Permeabilidade para diferentes relações a/c e teor de aditivo: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).

Das figuras, observa-se que, semelhantemente aos resultados de taxa de infiltração, conforme aumenta-se a porosidade, há um aumento do coeficiente de permeabilidade das amostras. Para as amostras CP-0.26, CP-0.28 e CP-0.30-SA, não houve diferença significativa em relação ao coeficiente de permeabilidade, comprovado pela equivalência nos desvios-padrão. Os corpos de prova também obtiveram a mesma faixa de porosidade.

Analisando o gráfico da variação do coeficiente de permeabilidade em relação a variação da relação a/c, verifica-se que há uma tendência de diminuição da permeabilidade com o aumento da relação a/c. Equivalente foi obtido por Fu *et al.* (2014), no qual foram estudadas três diferentes relações a/c (0,25, 0,35 e 0,45). Para as relações a/c 0,25 e 0,35, mesmo ambas

estando na mesma faixa de porosidade (20% e 30%), os valores de permeabilidade foram menores para as amostras de maior relação a/c. Para a relação a/c de 0,45, os autores mencionaram que houve segregação da pasta (acumulou-se no fundo da amostra em função da gravidade), devido à falta de aderência da mesma nos agregados. Conseqüentemente, os resultados foram reduzidos drasticamente até o ponto em que a permeabilidade é baixa. Neste caso, os autores mencionaram a importância do uso de aditivo intensificador de viscosidade para evitar o fenômeno.

Os valores médios obtidos de permeabilidade para todas as amostras permaneceram na faixa entre aproximadamente 1,0 cm/s e 2,0 cm/s. Estes valores permanecem de acordo com os valores observados por outros autores na literatura utilizando um permeômetro de carga variável (SCHAEFER *et al.*, 2006; MONTES e HALSELBACH, 2006).

#### 4.3.4 Resistência à compressão

A Figura 37 mostra os resultados de resistência à compressão, também divididos em Figura 37 (a), a qual mostra os resultados de resistência à compressão pela porosidade, e Figura 37 (b), mostrando os resultados de resistência à compressão média em função da variação da relação a/c.

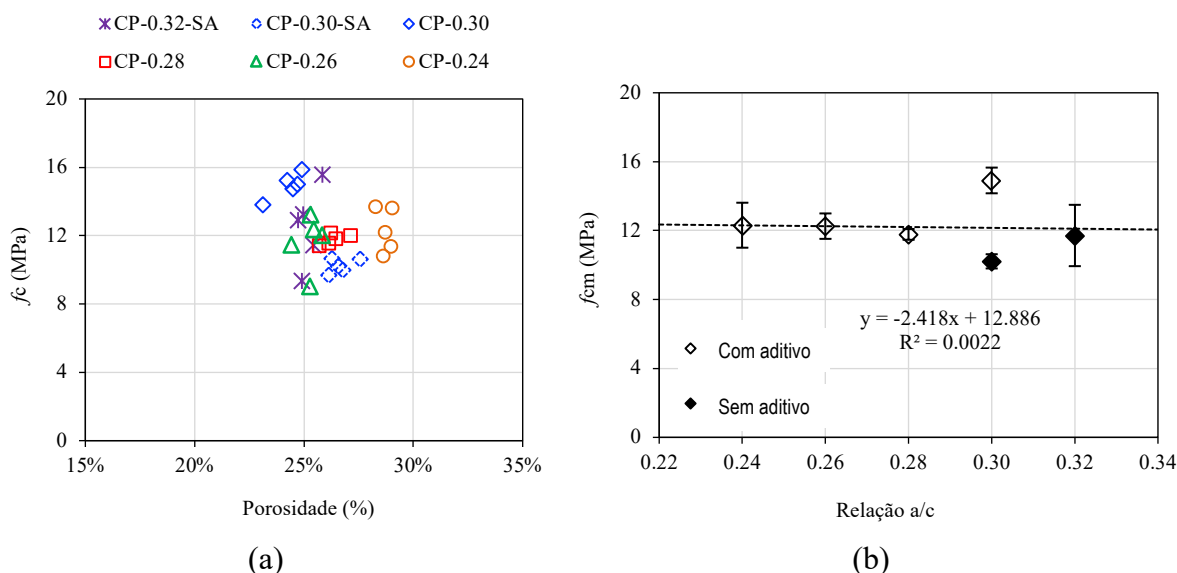


Figura 37 – Resistência à compressão para diferentes relações a/c e teor de aditivo: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).

Através de ambos os gráficos, é possível observar que não há influência significativa da variação da porosidade e da relação a/c para os resultados de resistência à compressão, com

exceção das amostras CP-0.30 com e sem aditivo. As amostras CP-0.24, CP-0.26, CP-0.28 e CP-0.32 não mostraram diferença significativa, comprovado pela coincidência dos desvios-padrão, conforme ilustra a Figura 37 (b), apresentando uma média de aproximadamente 12 MPa. A divergência entre os valores obtidos para a amostra CP-0.30 se deve, para o caso sem aditivo, da consistência seca e conseqüente falta de aderência da pasta com o agregado. Já para a amostra CP-0.30 com aditivo, a maior resistência é provavelmente devido à maior precipitação da pasta nos macroporos gerado pela presença do aditivo modificador de reologia, a qual acarretou a redução da porosidade (menor média dentre os demais). No caso da amostra CP-0.24, apesar de ter apresentado maior média de porosidade (28,72%) em comparação aos demais, o valor médio de resistência à compressão se manteve na mesma faixa, provavelmente em virtude da baixa relação a/c. É possível notar, desta forma, que para o concreto permeável, a resistência à compressão é função de várias variáveis, tais como, principalmente, do controle da densidade e porosidade, e do controle da relação a/c através da trabalhabilidade e consistência (aderência pasta-agregado e precipitação da pasta nos vazios). Vale ressaltar que, além disso, embora não seja uma variável deste estudo, as propriedades físicas do agregado também apresentam uma importante contribuição no controle das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto permeável, conforme mencionado no item 2.3.1.

No trabalho de Fu *et al.* (2014), os valores médios de resistência para as relações a/c de 0,25 e 0,35 apresentaram uma diferença de, aproximadamente, 5 MPa, embora os autores não tenham apresentado o desvio-padrão nos gráficos. Para uma faixa granulométrica semelhante a adotada neste trabalho, os autores obtiveram valores entre, aproximadamente, 16 MPa e 21 MPa, para as relações a/c de 0,35 e 0,25, respectivamente. Para Sonebi e Bassuoni (2013), o incremento na relação água/cimento, resultou, nas misturas estudadas, no incremento da densidade e da resistência à compressão, enquanto reduziu a quantidade de vazios (porosidade) e taxa de infiltração. As relações a/c estudadas foram de 0,28, 0,34 e 0,40. É importante enfatizar que no estudo de Sonebi e Bassuoni (2013), assim como em muitos outros encontrados na literatura, a moldagem do concreto permeável foi feita semelhante ao realizado para concreto convencional, através do preenchimento da fôrma e compactação com haste em duas camadas de 15 golpes, sem controle da densidade. Como conseqüência, diferentes porosidades foram obtidas entre as amostras. Assim, é possível que as maiores relações a/c obtida pelos autores, resultaram na maior densidade e redução da porosidade devido a precipitação da pasta nos poros, uma vez que não foi mencionado nenhum tipo de controle de trabalhabilidade. A divergência dos

métodos de dosagem e compactação encontrados na literatura, dificultam a comparação dos resultados.

No concreto convencional, a zona de transição (ZT) entre o agregado e a matriz cimentícia apresenta grande influência em relação as propriedades do concreto, já que geralmente representa a parte mais frágil do material. Observa-se que semelhante ocorre para o concreto permeável, ou seja, a fragilidade da zona de transição, que pode ser gerada pela falta ou excesso de água na mistura e falta de aderência, também pode afetar sua resistência. Sendo assim, para o concreto permeável, todos fatores mencionados (consistência/trabalhabilidade, densidade, porosidade e ZT) são igualmente importantes e devem ser considerados para obtenção da resistência mecânica desejada.

#### 4.3.5 Resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático

A Figura 38 apresenta os resultados de resistência à tração na flexão para as diferentes relações a/c estudadas. Na Figura 38 (a) os resultados são mostrados em função da porosidade  $e$ , na Figura 38 (b), os resultados médios são mostrados em função da variação da relação a/c. A Tabela 16 mostra os resultados médios e estatísticos para a resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático. A diferença das porosidades obtidas neste ensaio em relação aos demais, se deve ao fato da diferença entre o tipo de corpo de prova e compactação. Nos resultados anteriores, em corpos de prova cilíndricos, a compactação foi feita com o uso do Proctor. Nos resultados das vigas prismáticas mostrados neste item, a compactação foi feita com rolo. A densidade foi controlada da mesma forma que para os corpos de prova cilíndricos.

Da Figura 38 (a) verifica-se que a concentração da porosidade das amostras ficou em torno de 25%, conforme o projetado. As amostras CP-0.24 e CP-0.30-SA variaram, em média, 1% para cima, em função das mesmas condições relatadas anteriormente, ou seja, foi constatado, para ambas, ausência de trabalhabilidade, o que dificultou a colocação da mistura na fôrma. Na Tabela 16 é possível verificar a média obtida e o baixo desvio padrão, o que confirma, embora o diferente método de compactação, que a porosidade projetada pôde ser obtida através do controle da densidade das amostras. Em relação a resistência à tração na flexão, da Figura 38 (b), observa-se que, mesmo para a mesma faixa de porosidade, há influência da relação água/cimento nos resultados, isto é, há uma tendência de diminuição da resistência à tração na flexão, conforme a relação a/c é aumentada. O valor de  $R^2$  obtido, demonstra que 74% da variável dependente pode ser explicada pela regressão linear no modelo.

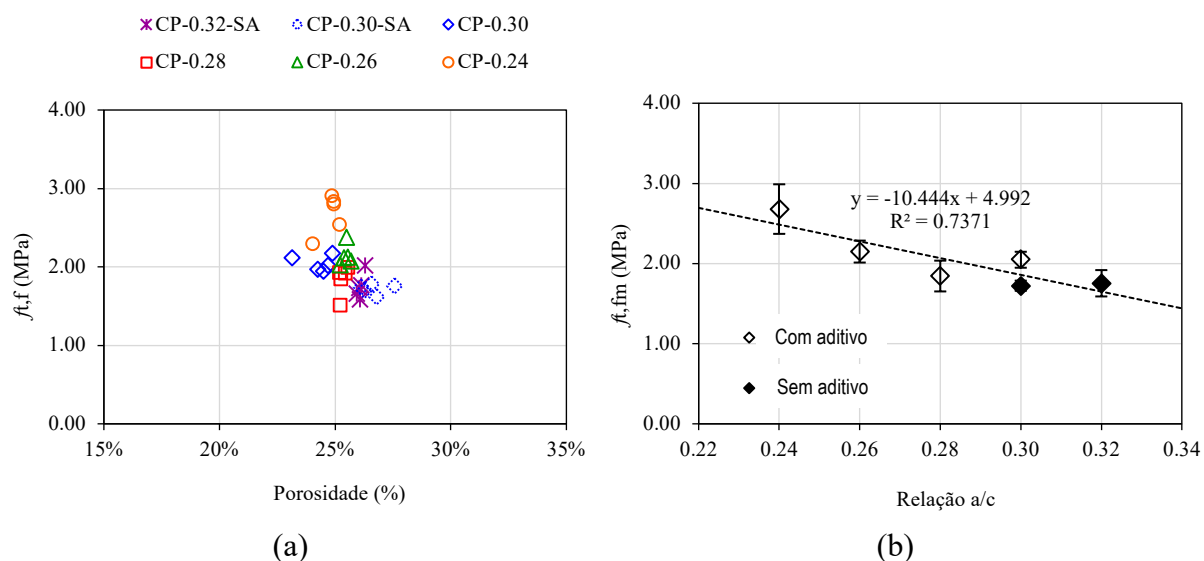


Figura 38 – Resistência à tração na flexão para diferentes relações a/c e teor de aditivo: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).

Na Tabela 16, referente ao módulo de elasticidade estático, observa-se que não há tendência de aumento ou redução em relação à variação da relação a/c. Os valores foram próximos e apresentaram uma média de 14,60 GPa – pouco menos da metade obtida tipicamente para concretos convencionais, sendo valores comuns em torno de 35 GPa (BALBO, 2009), cuja porosidade é de 4 a 5 vezes menor do que o concreto permeável. Em suma, os valores de resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático estão de acordo com o encontrado por outros autores (RODDEN *et al.*, 2011; BATEZINI, 2013) e sugerido pela *American Concrete Pavement Association* (ACPA) para projetos de pavimento com revestimento permeável.

No Brasil, pavimentos de concreto simples (PCS) possuem resistências típicas à tração na flexão de 2,5 a 4,5 MPa (BALBO, 2005). Para tráfego mais intenso, é comum a utilização de resistências acima de 4,0 MPa. Nesse sentido, considerando que o concreto permeável possui alta porosidade e baixa resistência quando comparado ao concreto convencional, seria necessário espessuras muito elevadas para atingir níveis de tráfego mais elevado, o que tornaria sua aplicação inviável. Entretanto, para tráfego leve, a NBR 16416 (2015), que trata dos requisitos e procedimentos para pavimentos permeáveis de concreto, traz como resistência mecânica característica à tração na flexão, o valor de 2,0 MPa para um concreto permeável moldado no local (100 mm de espessura). Cabe ressaltar que este valor mencionado pela norma deve ser ponderado como uma resistência mínima de projeto, já que as considerações estatísticas da resistência característica que levam em conta o desvio-padrão, não poderiam ser

aplicadas da mesma forma ao concreto permeável. Sendo assim, as amostras CP-0.24, CP-0.26 e CP-0.30 poderiam ser consideradas para baixo nível de tráfego de veículos, considerando o limite inferior do desvio-padrão acima do valor especificado.

Tabela 16 – Valores médios de resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático para diferentes relações a/c e teor de aditivo.

Nomenclatura	Porosidade (%)	DesvPad	$f_{t,f}$ (MPa)	DesvPad	E (GPa)	DesvPad
CP-0.24	24,79	0,60	2,68	0,31	14,36	1,20
CP-0.26	25,46	0,18	2,18	0,18	17,15	2,72
CP-0.28	25,33	0,03	1,84	0,22	13,69	1,99
CP-0.30	24,29	0,69	2,05	0,10	15,11	2,18
CP-0.30-SA	26,67	0,35	1,69	0,06	14,09	1,38
CP-0.32-SA	26,10	0,17	1,75	0,23	10,77	2,61

#### 4.3.6 Considerações parciais

Neste último item da Fase 1, objetivou-se avaliar o efeito da variação da relação a/c e aditivo modificador de reologia, nas misturas de concreto permeável, mantendo o método de dosagem e compactação com o Proctor, escolhido através dos estudos conduzidos no subitem anterior desta fase. Este estudo contribui para a consolidação do método de dosagem pela verificação da influência das outras variáveis, tais como a relação a/c e a trabalhabilidade, uma vez que tais fatores podem influenciar na obtenção da porosidade projetada. Assim, as seguintes conclusões podem ser fornecidas:

- O método de dosagem utilizado com controle rigoroso da densidade, foi eficiente para obter a porosidade, mesmo com a variação da relação a/c nas misturas. A porosidade média obtida para todas as amostras foi de aproximadamente 26%. Devido a menor trabalhabilidade pela consequente relação a/c mais baixa, o valor projetado de porosidade foi mais difícil de se obter para as amostras CP-0.24.
- O aditivo modificador de reologia melhora a trabalhabilidade das amostras e facilita o preenchimento das misturas nas fôrmas, fato importante a ser considerado em situações práticas. Entretanto, atenção deve ser dada a escolha correta da relação água/cimento e teor de aditivo para obtenção adequada de consistência e trabalhabilidade, ou seja, sem que a mistura apresente aspecto seco e falta de aderência com o agregado, ou que haja precipitação da pasta nos macroporos da mistura. Sendo assim, as melhores trabalhabilidades, considerando tais efeitos, foram observadas para as amostras CP-0.26, CP-0.28 e CP-0.32.



- A taxa de infiltração e o coeficiente de permeabilidade aumentam com o aumento da porosidade e diminuem com o aumento da relação a/c. Entretanto, para uma mesma faixa de porosidade, as amostras CP-0.26, CP-0.28 e CP-0.30-SA apresentaram maior taxa de infiltração e permeabilidade que as amostras CP-0.30 e CP-0.32-SA. Tal fato indica uma provável mudança na tortuosidade dos poros, gerada por estas últimas, que apresentaram maior fluidez.
- Não houve diferença significativa na resistência à compressão com a variação da relação a/c, com exceção da amostra CP-0.30 que, para o caso com uso do aditivo, houve precipitação da pasta nos poros. Já para o caso sem aditivo, houve falta de aderência com a pasta. Ressalta-se a importância do controle ideal da consistência das misturas na resistência à compressão do concreto permeável.
- A resistência à tração na flexão decresce com o aumento da relação a/c. Mesmo para a mesma faixa de porosidade, há influência da relação água/cimento nos resultados. Valores acima de 2 MPa, considerados satisfatórios para tráfego leve de veículos, foram obtidos para as misturas CP-0.24 e CP-0.26. Não houve tendência de comportamento para os valores de módulo de elasticidade estático em relação à variação da relação a/c. A média obtida de 14,60 GPa representa cerca da metade do valor comumente obtido para concretos convencionais.

Considerando o desempenho hidráulico e mecânico e, ainda, a consistência e trabalhabilidade das misturas estudadas, verifica-se que, para o traço estudado, a relação a/c de 0,26 apresentou bom equilíbrio entre as variáveis mencionadas, resultando no aumento da resistência à tração na flexão e mantendo a mesma ou superior capacidade de infiltração e permeabilidade que relações a/c maiores. A mistura de relação a/c de 0,24, apesar de ter apresentados os melhores resultados tanto em termos hidráulicos, quanto mecânico, possui baixa trabalhabilidade, mesmo com a quantidade máxima de aditivo recomendada pelo fabricante e, portanto, não é recomendada.

#### 4.4 VARIAÇÃO DO TEOR DE PASTA

A quantidade de pasta da mistura de concreto permeável é fator determinante, principalmente, nas propriedades mecânicas do material, pois auxilia no melhor envolvimento do agregado e no melhoramento da zona de transição entre o agregado e a matriz cimentícia. Quando se deseja aumentar a resistência mecânica do concreto permeável, é necessário verificar se o teor de pasta

da mistura pode ser considerável na obtenção das propriedades desejadas. Entretanto, cabe ressaltar que o aumento da quantidade de pasta da mistura acarreta custos devido ao aumento do consumo de cimento. Além disso, considerando as limitações de aplicação do concreto permeável e seu desempenho mecânico inferior ao concreto convencional, tal aumento de custo inviabilizaria ainda mais a ampliação da sua aplicação. Por exemplo, um concreto para pavimento pode possuir um consumo de cimento em torno de 420 kg/m<sup>3</sup>; já o concreto permeável estudado neste trabalho, para o traço 1:4 (cimento:agregado), o consumo de cimento é de, aproximadamente, 380 kg/m<sup>3</sup> (diferença de 40 kg/m<sup>3</sup>). Embora o material corrobore com ganhos ambientais, o custo de um concreto permeável consideravelmente maior ao de um concreto convencional, desfavorece sua aplicação. Nesse sentido, considerando os benefícios hidráulicos do concreto permeável, o aumento do teor de pasta para obter um consumo de cimento equivalente, é resultado de uma proporção de 1:3,5, a qual fornece um consumo de cimento de, aproximadamente 418 kg/m<sup>3</sup>. Neste item, são comparados os desempenhos hidráulicos e mecânico da alteração do teor de pasta, conforme dados da Tabela 17. A quantidade de aditivo para o traço 1:3,5 teve que ser alterada para o máximo recomendado pelo fabricante, para que a consistência ideal da mistura pudesse ser atingida. A relação a/c foi mantida em 0,26 em função dos resultados obtidos no item anterior.

Tabela 17 – Proporções de mistura: variação do teor de pasta.

<b>Nomenclatura</b>	<b>Agregado/Cimento</b>	<b>Água/Cimento</b>	<b>Aditivo/Cimento</b>	<b>Dt (kg/m<sup>3</sup>)</b>
P-1:4	4,0	0,26	0,007	2004,67
P-1:3.5	3,5	0,26	0,011	1987,66

Dt = Densidade teórica;

O procedimento de mistura, moldagem e cura das amostras manteve-se o mesmo. A quantidade total de corpos de prova moldados foi de 5 corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x altura) e 5 vigas prismáticas de 10 x 10 x 40 cm (altura x largura x comprimento). Os valores médios, desvio-padrão, coeficiente de variação e análise de variância (ANOVA) podem ser visualizados na Tabela 18.

Considerando o nível de significância de 0,05, os *valores-P* obtidos através da análise de variância ANOVA entre os dois traços estudados, indicam que há influência do teor de pasta nos resultados de densidade, taxa de infiltração, coeficiente de permeabilidade e resistência à compressão. Por outro lado, a mudança no teor de pasta não é significativa para os resultados de porosidade e resistência à tração na flexão. Os resultados mostram, portanto, que aumentando o teor de pasta da mistura, em relação as propriedades hidráulicas, obtém-se

menores valores médios de taxa de infiltração e permeabilidade, com reduções de, aproximadamente, 18% e 20%, respectivamente. Em relação a resistência à compressão, houve um aumento médio de 26%.

Tabela 18 – Média, desvio-padrão, coeficiente de variação e análise de variância (ANOVA) das propriedades hidráulicas e mecânicas dos traços 1:4,0 e 1:3,5.

Nomenclatura		Dr (kg/m <sup>3</sup> )	P	I (mm/h)	K (cm/s)	f <sub>cm</sub> (MPa)	f <sub>t,fm</sub> (MPa)
P-1:4	Média	2006,75	0,253	0,94	1,53	11,61	2,15
	DesvPad	4,50	0,0052	0,04	0,11	1,58	0,14
	CV	0,22%	2,07%	4,55%	7,11%	13,64%	6,37%
P-1:3.5	Média	1981,42	0,256	0,77	1,22	14,63	2,10
	DesvPad	2,83	0,0035	0,09	0,11	2,07	0,29
	CV	0,14%	1,36%	10,98%	9,32%	14,13%	13,66%
1:4,0 vs 1:3,5	Valor-P	5,3E <sup>-06</sup>	0,2763	0,0054	0,0023	0,0319	0,1050

Dr = Densidade real; P = Porosidade; I = Taxa de infiltração; K = Coeficiente de permeabilidade  
F<sub>cm</sub> = resistência à compressão média; F<sub>t,fm</sub> = resistência à tração na flexão média

Considerando que a resistência à tração na flexão é a variável considerada para o dimensionamento do material para pavimentação, verifica-se que o aumento do consumo de cimento em 38 kg/m<sup>3</sup> na mistura, não gera alterações significativas e favoráveis em relação as propriedades hidráulicas e de resistência mecânica do material. O acréscimo de custo gerado (relacionado apenas ao consumo de cimento) é de, aproximadamente, R\$ 20,00 por m<sup>3</sup> de concreto permeável, para aumentar, em média, apenas 3,02 MPa de resistência à compressão. Este custo fornecido é apenas uma referência<sup>10</sup>, podendo variar dependendo da região de compra do cimento CPV-ARI utilizado nesta pesquisa.

#### 4.5 SÍNTESE DA FASE 1

A **Fase 1** desta tese, sendo idealmente uma fase de estudos preliminares, é de suma importância para a consolidação de métodos e procedimentos laboratoriais para o estudo do concreto permeável. Um dos objetivos desta fase foi avaliar a possibilidade de utilizar um método tradicional de dosagem de concreto convencional no país, como o IPT/EPUSP, também para concreto permeável. A dosagem do concreto convencional é algo amplamente difundido e corriqueiro, porém, quando se trata de concreto permeável, os métodos podem não ser eficientes, uma vez que, além do material ser consideravelmente diferente em termos

<sup>10</sup> Referência para cimento CP-V ARI, site: americanas.com.br. Acesso em: 18 de novembro de 2018.

mecânicos, sua dosagem deve levar em consideração um fator extremamente importante, a **porosidade**. A porosidade é a variável que governa as demais propriedades do material, e, portanto, deve ser considerada no projeto de dosagem. Em muitos trabalhos, é possível notar a dificuldade em obter baixa variabilidade da porosidade final de amostras de concreto permeável (que podem variar de 15 a 35%), isso porque para obtenção da porosidade, outras três variáveis também devem ser consideradas, isto é, **densidade** do concreto permeável, **consistência** da mistura e **método de compactação**.

Conforme já mencionado, o método de compactação utilizando a haste de adensamento para concreto convencional, não é recomendado para o concreto permeável, primeiramente porque não representa condições práticas, e segundo porque não é suficiente para homogeneização e uniformização da mistura na fôrma, cujo *slump* é praticamente zero. Além disso, pode prejudicar a porosidade vertical da amostra. Considerando a energia de compactação, o subcomitê de concreto permeável da ASTM (ver item 2.4.2) recomendou o uso do Proctor para compactação do concreto permeável, com um número de golpes padrão. Assim, um outro objetivo desta fase foi comparar corpos de prova extraídos e compactados com rolo (simulando situações *in loco*) com corpos de prova moldados em laboratório com o uso do Proctor. Nesta etapa, verificou-se que o uso Proctor, apesar de não representar algumas variáveis obtidas na prática (com uso do rolo), é válido quando se deseja obter resultados mais consistentes e comparar variáveis em laboratório (por exemplo, verificar influência do tipo de agregado, uso de materiais cimentícios suplementares, etc.). Isto ocorre porque é possível manter um melhor controle da compactação e densidade dos corpos de prova.

Uma outra contribuição importante foi observada referente ao método de compactação. Apesar da placa moldada e dos corpos de prova terem sido compactados com diferentes equipamentos, pouca diferença foi observada entre a porosidade dos corpos de prova extraídos da placa e os moldados no laboratório (em torno de 3%). Dessa forma, independentemente do método de compactação, é importante o **controle da densidade** para que a porosidade projetada seja atingida. Já a diferença entre a infiltração e permeabilidade dos corpos de prova moldados *versus* extraídos, deu-se em função da pressão causada pela passagem do rolo, conforme explicado.

Em relação à variação da relação a/c das misturas de concreto permeável, verifica-se que o comportamento não é semelhante ao concreto convencional. Na resistência à compressão, o efeito desta variação não é significativo. A partir desta etapa, é importante enfatizar outra

variável na obtenção da porosidade projetada, a **consistência da mistura**. Neste caso, controlar a densidade e a compactação não será suficiente se a amostra não estiver na consistência ideal. Uma consistência muito seca, faz com que o número de golpes padrão não seja suficiente para controlar a densidade e, dessa forma, aumentar o número de golpes para uma determinada mistura faz com que uma variável de controle seja perdida e as demais não possam ser comparadas entre si. Por outro lado, uma consistência muito fluida, pode ocasionar a precipitação da pasta nos macroporos da mistura diminuindo, conseqüentemente, a porosidade que havia sido projetada.

Neste contexto, evidencia-se que não basta projetar apenas a porosidade do concreto permeável para que as propriedades hidráulicas e mecânicas sejam atingidas, é preciso garantir diversos fatores intercessores, tais como: o controle da densidade projetada; a consistência apropriada e aderência da pasta com o agregado, através da adequada relação água/cimento e aditivo; e a utilização de um método de compactação que garanta a uniformidade do material.

## 5 FASE 2: COMBINAÇÕES DE MATERIAIS ALTERNATIVOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da Fase 2, cujo objetivo é a incorporação de materiais alternativos para o aumento do desempenho mecânico do concreto permeável (conforme descrito no item 1.5). Os parâmetros de dosagem (proporção de mistura e relação a/c), bem como o método de compactação, foram fixados com base nos resultados obtidos na Fase 1. É importante enfatizar que a escolha das proporções adotadas foi realizada com base na revisão apresentada no Capítulo 2 desta tese, mais especificadamente nos itens 2.3.2, 2.3.3 e 2.3.4. Portanto, os teores dos materiais alternativos foram escolhidos com base em tais pesquisas, visando aliar a melhora do desempenho mecânico sem o comprometimento da funcionalidade hidráulica do concreto permeável.

Os subitens deste capítulo foram divididos de forma a contemplar a análise individual da influência de algumas variáveis no concreto permeável, tais como a influência da relação a/c quando a sílica ativa é incorporada, e, ainda, a influência do tipo de fibra. Por fim, é analisada a influência da combinação dos materiais alternativos estudados.

### 5.1 INCORPORAÇÃO DE SÍLICA ATIVA VS. RELAÇÃO A/C

Nesta etapa foram avaliadas misturas de concreto permeável com substituição parcial do cimento por 8% de sílica ativa nas relações água/cimento de 0,26 e 0,30 com aditivo. Apesar da relação a/c 0,26 apresentar os melhores resultados em termos de resistência à tração na flexão, optou-se por avaliar também para relação a/c 0,30, já que as partículas finas da sílica ativa podem demandar maior consumo de água devido à maior área superficial específica. O aumento apenas da quantidade de aditivo pode não ser suficiente para manter a consistência do concreto permeável quando a sílica ativa é incorporada.

A Tabela 19 mostra as proporções de mistura e as densidades projetadas, cujos valores foram alterados considerando no traço a substituição em massa do cimento pela sílica ativa e a diferença de massa específica dos materiais. Estes valores de densidade foram calculados considerando a mesma porosidade projetada de 25%. No entanto, a quantidade de aditivo foi alterada em função da incorporação da sílica ativa nas misturas. Para que a mesma consistência fosse obtida, a quantidade de aditivo na mistura com relação a/c de 0,30 contendo sílica teve um pequeno aumento. Já para a mistura de relação a/c de 0,26, foi utilizada a quantidade

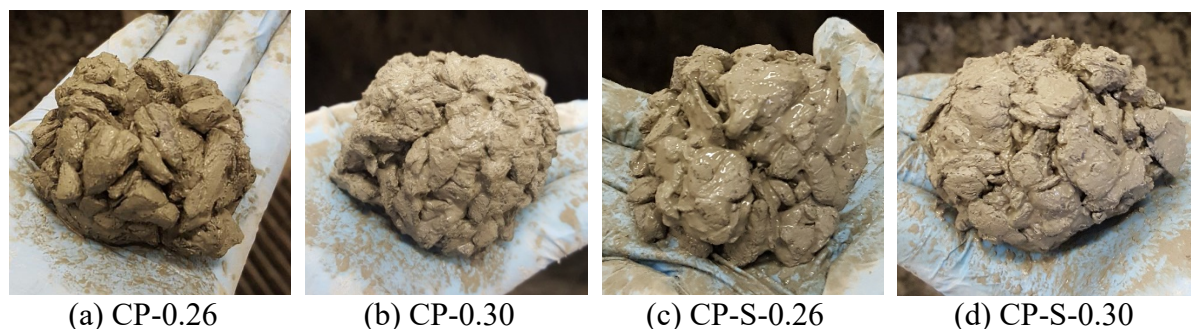
máxima de aditivo recomendada pelo fabricante. A Figura 39 mostra a consistência das misturas, no qual é possível visualizar a diferença no aspecto para aquelas com relação a/c de 0,26 (sem e com a incorporação de sílica ativa). Nota-se que a mistura com sílica ativa e maior quantidade de aditivo (CP-S-0.26), apresentou um aspecto mais brilhoso e com maior tendência de precipitação da pasta nos poros, quando comparada à mistura padrão CP-0.26. Já para as misturas com relação a/c de 0,30, essa diferença não é visivelmente notável.

Tabela 19 – Proporções de mistura: sílica ativa e variação da relação a/c.

Nomenclatura	Agregado/Cimento	Sílica	Água/Cimento	Aditivo/Cimento	Dt (kg/m <sup>3</sup> )
CP-0.26	4	-	0,26	0,007	2004,67
CP-0.30	4	-	0,30	0,003	1979,68
CP-S-0.26	4	8%	0,26	0,011	1995,97
CP-S-0.30	4	8%	0,30	0,004	1971,26

Dt = Densidade teórica

Figura 39 – Consistência das misturas sem e com sílica ativa para as diferentes relações a/c.



Seguindo o mesmo padrão adotado no capítulo anterior, os ensaios foram realizados em 5 corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x altura) e 5 vigas prismáticas de 10 x 10 x 40 cm (altura x largura x comprimento) para cada mistura. Da mesma maneira, os corpos de prova cilíndricos foram moldados com o uso do Proctor (duas camadas de 20 golpes), e os corpos de prova prismáticos com o uso do rolo (uma camada).

### 5.1.1 Densidade no estado endurecido vs. porosidade

A Figura 40 apresenta a relação entre a densidade média real obtida no estado endurecido e a porosidade média para ambas relações a/c analisadas, considerando o concreto permeável sem e com a incorporação de sílica ativa. A Tabela 20 mostra os valores e comparativo entre a densidade teórica, densidade real e porosidade.

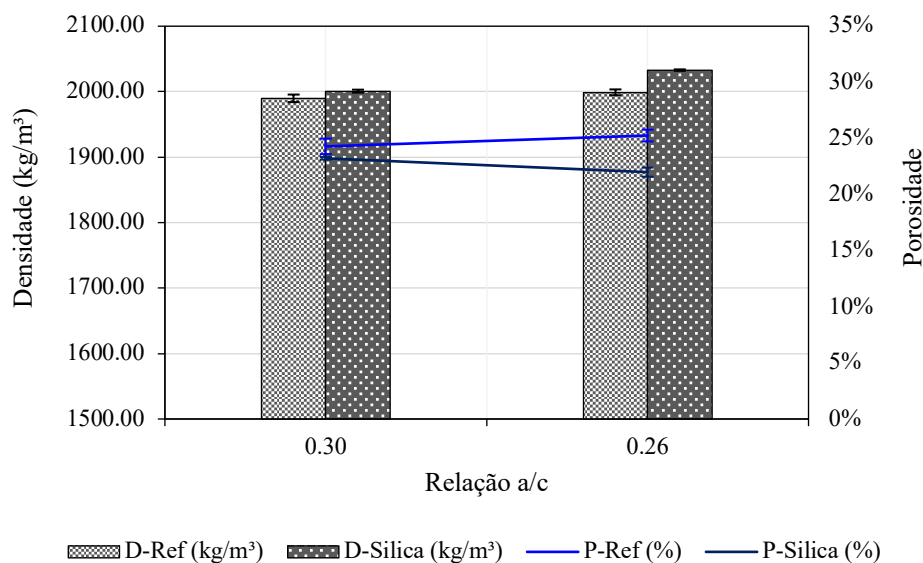


Figura 40 – Relação entre densidade real e porosidade para as misturas sem e com sílica ativa para as diferentes relações a/c e teor de aditivo.

Tabela 20 – Valores médios de densidade e porosidade para as misturas sem e com sílica ativa para diferentes relações a/c e teor de aditivo.

Nomenclatura	D-teórica (kg/m <sup>3</sup> )	D-real (kg/m <sup>3</sup> )	DesvPad	Porosidade	DesvPad
CP-0.26	2004,67	2006,75	4,50	25,26%	0,56
CP-0.30	1979,68	1989,82	5,77	24,29%	0,31
CP-S-0.26	1995,97	2032,50	1,14	22,00%	0,41
CP-S-0.30	1971,26	2000,83	2,24	23,23%	0,11

Observa-se, na Figura 40, que houve uma pequena diferença entre as densidades para a mesma relação a/c. A densidade das amostras contendo sílica ativa, considerando a densidade projetada, deveria ser ligeiramente menor que aquelas sem o material cimentício suplementar, conforme mostra a Tabela 20. Este aumento da densidade real para as misturas contendo sílica ativa pode, possivelmente, ser atribuído ao aumento da quantidade de aditivo incorporado. Este aumento está ligado à modificação da fluidez da pasta e sua tendência de precipitação nos poros do concreto. Foi observado durante a moldagem que, para que a altura dos corpos de prova fosse mantida (considerando a não possibilidade de alteração do número de golpes de compactação) uma maior quantidade de massa foi acomodada na fôrma. Tal fato acabou por resultar no aumento da densidade final das amostras.

A Figura 40 também mostra o efeito da variação da densidade na porosidade média final das amostras. A linha azul clara indica a porosidade das amostras sem sílica ativa, enquanto que a linha azul escura indica a porosidade das misturas contendo sílica ativa. Observa-se que, para a



relação a/c 0,30, a porosidade média baixou apenas 1,06%. Já para a relação a/c de 0,26, a porosidade média teve um decréscimo de 3,26%. A redução da porosidade para as amostras contendo sílica ativa, pode estar relacionada ao mesmo efeito atrelado à alteração da densidade, devido ao aumento do aditivo. A diferença entre os valores médios, tanto de densidade quanto de porosidade, é significativa, uma vez que o desvio padrão de ambos não coincidem.

### 5.1.2 Taxa de infiltração

A Figura 41 apresenta os dados de infiltração vs. porosidade para as misturas analisadas. Na Figura 41 (a) é possível visualizar a distribuição para todos os corpos de prova e, na Figura 41 (b), a média e o desvio padrão para cada relação a/c com e sem a incorporação de sílica ativa.

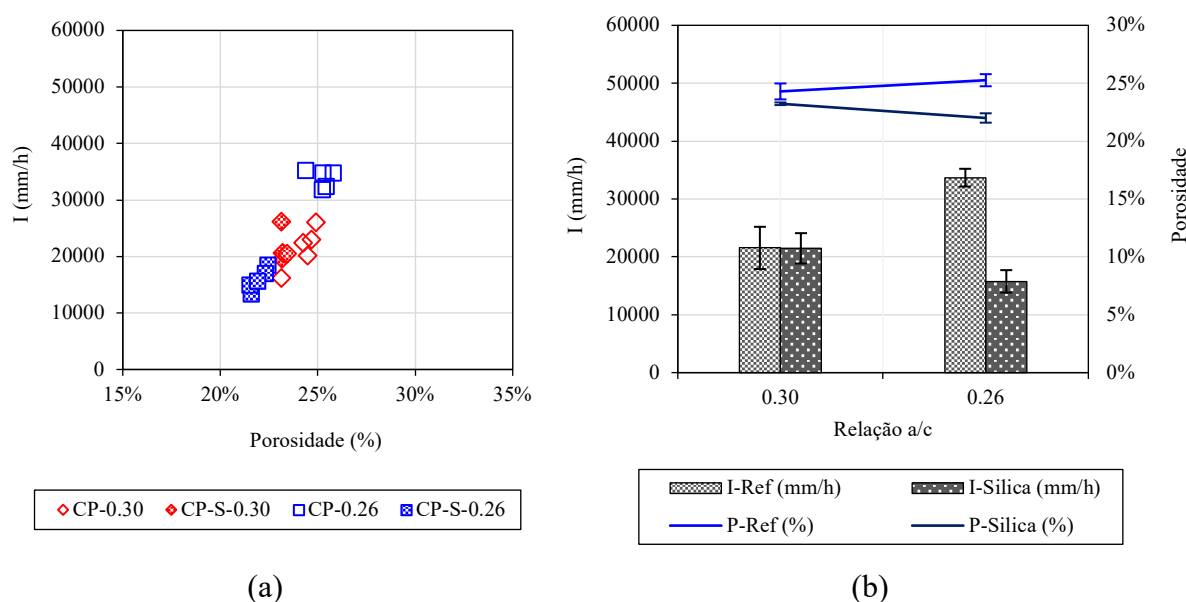


Figura 41 – Taxa de infiltração para as misturas sem e com sílica ativa para as diferentes relações a/c e teor de aditivo: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).

Observa-se que para a relação a/c 0,30, no qual os valores de porosidade ficaram próximos, não há influência significativa da presença da sílica ativa na mistura em relação à taxa de infiltração. Esta hipótese foi confirmada pelo teste de variância ANOVA, cujo *valor-P* obtido é de 0,972, sendo maior que 0,05 (nível de significância). Já para mistura com relação a/c 0,26, a diferença na taxa de infiltração é evidente, representado pela diminuição de aproximadamente 53%, e pelo *valor-P* obtido de  $2,1 \times 10^{-7}$  (menor que 0,05). No entanto, não há como constatar apenas a influência da incorporação da sílica ativa para esta relação a/c em particular, uma vez que a alteração da quantidade de aditivo adicionada à mistura também representa papel fundamental

nos resultados. É possível que não somente a sílica ativa, mas a combinação em particular destes materiais e teores para formar a pasta (aglomerantes, relação a/c e aditivo), tenham alterado a fluidez, de forma que os macroporos do concreto tenham sido mais bem preenchidos, alterando sua conectividade.

### 5.1.3 Permeabilidade

A Figura 42 apresenta os dados de permeabilidade vs. porosidade para as misturas analisadas. Da mesma forma que para a taxa de infiltração, a figura foi dividida na Figura 42 (a), contendo os valores individuais obtidos para todos os corpos de prova, e Figura 42 (b), contendo a média e o desvio padrão para cada relação a/c com e sem a incorporação de sílica ativa.

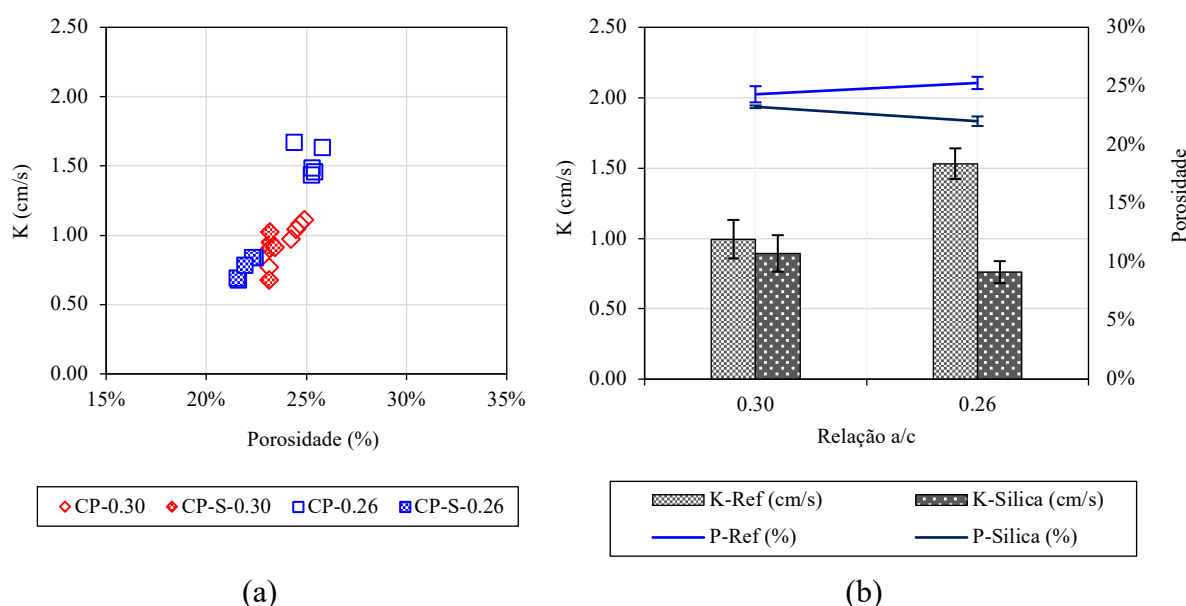


Figura 42 – Permeabilidade para as misturas sem e com sílica ativa para as diferentes relações a/c e teor de aditivo: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).

Os resultados apresentados na Figura 42 (a e b) para permeabilidade apresentam comportamento semelhante aos resultados de taxa de infiltração. Não houve diferença significativa para os resultados referentes à relação a/c 0,30, confirmado pela análise de variância ANOVA, cujo *valor-P* obtido foi de 0,264 ( $> 0,05$ ). Já para as misturas com relação a/c 0,26, a redução da permeabilidade quando a sílica ativa foi incorporada (aliado à alteração do teor de aditivo) foi de aproximadamente 50%. O *valor-P* obtido no teste de variância entre as amostras foi de  $1,27 \times 10^{-6}$ .

Segundo Lian e Zhuge (2010), aditivos superplastificante normalmente possuem moléculas longas, de alta massa molecular, as quais envolvem-se em torno das partículas de cimento, resultando na desfloculação da pasta e na dispersão da sílica ativa. De maneira semelhante, o aditivo plastificante (utilizado nesta pesquisa) também promove a repulsão eletrostática, afastando os grãos de cimento cobertos pelo aditivo facilitando a trabalhabilidade. Portanto, a alteração da quantidade de aditivo para relação água/cimento 0,26 pode ser um fator contribuinte para uma maior precipitação da pasta nos poros, acarretando na redução da permeabilidade e infiltração.

Apesar de os valores de permeabilidade para os traços com sílica ativa terem reduzido para uma média de 0,89 cm/s (para relação a/c 0,30) e 0,76 cm/s (para relação a/c 0,26), os valores ainda estão condizentes com os encontrados na literatura, que variam de 0,1 a 2,0 cm/s (SCHAEFER *et al.*, 2006; MONTES e HALSELBACH, 2006). Lian e Zhuge (2010) obtiveram valores na faixa de 0,61 cm/s e 1,26 cm/s para misturas com incorporação de 10% e 7% de sílica ativa, respectivamente, utilizando um permeômetro de carga variável.

#### 5.1.4 Resistência à compressão

A Figura 43 mostra os resultados de resistência à compressão para as amostras sem e com sílica ativa. Na Figura 43(a), estão os resultados de resistência à compressão pela porosidade de cada corpo de prova, e na Figura 43(b), os resultados de resistência à compressão média em função da variação da relação a/c.

A partir dos gráficos, nota-se que para a mesma relação a/c de 0,30, houve um decréscimo na resistência à compressão média de aproximadamente 1 MPa quando a sílica ativa é incorporada à mistura. No entanto, este valor não é significativo, confirmado pelo *valor-P* de 0,064 (maior que o nível de significância estabelecido de 0,05) obtido na análise de variância ANOVA. Para a mistura com relação a/c 0,26, a média para a mistura com sílica ativa foi duas vezes maior do que para a mistura sem sílica ativa. *Valor-P* obtido foi de  $5,86 \times 10^{-5}$  (menor que 0,05). Neste caso, é importante observar a possibilidade da influência de outras variáveis. Conforme já mencionado, a quantidade de aditivo para esta relação a/c com a presença de sílica ativa, pode ser responsável pela precipitação da pasta que resultou na diminuição da porosidade, em comparação à mistura sem sílica ativa. A diminuição da porosidade também acarreta no aumento da resistência mecânica. Nesse sentido, é possível que o maior valor de resistência à compressão obtido seja consequência da combinação da sílica ativa (fortalecimento da zona de

transição), com a menor relação a/c e maior teor de aditivo que, presumidamente, foram suficientes para uma boa dispersão das partículas de aglomerante. Segundo Hommer (2008), a distribuição uniforme das partículas de sílica ativa gerada pela incorporação de aditivo é capaz de preencher os poros capilares ou gel da pasta de cimento, de forma que a resistência à compressão do concreto possa ser claramente melhorada.

Para a mistura com relação a/c de 0,30, é possível que a sílica ativa não tenha sido bem dispersada na mistura, devido a menor quantidade de aditivo, mesmo que a mistura de concreto permeável tenha apresentado semelhante consistência, conforme observado na Figura 39. Tal fato pode ser tido como hipótese para o não aumento da resistência à compressão.

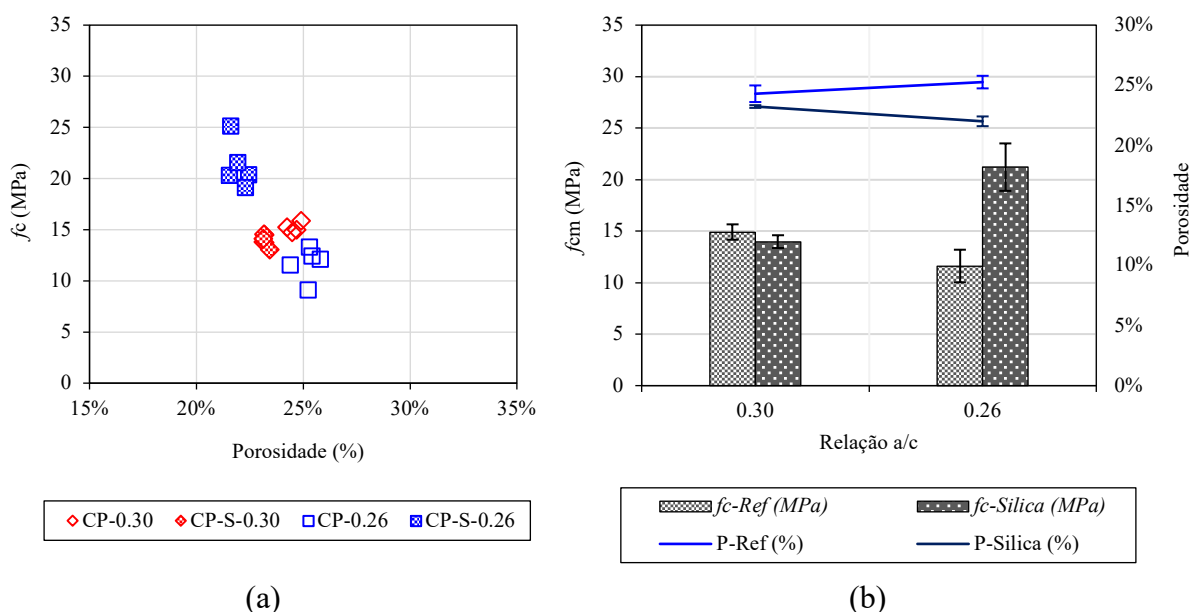


Figura 43 – Resistência à compressão para as misturas sem e com sílica ativa para as diferentes relações a/c e teor de aditivo: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).

Como forma complementar às análises, imagens foram tiradas dos corpos de prova após a ruptura com o uso de um microscópio estereoscópico (lupa). Através da Figura 44, é possível visualizar a pasta, o agregado e a interface entre ambos. A flecha vermelha nas imagens indica a presença de fissura. Nota-se que, em todas as imagens, houve a exposição do agregado indicando sua ruptura (ver Figura 5). Entretanto, além disso é possível notar fissuras na zona de transição para as misturas com relação a/c 0,30, com e sem a presença de sílica ativa. Para a mistura sem sílica ativa, esta fissura fica ainda mais evidente. Já as misturas com relação a/c 0,26 observa-se que, para aquela sem sílica ativa, há fissuras mais espessas na pasta, enquanto que a mistura com sílica ativa, a fissura indicada pela flecha é quase imperceptível,

considerando a resolução das imagens. Em suma, é possível verificar a hipótese de fortalecimento da zona de transição gerada pela incorporação da sílica ativa no concreto permeável para mistura com relação a/c 0,26.

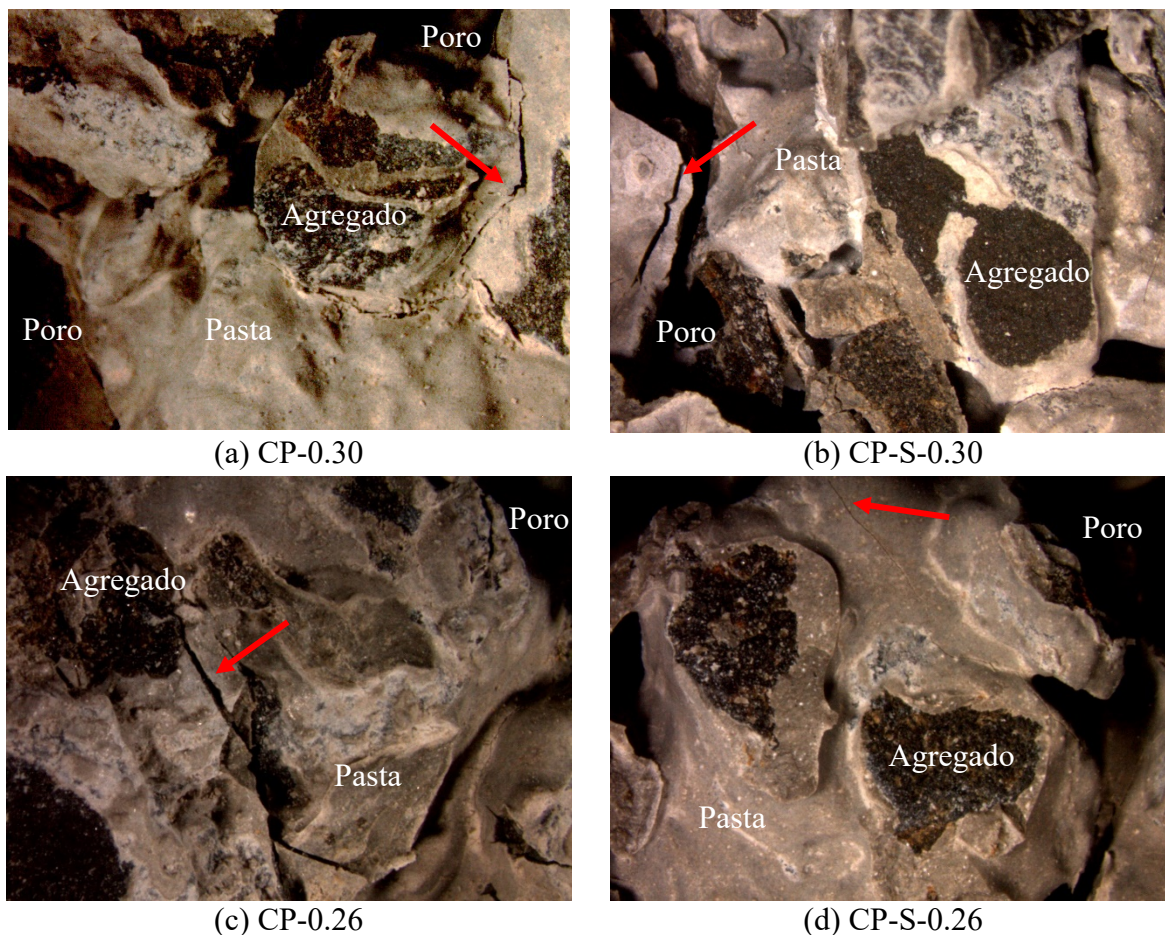


Figura 44 – Imagens obtidas com microscópio estereoscópio das misturas sem e com sílica ativa para as diferentes relações a/c e teor de aditivo, após ruptura no ensaio de compressão simples.

### 5.1.5 Resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade

A Figura 45 apresenta os resultados de resistência à tração na flexão para as misturas sem e com sílica ativa para as relações a/c estudadas. Na Figura 45 (a) os resultados são mostrados em função da porosidade e, na Figura 45 (b), os resultados médios são mostrados em função das relações a/c. A Tabela 21 mostra os resultados médios, desvio padrão, e análise de variância ANOVA para a porosidade, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático. É importante lembrar que há diferença nas porosidades obtidas neste ensaio em relação aos anteriores, devido ao tipo de corpo de prova e compactação. Neste caso, a compactação foi feita

com o uso do rolo. A densidade foi controlada da mesma forma que para os corpos de prova cilíndricos.

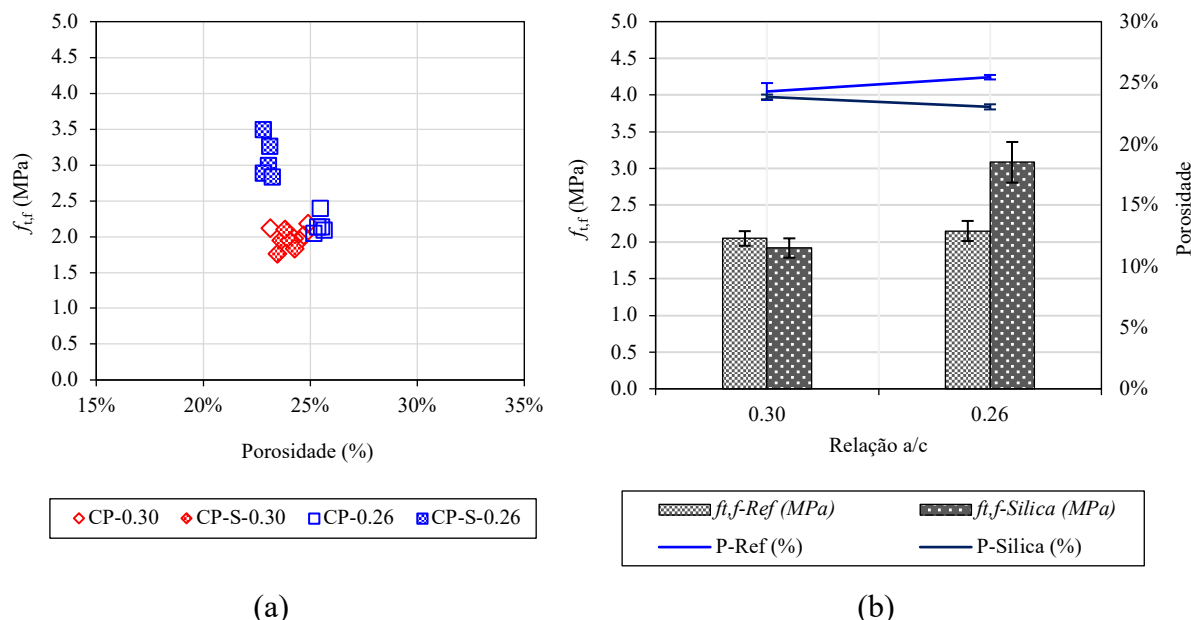


Figura 45 – Resistência à tração na flexão para as misturas sem e com sílica ativa para as diferentes relações a/c e teor de aditivo: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).

Tabela 21 – Valores médios, desvio padrão e análise de variância ANOVA para tração na flexão e módulo de elasticidade estático para as misturas com e sem sílica ativa.

Nomenclatura	Porosidade (%)	DesvPad	$f_{t,f}$ (MPa)	DesvPad	E (GPa)	DesvPad
CP-0.26	25,46	0,18	2,15	0,14	17,15	2,72
CP-0.30	24,29	0,69	2,05	0,10	15,11	2,18
CP-S-0.26	23,04	0,21	3,08	0,28	16,55	4,38
CP-S-0.30	23,85	0,19	1,92	0,13	12,42	1,98

ANOVA (valor-P)			
Relação	Porosidade	Tração na flexão	Módulo de elasticidade
CP-0.30 vs. CP-S-0.30	0,22999	0,11622	0,07539
CP-0.26 vs. CP-S-0.26	$2,8 \times 10^{-08}$	0,00014	0,79884

As amostras contendo sílica ativa, mesmo para as vigas compactadas com rolo, apresentaram porosidade média ligeiramente inferior às amostras sem sílica ativa para ambas relações a/c. No entanto, essa diferença não é significativa para as misturas com relação a/c 0,30, conforme mostra o *valor-P* da Tabela 21 (maior que 0,05). Já para misturas com relação a/c 0,26, esta diferença é significativa. Acredita-se que, conforme já mencionado, o aumento da quantidade de aditivo na mistura com sílica ativa pode ter proporcionado maior trabalhabilidade, isto é, maior acomodação da mistura na fôrma e, conseqüentemente, a diminuição da porosidade final.



Em relação à resistência à tração na flexão, a diferença entre os resultados para as misturas de relação a/c 0,30 também não é significativa, embora a média para o concreto permeável com sílica ativa tenha diminuído. Neste caso, conforme citado anteriormente, é possível que a sílica ativa não tenha contribuído efetivamente em virtude de a quantidade de aditivo adicionado não ser suficiente para uma boa dispersão das partículas, mesmo que a mistura tenha apresentado a consistência almejada (Figura 39). Como contribuição à hipótese, a Figura 46 mostra o aspecto das misturas contendo sílica ativa no estado fresco, para ambas relações a/c analisadas. Nota-se que na mistura de relação a/c 0,30, há formação de “pelotas” de pasta com agregado. Assim, evidencia-se a possibilidade de que as partículas de sílica ativa mal dispersas, tenham se aglomerado apenas em alguns pontos específicos.

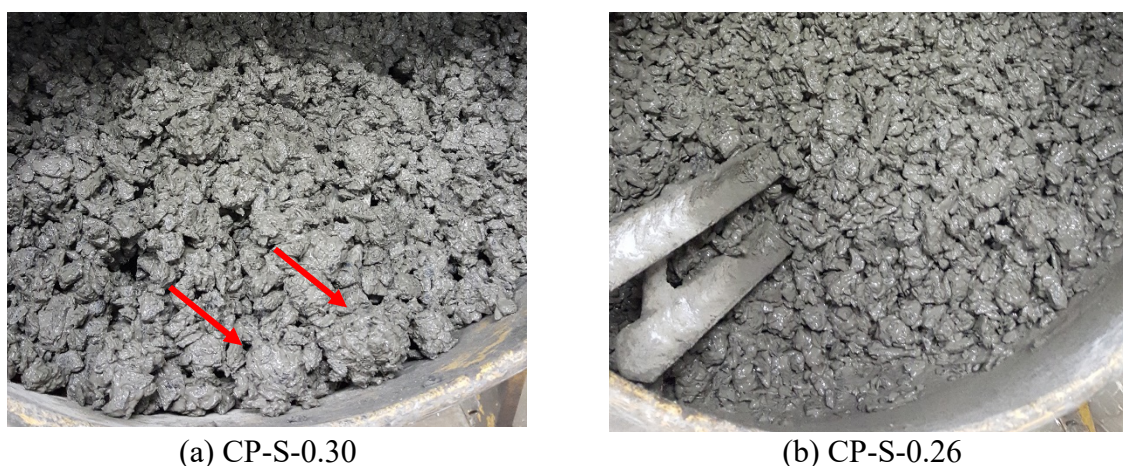


Figura 46 – Comparação entre as misturas com sílica ativa para as relações a/c e teor de aditivo avaliados no estado fresco.

Por outro lado, a diferença na resistência à tração na flexão para as amostras de relação a/c 0,26 (com e sem sílica ativa) foram significativas. Com a substituição parcial do cimento pela sílica e o aumento do teor de aditivo, a resistência à tração na flexão média aumentou 33%. Este acréscimo é importante considerando o uso do concreto permeável como material de pavimentação para tráfego leve de veículos.

Em relação ao módulo de elasticidade estático, observa-se a partir da Tabela 21, que houve uma pequena diminuição no valor médio para as misturas com sílica ativa em relação às referências. No entanto, este valor não é significativo para nenhuma das relações a/c analisadas, considerando o maior desvio padrão obtido neste ensaio (que corresponde a coeficientes de variação entre 14% e 26%). É importante enfatizar que, por se tratar de um material de elevada porosidade, pode ocorrer o desajuste do LVDT na superfície irregular do concreto permeável

durante a execução do ensaio, alterando os resultados. Os valores de módulo de elasticidade estático permaneceram com uma média de 15 GPa.

### 5.1.6 Considerações parciais

Neste item, a influência de duas relações a/c foi estudada em função da substituição parcial do cimento por 8% de sílica ativa no traço padrão. Conforme mencionado inicialmente, quando a sílica ativa é incorporada na mistura, uma maior demanda de água pode ser necessária em função da sua maior área superficial específica. Portanto, embora a relação a/c de 0,26 tenha apresentado os melhores resultados em termos mecânicos e hidráulicos para o traço de referência, a relação a/c de 0,30 poderia acarretar em maior desempenho com a presença da sílica ativa.

No entanto, os resultados obtidos mostraram que o comportamento do concreto permeável é inusitado frente à incorporação de um material cimentício suplementar, como a sílica ativa. Isto ocorre porque o concreto permeável é função de várias variáveis, conforme discutido no item 4.5, que podem suprimir o efeito de um material. O uso do aditivo teve papel fundamental não só na dispersão da sílica ativa, mas na trabalhabilidade da mistura (consequência da redução da porosidade) para relação a/c de 0,26. Assim, é equivocado afirmar que a sílica ativa não é efetiva para misturas com relação a/c 0,30, bem como que a sílica ativa é efetiva para misturas com relação a/c 0,26, já que ambas tiveram alterações na quantidade de aditivo. Particularmente, em relação à mistura com relação a/c de 0,26 e relação aditivo/cimento de 0,011, a sílica ativa possivelmente resultou na melhora da zona de transição através da sua melhor dispersão, ocasionando o aumento da resistência mecânica. Dados os resultados obtidos, o traço com sílica ativa na mistura com relação a/c de 0,26 foi escolhido para as avaliações realizadas nos itens subsequentes, utilizando fibras de polipropileno e areia.

É importante salientar a importância da padronização de ensaios que verifiquem quantitativamente a consistência de misturas de concreto permeável. A avaliação qualitativa realizada, embora auxilie no projeto da mistura, não serve como um medidor de trabalhabilidade – fato que influencia a maneira como a mistura é acomodada na fôrma e também a sua porosidade final. Segundo Kevern (2011), o teste de abatimento usando o tronco de cone invertido pode ser utilizado como forma de verificação da trabalhabilidade do concreto permeável *in loco*. Se o concreto fluir facilmente pelo cone, então irá ser prontamente descarregado pelo caminhão. Por outro lado, se o material trancar e requerer energia substancial



para que seja liberado, então o concreto permeável será considerado rígido, difícil de ser descarregado, acarretando em alta porosidade e baixa resistência. Ainda que esta análise auxilie na verificação da trabalhabilidade do concreto permeável, não quantifica esta variável, o que prejudica a comparação de misturas com sutil diferença na consistência.

## 5.2 INFLUÊNCIA DO TIPO DE FIBRA DE POLIPROPILENO

A partir da escolha da relação a/c de 0,26, a combinação de 8% de sílica ativa com fibras de polipropileno foi avaliada para dois tipos de fibra: fibra de polipropileno corrugada (N) e macrofibra sintética estrutural (T). As fibras possuem comprimentos semelhantes (50 e 54 mm, respectivamente), porém diferem no fator de forma. As descrições e propriedades das fibras encontram-se no item 3.1.2.3.

Embora ACI (2010) recomende a utilização de fibras entre 40 e 50 mm para melhora da tenacidade, não há recomendações quanto ao melhor diâmetro da fibra a ser incorporado no concreto permeável. Conforme os estudos apontados no item 2.3.4, o foco da maioria dos trabalhos ocorre em função do tipo e comprimento da fibra, sendo a de polipropileno mais estudada. No estudo de Kevern *et al.* (2008) os resultados obtidos foram melhores para fibras de comprimento de 20 mm, que para comprimento de 50 mm. Já nos trabalhos de Huang *et al.* (2010), Wu *et al.* (2016) e Bonicelli *et al.* (2016), o efeito das fibras menores que 20 mm não foram significativas no concreto permeável. Por outro lado, no trabalho de Rehder *et al.* (2014) a utilização de fibras de 54 mm contribuiu na capacidade residual na flexão para maiores porosidades. Nota-se que existe uma divergência no estudo do comprimento ideal da fibra no concreto permeável e também do seu efeito. Acredita-se que fibras muito curtas, de comprimentos menores que 20 mm, possam apresentar problemas de ancoragem devido a elevada porosidade do concreto permeável.

Além do comprimento, a quantidade de fibras adicionadas à mistura também é variável. Os estudos apresentados no item 2.3.4, utilizaram dosagens entre 0,1% até 1,0% em relação ao volume total da mistura (dependendo do tipo de fibra). A escolha da quantidade de fibras adicionadas ao concreto permeável desta pesquisa, deu-se por tentativas e erros. Notou-se que quantidades acima de 0,5% (para estas fibras em particular) acarretavam na formação de grumos e, muitas vezes, falta de aderência com a pasta, ficando grudadas na parede da betoneira ou, simplesmente, soltas acima da mistura. A partir das tentativas realizadas e da análise visual das misturas, a quantidade de fibra adicionada em relação ao volume total da mistura foi de

0,2%. A Tabela 22 mostra as proporções e nomenclaturas adotadas e a Figura 47 mostra a consistência das misturas. A densidade projetada permaneceu a mesma, uma vez que as fibras foram adicionadas.

Tabela 22 – Proporções de mistura: sílica ativa e fibras de polipropileno.

Nom.	Agregado/Cimento	Sílica	Fibra	Água/Cimento	Aditivo/Cimento	Dt (kg/m <sup>3</sup> )
CPS	4	8%	-	0,26	0,011	1995,97
CPSF-N	4	8%	0,2%	0,26	0,011	1995,97
CPSF-T	4	8%	0,2%	0,26	0,011	1995,97

Dt = Densidade teórica; N = corrugada ( $\theta = 100 \mu\text{m}$ ); T = sintética estrutural ( $\theta = 480 \mu\text{m}$ ).

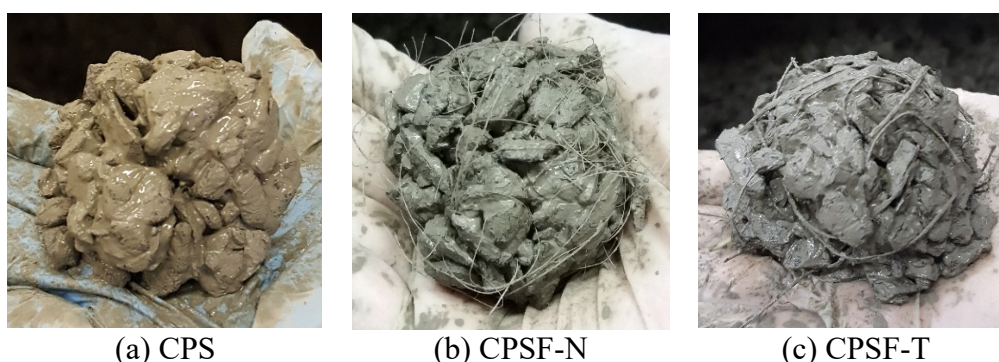


Figura 47 – Consistência das misturas com sílica ativa e fibras tipo “N” e “T”.

Das consistências mostradas na Figura 47, observa-se que para ambas as fibras, algumas delas ficam sobrepostas à mistura, expostas e com pouca área de contato. Devido à porosidade do concreto permeável e à falta de homogeneidade da mistura, a dispersão das fibras torna-se um desafio. Durante a moldagem, observou-se que a fibra de maior diâmetro prejudicou a trabalhabilidade da mistura comparada à de menor diâmetro.

Os ensaios foram realizados em 5 corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x altura) e 5 vigas prismáticas de 10 x 10 x 40 cm (altura x largura x comprimento) para cada mistura. Os corpos de prova cilíndricos foram moldados com o uso do Proctor (duas camadas de 20 golpes), e os corpos de prova prismáticos com o uso do rolo (uma camada). Além disso, ensaio de abrasão (cantabro) em corpos de prova de 10 x 10 cm (diâmetro x altura) também foram realizados. Da mesma forma, a densidade das misturas foi controlada. A compactação foi realizada com o Proctor, aplicando-se um número de golpes suficientes para que a altura de 10 cm fosse atingida na fôrma cilíndrica de 10 x 20 (diâmetro x altura). Para isso, a massa total referente a densidade projetada era colocada na fôrma e, então, a quantidade necessária de golpes era aplicada até que o corpo de prova atingisse a altura desejada. Na sequência, a mesma quantidade de golpes era aplicada para as demais amostras.

### 5.2.1 Densidade no estado endurecido vs. porosidade

A Figura 48 apresenta a relação entre a densidade real obtida no estado endurecido e a porosidade para as misturas analisadas sem e com a incorporação de fibras de polipropileno. A Tabela 23 mostra os valores médios, desvio padrão e comparativo (através de análise de variância ANOVA) entre a densidade real e porosidade.

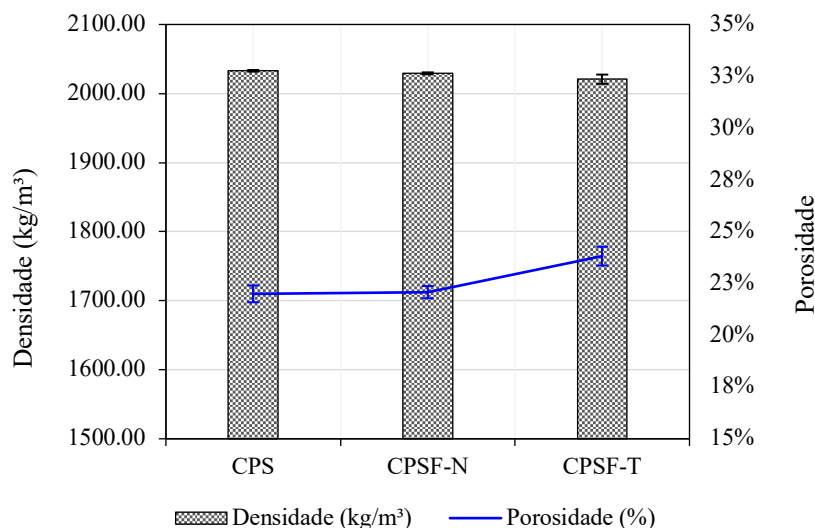


Figura 48 – Relação entre densidade real e porosidade para as misturas sem e com fibras de polipropileno tipo “N” e “T”.

Tabela 23 – Valores médios, desvio padrão e análise de variância ANOVA para densidade e porosidade das misturas sem e com fibras de polipropileno tipo “N” e “T”.

Nomenclatura	D-teórica (kg/m³)	D-real (kg/m³)	DesvPad	Porosidade	DesvPad
CPS	1995,97	2032,50	1,14	22,00%	0,41
CPSF-N	1995,97	2029,24	1,38	22,08%	0,30
CPSF-T	1995,97	2020,76	6,67	23,82%	0,45
ANOVA (valor-P)					
Relação	Densidade		Porosidade		
CPS vs. CPSF-N	0,00177		0,72583		
CPS vs. CPSF-T	0,00386		0,00015		
CPSF-N vs. CPSF-T	0,02382		9,4x10 <sup>-5</sup>		

Observa-se que houve um decréscimo na densidade real de ambas misturas com fibras em relação à mistura de referência. Isso ocorre porque a adição de fibras possivelmente diminuiu a trabalhabilidade das misturas, fato observado durante o processo de moldagem. A diferença entre as densidades reais das misturas, apesar de pequenas, foram significativas, conforme mostra os *valores-P* da Tabela 23. No entanto, não houve diferença significativa na porosidade final das amostras com a fibra “N” em relação às amostras sem fibra (CPS vs. CPSF-N: *valor-*

$P > 0,05$ ). Por outro lado, a porosidade média aumentou aproximadamente 8% nas amostras com a fibra tipo “T”, sendo significativa a diferença em relação as demais. Acredita-se que a fibra tipo “T”, por possuir maior diâmetro, aumenta a espessura de contato entre os agregados envolvidos pela pasta, contribuindo para o aumento da porosidade final. Através da Figura 49 é possível identificar a influência do diâmetro da fibra nos poros do concreto permeável no estado endurecido.



(a) CPSF-N

(b) CPSF-T

Figura 49 – Aspecto superficial de corpos de prova com fibras de polipropileno “N” e “T”.

### 5.2.2 Taxa de infiltração

A Figura 50 mostra os resultados de taxa de infiltração para a mistura de referência (com sílica ativa e sem fibra) e para as misturas com sílica ativa e fibras de polipropileno do tipo “N” e “T”. A Figura 50 (a) mostra a relação em função da porosidade, e a Figura 50 (b) mostra os valores médios e o desvio padrão.

A partir dos gráficos, nota-se que a taxa de infiltração média aumenta quando as fibras são adicionadas à mistura. Porém, este aumento não é considerado significativo entre CPS e CPSF-N (*valor-P* obtido de 0,14173, maior que o nível de significância de 0,05), mas sim entre CPS-CPSF-T (*valor-P* obtido de 0,00059, menor que o nível de significância de 0,05). Este acréscimo na taxa de infiltração (aproximadamente 34%) gerado nas amostras com a fibra de maior diâmetro ocorre devido ao aumento da porosidade total do concreto permeável na presença da fibra tipo “T”. Acredita-se que esta fibra tenha aumentado a porosidade da mistura devido ao maior fator de forma e redução da trabalhabilidade (colocação da mistura na fôrma). Consequentemente, houve o aumento da capacidade de infiltração do material. Para a fibra tipo “N” o incremento médio na taxa de infiltração foi de 12%.

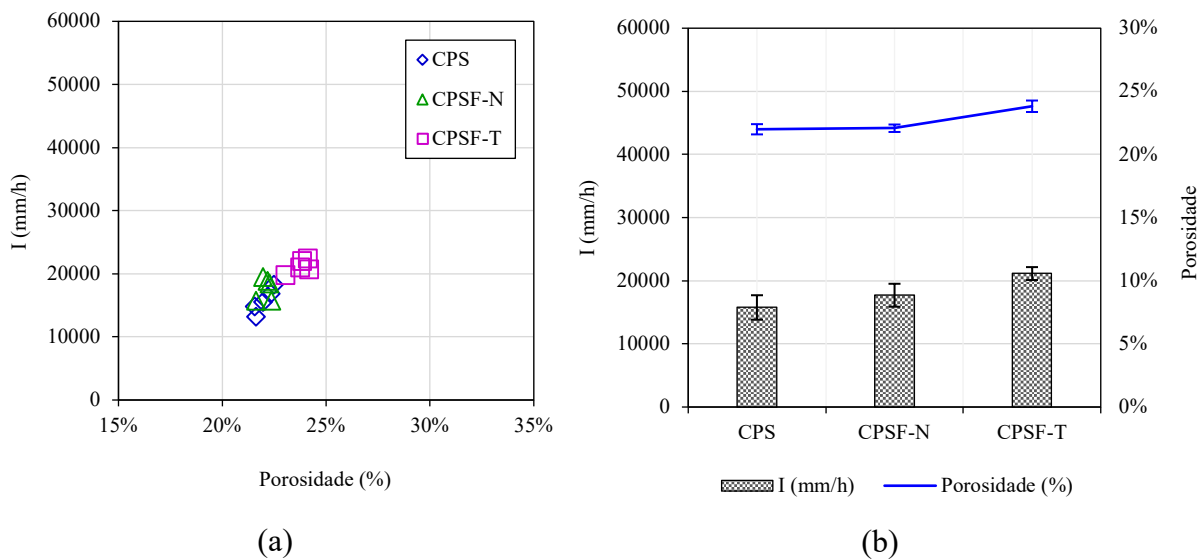


Figura 50 – Taxa de infiltração para as misturas sem e com fibras de polipropileno tipo “N” e “T”: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).

### 5.2.3 Permeabilidade

Na Figura 51 encontram-se os resultados de permeabilidade para misturas sem e com fibras de polipropileno, divididos em: Figura 51 (a) com dados de permeabilidade em função da porosidade, e Figura 51 (b) com os valores médios e desvio padrão.

O ensaio de permeabilidade mostrou a mesma tendência de comportamento que o ensaio de infiltração. Observando os gráficos, é possível verificar que as fibras aumentaram a permeabilidade do concreto permeável comparado à mistura de referência sem fibras. Neste caso, através do teste de variância ANOVA, o *valor-P* obtido nas comparações da mistura de referência CPS com as misturas CPSF-N e CPSF-T, mostrou que a diferença é significativa para ambos. Ou seja, o *valor-P* obtido para CPS vs. CPSF-N foi de 0,01069, e CPS vs. CPSF-T foi de 0,00019, ambos menores que o nível de significância de 0,05 considerado. Neste caso, houve influência das fibras de polipropileno nos resultados de permeabilidade do concreto permeável em ambos diâmetros. Considerando a resposta diferente obtida no teste de variância realizado para taxa infiltração na comparação entre CPS e CPSF-T, é importante observar a diferença entre o tipo de ensaio. No primeiro, a taxa de infiltração é obtida através da passagem de uma quantidade de água através do corpo de prova, mantendo-se constante uma coluna de água de 2 cm. Manter a coluna de água adequada pode ser variável, uma vez que depende do operador. Já no ensaio de permeabilidade, a variação da coluna de água se dá através do permeâmetro, sendo mais facilmente controlada independente do operador.

Portanto, acredita-se que a fibra, mesmo a de menor diâmetro, tenha alterado a conectividade dos poros do concreto permeável. Este fato não pôde ser evidenciado de forma significativa no ensaio de infiltração, no entanto pôde ser observado no ensaio de permeabilidade. O acréscimo obtido na permeabilidade para a mistura com a fibra tipo “T” foi de 19% em comparação à mistura de referência, mesmo não havendo diferença significativa na porosidade de ambas.

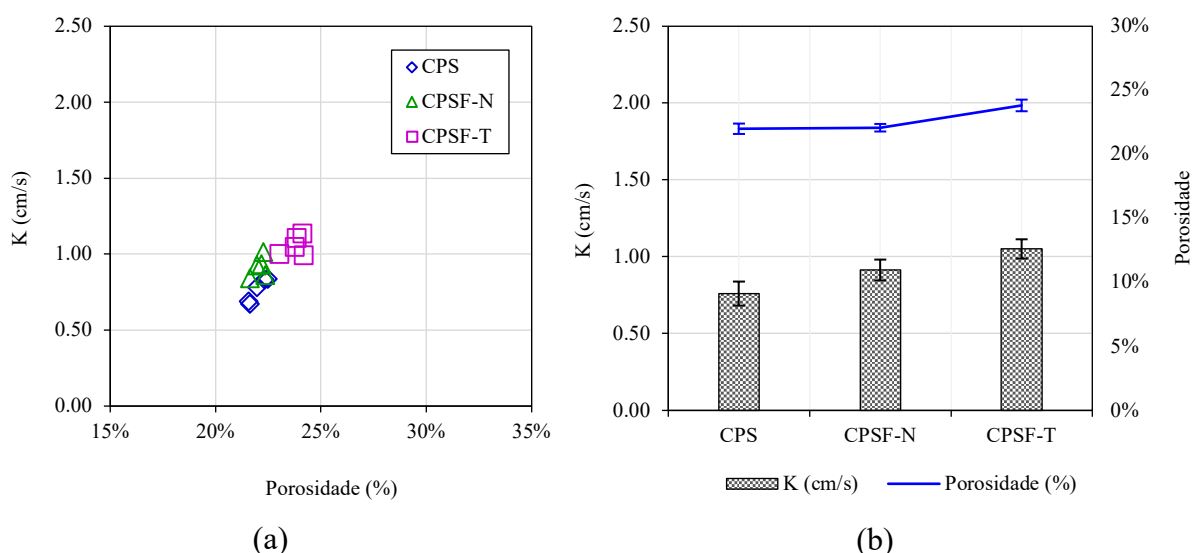


Figura 51 – Permeabilidade para as misturas sem e com fibras de polipropileno tipo “N” e “T”: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).

#### 5.2.4 Resistência à compressão

A Figura 52 mostra os resultados de resistência à compressão para as misturas sem e com fibras de polipropileno. A Figura 52 (a) apresenta os resultados individuais para cada corpo de prova em função da porosidade, e a Figura 52 (b) mostra os valores médios obtidos e o desvio padrão.

Como resultado, observa-se que a fibra de polipropileno em ambos diâmetros, acarretou na redução da resistência à compressão do concreto permeável. Enquanto que a resistência à compressão média para CPS foi de 21,2 MPa, a resistência à compressão média para CPSF-N e CPSF-T foi de 15,1 MPa e 13,7 MPa, respectivamente, representando uma redução de cerca de 34%. Através da análise de variância ANOVA, foram obtidos *valores-P* menores que o nível de significância de 0,05 para comparações entre CPS vs. CPSF-N (*valor-P* = 0,00558) e CPS vs. CPSF-T (*valor-P* = 0,00026), indicando diferença significativa nos resultados entre as misturas com fibras em relação à de referência. No entanto, o *valor-P* obtido na comparação entre CPSF-N vs. CPSF-T de 0,34651, indica que não há influência significativa do tipo de fibra utilizado nos resultados de resistência à compressão do concreto permeável.



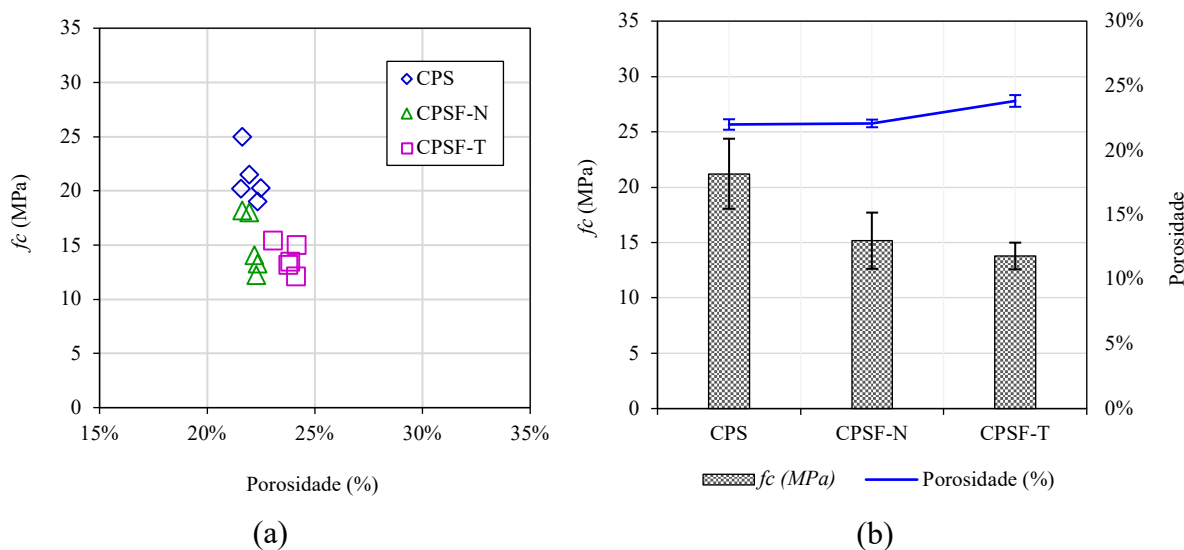


Figura 52 – Resistência à compressão das misturas sem e com fibras de polipropileno tipo “N” e “T”: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).

Conforme mencionado anteriormente e apontado na Figura 47, devido a maior heterogeneidade do concreto permeável e a elevada porosidade quando comparado ao concreto convencional, a dispersão das fibras se torna dificultosa. Durante o processo de mistura na betoneira, os agregados envolvidos pela pasta podem gerar o amassamento das fibras, aglomerando-as em pontos específicos devido à falta de aderência. Tais pontos podem ser um dos responsáveis pela menor resistência à compressão do concreto permeável, devido à possível fragilidade da pequena zona de contato (interface) entre a fibra e a pasta que envolve o agregado, gerando prováveis pontos de propagação de fissura.

A Figura 53 mostra pontos de falta de ancoragem da fibra com a matriz cimentícia para ambas as fibras utilizadas. É possível verificar que em diversos pontos da matriz, a fibra encontra-se com grande parte do seu comprimento exposto, sem qualquer contato com a pasta, e presente entre os macroporos do concreto permeável. Mesmo com a presença das fibras, nota-se o rompimento do agregado, indicando um ponto de maior fragilidade da matriz. Além disso, é possível observar na Figura 53 (b), a propagação de uma fissura no encontro da fibra com a pasta, fomentando a possibilidade falta de aderência entre os elementos.

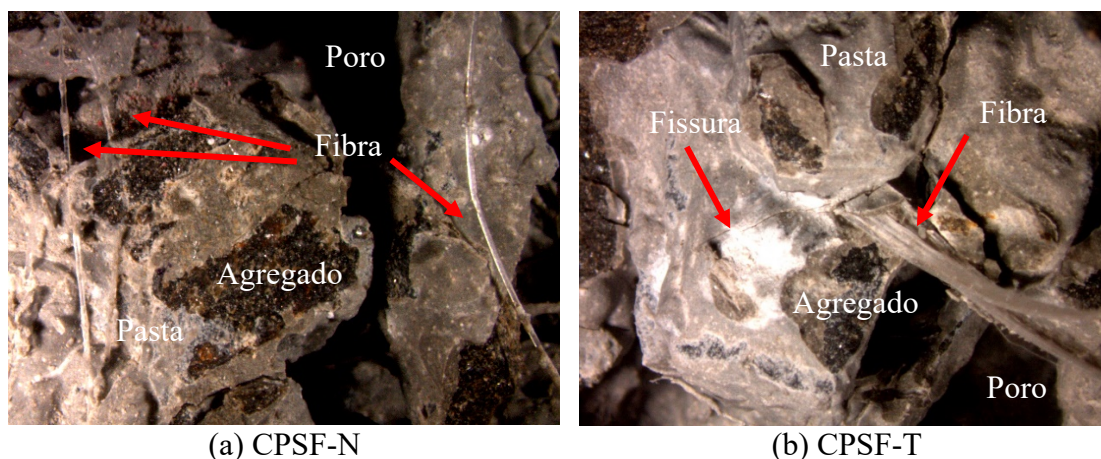


Figura 53 – Imagens obtidas com microscópio estereoscópio das misturas com sílica ativa e fibra de polipropileno, após ruptura no ensaio de compressão simples.

### 5.2.5 Resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade

A Figura 54 apresenta os resultados de resistência à tração na flexão para a mistura de referência (com sílica ativa) e para as misturas com sílica ativa e fibras de polipropileno tipo “N” e “T”. A Figura 54 (a) mostra os resultados em função da porosidade e, na Figura 54 (b), os resultados médios são mostrados em função do tipo de mistura. Na Tabela 24 estão contidos os resultados médios, desvio padrão, e análise de variância ANOVA para a porosidade, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático. Novamente, a diferença nas porosidades obtidas neste ensaio em relação aos anteriores ocorre devido ao tipo de corpo de prova e compactação com uso do rolo. A densidade foi controlada da mesma forma que para os corpos de prova cilíndricos.

A partir da Figura 54 (a), observa-se que a faixa de porosidade ficou próxima para todas as misturas, com valores intermediários apresentados pela mistura com a fibra “T”. Apesar de haver diferença significativa apenas entre os valores de porosidade obtidos para a mistura de referência (CPS) e para a mistura com fibra tipo “N” (CPSF-N), a diferença entre as médias é de apenas 0,54%. O *valor-P* obtido menor que 0,05 ocorre porque houve um baixo desvio-padrão na porosidade das vigas, conforme mostra a Tabela 24. Isso indica, novamente, que o controle da densidade é fundamental na obtenção da porosidade projetada, independentemente do método de compactação utilizado. A diferença na porosidade não foi significativa comparando-se a mistura de referência com a de fibra tipo “T” e, também, entre as misturas com fibras.



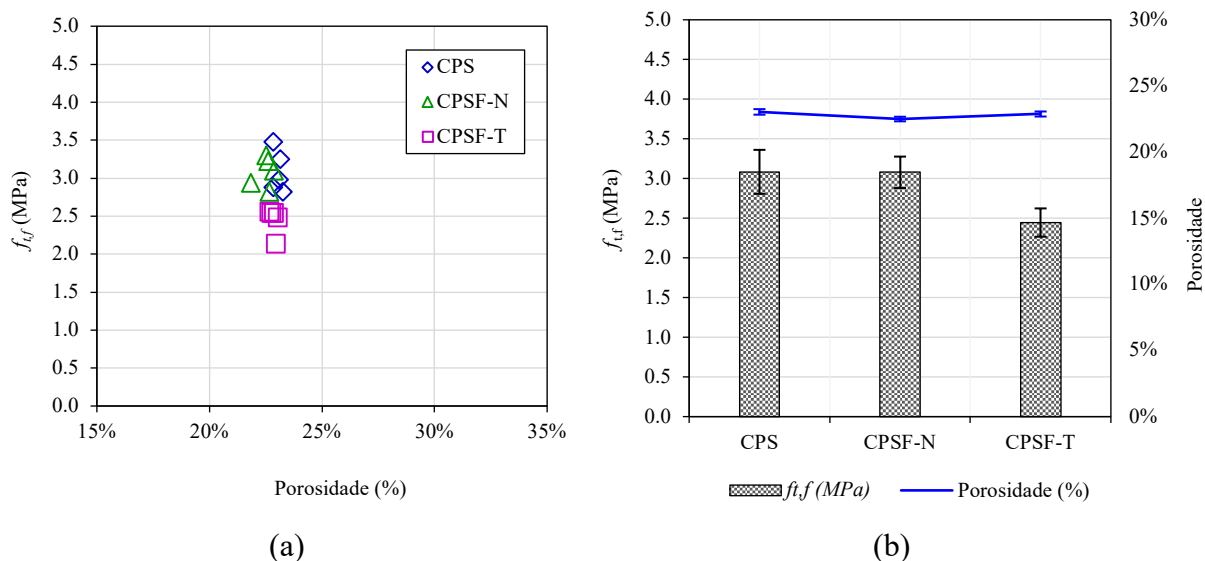


Figura 54 – Resistência à tração na flexão para as misturas sem e com fibras de polipropileno tipo “N” e “T”: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).

Tabela 24 – Valores médios, desvio padrão e análise de variância ANOVA para tração na flexão e módulo de elasticidade estático para as misturas sem e com fibras de polipropileno.

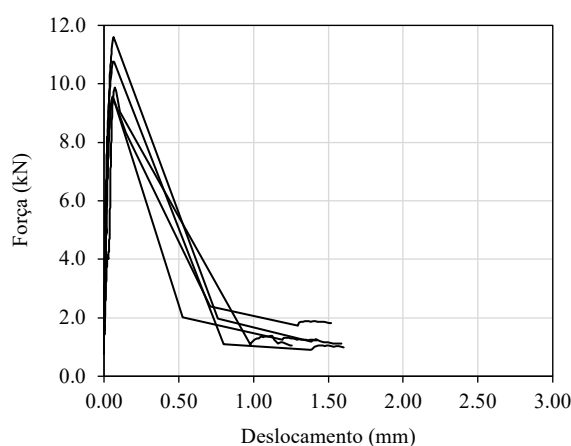
Nomenclatura	Porosidade (%)	DesvPad	$f_{t,f}$ (MPa)	DesvPad	E (GPa)	DesvPad
CPS	23,04	0,21	3,08	0,28	16,55	4,38
CPSF-N	22,50	0,17	3,08	0,20	13,63	6,29
CPSF-T	22,88	0,19	2,45	0,18	14,40	1,86

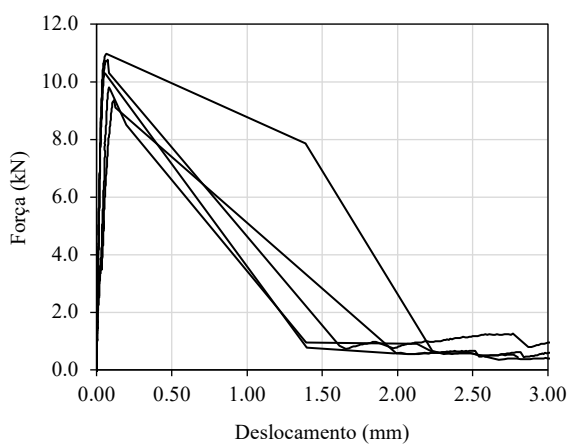
ANOVA (valor-P)			
Relação	Porosidade	Tração na flexão	Módulo de elasticidade
CPS vs. CPSF-N	0,02391	0,96956	0,42194
CPS vs. CPSF-T	017287	0,00249	0,3435
CPSF-N vs. CPSF-T	0,07528	0,00072	0,80233

Para os resultados de tração na flexão, a fibra tipo “T” de maior diâmetro acarretou na redução da resistência em comparação as demais, sendo este valor significativo quando comparado à ambas as misturas, conforme mostra o teste de variância ANOVA apresentado na Tabela 24 (*valores-P* < 0,05). Por outro lado, não houve diferença significativa entre CPS e CPSF-N, sendo iguais as médias obtidas. Assim, não é possível verificar qualquer influência da fibra tipo “N” na resistência à tração na flexão do concreto permeável. Em relação ao módulo de elasticidade, apesar de os valores médios obtidos para as misturas com fibras terem diminuído em relação à mistura de referência, a diferença não foi significativa entre nenhuma das misturas. Ressalta-se, novamente, o maior desvio-padrão obtido neste ensaio devido à dificuldade de posicionamento dos lvdts na superfície porosa do concreto permeável.

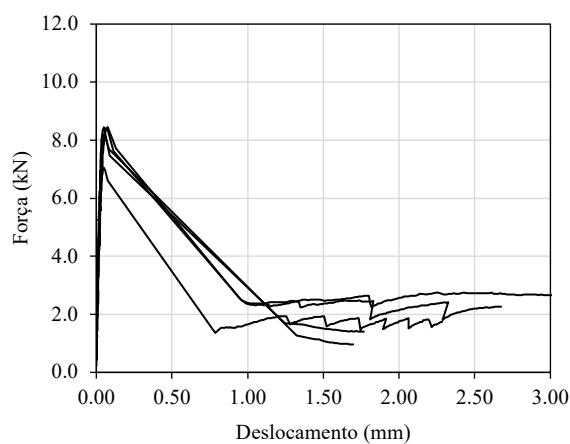
Em relação ao modo de ruptura, é importante enfatizar que todos os corpos de prova de concreto permeável para todas as misturas romperam de forma frágil, mesmo com a presença de fibras. Este comportamento pode ser observado na Figura 55, a qual mostra a curva força vs. deslocamento (obtido através dos lvdts) para cada corpo de prova. Após a ruptura, as fibras não foram capazes de resistir a maiores carregamentos com o aumento do deslocamento no estágio pós-fissuração, como ocorre com concretos reforçados com fibras (CRF). O deslocamento ligeiramente maior para as misturas CPSF-N e CPSF-T pode ter sido gerado pelas fibras que, após a abertura da fissura, são puxadas para fora ou rompidas de maneira mais gradual. Embora a fibra tipo “T” tenha apresentado no gráfico um suposto controle de fissuração pós-pico de carregamento, este controle encontra-se em uma faixa residual de apenas 2 kN. As fibras, portanto, não foram capazes de controlar a fissuração, possivelmente por problemas de dispersão e também de limitação de contato com a matriz, conforme já mencionado.



(a) CPS



(b) CPSF-N



(c) CPSF-T

Figura 55 – Ensaio de tração na flexão: força vs. deslocamento para as misturas sem e com fibras de polipropileno tipo “N” e “T”.

### 5.2.6 Abrasão

A Figura 56 mostra a perda de massa obtida no ensaio Cantabro, no qual três corpos de prova cilíndricos de 10 x 10 cm (diâmetro x altura) são colocados dentro do tambor, e o desgaste abrasivo é gerado pelo contato entre as próprias amostras. O gráfico mostra a perda de massa pelo número de rotações (variando de 100 até o total de 500) referente a perda total das três amostras conjuntas. É importante frisar que neste ensaio não é possível obter o desvio-padrão para cada mistura devido à dificuldade de identificação dos corpos de prova no decorrer do ensaio, devido ao desgaste.

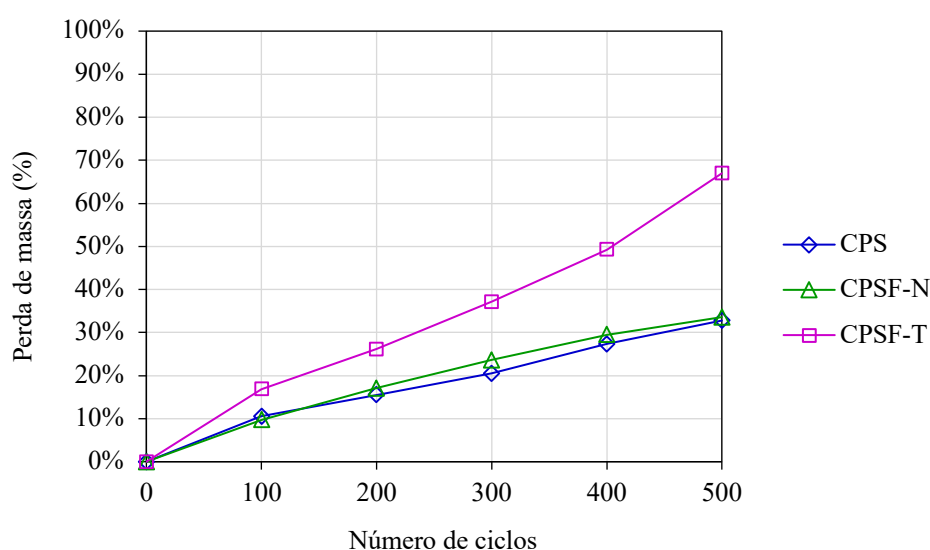


Figura 56 – Perda de massa por abrasão vs. número de ciclos para as misturas sem e com fibra de polipropileno tipo “N” e “T”.

Observa-se que a perda de massa dos corpos de prova contendo a fibra tipo “T” de maior diâmetro foi, aproximadamente, 40% maior ao final do ensaio (perda total de 67%) quando comparado às misturas CPS e CPSF-N. Novamente a fibra mostra ter prejudicado a matriz. Acredita-se na possibilidade de pouco envolvimento da mistura de cimento nas fibras devido ao seu diâmetro elevado, diminuindo a sua função e comprometendo a aderência fibra-matriz. Por outro lado, a mistura com a fibra tipo “N” parece não ter impactado nem positivamente nem negativamente na perda de massa por abrasão do concreto permeável. Esta fibra, por ter diâmetro menor, pode ter sido mais bem envolvida pela pasta quando comparada à anterior, porém não o suficiente para garantir a aderência fibra-matriz, fazendo com que a fibra seja arrancada facilmente. Além disso, a provável má distribuição das fibras na mistura pode contribuir negativamente nos resultados.

Durante o teste, com o acréscimo do número de ciclos, a forma das amostras torna-se cada vez mais esférica até o surgimento de maiores danos ou quebras. A Figura 57 ilustra o aspecto de um dos corpos de prova para cada mistura após os 500 ciclos do ensaio Cantabro. Na amostra CPSF-T é possível visualizar as fibras arrancadas e expostas, devido à menor aderência com a matriz cimentícia. A perda de massa de aproximadamente 33% obtida ao final do ensaio para as misturas CPS e CPSF-N é semelhante a obtida por um concreto simples ( $f_{cm}$  de 25 MPa) que atinge uma perda de massa no mesmo ensaio na ordem de 35%, enquanto que um concreto para pavimento convencional ( $f_{t,fm}$  de 5 MPa) pode atingir uma perda de massa de apenas 10% (COSTA, 2015).

No trabalho de Wu *et al.* (2011), a utilização de fibras de polipropileno monofilamento de 19 mm de comprimento (dosagem de 0,9 kg/m<sup>3</sup>), acarretaram em uma perda de massa de pouco menos de 30% a 300 ciclos. O agregado utilizado foi de granito (fração 9,5-1,18 mm), para um traço de 1:4 e uma relação a/c de 0,35. Na mesma pesquisa, quando agregado de calcário na mesma fração granulométrica é utilizado, a perda de massa ao final dos 300 ciclos diminui para em torno de 15%. Neste trabalho, ao final dos 300 ciclos a perda de massa foi de 20% para CPS, 23% para CPSF-N e 37% para CPSF-T.

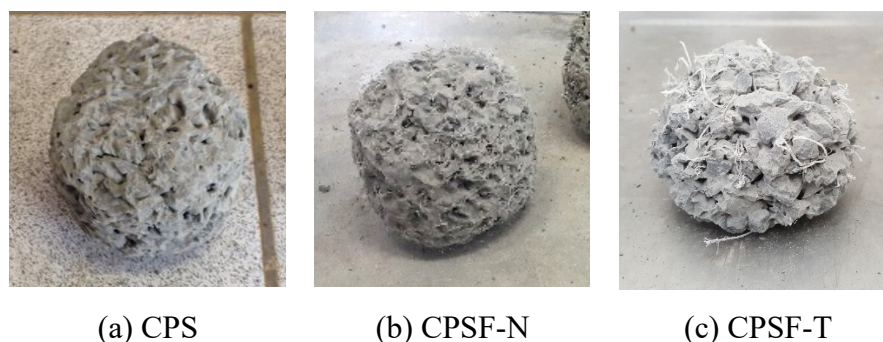


Figura 57 – Perda de massa por abrasão ao final dos 500 ciclos para as misturas sem e com fibra de polipropileno tipo “N” e “T”.

### 5.2.7 Considerações parciais

Neste item, a avaliação do traço utilizando sílica ativa para dois tipos de fibra de polipropileno foi realizada em termos de propriedades hidráulicas (porosidade, taxa de infiltração e permeabilidade) e propriedades mecânicas (resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático). Além disso, foi realizado o teste de abrasão Cantabro para avaliar a atuação das fibras no desgaste de corpos de prova de concreto permeável. As fibras, denominadas tipo “N” e “T”, possuíam comprimentos semelhantes (50 e 54 mm,

respectivamente), porém diferentes fatores de forma devido aos diâmetros de 100  $\mu\text{m}$  e 480  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

Em concretos convencionais, as fibras, mesmo adicionadas em pequenas quantidades, costumam melhorar os resultados de resistência à tração na flexão e controle de fissuração do concreto. No entanto, no concreto permeável, as fibras parecem acarretar em problemas ou não gerar qualquer efeito sobre tais propriedades. Acredita-se que, conforme mencionado, este fato ocorre devido à má dispersão e falta de aderência das fibras com a matriz porosa do concreto permeável. Conforme pôde ser observado, as fibras reduziram a resistência à compressão e, no caso da mistura com a fibra tipo “N”, a resistência à tração na flexão média obtida foi igual à mistura de referência CPS.

No concreto permeável, portanto, as fibras não poderiam ser totalmente envolvidas na mistura devido à elevada porosidade do material e da quantidade pouco espessa de pasta que envolve os agregados, o que diminui a ancoragem e a função das fibras. Neste sentido, a incorporação de areia na mistura para aumentar a quantidade de argamassa que envolve os agregados e, conseqüentemente, a ancoragem com as fibras, pode ser uma possibilidade para o aumento de desempenho mecânico do concreto permeável. Esta hipótese é estudada no item subsequente, considerando apenas a fibra tipo “N” que apresentou resultados mais satisfatórios.

### 5.3 COMBINAÇÕES EXPERIMENTAIS

Como última fase experimental desta tese na busca do aprimoramento de misturas de concreto permeável em termos mecânicos e de durabilidade, foi avaliado a incorporação de areia na mistura. As propriedades da areia utilizada encontram-se descritas no item 3.1.2.2. O material possui módulo de finura de 1,98 e dimensão máxima característica de 2,36 mm, sendo sua curva granulométrica próxima ao limite inferior da zona utilizável – limite entre areia média e areia fina. Para não alterar as proporções de mistura e a densidade projetada adicionando-se a areia no concreto permeável, optou-se pela substituição parcial do agregado graúdo pela areia, cuja massas específicas são próximas (2,63 e 2,80  $\text{g}/\text{cm}^3$ , respectivamente). É importante destacar que a alteração da densidade e porosidade poderiam dificultar a comparação entre os resultados, já que outra variável de interesse estaria sendo considerada, e não apenas o efeito da areia.

Em relação ao teor adotado, apesar de bons resultados terem sido obtidos com 10% de areia na literatura, a quantidade foi escolhida em 5%, pois o agregado utilizado nesta pesquisa já possui

uma quantidade de finos de 18% (entre 2,36 e 4,75 mm) da sua massa total. Além disso, segundo o trabalho de Bonicelli *et al.* (2015), a efetividade da areia no concreto permeável depende da quantidade de água, portanto uma baixa relação a/c não traz benefícios. Assim, para que a relação a/c não seja alterada, o aumento da quantidade de areia para 10% pode acarretar na perda de trabalhabilidade e resistência, além da capacidade hidráulica do material. Nesta etapa, além dos ensaios hidráulicos (porosidade, infiltração e permeabilidade) e mecânicos (resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade), também foi realizado o ensaio de abrasão Cantabro.

A Tabela 25 mostra as proporções das misturas e as nomenclaturas adotadas. As variáveis mantidas com base nos estudos dos itens anteriores foram relação a/c de 0,26, substituição parcial do cimento por 8% de sílica ativa e teor máximo de aditivo recomendado pelo fabricante. A Figura 58 mostra a consistência das misturas. Observa-se que aquelas contendo areia apresentaram um aspecto menos brilhoso e um pouco mais seco quando comparado a mistura somente com sílica ativa (CPS).

Tabela 25 – Proporções das misturas com combinações de sílica ativa, fibra e areia.

Nom.	Ag/Cim	Sílica	Fibra	Areia	A/C	Adt/C	Dt (kg/m <sup>3</sup> )
CPS	4	8%	-	-	0,26	0,011	1995,97
CPSF	4	8%	0,2%	-	0,26	0,011	1995,97
CPSA	4	8%	-	5%	0,26	0,011	1995,97
CPSFA	4	8%	0,2%	5%	0,26	0,011	1995,97

Dt = Densidade teórica.

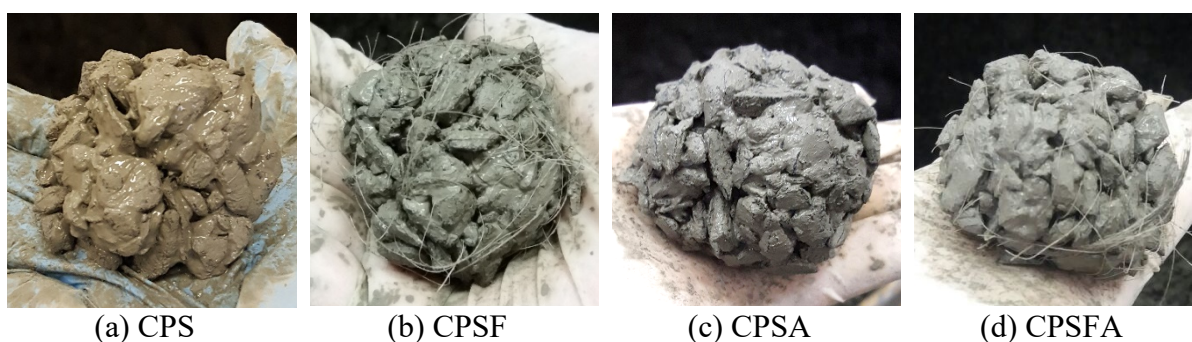


Figura 58 – Consistência das misturas com sílica ativa, fibra e areia.

Para os testes, foram moldados 5 corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm (diâmetro x altura) e 5 vigas prismáticas de 10 x 10 x 40 cm (altura x largura x comprimento) para cada mistura. Os corpos de prova cilíndricos foram moldados com o uso do Proctor (duas camadas de 20 golpes), e os corpos de prova prismáticos com o uso do rolo (uma camada). O ensaio de abrasão

(cantabro) foi realizado em corpos de prova de 10 x 10 cm (diâmetro x altura), também compactados com o Proctor. A densidade de todas as misturas foi controlada.

### 5.3.1 Densidade no estado endurecido vs. porosidade

A Figura 59 Figura 34 apresenta a relação entre a densidade real obtida no estado endurecido e a porosidade para as combinações de misturas com sílica ativa, fibra e areia. A Tabela 23 mostra os valores médios, desvio padrão e comparativo (através de análise de variância ANOVA) entre a densidade real e porosidade.

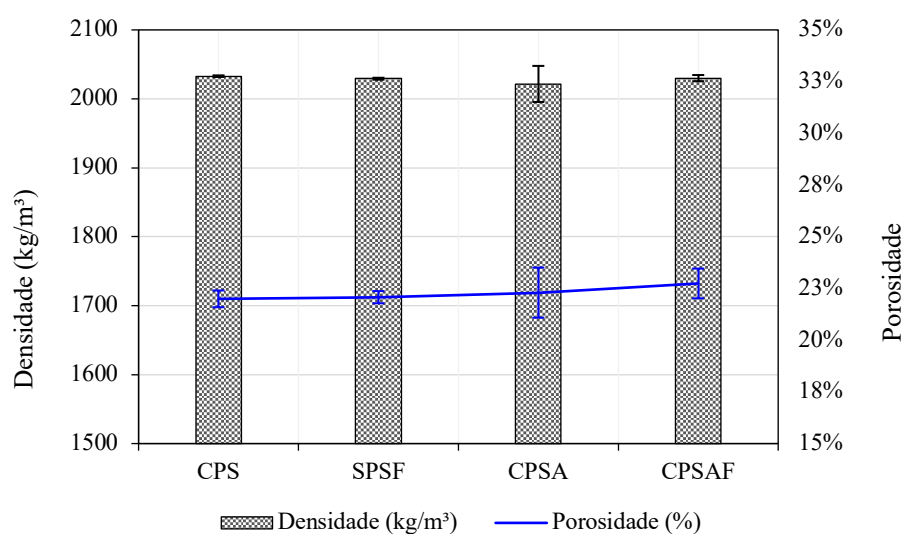


Figura 59 – Relação entre densidade real e porosidade para as misturas com combinações de sílica ativa, fibra e/ou areia.

Tabela 26 – Valores médios, desvio padrão e análise de variância ANOVA para densidade e porosidade das misturas com combinações de sílica ativa, fibra e/ou areia.

Nomenclatura	D-teórica (kg/m³)	D-real (kg/m³)	DesvPad	Porosidade	DesvPad
CPS	1995,97	2032,50	1,14	22,00%	0,41
CPSF	1995,97	2029,24	1,38	22,08%	0,30
CPSA	1995,97	2040,24	26,15	22,30%	1,21
CPSAF	1995,97	2030,05	4,49	22,74%	0,72

ANOVA (valor-P)		
Relação	Densidade	Porosidade
CPS vs. CPSF	0,00177	0,72583
CPS vs. CPSA	0,54916	0,61175
CPS vs. CPSFA	0,2039	0,07868
CPSF vs. CPSA	0,3751	0,70322
CPSF vs. CPSAF	0,70814	0,09325
CPSA vs. CPSAF	0,41568	0,50209

Observa-se que a densidade real de todas as misturas foi maior que a densidade de projeto, o que novamente pode ser explicado pelo efeito da quantidade de aditivo que possibilitou um maior adensamento da mistura de concreto permeável na fôrma. Dessa forma, uma quantidade ligeiramente superior ao projetado foi colocada para que as dimensões dos corpos de prova com a mesma quantidade de golpes de compactação fossem atingidas. A densidade real média para a mistura contendo areia foi ainda maior que para as demais. No entanto, o maior desvio-padrão obtido ressalta a menor uniformidade no conjunto de dados. O motivo pelo qual houve maior dispersão nos dados para a mistura com areia não está claro, embora acredite-se na possibilidade de falta de homogeneidade da mistura pela baixa relação a/c.

O *valor-P* obtido na análise de variância (ANOVA) para densidade, indica que apenas a comparação entre CPS vs. CPSF são diferentes, ou seja, a fibra diminuiu a densidade do concreto permeável, ainda que este valor tenha sido de apenas 0,16%. Esta diferença significativa pode ser atribuída à consistência dos resultados, isto é, ao baixo desvio-padrão obtido para ambas as misturas. Por outro lado, não houve diferença significativa na porosidade entre nenhuma das misturas avaliadas. Isso indica que a substituição do agregado por 5% de areia não alterou a densidade nem a porosidade final da mistura.

### 5.3.2 Taxa de infiltração

A Figura 60 mostra a taxa de infiltração para as misturas avaliadas. Na Figura 60 (a) os valores individuais são mostrados em função da porosidade de cada corpo de prova, e na Figura 60 (b) a média e o desvio-padrão podem ser comparados. A Tabela 27 mostra o *valor-P* obtido na análise de variância (ANOVA) entre as combinações estudadas.

Através dos valores médios apresentados na Figura 60 (b), observa-se que há uma tendência de diminuição da taxa de infiltração quando o agregado graúdo é parcialmente substituído por areia. A infiltração média apresentou uma redução de 17%, considerando as misturas sem fibras. Entretanto o *valor-P* obtido na Tabela 27 evidencia que esta diferença não é significativa, provavelmente devido ao grande desvio-padrão obtido para as amostras contendo areia. Dentre as comparações realizadas, a única que apresentou diferença significativa (*valor-P* < 0,05) foi entre CPSF e CPSA. Observa-se que os valores médios de taxa de infiltração para as misturas tendem a aumentar quando a fibra é adicionada, tanto para a mistura com apenas sílica ativa, assim como para a mistura com sílica ativa e areia. Apesar da diferença entre os resultados obtidos não ser significativa, é importante considerar que a fibra pode alterar a



conectividade entre os macroporos devido à sua má distribuição na matriz. Aglomerações de fibras podem ser caminhos fáceis para percolação de água o que pode aumentar a infiltração do concreto permeável.

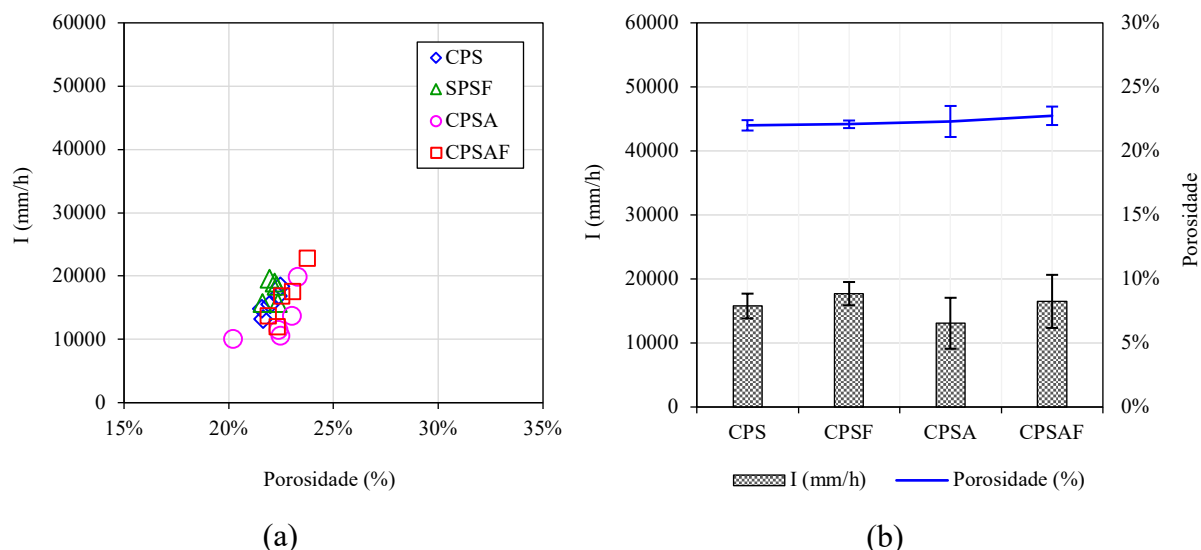


Figura 60 – Taxa de infiltração para as misturas com combinações de sílica ativa, fibra e/ou areia: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).

Tabela 27 – Análise de variância ANOVA para taxa de infiltração das misturas combinações de com sílica ativa, fibra e/ou areia.

Relação	CPS vs. CPSF	CPS vs. CPSA	CPS vs. CPSFA	CPSF vs. CPSA	CPSF vs. CPSAF	CPSA vs. CPSAF
Valor-P	0,14173	0,21084	0,73189	0,04564	0,56673	0,22007

### 5.3.3 Permeabilidade

A Figura 61 mostra os resultados de permeabilidade para as misturas avaliadas, dividida em Figura 61 (a), cujos valores individuais são mostrados em função da porosidade de cada corpo de prova, e Figura 61 (b), contendo a média e o desvio-padrão. A Tabela 28 mostra o *valor-P* obtido na análise de variância (ANOVA) entre as combinações estudadas.

A permeabilidade média obtida ponderando todas as misturas foi de 0,86 cm/s. Considerando o *valor-P* indicado na Tabela 28, percebe-se que não houve diferença significativa entre os resultados, com exceção da comparação entre CPS e CPSF. Diferentemente do obtido na taxa de infiltração, no qual não é possível evidenciar a influência da fibra no concreto permeável com sílica ativa, a permeabilidade é influenciada pela fibra. Conforme já explicado no item

anterior, acredita-se que no teste de infiltração há maior variabilidade na execução do ensaio devido ao procedimento de manter a coluna de água. Portanto, acredita-se que a aglomeração das fibras devido a sua má dispersão seja responsável pela maior percolação de água em determinados pontos.

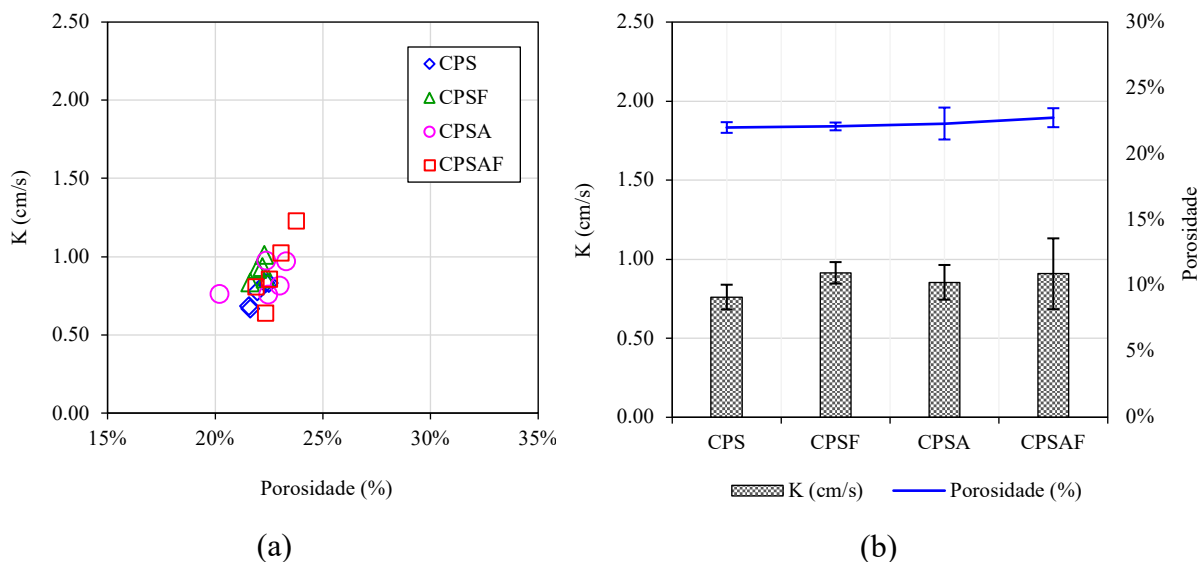


Figura 61 – Permeabilidade para as misturas com combinações de sílica ativa, fibra e/ou areia: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).

Tabela 28 – Análise de variância ANOVA para permeabilidade das misturas combinações de com sílica ativa, fibra e/ou areia.

Relação	CPS vs. CPSF	CPS vs. CPSA	CPS vs. CPSFA	CPSF vs. CPSA	CPSF vs. CPSAF	CPSA vs. CPSAF
Valor-P	0,01069	0,15991	0,20218	0,32875	0,95607	0,64091

Em relação às misturas com areia, nota-se novamente o maior desvio-padrão obtido, o que ressalta a menor uniformidade no conjunto de dados. Acredita-se na formação de pontos com maior teor de argamassa que possivelmente acarretaram na variabilidade dos resultados. A Figura 62 ilustra a mistura CPS (apenas sílica ativa) e CPSA (sílica ativa e areia) no estado fresco, onde é possível notar a concentração de argamassa em determinados pontos. Devido à baixa consistência do concreto permeável (*slump* zero) quando comparado ao concreto convencional, ou seja, menor plasticidade e menor deformação perante aos esforços, a dispersão da areia ocorre de maneira diferente como resultado da falta de homogeneidade da mistura. Além disso, a baixa relação a/c também pode ser um fator contribuinte, conforme relatado por Bonicelli *et al.* (2015), mesmo para pequenas quantidades de agregado miúdo. No entanto, a

areia não influenciou as propriedades hidráulicas do concreto permeável de maneira geral. O mesmo foi obtido pelos autores mencionados. O maior desvio-padrão para misturas com areia (5% e 10%) fez com que a diferença em relação a mistura de referência não fosse significativa.



Figura 62 – Análise visual das misturas CPS e CPSA no estado fresco.

Da mesma forma que para taxa de infiltração, há uma tendência de aumento da permeabilidade nas misturas quando as fibras são incorporadas, ainda que as diferenças não tenham sido significativas. Mesmo na mistura contendo areia, o que gera maior quantidade de argamassa envolvendo os agregados, a aglomeração de fibras provavelmente persiste dado pela consistência ainda baixa do concreto permeável, pois a quantidade não suficiente de argamassa em conjunto com a baixa relação  $a/c$ , colaboram para o não envolvimento adequado das fibras. Essa hipótese reflete na permeabilidade, cujo valor médio foi ligeiramente maior nas misturas contendo fibras.

#### 5.3.4 Resistência à compressão

A Figura 63 mostra a resistência à compressão das amostras com combinações de sílica ativa, fibra e/ou areia. Na Figura 63 (a) estão contidos os valores individuais em função da porosidade de cada corpo de prova, e na Figura 63 (b) estão os valores médios e o desvio-padrão. A Tabela 29 mostra o *valor-P* obtido na análise de variância (ANOVA) para cada uma das combinações.

Comparando-se apenas as misturas CPS e CPSA, da Tabela 29 verifica-se que não há influência significativa da areia na resistência à compressão do concreto permeável. Considerando a média dos valores, houve uma queda de 15% ( $\approx 3$  MPa), porém há um grande desvio-padrão nos resultados. Em relação a incorporação das fibras, nota-se que a diferença não foi significativa nos resultados quando há presença de areia na mistura (entre CPSA e CPSAF), provavelmente pela melhora na ancoragem das fibras quando comparado a mesma mistura sem areia. Diferente

ocorre entre CPS e CPSF, no qual percebe-se uma queda mais expressiva na resistência à compressão. Neste caso, a falta de aderência e a aglomeração das fibras possivelmente geraram pontos de fragilidade responsáveis pela queda de resistência, conforme apontado no item 5.2.4.

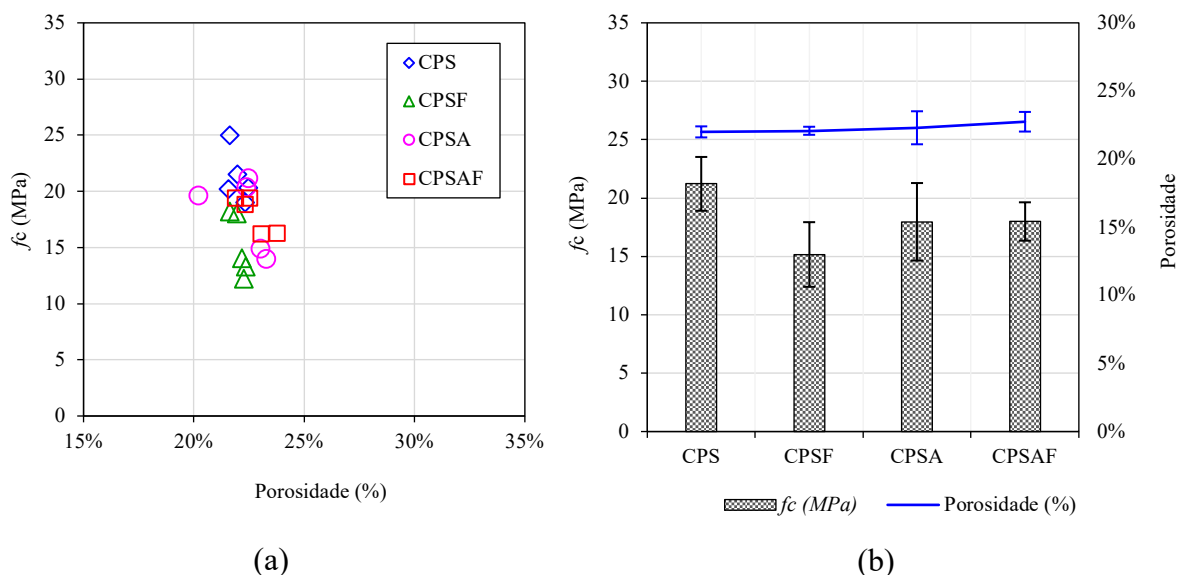


Figura 63 – Resistência à compressão para as misturas com combinações de sílica ativa, fibra e/ou areia: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).

Tabela 29 – Análise de variância ANOVA para resistência à compressão das misturas com combinações de sílica ativa, fibra e/ou areia.

Relação	CPS vs. CPSF	CPS vs. CPSA	CPS vs. CPSFA	CPSF vs. CPSA	CPSF vs. CPSAF	CPSA vs. CPSAF
Valor-P	0,00558	0,1098	0,0343	0,18556	0,08533	0,9876

A Figura 64 mostra imagens tiradas com microscópio estereoscópio após a ruptura de um corpo de prova referente às misturas CPA e CPSAF. Da mesma forma que ilustrado nos itens anteriores, houve a exposição do agregado na ruptura indicando ser o ponto provável de maior fragilidade da matriz. Na imagem de CPSAF nota-se a exposição das fibras que cruzam os poros da amostra. Embora a argamassa possa envolver melhor as fibras, as características do concreto permeável impedem o total envolvimento das mesmas na matriz. Mesmo com a suposta concentração de argamassa em alguns pontos, os resultados de resistência à compressão não foram melhorados. Uma hipótese é a baixa relação a/c, já que parte da água é absorvida pelo agregado miúdo, prejudicando a hidratação do cimento.

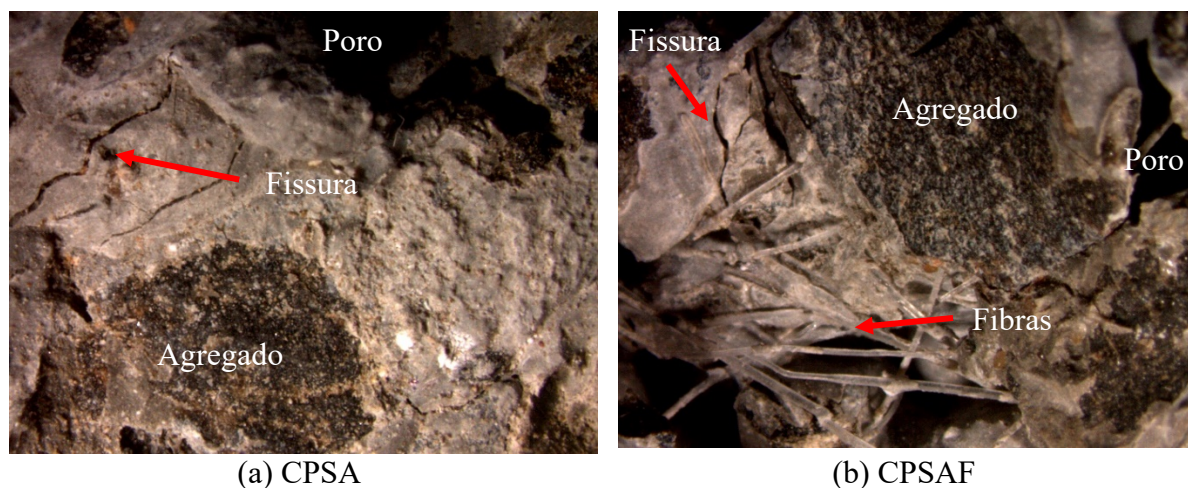


Figura 64 – Imagens obtidas com microscópio estereoscópio das misturas CPSA e CPSAF, após ruptura no ensaio de compressão simples.

### 5.3.5 Resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade

A Figura 65 apresenta os resultados de resistência à tração na flexão para as combinações de sílica ativa, fibra e/ou areia. A Figura 65 (a) mostra os resultados em função da porosidade e a Figura 65 (b) mostra o valor médio e o desvio-padrão para cada mistura. Na Tabela 30 encontram-se os resultados médios, desvio padrão e análise de variância ANOVA para a porosidade, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático. Os resultados de porosidade apresentados neste ensaio referem-se aos obtidos para os corpos de prova prismáticos compactados com o uso do rolo.

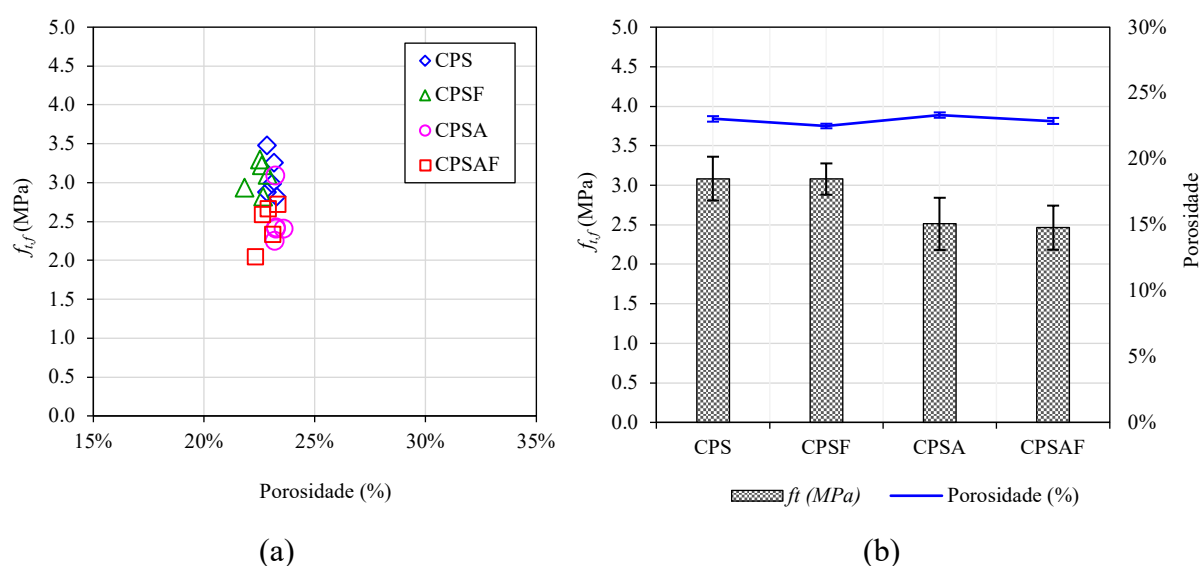


Figura 65 – Resistência à tração na flexão para as misturas com combinações de sílica ativa, fibras e/ou areia: valores para todos os corpos de prova em relação a porosidade (a) e valores médios (b).

Tabela 30 – Valores médios, desvio padrão e análise de variância ANOVA para tração na flexão e módulo de elasticidade estático para as misturas com combinações de sílica ativa, fibra e/ou areia.

Nomenclatura	Porosidade (%)	DesvPad	$f_{lf}$ (MPa)	DesvPad	E (GPa)	DesvPad
CPS	23,04	0,21	3,08	0,28	16,55	4,38
CPSF	22,50	0,17	3,08	0,20	13,63	6,29
CPSA	23,33	0,20	2,51	0,33	11,08	1,41
CPSAF	22,88	0,23	2,46	0,28	12,54	5,55

ANOVA ( <i>valor-P</i> )			
Relação	Porosidade	Tração na flexão	Módulo de elasticidade
CPS vs. CPSF	0,02391	0,96956	0,42194
CPS vs. CPSA	0,03290	0,01787	0,02902
CPS vs. CPSFA	0,45347	0,00774	0,24090
CPSF vs. CPSA	0,00240	0,01104	0,39979
CPSF vs. CPSAF	0,16107	0,00387	0,77630
CPSA vs. CPSAF	0,04953	0,81039	0,58362

Devido ao baixo desvio-padrão obtido pelo controle da densidade dos corpos de prova, a diferença na porosidade média entre a maioria das amostras pode ser considerada significativa ( $valor-P < 0,05$ ), no entanto manteve-se na faixa de aproximadamente 23%, próximo ao valor projetado (25%).

Analisando os dados de resistência à tração na flexão, observa-se que a substituição parcial do agregado graúdo por areia resultou em uma diminuição de aproximadamente 0,6 MPa, o que representa um decréscimo de 18,5% na resistência. A diferença entre os valores é significativa comprovado pelo *valor-P* obtido na Tabela 30. No trabalho de Bonicelli *et al.* (2015), as misturas contendo a mesma quantidade de areia (5%), foram estudadas para três relações a/c diferentes, isto é, 0,27, 0,30 e 0,35. A diferença na resistência à tração por compressão diametral não foi significativa. Portanto, não é claro o fator responsável pela queda de resistência do concreto permeável na presença de areia nesta pesquisa. Destaca-se a possibilidade de a relação a/c mantida em 0,26 não ser suficiente para hidratação dos grãos de cimento devido à presença de areia, considerando que o agregado graúdo já possuía uma quantidade de finos de 18% - diferente do agregado utilizado na pesquisa de Bonicelli *et al.* (2015). Neste sentido, há necessidade de maiores investigações sobre a incorporação de areia variando a relação a/c, mantendo comparáveis os parâmetros de densidade e porosidade.

No trabalho dos autores mencionados, a relação a/c passou a gerar diferença nos resultados nas misturas contendo 10% de areia, cujos valores eram melhores para as maiores relações a/c. No entanto, a densidade das misturas contendo as maiores relações a/c para 10% de areia foi



aumentada e, conseqüentemente, a porosidade foi reduzida. Neste caso, novamente não fica claro o efeito da areia no concreto permeável. Não é possível afirmar se a resistência aumentou devido à incorporação de 10% de areia ou devido à diminuição da porosidade. Buscou-se então comparar duas misturas de mesma relação a/c (0,30) e mesma porosidade ( $\approx 20\%$ ) obtidas pelos autores, porém uma com 5% de areia e a outra com 10% de areia, no qual foi possível observar que a diferença entre os resultados de tração por compressão diametral não foi significativa. Assim, evidencia-se que a porosidade representa o aspecto fundamental na resistência mecânica do concreto permeável.

Outro fator a ser observado é a ausência de qualquer efeito da fibra no concreto permeável, mesmo quando a areia é incorporada à mistura. A Figura 66 mostra as curvas força vs. deslocamento obtidas no ensaio para cada mistura analisada.

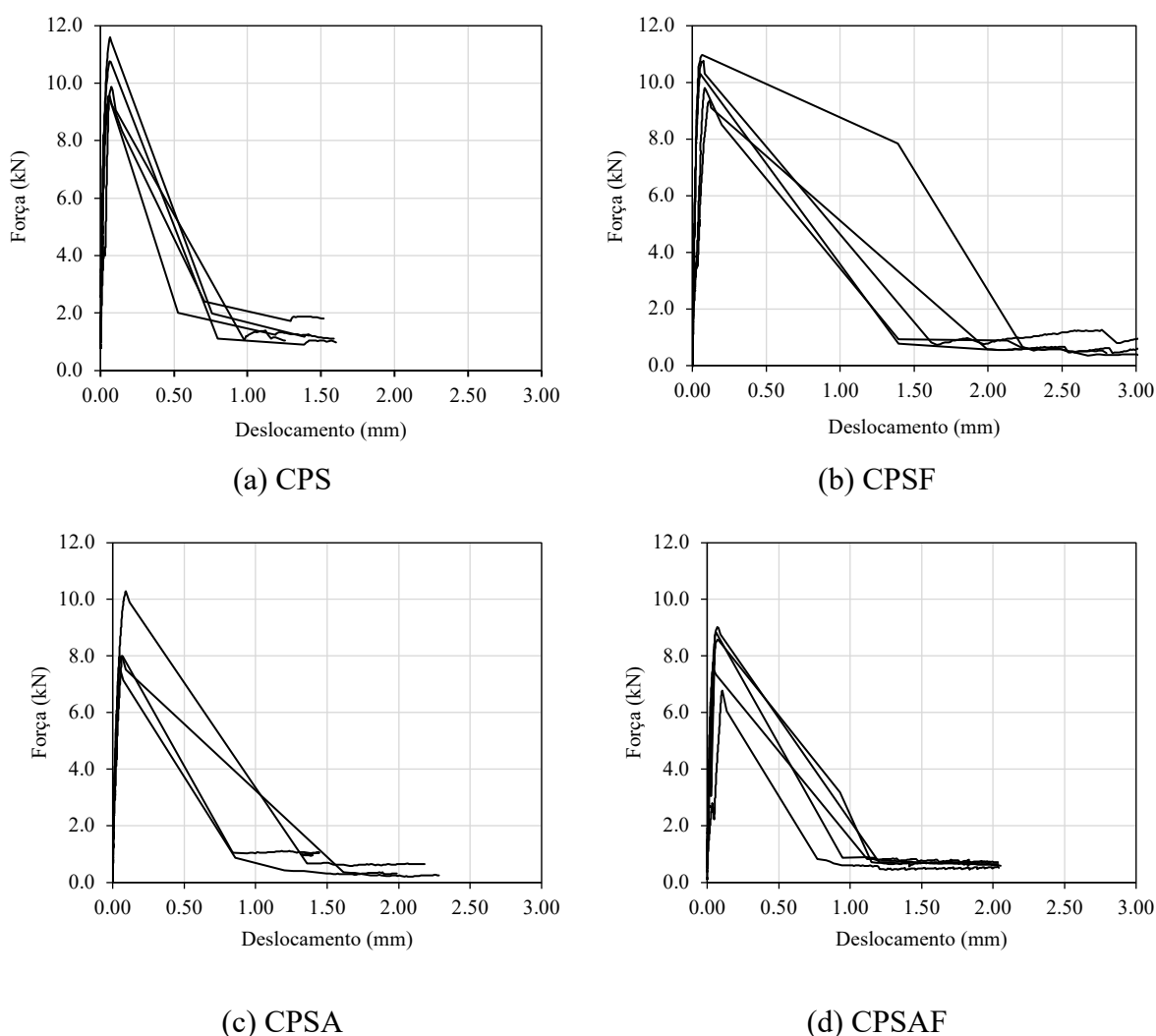


Figura 66 – Ensaio de tração na flexão: força vs. deslocamento para as misturas com sílica ativa, fibras e/ou areia.

O aumento da quantidade de argamassa envolvendo os agregados para o aumento da área de contato com as fibras não foi suficiente para o melhoramento da ductilidade do concreto permeável, uma vez que as fibras não são totalmente envolvidas devido à estrutura porosa do material. É possível visualizar a partir da Figura 66 que a presença de areia juntamente com as fibras não contribuiu no controle da fissuração, mantendo o comportamento frágil na ruptura. Com isso, não é possível constatar se houve melhora da aderência fibra-matriz pela incorporação de areia, pois é possível que a resistência da argamassa tenha sido prejudicada pela baixa relação a/c mantida.

### 5.3.6 Abrasão

A Figura 67 mostra a perda de massa por abrasão das misturas com combinações de sílica ativa, fibra e/ou areia. Conforme relatado, neste ensaio três amostras de dimensões 10 x 10 cm (diâmetro x altura) são colocadas na máquina de abrasão Los Angeles cujo atrito é gerado pelos próprios corpos de prova e pela parede do tambor. Devido ao desgaste das amostras e da quantidade de pó gerado durante o teste, é difícil a identificação individual de cada amostra e, por isso, não foi possível obter o desvio-padrão dos resultados. Cada ponto ilustrado no gráfico representa a média das perdas de massa obtida para os três corpos de prova.

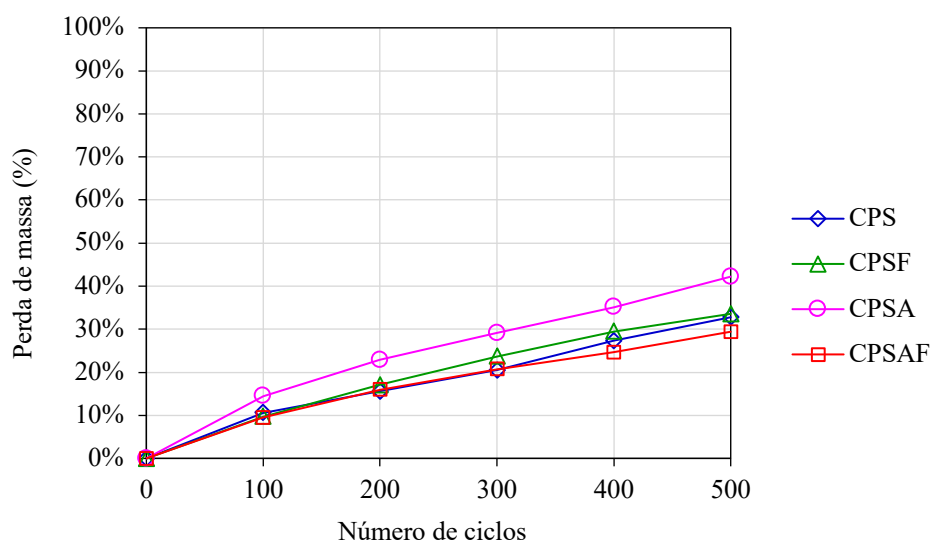


Figura 67 – Perda de massa por abrasão vs. número de ciclos para as misturas com sílica ativa, fibras e/ou areia.

A partir do gráfico da Figura 67 nota-se que, mais uma vez, a substituição parcial do agregado graúdo pela areia parece não ter efeito positivo para o concreto permeável no traço estudado. A perda de massa média para a mistura CPSA foi maior que as demais em decorrência da menor



resistência da matriz, conforme evidenciado. Em conjunto com as fibras, há uma redução na perda de massa média para a mistura CPSAF, no entanto parece igualar-se a CPS e CPSF. Comparando-se apenas as misturas com areia, a incorporação de fibras diminuiu em aproximadamente 10% a perda de massa após os 500 ciclos, indicando que uma pequena melhoria houve no envolvimento das fibras de forma que a estrutura do corpo de prova foi menos danificada. A Figura 68 mostra o aspecto de um dos corpos de prova para cada mistura ao final do ensaio.

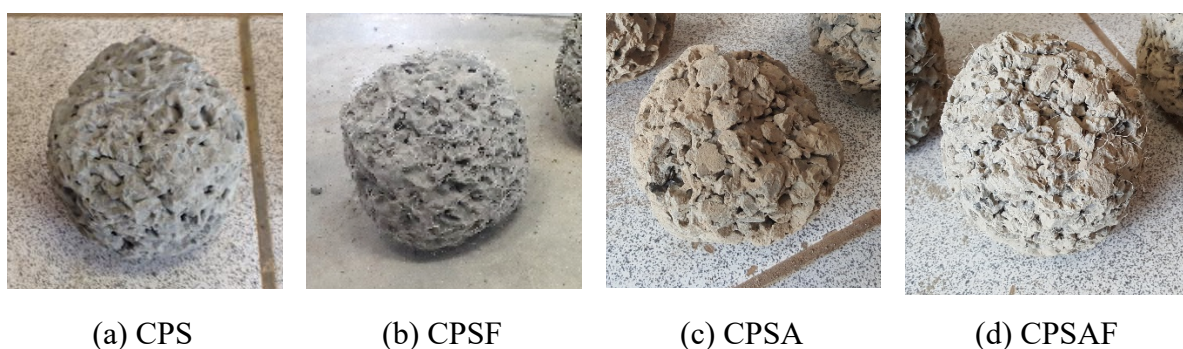


Figura 68 – Perda de massa por abrasão ao final dos 500 ciclos para as misturas com sílica ativa, fibra e/ou areia.

### 5.3.7 Considerações parciais

Neste item, combinações experimentais foram feitas com os traços de melhor desempenho (relação a/c, sílica ativa e fibra), através da substituição parcial do agregado graúdo por areia no intuito de avaliar o comportamento do concreto permeável. Anteriormente verificou-se que a incorporação de fibras não gerou qualquer efeito sobre as propriedades mecânicas do concreto permeável, devido à provável má dispersão e falta de aderência das fibras com a matriz porosa do material. A substituição parcial do agregado por 5% de areia objetivou o aumento da quantidade de argamassa que envolve os agregados e, com isso, uma possível melhora no envolvimento e ancoragem das fibras promovendo sua funcionalidade. A quantidade de 5% escolhida foi feita com base em estudos mencionados e considerando que o agregado utilizado nesta pesquisa já possuía um teor de finos de aproximadamente 18% na fração entre 4,75 e 2,36 mm.

Como resultado, verificou-se que a areia também não promoveu melhorias nas características mecânicas avaliadas, e também na abrasão. Acredita-se que a manter a relação a/c de 0,26 possa ter prejudicado a resistência do concreto permeável já que a areia pode absorver parte da água necessária à hidratação do cimento. Relações a/c maiores devem ser analisadas para confirmar

tal efeito. Já que fibra apresentou um potencial de melhora na mistura contendo areia, portando a análise de relações a/c maiores também poderia colaborar para o estudo do efeito da fibra neste caso. De maneira geral, observa-se que a areia, mesmo em pequena quantidade, altera a resistência mecânica do concreto. Nesse sentido, quantidades maiores de areia necessitariam de relações a/c ainda maiores, o que poderiam prejudicar a resistência e as características drenantes do concreto permeável.

#### 5.4 SÍNTESE DA FASE 2

A **Fase 2** desta pesquisa buscou avaliar, a partir de parâmetros iniciais fixados, a incorporação de materiais alternativos na tentativa de melhorar a resistência mecânica sem afetar as propriedades hidráulicas do concreto permeável. Os parâmetros fixados a partir dos resultados da **Fase 1**, como tipo de corpo de prova, método de dosagem e compactação, foram considerados eficientes para a obtenção de variáveis de controle (usadas na Fase 2), ou seja, proporção de mistura, relação a/c, densidade e porosidade de projeto. Isso é importante quando se deseja comparar o efeito individual de diferentes materiais sem que mais variáveis de interesse sejam incluídas no estudo, o que tornariam os resultados incomparáveis.

Mesmo que os valores de porosidade das amostras estudadas nesta fase tenham permanecido próximo ao valor projetado, mas não exatamente igual, observou-se que a quantidade de aditivo tem grande influência na trabalhabilidade da mistura e, portanto, torna a obtenção da porosidade de projeto ligeiramente variável. Embora isso ocorra, fica evidente que as misturas que tiveram maior quantidade de aditivo, apresentaram os melhores resultados mecânicos, já que ocorre um melhor adensamento da mistura na fôrma e melhor dispersão dos grãos de aglomerante. O uso de aditivo ressalta-se como um material muito importante para o projeto de misturas de concreto permeável.

Entre os materiais alternativos analisados (sílica ativa, fibras de polipropileno de areia), a sílica ativa foi o único material que de fato acarretou em melhorias no desempenho mecânico do concreto permeável, sem prejudicar as demais propriedades do material, isto é, trabalhabilidade, porosidade e drenabilidade. O uso da quantidade máxima de aditivo recomendada pelo fabricante, neste caso, foi fundamental para a obtenção destes resultados. Com a baixa relação a/c aliado ao teor máximo de aditivo, foram obtidos resultados de resistência média à compressão e tração na flexão de 21 MPa e 3 MPa, respectivamente, caracterizando os melhores resultados desta pesquisa. O valor de resistência à tração na flexão é maior que o recomendado

pela NBR 16416 (2015) para pavimentos moldado no local de 100 mm de espessura para tráfego leve de veículos, e os valores de taxa de infiltração e permeabilidade (0,44 e 0,76 cm/s, respectivamente) são maiores que o exigido de 0,10 cm/s.

As macrofibras (50 mm de comprimento) não são indicadas para uso em concreto permeável. Além de problemas de dispersão, ocorre a aglomeração durante o processo de mistura, gerando pontos de fragilidade na matriz que podem até mesmo reduzir a resistência. Técnicas de dispersão podem ser aplicadas para verificar o comportamento das fibras no concreto permeável, no entanto o problema de envolvimento das fibras na mistura será sempre proporcional à porosidade do concreto permeável. Quanto maior a quantidade de poros, mais expostas ficarão as fibras na matriz e menor será sua funcionalidade.

Ainda em relação ao desempenho das fibras, o comportamento obtido nesta pesquisa para fibras de maior comprimento é similar ao obtido para fibras menores (12-20 mm) estudadas por diferentes autores (WU *et al.*, 2011; HUANG *et al.*, 2010; KEVERN *et al.*, 2008). Diante disso, há um indicativo de que independente das dimensões da fibra (comprimento e diâmetro), a sua adição na mistura não mostra efeito significativo nas propriedades mecânicas ou resistência à abrasão do concreto permeável. Um comprimento maior de fibra para garantir melhor aderência e envolvimento na estrutura porosa do concreto permeável, ainda não é suficiente para que a fibra possa exercer sua função como em um concreto convencional.

Por fim, pode-se destacar que para a proporção de mistura estudada, a areia não acarretou em melhorias nas propriedades mecânicas do concreto permeável, diferente do obtido por alguns autores (YANG e JIANG, 2003; KEVERN *et al.*, 2008; BONICELLI *et al.*, 2015). Todavia, é importante considerar que para esses autores mencionados, a quantidade de areia sempre resultou na diminuição da porosidade do concreto permeável, não ficando claro se o aumento de resistência ocorreu devido a este fenômeno ou de fato à incorporação de areia. Salienta-se uma das lacunas mencionadas nesta tese, isto é, a ausência de normas a respeito de métodos de dosagem e compactação, o que acaba limitando a comparação entre as pesquisas realizadas sobre concreto permeável. Isso não exclui a necessidade de verificação de maiores relações a/c para analisar se realmente a incorporação de areia no concreto permeável não apresenta melhorias significativas. Contudo, destaca-se que, independente do material utilizado, foi possível nesta pesquisa alcançar consecutivamente as propriedades desejadas de maneira muito próxima, o que possibilitou avaliar o potencial dos materiais de forma mais efetiva.

## 6 FASE 3: CONSIDERAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO

Estudos a respeito do dimensionamento do concreto permeável ainda são limitados devido ao comportamento variável do material em função da sua porosidade e de modelos representativos deste comportamento. Análises estruturais e do comportamento à fadiga são imprescindíveis para o projeto do pavimento. Neste sentido, este capítulo traz uma abordagem a respeito do comportamento de uma placa de concreto permeável sujeito à carga de um eixo padrão (80 kN) e estimativas de espessuras através de modelos de fadiga existentes. Tais análises visam contribuir para o estudo da aplicabilidade e implementação do concreto permeável como revestimento em vias de tráfego leve e médio.

### 6.1 ANÁLISES MECÂNICAS

Neste item foram analisadas as tensões atuantes em uma placa de concreto permeável de dimensões 3,5 x 5,0 m, cujos resultados foram comparados aos obtidos por Batezini (2013), utilizando o *software* EverFE 2.24 – ferramenta tridimensional em elementos finitos para análise da resposta de pavimentos de concreto simples aos eixos veiculares e efeitos do ambiente (DAVIDS *et al.*, 2003). Da mesma forma que realizadas pelo autor, as análises foram feitas considerando a aplicação de uma carga de eixo padrão de 80 kN sobre a placa de bordas livres, na posição mostrada na Figura 69.

Segundo Batezini (2013) esta posição é a mais crítica dentre as diversas obtidas através de análises preliminares com a variação da posição do eixo sobre a placa. O módulo de reação do sub-leito (k) adotado também foi de 0,05 MPa/mm, considerando um subleito de qualidade mediana. A Tabela 31 mostra os dados utilizados pelo autor e os dados desta pesquisa. As resistências à tração na flexão dos concretos foram ligeiramente reduzidas considerando o desvio-padrão obtido nos resultados. O coeficiente de Poisson utilizado por Batezini (2013) foi empregado de acordo com o estudo de Goede (2009). No entanto, o valor utilizado pelo *software* de dimensionamento de pavimentos de concreto permeável (*PerviousPave*), que será tratado no item 6.2, é o mesmo de um concreto convencional de 0,15 e, por esse motivo, não foi alterado. Por fim, adotou-se a mesma malha de elementos finitos utilizada por Batezini (2013), conforme mostra a Figura 70.

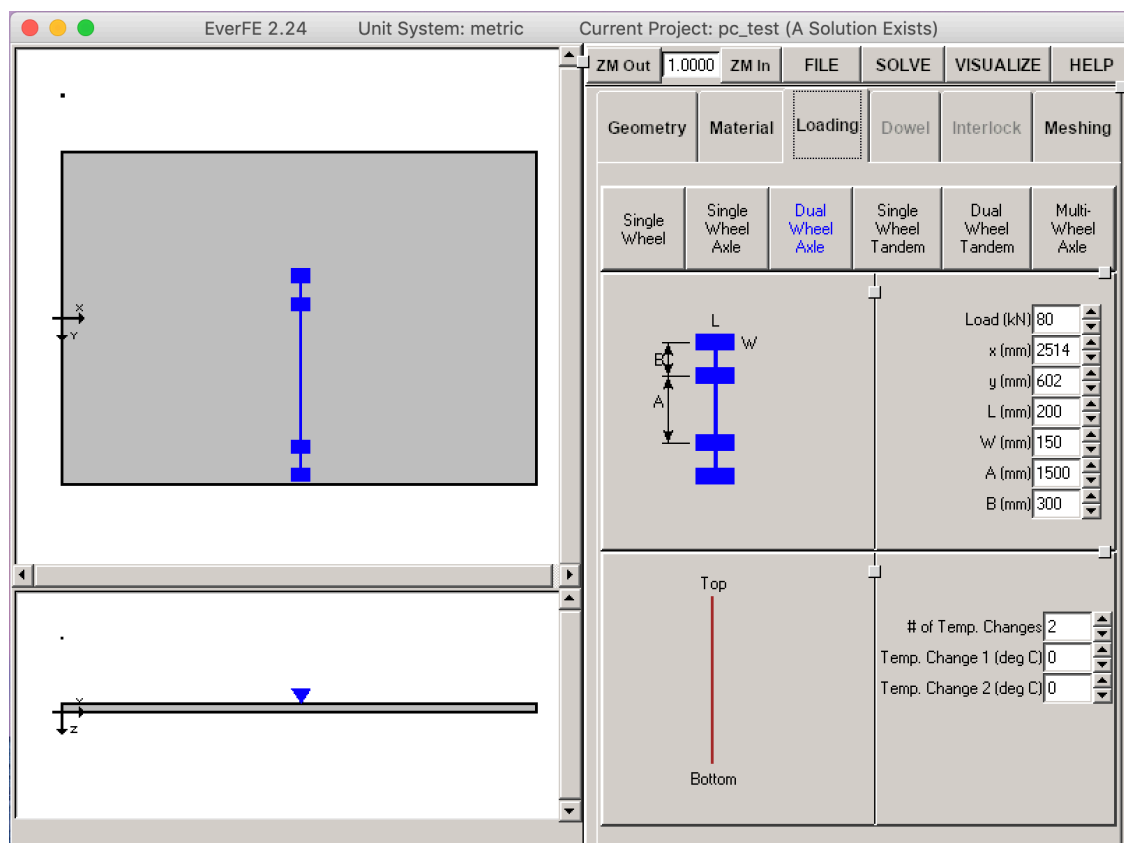


Figura 69 – Posicionamento de um eixo padrão (80 kN) na placa de concreto permeável.

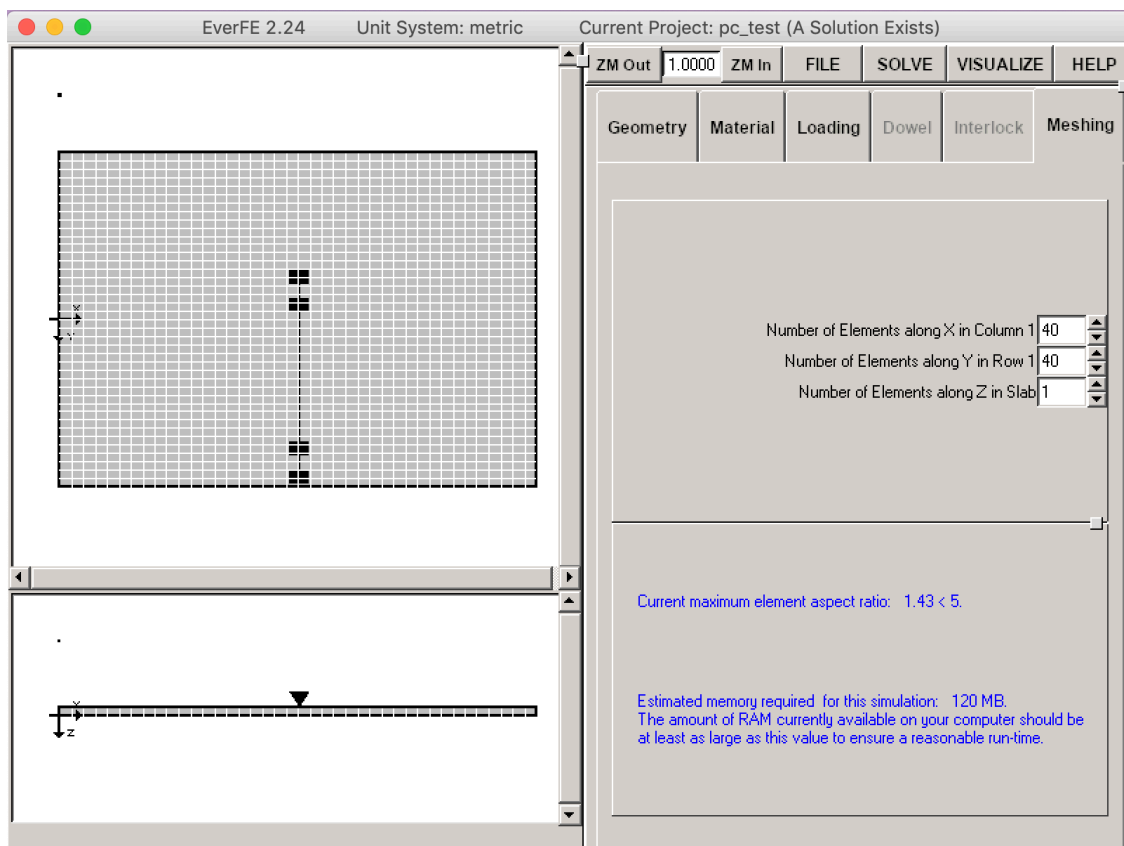


Figura 70 – Malha de elementos finitos.

Tabela 31 – Parâmetros de entrada utilizados na análise mecanicista.

Material	CP	CPS	Batezini (2013)	
			Concreto Permeável	Concreto Convencional
Módulo de Elasticidade (E)	15.000	15.000	15.000	28.000
Coefficiente de Poisson	0,15	0,15	0,22	0,15
Resistência à tração na flexão (MPa)	2,00	3,00	2,13	4,50

CP – Concreto permeável de relação a/c 0,26 obtido na Fase 1.

CPS – Concreto permeável de relação a/c 0,26 com sílica ativa obtido na Fase 2.

É importante ressaltar que, conforme mencionado pelo autor, o modelo estático linear utilizado nas análises é para um concreto convencional considerado homogêneo e isotrópico, já que não há modelos numéricos para placas porosas. Portanto, é possível que este modelo seja insuficiente para obtenção das tensões reais na placa para um concreto permeável devido a quantidade de poros, da variação vertical da porosidade e da diferente forma como as tensões são distribuídas internamente no material. Por outro lado, análises realizadas por Cofer *et al.* (2011) e comparadas com resultados obtidos através da teoria analítica clássica para o pavimento tradicional de concreto, presumem que o sistema de pavimento de concreto permeável segue as mesmas tendências de tensões de flexão e deflexão que as normalmente observadas em sistemas tradicionais de pavimento de concreto. Embora haja esta hipótese, destaca-se a importância de estudos reais em placas para verificação das tensões atuantes em condições *in situ* para validação da análise em elementos finitos e compatibilização entre aplicações práticas e teóricas.

A Figura 71 apresenta a variação das relações de tensão (RT), obtida entre a tensão atuante na placa pela resistência à tração na flexão, em função da variação da espessura do pavimento de concreto permeável para a carga de eixo padrão (80 kN). As curvas são comparadas às obtidas por Batezini (2013) para os concretos de características descritas na Tabela 31. A linha pontilhada no gráfico (RT = 0,45) representa o valor limite sugerido pelo modelo de fadiga PCA (1984) da *Portland Cement Association*, para que não haja perda de resistência por fadiga. Neste caso o concreto permeável convencional (CP) desenvolvido nesta pesquisa e por Batezini (2013) não atendem a este critério para nenhuma das espessuras analisadas. Em relação ao concreto permeável desenvolvido por Batezini (2013), este fato já havia sido relatado pelo autor em seu trabalho. Isso sugere que estes materiais não poderiam ser aplicados como revestimento para pavimentos com tráfego de veículos pesados. É importante lembrar que este valor é apenas

uma referência já que trata de concretos tradicionais, podendo ser inclusive menor tratando-se de um concreto permeável.

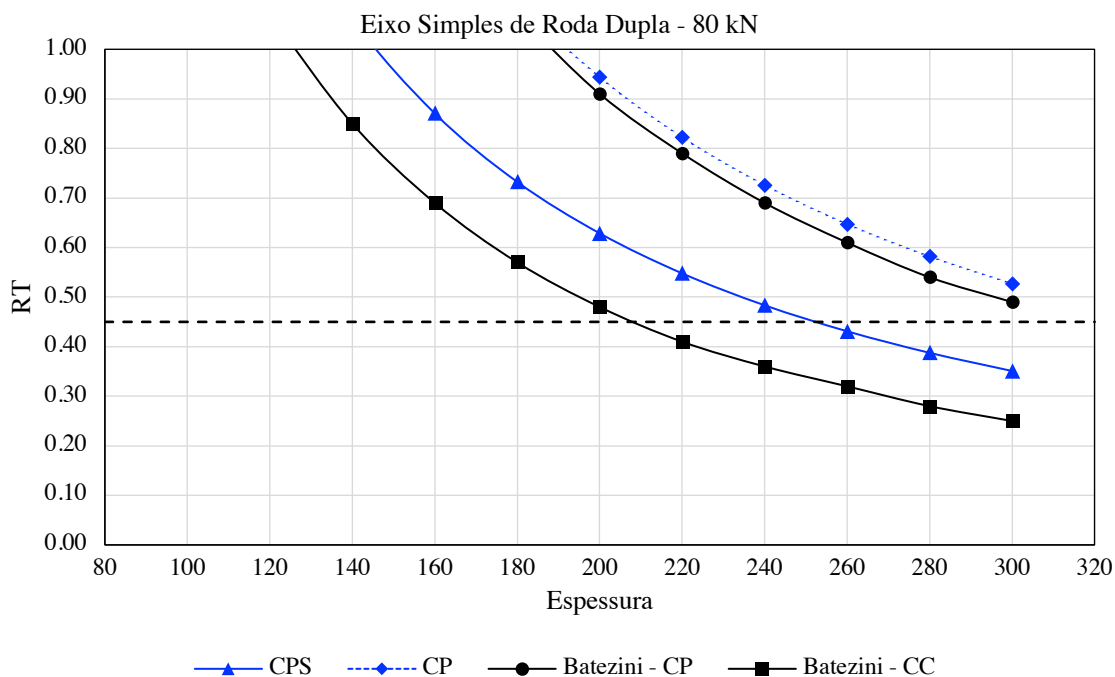


Figura 71 – Variação da relação de tensão (RT) vs. espessura da placa.

Observa-se que a curva obtida para o CPS (concreto permeável com sílica ativa) se aproxima da obtida para um concreto convencional, indicando que para espessuras inferiores a aproximadamente 130 e 150 mm (para o concreto convencional e para CPS, respectivamente) haveria a ruptura da placa imediatamente após primeira passagem do veículo, já que as tensões de tração atuantes igualam-se às tensões resistentes ( $RT = 1$ ). Já para os concretos permeáveis simples (sem incorporação de materiais cimentícios suplementares) desta pesquisa e o desenvolvido por Batezini (2013), haveria ruptura para espessuras menores que aproximadamente 200 mm.

Na Figura 72 são apresentadas as tensões máximas obtidas na placa de concreto em relação ao topo (a) e em relação à base (b), e a Figura 73 mostra o aspecto das deformações oriundas do carregamento aplicado em diferentes perspectivas, para uma espessura de 260 mm – escolhida considerando os dados da Figura 71 para o CPS e o critério abaixo de 0,45 de RT. Observa-se que na base da placa é onde ocorrem as maiores solicitações devido as tensões de tração nas fibras inferiores. Neste caso a tensão atuante é de 1,29 MPa (equivalente a  $RT = 0,43$ ). Quanto às deformações, evidencia-se que as maiores ocorrem na borda quando comparadas ao centro.

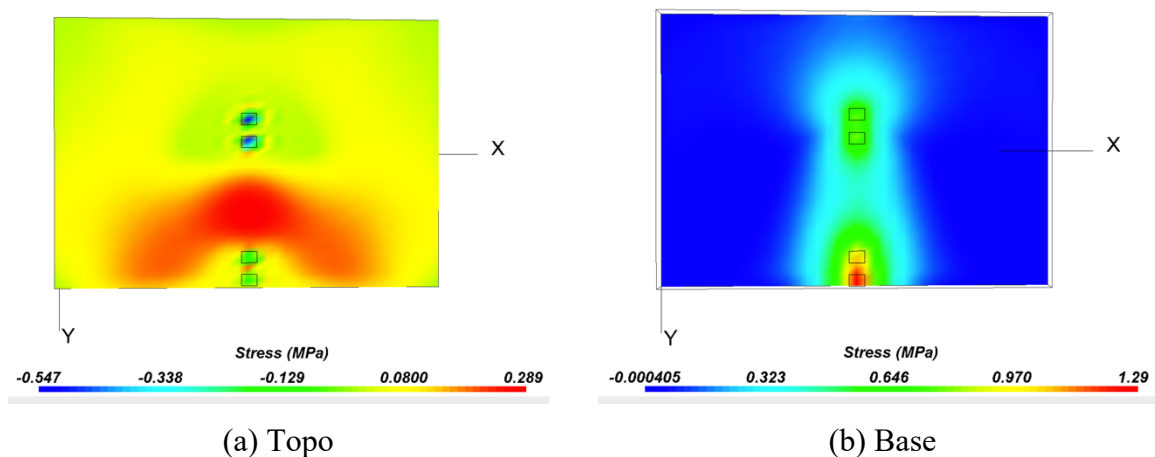


Figura 72 – Distribuições das tensões na placa em função da carga de eixo padrão (80 kN).

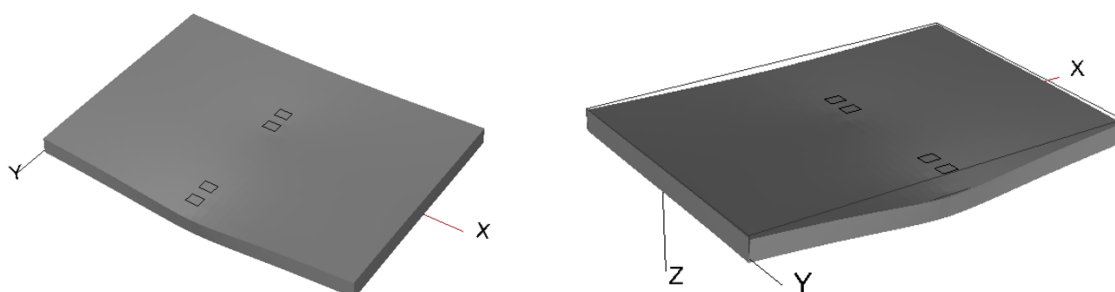


Figura 73 – Deformações na placa em função da carga de eixo padrão (80 kN).

## 6.2 DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO ATRAVÉS DE MODELOS DE FADIGA

A espessura da placa de 260 mm para o concreto permeável tipo CPS obtida no item anterior, considera que o modelo de fadiga do PCA (1984) seja adequado a este tipo de material, dado a limitante de relações de tensões (RT) de 0,45. Este valor de RT fornecido pelo método indica que o número permissível de repetições para a carga de eixo padrão analisada é ilimitado. Assim, para RTs maiores que 0,45, o número de repetições possíveis deve ser considerado. Neste sentido, este item visa obter espessuras de concreto permeável considerando diferentes número de repetições de carga suportado pelo material ( $N_f$ ) à fadiga sob valores mais elevados de RT. Com isso, é possível diminuir a espessura necessária do pavimento dado o tipo de tráfego, para que não haja superdimensionamento e, conseqüentemente, maiores custos. Assim, para o cálculo das espessuras do pavimento, também será considerado números de repetições do eixo padrão ( $N_d$ ) característicos de dois tipos de via (local e coletora).



### 6.2.1 Descrição dos modelos de fadiga

Os modelos de fadiga são geralmente funções do número de ciclos de carregamento ( $N_f$ ) e da RT. A espessura do pavimento é adequada quando a relação entre  $N_d$  e  $N_f$  for imediatamente inferior a 100%, critério de limite estrutural. Para análise das espessuras foram considerados três modelos de fadiga: (i) modelo de fadiga usado pelo *software* de dimensionamento de concreto permeável *PerviousPave*; (ii) modelo de fadiga obtido através de ensaios experimentais de Chen *et al.* (2013); (iii) modelo de fadiga obtido através de ensaios experimentais de Zhou *et al.* (2016). Cabe lembrar que os resultados obtidos por estes autores estão discutidos no item 2.6.2.

O modelo de fadiga utilizado no *software PerviousPave* é o mesmo utilizado no *software StreetPave*, ambos desenvolvidos pela *American Concrete Pavement Association* (ACPA), que levam em consideração o modelo desenvolvido pela *Portland Cement Association* (PCA) de 1984, o qual inclui critérios de fadiga e falha por erosão, além do impacto estrutural da borda do pavimento (meio-fio) (TAYABJI e PACKARD, 1983; PCA, 1984). A ACPA primeiramente utilizou tal metodologia para determinar a espessura de vias e rodovias de concreto no *software StreetPave* (ACPA, 2005), incluindo outros parâmetros como “confiabilidade” (*reliability*) (TITUS-GLOVER *et al.*, 2004), análise de eixos tridem no espectro de tráfego (GOTLIF *et al.*, 2004), barras de transferência, etc.

O *software PerviousPave* utiliza o mesmo modelo de fadiga de concretos convencionais, pois no período em que foi desenvolvido (2010) os estudos relacionados à fadiga do concreto permeável sugeriram que o comportamento de ambos era similar (TAMAI *et al.*, 2004). Os modelos para pavimentos permeáveis estudados anteriormente por Pintado *et al.* (1999) e Watanabe *et al.* (2004), citados no manual do *software*, não foram considerados aceitáveis devido às proporções de misturas e número de amostras limitadas, bem como questões relacionadas à fadiga de amostras de laboratório *versus* placas de tamanho integral. Embora o modelo de fadiga seja o mesmo, o *PerviousPave* possui algumas diferenças aplicadas para análise do concreto permeável, tais como, por exemplo, a exclusão de categorias de tráfego para cargas de eixo pesado, a não necessidade de barras de transferência, e também do critério de erosão<sup>11</sup>, uma vez que as pressões hidráulicas geradas sob as placas permeáveis são diferentes

---

<sup>11</sup> Segundo o Comitê de Manutenção de Juntas em Pavimentos de Concreto relacionado à erosão (*Report of Committee on Maintenance of Joints in Concrete Pavements as Related to the Pumping Action of*

das geradas em placas íntegras de concreto convencional. Em placas de concreto permeável a água possui vários locais de escape (vazios do concreto permeável), enquanto que em pavimentos de concreto convencional o único caminho de escape é entre as juntas transversais e longitudinais para superfície do pavimento. Por fim, também não são considerados critérios de desgaste superficial. As informações fornecidas estão contidas no manual<sup>12</sup> do *software* ACPA (2010).

Sendo o critério de fadiga o único considerado, o dano de fadiga acumulado causado por cargas de eixo único, tandem e tridem, é obtido pela Equação 8.

$$FD_{total} = FD_{único} + FD_{tandem} + FD_{tridem} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

$FD_{total}$  é o dano total à fadiga (%);

$FD_{único}$  é o dano causado por eixo único (%);

$FD_{tandem}$  é o dano causado por eixo tandem (%);

$FD_{tridem}$  é o dano causado por eixo tridem (%)

A partir da hipótese de Palmgren-Miner, o dano de fadiga (FD) para cada tipo de eixo é expressado pela Equação 9.

$$FD = \frac{N_d}{N_f} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

$N_d$  é o número de cargas aplicadas (calculado a partir dos dados de tráfego);

$N_f$  é o número de cargas aplicadas suportadas pelo material antes da ruptura.

O valor de  $N_f$  é o estimado através do procedimento da ACPA de acordo com o modelo de fadiga apresentado na Equação 10.

$$\log N_f = \left[ \frac{-SR^{-10,24} \log(1 - P)}{0,0112} \right]^{0,217} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

---

*Slabs, 1948*) citado no *PerviousPave manual*, para que a erosão ocorra, três fatores são necessários: (i) subleito de material fino ou erodível; (ii) a presença de água entre o pavimento e o subleito/sub-base; e (iii) cargas pesadas em tráfego rápido/intenso.

<sup>12</sup> Disponível em: <http://1204075.sites.myregisteredsite.com/perviouspave/About%20PerviousPave.pdf>.

$SR$  é a relação de tensão (tensão atuante pela tensão resistente do concreto permeável);

$P$  é a probabilidade de falha dada pela Equação 11.

$$P = 1 - R \times \frac{SC}{50} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

$R$  é a confiança “*reliability*” (fornecido pelo usuário. Recomendado no valor de 80%), %;

$SC$  é a porcentagem de placas fissuradas ao final da vida útil do pavimento (assumido como 15%), %.

Os modelos de fadiga obtidos experimentalmente por Chen *et al.* (2013) e Zhou *et al.* (2016) são dados pelas Equações 12 e 13, respectivamente. Estas equações foram obtidas através dos valores de  $N_f$  para diferentes relações de tensão (RT) no ensaio de fadiga, mostrados na Tabela 32. A Tabela 32 também mostra as características do concreto permeável utilizadas no ensaio de fadiga. Cabe ressaltar que os autores realizaram outras variações no traço, porém as amostras escolhidas foram aquelas cujos resultados mais se aproximam aos obtidos nesta pesquisa. No traço de Chen *et al.* (2013) a quantidade de aglomerante é composta de 72% de cimento Portland, 18% de cinza volante, 10% de sílica ativa e 0,5% de aditivo. No traço de Zhou *et al.* (2016), não há presença de materiais cimentícios suplementares, no entanto 10% de polímero foi adicionado em relação à massa de água da mistura.

$$RT = -0,044 \ln N_f + 1,0859 \quad (\text{Equação 12})$$

$$RT = -0,036 \ln N_f + 0,9951 \quad (\text{Equação 13})$$

Tabela 32 – Características e resultados dos concretos permeáveis confeccionados por Chen *et al.* (2013) e Zhou *et al.* (2016) no ensaio de fadiga.

Autores	Traço*	Relação a/c	n° de amostras	Porosidade (%)	Resistência à tração na flexão (MPa)	
Chen <i>et al.</i>	1:5,32	0,28	6	24,70	4,20	
Zhou <i>et al.</i>	1:6,00	0,32	-	28,90	1,98	
Autores	Número de cargas aplicadas suportadas pelo material ( $N_f$ )					
	RT = 0,90	RT = 0,85	RT = 0,80	RT = 0,75	RT = 0,70	RT = 0,65
Chen <i>et al.</i>	107	-	395	-	8345	-
Zhou <i>et al.</i>	-	51	234	1189	2267	14508

\* Traço (aglomerante:agregado graúdo)

## 6.2.2 Comparações entre os modelos

A Figura 74 mostra a comparação entre os modelos de fadiga da ACPA (2010), Chen *et al.* (2013) e Zhou *et al.* (2016). Para correlacionar os modelos, é importante relatar a influência da probabilidade de falha do pavimento. No modelo da ACPA os valores de P (probabilidade de falha) são admitidos a partir de aproximadamente 70%, já que é função do valor R (confiança), conforme mostra a Equação 11. No *software*, o valor R está relacionado a classificação da via, sendo recomendado valor de 80% para vias residenciais/locais e 85% para vias coletoras. Quanto maior o valor de R, menor o valor de P, não sendo admitidos valores de R maiores que 100%. Tal fato reflete diretamente na determinação da espessura do pavimento, pois observando o gráfico da Figura 74, é possível verificar que para mesma RT o modelo de ACPA admite que o pavimento suportará um maior número de ciclos de fadiga. Se o valor de  $N_f$  fosse reduzido pela diminuição da probabilidade de falha, espessuras maiores seriam obtidas e mais a favor da segurança, pois quanto maior os valores de  $N_f$  menores espessuras são necessárias.

Os modelos de Chen *et al.* (2013) e Zhou *et al.* (2016) apresentam relações de RT vs.  $N_f$  mais próximas, embora os materiais apresentem características diferentes conforme mostra a Tabela 32. No modelo de Zhou *et al.* (2016) foi considerado os resultados para uma probabilidade de falha de 50% (probabilidade mais alta utilizada). Quanto menor a probabilidade de falha menores valores de cargas aplicadas suportadas pelo material eram obtidas. Neste sentido, o valor alto de probabilidade de falha utilizado no modelo ACPA deve ser melhor investigado para concretos permeáveis.

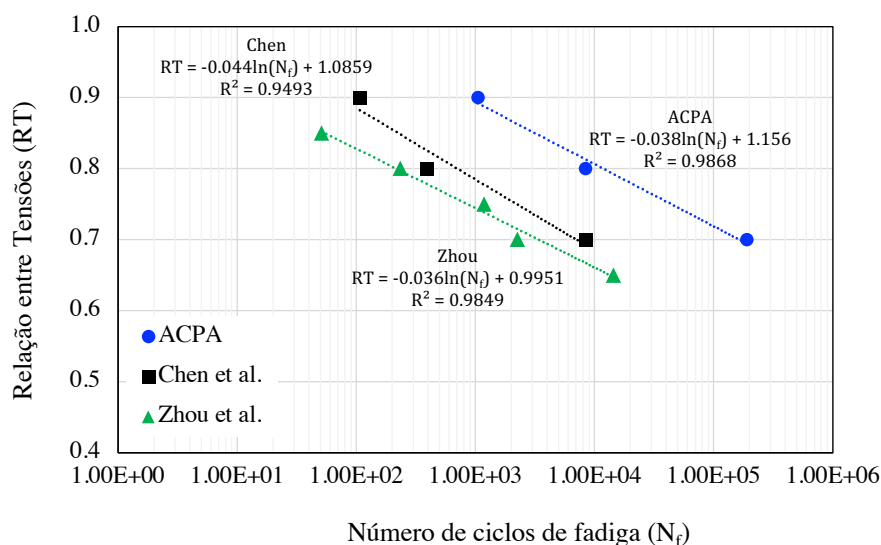


Figura 74 – Modelos de fadiga utilizados na determinação da espessura do concreto permeável.

Para que o modelo desenvolvido pela ACPA se aproximasse dos demais obtidos através de ensaios de fadiga do concreto permeável, seria necessário que a probabilidade de falha fosse aproximadamente 20%. Tal fato garantiria semelhantes quantidades de cargas aplicadas suportadas pelo material. A partir disso, nota-se que o modelo da ACPA parece otimista para o concreto permeável. A Figura 75 ilustra a alteração do modelo e a comparação com os demais.

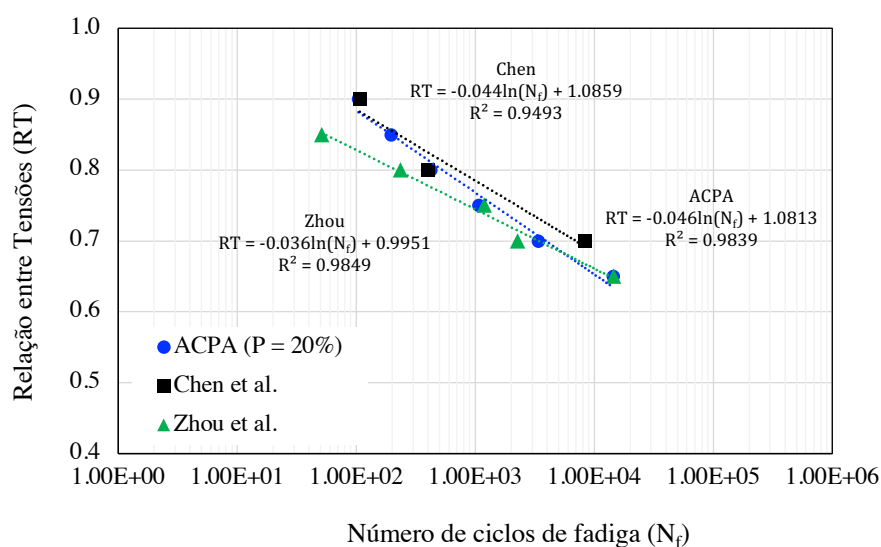


Figura 75 – Comparação entre modelos de fadiga com adaptação do modelo ACPA para uma probabilidade de falha de 20%.

### 6.2.3 Análise das espessuras do revestimento de concreto permeável

No *software PerviousPave*, para determinação da espessura do pavimento, são necessários como parâmetros de entrada as seguintes variáveis: vida de projeto (recomendado 20 anos); nível de confiança (recomendado 80%), relacionado a probabilidade de falha; tipo de via (residencial/local, coletora, etc.); módulo de reação do sub-leito “k” (adotado 0,05 MPa/mm para um solo mediano – arenoso com quantidade moderada de silte/argila); resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade do concreto permeável. Após o preenchimento de tais variáveis o *software* fornece a espessura do pavimento de concreto permeável, utilizando o modelo de fadiga mencionado no item anterior.

Para comparar as espessuras fornecidas pelo *software PerviousPave* com outras obtidas usando os demais modelos de fadiga mencionados, foi realizado as seguintes etapas utilizando os modelos de Chen *et al.* (2013) e Zhou *et al.* (2016):

- (i) Uma espessura foi inicialmente adotada para que a tensão máxima ( $\sigma_{t,f}$ ) atuante na placa fosse obtida através do *software* EverFE 2.24 conforme item 6.1, para uma carga de eixo padrão de 80 kN.
- (ii) A relação de tensão (RT) foi obtida através da tensão máxima atuante na placa ( $\sigma_{t,f}$ ) pela resistência à tração na flexão do concreto permeável.
- (iii) Considerando o valor de RT obtido, as Equações 12 (Chen *et al.*) e 13 (Zhou *et al.*) fornecem o número de cargas aplicadas suportadas pelo material ( $N_f$ );
- (iv) Finalmente, o consumo de resistência à fadiga é calculado de acordo com a Equação 9. Os valores de  $N_{d,k}$  (número de cargas reais aplicadas) adotados representam valores característicos de vias locais e coletoras fornecidos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para uma carga de eixo padrão de 80 kN. É importante esclarecer que o no *software PerviousPave* os valores de  $N_d$  para os diversos tipos de eixos e vias não são fornecidos e, para que valores de  $N_d$  precisos fossem considerados, seriam necessárias análises de tráfego nos tipos de vias mencionadas. No entanto, os valores servem como uma estimativa considerando valores típicos da classificação da via.
- (v) O procedimento é repetido para diferentes espessuras até que o critério de limite estrutural seja atingido ( $FD < 100\%$ ).

A Tabela 33 mostra os resultados obtidos utilizando os modelos de Chen *et al.* (2013) e Zhou *et al.* (2016) para vias locais e coletoras. A Tabela 34 mostra a comparação das espessuras obtidas considerando os três modelos analisados. Os valores foram obtidos para o concreto permeável simples de relação a/c 0,26 obtido na Fase 1 (CP), de resistência à tração na flexão de 2,0 MPa; e o concreto permeável contendo sílica ativa de relação a/c 0,26 obtido na Fase 2 (CPS), de resistência à tração na flexão de 3,0 MPa. As diferentes espessuras também foram obtidas em relação ao tipo de tráfego, considerando vias locais e coletoras.

Tabela 33 – Verificação de espessuras de concreto permeável a partir dos modelos de fadiga de Chen *et al.* (2013) e Zhou *et al.* (2016).

#	Via	Modelo	H (mm)	P (kN)	$\sigma_{t,f}$ (MPa)	RT	N <sub>f</sub>	N <sub>d,k</sub>	CRF (%)
CP	Local	Chen <i>et al.</i>	295	80	1,08	0,54	2,49E+05	2,00E+05	80,48%
		Zhou <i>et al.</i>	290	80	1,11	0,55	2,17E+05	2,00E+05	92,13%
	Coletora	Chen <i>et al.</i>	325	80	0,94	0,47	1,24E+06	1,00E+06	80,65%
		Zhou <i>et al.</i>	315	80	0,98	0,49	1,23E+06	1,00E+06	81,58%
CPS	Local	Chen <i>et al.</i>	220	80	1,64	0,55	2,04E+05	2,00E+05	97,84%
		Zhou <i>et al.</i>	220	80	1,64	0,55	2,48E+05	2,00E+05	80,50%
	Coletora	Chen <i>et al.</i>	245	80	1,41	0,47	1,22E+06	1,00E+06	82,18%
		Zhou <i>et al.</i>	240	80	1,45	0,48	1,49E+06	1,00E+06	67,27%

CRF – consumo de resistência à fadiga.

Tabela 34 – Comparação entre as espessuras de concreto permeável obtidas através dos modelos de fadiga analisados.

Espessura (mm) – Vida de projeto de 20 anos						
#	ACPA (2010)		Chen <i>et al.</i> (2013)		Zhou <i>et al.</i> (2016)	
	Via local	Coletora	Via local	Coletora	Via Local	Coletora
CP	203,20	254,00	295,00	325,00	290,00	315,00
CPS	152,40	190,50	220,00	245,00	220,00	240,00

CP – Concreto permeável de relação a/c 0,26 obtido na Fase 1.

CPS – Concreto permeável de relação a/c 0,26 com sílica ativa obtido na Fase 2.

A partir da Tabela 34, é possível observar que as espessuras obtidas através dos modelos de Chen *et al.* (2013) e Zhou *et al.* (2016) foram semelhantes. Por outro lado, os valores obtidos a partir do modelo da ACPA (2010) no *software PerviousPave* são até 32% menores que os demais. Os valores de 203,20 mm (via local para CP) e 152,40 mm (via local para CPS) obtidos pelo programa estão próximos às espessuras obtidas para uma RT de 1,0 analisada para a carga de eixo padrão de 80 kN no item 6.1. Conforme mostrado, para espessuras abaixo de 200 mm para o CP e de 150 mm para CPS, haveria a ruptura do pavimento com apenas uma passada do veículo. Neste sentido, as espessuras obtidas através dos modelos experimentais parecem mais coerentes com o concreto permeável, por se tratar de um material poroso e de propriedades variáveis. Comparando os concretos CPS e CP, observa-se que a incorporação de sílica ativa pelo aumento da resistência à tração na flexão, reduz em até 26% a espessura necessária do pavimento. Em nenhum dos modelos utilizados foi necessário espessuras acima de 300 mm para o CPS, resultado mais próximo à prática de pavimentos de concreto convencional.

É importante salientar algumas observações quanto as espessuras obtidas. Estes valores são apenas referências, já que análises mais aprofundadas devem ser consideradas, tais como: (i) as tensões obtidas através do *software* EverFE 2.24 podem não ser condizentes com as de um concreto permeável *in loco* dado a variação da porosidade vertical, já que o programa considera um material isotrópico e homogêneo; (ii) as espessuras obtidas não devem ser consideradas para absorção total da água pluvial pelo solo (considerado mediano), pois este pode apresentar queda de resistência, assim a drenagem parcial ou total devem ser consideradas; (iii) o número de cargas reais aplicadas ( $N_d$ ) para cada tipo de eixo deve ser considerado para resultados mais precisos; (iv) os modelos de fadiga experimentais utilizados refletem o comportamento do material em laboratório, assim correlações devem ser feitas com o material em campo a fim de obter espessuras mais representativas de situações práticas; (v) por fim, novos modelos de fadiga e testes experimentais reais em placas devem ser conduzidos para validar as análises realizadas.



## 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta tese buscou, além do aprimoramento de misturas de concreto permeável para pavimentação com o uso de materiais alternativos (sílica ativa, areia e fibras), a análise de questões básicas, porém fundamentais, tais como a influência do tipo de corpo de prova, método de compactação, obtenção de propriedades projetadas (densidade e porosidade), etc. Conforme a explanação dos resultados, conclusões parciais foram expostas em cada item de análise. Assim, para sintetizar as contribuições obtidas, este item busca fornecer respostas para as perguntas destacadas no item 1.4.

- *Quais variáveis devem ser controladas para que a porosidade projetada em misturas de concreto permeável seja atingida sem variância significativa?*

Para que a porosidade final das misturas seja obtida, a densidade de cada corpo de prova deve ser controlada. No entanto, o controle da massa do corpo de prova é dependente de outras variáveis como consistência da mistura e método de compactação. Misturas muito fluídas podem apresentar precipitação das pastas nos poros e prejudicar a obtenção da propriedade desejada, assim como uma compactação excessiva. Isto indica que misturas de consistência seca podem necessitar de maiores quantidades de golpes para atingir a densidade projetada; por outro lado misturas muito fluídas podem adensar-se de maneira que maior quantidade de massa seja necessária para o preenchimento da mistura na fôrma, dado a fixação do número de golpes de compactação. Portanto, é imprescindível a análise da consistência ideal da mistura em função do número de golpes de compactação adotado, para obtenção da densidade e porosidade projetadas. Vale ressaltar que esta análise é tida com base no método de dosagem utilizado. Para validação da hipótese, novos métodos devem ser considerados.

- *Existe diferença significativa entre as propriedades mecânicas e hidráulicas obtidas através de corpos de prova extraídos (simulando condições in situ) e corpos de prova moldados em laboratório? Qual método possui maior consistência para análise das propriedades de diferentes misturas de concreto permeável?*

Há diferença significativa entre o tipo de corpo de prova analisado nas propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável. Embora os corpos de prova extraídos representem condições práticas, os corpos de prova cilíndricos compactados com o

Proctor apresentaram maior consistência nos resultados (menor desvio-padrão) devido à porosidade vertical mais uniforme. Esta condição é importante em laboratório quando se deseja comparar o efeito da aplicação de materiais alternativos ou estimar propriedades.

- *Devido à superfície irregular dos corpos de prova de concreto permeável, há influência do método de capeamento no modo de ruptura e resistência à compressão do material?*

Para corpos de prova compactados com Proctor, nos quais obtém-se superfícies mais regulares, o capeamento com argamassa ou uso do Neoprene não acarreta em diferença significativa nos resultados de resistência à compressão. Por outro lado, em corpos de prova extraídos, a superfície da amostra pode ser irregular devido a quebras no processo de extração, principalmente na superfície inferior mais porosa (maior efeito da porosidade vertical). Neste caso, o uso do Neoprene pode não ser suficiente para distribuir as tensões, afetando o modo de ruptura do material. O capeamento com argamassa gera uma superfície mais regular, com preenchimento de pequenas falhas, permitindo uma distribuição mais uniforme das tensões nas amostras. Além disso, a retificação de corpos de prova não é recomendada pois pode gerar a quebra de alguns agregados prejudicando o ensaio de resistência à compressão.

- *Qual a influência da relação água/cimento e consistência da mistura nas propriedades hidráulicas e mecânicas do concreto permeável?*

A variação relação a/c no concreto permeável não possui o mesmo comportamento para concretos convencionais. A redução da relação a/c pode não resultar em ganhos de resistência mecânica, já que este fator é dependente da consistência da mistura. Consistências muito secas podem dificultar o processo de compactação, pois uma quantidade maior de golpes pode ser necessária gerando maiores quebras nos agregados. Já consistências muito fluídas podem gerar precipitação da pasta nos macroporos diminuindo a porosidade. Neste caso, a diminuição da porosidade não está diretamente relacionada ao aumento da resistência, pois a/c maiores podem enfraquecer a zona de transição mesmo diminuindo a porosidade total do concreto permeável. Portanto, os efeitos da variação da relação a/c e consistência influenciam de diferentes formas as características mecânicas e hidráulicas do concreto permeável.

- *Existe ganho mecânico significativo quando se aumenta o teor de pasta de uma determinada mistura de concreto permeável?*

Para a mistura analisada nesta tese, o aumento de aproximadamente 40 kg/m<sup>3</sup> de cimento não acarretou em diferença significativa nas propriedades hidráulicas e mecânicas do concreto permeável para uma relação a/c mantida em 0,26. Destaca-se que, neste caso, uma maior quantidade de água poderia ser necessária para hidratação do cimento, não sendo possível generalizar o caso para demais misturas.

- *A utilização de materiais suplementares, como sílica ativa, areia e fibras aumenta o desempenho de misturas de concreto permeável?*

Nesta pesquisa, apenas o uso de sílica ativa apresentou ganhos mecânicos significativos sem perda da funcionalidade hidráulica do concreto permeável. Sua incorporação deve estar associada ao uso de aditivo para melhor dispersão. A utilização de macrofibras de polipropileno não acarretaram em melhorias na resistência à tração na flexão, nem mesmo no desgaste por abrasão e, portanto, não são recomendadas. Este fato pode possivelmente ser atribuído a má dispersão das fibras e à falta de ancoragem com a matriz cimentícia. A utilização de 5% de areia em substituição parcial ao agregado graúdo para o traço estudado com relação a/c mantida em 0,26 gerou perda de resistência à tração na flexão. Algumas das possíveis causas incluem a baixa relação a/c, a qual pode não ter sido suficiente para hidratar os grãos de cimento devido à absorção da água pelos finos. Assim, o efeito da areia no concreto permeável necessita ser melhor investigado. No entanto, evidencia-se que quantidades maiores de areia necessitariam de relações a/c ainda maiores, o que poderiam prejudicar a resistência e a permeabilidade do concreto permeável. O aumento da quantidade de argamassa envolvendo os agregados também não foi suficiente para o melhoramento da ancoragem fibra/matriz. A dispersão das fibras torna-se um desafio devido à consistência e à estrutura porosa do concreto permeável.

- *É possível obter uma boa combinação entre o aumento do desempenho mecânico sem que as propriedades hidráulicas do concreto permeável sejam comprometidas?*

Sim, primeiramente sendo necessário o controle da densidade projetada para que a porosidade final seja atingida. O ganho de resistência neste caso pode ser atingido com o melhoramento da zona de transição entre o agregado e a pasta, por exemplo com uso

de sílica ativa, e também com a utilização de agregados mais resistentes. Apesar do tipo de agregado não ser uma variável desta pesquisa, observou-se que a ruptura característica das amostras estudadas se deu em grande parte no agregado, indicando a possibilidade de obtenção de maiores resistências mecânicas com a utilização de um agregado mais resistente. Este fato deve ser melhor investigado para outros tipos de agregado e fator de forma. Nesta pesquisa, mesmo com o ganho de resistência mecânica pela incorporação da sílica ativa, foi possível obter a porosidade projetada através do controle da densidade, resultando em coeficientes de permeabilidade maiores que  $10^{-3}$  m/s (0,1 cm/s), conforme recomendado pela NBR 16416 (2015).

- *Qual o nível de tráfego de veículos pode ser submetido a mistura de melhor desempenho avaliada? Qual deve ser a espessura do revestimento do pavimento?*

É possível considerar a utilização do concreto permeável com sílica ativa (CPS) obtido nesta pesquisa, com espessuras a partir de 220 mm para tráfego leve e 245 mm para tráfego médio, correspondentes a vias locais e coletoras, respectivamente. Para vias de tráfego leve também se considera a possibilidade de utilização do concreto permeável convencional sem sílica ativa (CP) com espessuras a partir de 295 mm. Já para tráfego médio seria necessário um aumento mínimo de 30 mm na espessura do revestimento em relação ao mesmo material ou de 80 mm em relação ao CPS. Considerando o valor limite sugerido ( $RT = 0,45$ ) pelo modelo de fadiga PCA (1984) para que não haja perda de resistência por fadiga (número permissível de repetições para a carga de eixo padrão é ilimitado), apenas o CPS poderia ser considerado para espessuras a partir de 260 mm, o que indica a possibilidade de utilização para tráfegos de veículos pesados. Estudos *in situ* e de fadiga do material são necessários para confirmação das análises.

Esta tese contribuiu na resposta de algumas questões a cerca do concreto permeável, contudo devido à variabilidade de suas propriedades e à dependência de inúmeras variáveis, não existe uma mistura ótima em termos absolutos, sendo o projeto de um concreto permeável abrangente de um estudo de consistência e energia de compactação. O uso de aditivo modificador de reologia é fortemente recomendado no auxílio da consistência/trabalhabilidade, na dispersão do aglomerante e, inclusive, no ganho de resistência mecânica, devendo ser considerado no projeto de misturas. A incorporação de sílica ativa também demonstra ser um material importante para que maiores resistências sejam obtidas relativo ao tipo de aplicação (por exemplo tráfego médio), considerando que o projeto de um concreto permeável deve ser relacionado ao uso

final, tipo de cargas de tráfego aplicadas ao pavimento e as necessidades do ambiente no qual será inserido.

Algumas outras questões ainda devem ser analisadas e, portanto, sugere-se como pesquisas para trabalhos futuros: (i) a análise da colmatação dos poros das misturas desenvolvidas, visando estabelecer períodos e técnicas de manutenção; (ii) estudos experimentais de fadiga; (iii) aplicação e comparação de outros métodos de dosagem; (iv) aprofundar estudos sobre o efeito da areia no concreto permeável estudado; (v) verificar a incorporação de outros materiais alternativos, tais como polímero visando o aumento da resistência mecânica; (vi) correlações entre laboratório e campo em termos de densidade, energia de compactação, porosidade, resistência mecânica e fadiga; (vii) consolidação de modelos para o dimensionamento do pavimento através das correlações mencionadas; (viii) análise de custos e ciclo de vida.

## REFERÊNCIAS

AHIABLAME, L.M.; ENGEL, B.A.; CHAUBEY, I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research. **Water, Air, Soil Pollution**, v.223, 2012, p.4253–4273.

AMDE, A.M.; ROGGE, S. **Development of High Quality Pervious Concrete Specifications for Maryland Conditions**. Technical Report, Maryland State Highway Administration, February 2013.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 522R-10. **Report on pervious concrete**. American Concrete Institute, 2010.

AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION (ACPA). **Pervious Pave Design Methodology Document**, American Concrete Pavement Association, 2010.

AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION (ACPA). **StreetPave**, MC003.01P, American Concrete Pavement Association, Skokie, IL, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Classification for Sizes of Aggregate for Road and Bridge Construction**. ASTM D448, West Conshohocken, PA, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for Portland Cement**. ASTM C150/C150M-15, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States of America, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for Concrete Aggregates**. ASTM C33 / C33M-16e1, West Conshohocken, PA, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete**. ASTM C494/C949M, West Conshohocken, PA, United States of America, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method**. ASTM C944/C944M, West Conshohocken, PA, United States of America, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion.** ASTM C1747/C1747M, West Conshohocken, PA, United States of America, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete.** ASTM C1701/C1701M, West Conshohocken, PA, United States of America, 2017a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete.** ASTM C1688/C1688M, West Conshohocken, PA, United States of America, 2014a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete.** ASTM C1754/C1754M, West Conshohocken, PA, United States of America, 2012.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – ASCE. **Permeable Pavements: Recommended Design Guidelines.** Technical Report. Permeable Pavement Technical Committee of the Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers, United States, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Melhores Práticas – Pavimento Intertravado Permeável. Cartilha.** Associação Brasileira de Cimento Portland, 2010, 24p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** NBR NM 53. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da composição granulométrica.** NBR NM 248. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland – Requisitos.** NBR 16697. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** NBR 5739. Rio de Janeiro, 2018.

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

BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

BALBO, J. T. **Pavimentos viários e pisos industriais de concreto**. In: *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, v.2, cap.42, 2005, p.1297-1332.

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

BONICELLI, A.; ARGUELLES, G.M.; PUMAREJO, L.G.F. Improving Pervious Concrete Pavements for Achieving More Sustainable Urban Roads. **Procedia Engineering**, v.161, 2016, 1568-1573.

BONICELLI, A.; GIUSTOZZI, F.; CRISPINO, M. Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v.91, 2015, p.102-110.

BRAKE, N. A.; ALLAHDADI, H.; ADAM, F. Flexural strength and fracture size effects of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v.113, 2016, p.536-543.

BROWN B. **Evaluation of laboratory compaction methods for pervious concrete**. Master's Thesis. University of Colorado at Denver, 2010.

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

CHEN, Y.; WANG, K.; LIANG, D. Mechanical properties of pervious cement concrete. **Journal of Central South University**, v.19, 2012, p.3329-3334.

CHEN, Y.; WANG, K.; WANG, X.; ZHOU, W. Strength, fracture and fatigue of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v.42, 2013, p.97-104.



CHINDAPRASRIT, P.; HATANAKA, S.; CHAREERAT, T.; MISHIMA, N.; YUASA, Y. Cement paste characteristics and porous concrete properties. **Construction and Building Materials**, v.22, 2008, p.894–901.

COFER, W.; HASELBACH, L.; ALAM, A. **Finite Element Evaluation of Pervious Concrete Pavement for Roadway Shoulders**. Technical Report, Transportation Northwest Regional Center X (TransNow), University of Washington, 2011.

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

COSTA, F. B. P. **Análise da Durabilidade de Compósitos Cimentícios de Elevada Capacidade de Deformação Reforçados com Fibras**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

CROUCH, L. K.; CATES, M. A.; DOTSON, V. J.; HONEYCUTT, K. R.; BADOE, D. Measuring the effective air void content of Portland cement pervious pavements. **Cement and Concrete Aggregates**, v.25, n.1, 2003, p.16–20.

CROUCH, L.K.; PITT, J.; HEWITT, R. Aggregate effects on pervious portland cement concrete static modulus of elasticity. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.19, 2007, p.561–568.

DAVIDS, W. G.; WANG, Z.; TURKYYAH, G.; MAHONEY, J. P.; BUSH, D. **Three-Dimensional Finite Element Analysis of Jointed Plain Concrete With EverFe2.2**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Paper n° 03/2223, 2003.

DELATTE, N. J. Structural Design of Pervious Concrete Pavement. In: **Transportation Research Board 86<sup>th</sup> Annual Meeting**, Washington, DC, 2007.

DEO, O.; NEITHALATH, N. Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features. **Material Science & Engineering**, v.528, n.1, 2010, p.402–12.

DEO, O.; NEITHALATH, N. Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. **Construction and Building Materials**, v.25, 2011, p.4181– 4189.

DONG, Q.; WU, H.; HUANG, B.; SHU, X.; WANG, K. Investigation into laboratory abrasion test methods for pervious concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.25, 2013, p.886– 892.

FERGUSON, B.K. **Porous Pavements**. New York: Taylor and Francis Group, 2005, 577 p.

FU, T.F.; YEIH, W.; CHANG, J.J.; HUANG, R. The influence of aggregate size and binder material on the properties of pervious concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2014, 17pp.

GAEDICKE, C.; MARINES, A.; MIANKODILA, F. A method for comparing cores and cast cylinders in virgin and recycled aggregate pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v.52, 2014, p.494-503.

GIUSTOZZI, F. Polymer-modified pervious concrete for durable and sustainable transportation infrastructures. **Construction and Building Materials**, v.111, 2016, p.502-512.

GOEDE, W. G. **Pervious Concrete: Investigation into Structural Performance and Evaluation of the Applicability of Existing Thickness Design Methods**. 2009, 198p. Thesis (Master in Engineering), Department of Civil and Environmental Engineering. Washington State University, Washington DC, 2009.

GOTLIF, A.; MALLELA, J.; DARTER, M. I.. **Enhanced StreetPave PCC Thickness Design Procedures: Development of Models for Tridem Axles**, ERES Consultants, A Division of Applied Research Associates, Inc., Champaign, IL, 2004.

HASELBACH, L.; DUTRA, V. P.; SCHWETZ, P.; SILVA FILHO, L. C. P. A Pervious Concrete Mix Design Based on Clogging Performance in Rio Grande do Sul. In: **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Best Practices for Concrete Pavements**. IBRACON, 2015, 10p.

HASELBACH, L.; FREEMAN, R. Vertical Porosity Distributions in Pervious Concrete Pavement. **ACI Materials Journal**, v.103, n.6, 2006, p.452-458.

HASELBACH, L.; POOR, C.; TILSON, J. Dissolved zinc and copper retention from stormwater runoff in ordinary Portland cement pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v.53, 2014, p.652-657.

HASELBACH, L.; VALAVALA, S.; MONTES, F. Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. **Journal of Environmental Management**, v.81, 2006, p.42-49.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI, 349p., 1992.

HENDERSON, V. **Evaluation of the Performance of Pervious Concrete Pavement in the Canadian Climate**. 2012. Thesis (Doctor of Philosophy in Civil Engineering) – University of Waterloo, Waterloo.

HENDERSON, V.; TIGHE, S. L. **Pervious Concrete Pavement - A Sustainable Alternative**. Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC, 2011.

HESAMI, S.; AHMADI, S.; NEMATZADEH, M. Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. **Construction and Building Materials**, v.53, 2014, p.680-691.

HOMMER, H. Interaction of polycarboxylate ether with silica fume. **Journal of the European Ceramic Society**, v.29, n.10, 2008, p.1847-1853.

HUANG, B.; WU, H.; SHU, X.; BURDETTE, E.G. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v.24, 2009, p.818–823.

IBRAHIM, A.; MAHMOUD, E.; YAMIN, M.; PATIBANDLA, V. C. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and Building Materials**, v.50, 2014, p.524-529.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE. **Censo demográfico – 2010**, Rio de Janeiro, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE. **Perfil dos Municípios Brasileiros – 2013**, Rio de Janeiro, 2013.

INTERNATIONAL CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE – ICPI. Permeable Interlocking Concrete Pavement: **A comparison Guide to Porous Asphalt and Pervious Concrete**, Canada, 2008.

JAIN, A.K.; CHOUHAN, J.S. Effect of shape of aggregate on compressive strength and permeability properties of pervious concrete. **International Journal of Advanced Engineering Research and Studies**, v.1, 2011, p.120-126.

JOSHAGHANI, A.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; ATAEI, O.; GOLROO, A. Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method. **Construction and Building Materials**, v.101, 2015, p.317-325.

KEVERN, J. T.; FARNEY, C. Reducing curing requirements for pervious concrete with a superabsorbent polymer for internal curing. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n.2290, 2012, p.115-121.

KEVERN, J.; HASELBACH, L.; SCHAEFER, V. Hot Weather Comparative Heat Balances in Pervious Concrete and Impervious Concrete Pavement Systems. **Journal of Heat Island Institute International**, v.7, n.2, 2012.

KEVERN, J.T.; SCHAEFER, V.R.; WANG, K. Evaluation of pervious concrete workability using gyratory compaction. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.21, 2009, p.764–770.

KEVERN, J.T.; SCHAEFER, V.R.; WANG, K.; SULEIMAN, M.T. Pervious Concrete Mixture Proportions for Improved Freeze-Thaw Durability. **Journal of ASTM International**, v.5, n.2, 2008.

KEVERN, J.T.; WANG, K.; SCHAEFER, V.R. Effect of coarse aggregate on the freeze-thaw durability of pervious concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.22, n.5, 2010, p.469-475.

KEVERN, JOHN T. **Design of Pervious Concrete Mixtures**. National Pervious Concrete Pavement Association NPCPA, 2011, 57f.

LEMING, M. L.; MALCOM, H. R.; TENNIS, P. D. **Hydrologic Design of Pervious Concrete**. Engineering Bulletin 303. Silver Spring (MD): Portland Cement Association, Skokie, IL, and National Ready Mixed Concrete Association, 2007, 72 p.

LIAN, C.; ZHUGE, Y. Optimum mix design of enhance permeable concrete – An experimental investigation. **Construction and Building Materials**, v.24, 2010, p.2664-2671.

LORENZI, A.; HASELBACH, L.; SILVA FILHO, L. C. Field data for heat island mitigation by pervious concrete in Porto Alegre. In: **Proceedings of the 3rd International Conference on Best Practices for Concrete Pavements**. IBRACON, 2015, 11p.

MAHBOUB KC, CANLER J, RATHBONE R, ROBL R, DAVIS B. Pervious concrete: compaction and aggregate gradation. **ACI Materials Journal**, v.106, n.6, 2009, p.523–9.

MARTIN III, W.D.; KAYE, N.B.; PUTMAN, B.J. Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v.59, 2014, p. 78–84.

MONTES, F.; HASELBACH, L. Measuring hydraulic conductivity in pervious concrete. **Environmental Engineering Science**, v.23, n.6, 2006, p.960-969.

NEITHALATH, N.; SUMANASOORIYA, M. S.; DEO, O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. **Materials Characterization**, v.61, 2010, p.802–813.

NGUYEN, D. H.; SEBAIBI, N.; BOUTOUIL, M.; LELEYTER, L.; BARAUD, F. A modified method for the design of pervious concrete mix. **Construction and Building Materials**, v.73, 2014, p.271-282.

ONG WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI). **World's 15 Countries with the Most People Exposed to River Floods**, 2015. Disponível em: <<http://www.wri.org/blog/2015/03/world%E2%80%99s-15-countries-most-people-exposed-river-floods>>. Acesso em: 12 de set. 2017.

PINDADO, M.A.; AGUADO, A.; JOSA, A. Fatigue Behavior of Polymer-Modified Porous Concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 7, p. 1077-1083, 1999.

POLASTRE, B.; SANTOS, L.D. 2006. **Concreto Permeável**. Disponível em: [www.usp.com.br](http://www.usp.com.br). Acesso em: junho de 2015.

POMPÊO, C. A. Drenagem urbana sustentável. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.5, p.15-23, 2000.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). **Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements**, EB109, Portland Cement Association, Skokie, IL, 1984.

PUTMAN, B.J.; NEPTUNE, A.I. Comparison of test specimen preparation techniques for pervious concrete pavements. **Construction and Building Materials**, v.25, 2011; p.3480–5.

QIN, Y.; YANG, H.; DENG, Z.; HE, J. Water permeability of pervious concrete is dependent on the applied pressure and testing methods. **Advances in Material Science Engineering**, v.2015, 2015, p.1-6.

RANGELOV, M.; NASSIRI, S.; HASELBACH, L.; ENGLUND, K. Using carbon fibers composites for reinforcing pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v.126, 2016, p.875-885.

REHDER, B.; BANH, K.; NEITHALATH, N. Fracture behavior of pervious concrete: The effects of pore structure and fibers. **Engineering Fracture Mechanics**, v.118, 2014, p.1-16.

RIZVI, R.; TIGHE, S.L.; HENDERSON, V.; NORRIS, J. Laboratory sample preparation techniques for pervious concrete. In: **Procedures of 88<sup>th</sup> annual meeting transportation research board**, 2009.

RODDEN, R.; G., VOIGT; SMITH, T. Structural and Hydrological Design of Sustainable Pervious Concrete Pavements. In: **Annual Conference of the Transportation Association of Canada**, Edmonton, Alberta, 2011.

RUSHTON, B. Low-impact parking lot design reduces runoff and pollutant loads. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.127, n.3, 2001, p.172–179.

SCHAEFER, V.; WANG, K.; SULEIMAN, M.; KEVERN, J. **Mix design development for pervious concrete in cold weather climates**. Technical Report. Civil Engineering, Iowa State University, 2006.

SCHWETZ, P.F. **Consolidação da Tecnologia, Apoio à Formulação da Normalização e Desenvolvimento de Pisos e Elementos Drenantes de Concreto Permeável**. 2014. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

SHEN, S.; BURTON, M.; JOBSON, B.; HASELBACH, L. Pervious concrete with dioxide as a photocatalyst compound for a greener urban road environment. **Construction and Building Materials**, v.35, 2012, p.874-883.

SHU, X.; HUANG, B.; WU, H.; DONG, Q.; BURDETTE, E.G. Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 25, 2011, p.3187-3192.

SMITH, K. D.; KRSTULOVICH, J. **Pervious Concrete**. TechBrief. Springfield (VA): The Advanced Concrete Pavement Technology (ACTP), 2012. 8 p. (FHWA-HIF-13-006).

SONEBI, M.; BASSUONI, M.T. Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling. **Construction and Building Materials**, v. 38, 2013, p. 147-154.

SUMANASOORIYA, M. S.; NEITHALATH, N. Pore structure features of pervious concrete proportioned for desired porosities and their performance prediction. **Cement & Concrete Composites**, v.33, 2011, p. 778-787.

TAMAI, M.; MITZUGUCHI, H.; HATANAKA, S.; KATAHIRA, H.; MAKAZAWA, T.; YANAGIBASHI, K.; KUNIEDA, M. Design, Construction and Recent Applications of Porous Concrete in Japan. In: **Proceedings of the JCI Symposium on Design, Construction, and Recent Applications of Porous Concrete**, Japan Concrete Institute, 2004.

TAYABJI, S. D.; PACKARD, R. G. Mechanistic Design of Concrete Pavements to Control Joint Faulting and Subbase Erosion. In: **International Seminar on Drainage and Erodibility at the Concrete Slab-Subbase-Shoulder Interfaces**, Paris, France, 1983.

TENNIS, P.D.; LEMING, M.L.; AKERS, D.J. **Pervious concrete pavements**. Technical report, EB302.02. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 2004, 32p.

TERHELL, S.L.; CAI, K.; CHIU, D.; MURPHY, J. Cost and Benefit Analysis of Permeable Pavements in Water Sustainability. In: **ESM 121: Water Science and Management**, 2015, 8p.

TITUS-GLOVER, L.; MALLELA, J.; DARTER, M. I. **Enhanced PCC Fatigue Model for StreetPave**, ERES Consultants, A Division of Applied Research Associates, Inc., Champaign, IL, 2004.

TORRES, A.; HU, J.; RAMOS, A. The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v.95, n.1, 2015, p. 850-859.

TUCCI, C. E. M. Drenagem Urbana. **Ciência e Cultura**, v.55, n.4, 2003.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.7, n.1, p.5-27, 2002.

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, vol. 11, p. 393, 2007.

TUCCI, C. E. M. Plano diretor de drenagem urbana: princípios e concepção. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.2, n.2, p.5-12, 1997.

US EPA. **Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices**. EPA-821-R-99-012. US Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington D.C., August 1999. Disponível em: <http://www.epa.gov/ost/stormwater>. Acesso em: junho de 2015.

WANG, T.; HARVEY, J.T.; JONES, D. **A Framework for Life-Cycle Cost Analyses and Environmental Life-Cycle Assessments for Fully Permeable Pavements**, Technical memorandum, Institute of Transportation Studies, Caltrans document No.: CTSW-TM-09-249.03 UCPRC document No.: UCPRC-TM- 2010-05.

WATANABE, T.; TODOROKI, Y.; IWA, S. The Fatigue Characteristics and Structural Design of Porous Concrete Pavement with Flexibility. **Concrete Journal**, v. 42, n. 4, p. 18-25, 2004.

WU, H.; HUANG, B.; SHU, X.; DONG, Q. Laboratory Evaluation of Abrasion Resistance of Portland Cement Pervious Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.23, n.5, 2011, p.697-702.



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

YANG, J.; JIANG, G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and Concrete Research**, v.33, 2003, p.381-386.

ZAETANG, Y.; SATA, V.; WONGSA, A. CHINDAPRASIRT, P. Properties of pervious concrete containing concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v.111, 2016, p.15-21.

ZHENG, M.; CHEN ,S.; WANG, B. Mix design method for permeable base of porous concrete. **International Journal of Pavement Research Technology**, v.5, 2012, p.102-7.

ZHONG, R.; ZHEN, L.; POON, C. Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-practice review. **Construction and Building Materials**, v. 183, 2018, p.544-553.

ZHOU, J.; ZHENG, M.; WANG, Q.; YANG, J.; LIN, T. Flexural fatigue behavior of polymer-modified pervious concrete with single sized aggregates. **Construction and Building Materials**, v.124, 2016, p.897-905.

ZOUAGHI, A. Technological problems of multi-performance porous concrete. In: **Proceedings of the 1st fib congress**, 2002, p. 233–42.