

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

JONATHAN REHBEIN DOS SANTOS

**DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA E DA
PERMEABILIDADE DE CONCRETO PERMEÁVEL: COMPARAÇÃO
ENTRE CONCRETOS USINADO E MOLDADO EM LABORATÓRIO**

Santa Maria, RS
2020

Jonathan Rehbein dos Santos

**DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA E DA PERMEABILIDADE DE
CONCRETO PERMEÁVEL: COMPARAÇÃO ENTRE CONCRETOS USINADO E
MOLDADO EM LABORATÓRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Tatiana Cureau Cervo

Santa Maria, RS
2020

Santos, Jonathan Rehbein dos
Determinação da resistência mecânica e da
permeabilidade de concreto permeável: Comparação entre
concretos usinado e moldado em laboratório / Jonathan
Rehbein dos Santos.- 2020.
139 p.; 30 cm

Orientadora: Tatiana Cureau Cervo
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2020

1. Concreto permeável 2. Pavimentos permeáveis 3.
Impermeabilização dos solos I. Cervo, Tatiana Cureau II.
Título.

Jonathan Rehbein dos Santos

**DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA E DA PERMEABILIDADE DE
CONCRETO PERMEÁVEL: COMPARAÇÃO ENTRE CONCRETOS USINADO E
MOLDADO EM LABORATÓRIO**

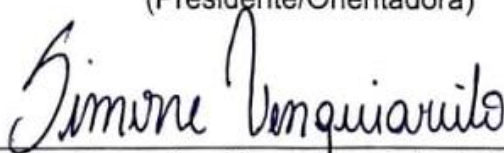
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 04 de Março de 2020.



Tatiana Cureau Cervo, Dr.^a (UFSM)

(Presidente/Orientadora)



Simone Dornelles Venquiaruto, Dr.^a (UNIPAMPA)



André Lübeck, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS

2020

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, inicialmente, à todos os meus familiares e amigos que fizeram-se presentes nesta etapa;

Aos membros do GEPPASV, professores, doutorandos, mestrandos e alunos de iniciação científica que contribuíram no desenvolvimento deste trabalho, seja na execução das atividades, ensinamentos ou ainda nos momentos de descontração e lazer no laboratório;

À minha orientadora, Tatiana Cureau Cervo, por todos as instruções e recomendações para o melhor desenvolvimento da dissertação;

À banca examinadora, composta pelos professores André Lübeck e Simone Dornelles Venquiaruto, pelas arguições e indicações de como melhorar o trabalho;

À CAPES, pois o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001;

À Supertex Soluções em Concreto e a Votorantim Cimentos pela doação dos materiais utilizados nessa pesquisa;

Ao PPGEC-UFSM pela oportunidade;

A todos, muito obrigado.

RESUMO

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA E DA PERMEABILIDADE DE CONCRETO PERMEÁVEL: COMPARAÇÃO ENTRE CONCRETOS USINADO E MOLDADO EM LABORATÓRIO

AUTOR: Jonathan Rehbein dos Santos
ORIENTADORA: Prof^a. Dr^a. Tatiana Cureau Cervo

Diante da impermeabilização dos solos, causada pela urbanização, e a ineficiência dos sistemas de drenagem, as chuvas intensas ou duradouras causam transtornos à população, pois a água precipitada gera escoamento superficial que formam inundações. Para resolver esse problema, está sendo analisada, nos centros de pesquisa, a utilização de pavimentos permeáveis. Trata-se de um pavimento projetado para permitir que a água drene pela sua estrutura até chegar ao destino, seja para um sistema de armazenamento ou diretamente no solo para que ocorra a infiltração. A camada de revestimento dos pavimentos permeáveis pode ser feita com diferentes materiais, entre eles o concreto permeável. Este trabalho estuda o comportamento do concreto permeável quando produzido com dois tipos de cimentos Portland, CP II Z e CP V, e quando utilizado resíduo de fresado asfáltico como substituinte de parte dos agregados naturais em sua composição. Ainda, são averiguadas as diferenças impostas pela produção do material em usinas de concreto ou no laboratório. Também é um objetivo desta pesquisa verificar a diferença nos parâmetros do concreto permeável entre o adensamento e cura executado em campo e o realizado no laboratório. Além disso, determinou-se a representatividade que ensaios de permeabilidade realizados em amostras de concreto permeável produzidas em laboratório possuem quando comparada a condutividade hidráulica apresentada no campo, em um estacionamento, através dos ensaios hidráulicos. Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de massa específica, índice de vazios, vazios comunicantes, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade, resistência à degradação por impacto e abrasão, condutividade hidráulica com permeômetros de carga constante e de carga variável, além da determinação da permeabilidade no campo. Por fim, com os resultados encontrados, foi inspecionado se as propriedades dos grupos de amostras estudados estão de acordo com a NBR 16416/2015 que aborda as especificações exigidas para pavimentos permeáveis no país. A partir da análise dos resultados foi possível observar que a mistura usinada possui menor índice de vazios, elevando a resistência mecânica, porém diminuindo a permeabilidade do concreto permeável. Concluiu-se que os métodos de adensamento e cura empregados no laboratório não são representativos com o executado em campo, pois as amostras moldadas e curadas conforme métodos de laboratório apresentaram resistência à compressão axial superior aos corpos de prova extraídos do estacionamento. Os corpos de prova com CP V mostraram-se mais permeáveis, mas menos resistentes se comparado aos com CP II Z. A colocação de fresado na mistura aumentou a permeabilidade, entretanto reduziu a resistência do concreto permeável. O ensaio com permeômetro de carga constante apresentou resultado mais próximo ao encontrado no campo que com permeômetro de carga variável. Quanto às exigências impostas pela norma, todos os grupos de amostras analisados superaram a massa específica e a resistência à tração na flexão mínimas. Os resultados de permeabilidade encontrados para os concretos moldados em laboratório estão de acordo com a norma, mas o oriundo de usina não alcançou o valor prescrito pela normativa, nem em laboratório, através dos permeômetros de cargas variável e constante, nem em campo, no estacionamento, através de método específico.

Palavras-chave: Impermeabilização dos solos. Pavimentos permeáveis. Concreto permeável.

ABSTRACT

MECHANICAL RESISTANCE AND PERMEABILITY DETERMINATION OF PERVIOUS CONCRETE: COMPARATIVE BETWEEN MACHINED AND LABORATORY CONCRETES

AUTHOR: Jonathan Rehbein dos Santos
ADVISOR: Prof^a. Dr^a. Tatiana Cureau Cervo

Faced with the soil sealing caused by urbanization and the inefficiency of drainage systems, heavy or lasting rainfall causes disruption to the population, as precipitated water generates runoff that forms floods. To solve this problem, the use of permeable pavements is being analyzed in research centers. It is a pavement projected to allow water to drain through its structure until it reaches its destination, either to a storage system or directly to the ground for infiltration to occur. The coating layer of permeable pavement can be made of different materials, including permeable concrete. This work studies the behavior of permeable concrete when produced with two types of Portland cement, CP II Z and CP V, and when used RAP (reclaimed asphalt pavement) as a substitute for part of the natural aggregates in its composition. Also, the differences imposed by the production of the material in concrete plants or in the laboratory are investigated. It is also an objective of this research to verify the difference in permeable concrete parameters between the densification and curing performed in the field and the performed in the laboratory. In addition, it was determined the representativeness that permeability tests performed in laboratory-produced permeable concrete samples have when compared to the hydraulic conductivity presented in the field, in a parking lot, through hydraulic tests. The specimens were subjected to specific mass, voids index, communicating voids, axial compression strength, diametral tensile strength, flexural tensile strength, elasticity modulus, impact and abrasion degradation resistance, conductivity tests with constant and variable load permeameters, as well as the determination of permeability in the field. Finally, with the results found, it was inspected whether the properties of the sample groups studied are in accordance with NBR 16416/2015 which addresses the specifications required for permeable pavements in the country. From the analysis of the results it was possible to observe that the machined mixture has lower voids index, increasing the mechanical resistance, but decreasing the permeability of the permeable concrete. It was concluded that the densification and curing methods employed in the laboratory are not representative with the one performed in the field, because the samples molded and cured according to laboratory methods presented superior axial compressive strength to the samples extracted from the parking lot. Specimens with CP V were more permeable but less resistant compared to CP II Z. Placing milling in the mix increased permeability, but reduced permeability of the permeable concrete. The constant load permeability test showed results closer to those found in the field than the variable load permeate test. As for the requirements imposed by the standard, all sample groups analyzed exceeded the minimum specific mass and flexural tensile strength. The permeability results found for concrete from the plant did not reach the value prescribed by the norms, either in the laboratory, through the variable and constant load permeameters, nor in the field, in the parking lot, through a specific method.

Keywords: Soil impermeabilization. Permeable pavements. Pervious concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de infiltração total	26
Figura 2 - Sistema de infiltração parcial	26
Figura 3 - Sistema sem infiltração	27
Figura 4 - Pisograma.....	28
Figura 5 - Blocos de concreto.....	29
Figura 6 - Bloco de concreto permeável.....	29
Figura 7 - Procedimento sucção ao vácuo	33
Figura 8 - Mangueira de alta pressão.....	34
Figura 9 - Concreto permeável.....	35
Figura 10 - Classes do concreto permeável	37
Figura 11 - Influência da granulometria do agregado na resistência à compressão axial no estudo de Hóltz (2011)	43
Figura 12 - Resistência à compressão axial x Resistência à tração por compressão diametral.....	52
Figura 13 - Resistência à compressão axial x Resistência à tração na flexão	53
Figura 14 - Resistência à compressão axial x Índice de vazios	54
Figura 15 - Resistência à tração por compressão diametral x Índice de vazios	54
Figura 16 - Resistência à tração na flexão x Índice de vazios.....	55
Figura 17 - Taxa de infiltração x Índice de vazios	56
Figura 18 - Resistências encontradas por Brito e Santos (2010)	60
Figura 19 - Permeabilidades encontradas por Brito e Santos (2010).....	60
Figura 20 - Resistências encontradas por Hóltz (2011)	61
Figura 21 - Resultados obtidos por Santos (2017)	62
Figura 22 - Resultados de Castro (2015)	63
Figura 23 - Resultados de Castro (2015): Adensamento manual x marshall	64
Figura 24 - Resultados obtidos por Schwetz et al. (2015).....	66
Figura 25 - Organograma resumo da metodologia.....	75
Figura 26 - Curva granulométrica dos agregados e da mistura.....	76
Figura 27 - Metodologia adotada para a mistura dos materiais.....	78
Figura 28 - Mistura coesa.....	79
Figura 29 - Adensamento com haste metálica	79
Figura 30 - Diferença de aspecto entre mistura usinada e misturas de laboratório...	80
Figura 31 - Campus da UFSM em SM/RS, local de implantação do estacionamento	81
Figura 32 – Laje do estacionamento	81
Figura 33 - Corpo de prova extraído	82
Figura 34 - Granulometria do material de base do estacionamento.....	83
Figura 35 - Camadas e espessuras, em cm, da estrutura do estacionamento	84
Figura 36 - Lançamento e espalhamento do concreto usinado.....	84
Figura 37 - Utilização da régua vibratória.....	85
Figura 38 - Execução do ensaio de resistência à compressão axial	88
Figura 39 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	89
Figura 40 - Ensaio de resistência à tração na flexão.....	90
Figura 41 - Permeâmetro de carga variável	92
Figura 42 - Permeâmetro de carga constante	93
Figura 43 - Ensaio de permeabilidade em campo	94
Figura 44 - Resistência à compressão axial.....	100
Figura 45 - Resistência à tração por compressão diametral	102

Figura 46 - Resistência à tração na flexão.....	104
Figura 47 - Módulo de elasticidade	106
Figura 48 – Perda de massa devido à degradação por impacto e abrasão.....	108
Figura 49 - Resultados de resistências comparados aos de outros trabalhos.....	109
Figura 50 – Permeabilidade medida com os permeômetros em laboratório.....	112
Figura 51 - Permeabilidade encontrada para a mistura usinada pelos métodos de laboratório e encontrada no estacionamento pelo método de campo	114
Figura 52 - Massa específica x Índice de vazios	116
Figura 53 - Vazios comunicantes x Índice de vazios	117
Figura 54 - Resistência à compressão axial x Índice de vazios.....	118
Figura 55 - Resistência à tração na flexão x Índice de vazios	119
Figura 56 - Permeabilidade x Índice de vazios	120
Figura 57 - Permeabilidade x Vazios comunicantes	120
Figura 58 - Permeabilidade com permeômetro de carga constante x Permeabilidade com permeômetro de carga variável	121
Figura 59 - Resistência à tração na flexão x Permeabilidade com permeômetro de carga constante	122
Figura 60 - Resistência à compressão axial x Índice de vazios com resultados de outras pesquisas.....	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre revestimento impermeável com permeáveis	30
Tabela 2 - Exigências normativas para pavimentos permeáveis.....	31
Tabela 3 - Comparativo entre concreto convencional e permeável.....	39
Tabela 4 - Materiais empregados no concreto permeável	39
Tabela 5 - Resultados encontrados por Sandoval (2014)	42
Tabela 6 - Misturas estudadas por Batezini (2013)	43
Tabela 7 - Resultados encontrados por Batezini (2013)	44
Tabela 8 - Curvas granulométricas recomendadas por Li (2009).....	45
Tabela 9 - Resultados encontrados por Monteiro (2010)	59
Tabela 10 - Traços estudados por Santos (2017)	62
Tabela 11 - Efeito de diferentes formas de adensamento	65
Tabela 12 - Resumo das principais conclusões da revisão bibliográfica.....	67
Tabela 13 - Resumo dos grupos de amostras a serem analisados.....	71
Tabela 14 - Ensaio realizados, idades e número de corpos de prova	73
Tabela 15 - Traços avaliados por Lamberti (2019).....	74
Tabela 16 - Resultados encontrado por Lamberti (2019)	74
Tabela 17 - Caracterização física dos agregados	76
Tabela 18 - Propriedades físicas dos cimentos utilizados	77
Tabela 19 - Propriedades físicas do material de base	83
Tabela 20 – Resultados médios do ensaio de massa específica	96
Tabela 21 - Teste-t para os resultados de massa específica	96
Tabela 22 - Índices de vazios médios dos grupos de amostras	97
Tabela 23 - Teste-t para os resultados de índice de vazios	97
Tabela 24 - Vazios comunicantes médios encontrados	98
Tabela 25 - Teste-t para os resultados de vazios comunicantes.....	98
Tabela 26 – Resultados médios de resistências à compressão axial	99
Tabela 27 - Teste-t para os resultados de resistência à compressão axial	100
Tabela 28 – Resultados médios de resistência à tração por compressão diametral	102
Tabela 29 - Teste-t para os resultados de resistência à tração por compressão diametral.....	103
Tabela 30 - Resultados médios de resistência à tração na flexão	104
Tabela 31 - Teste-t para os resultados de resistência à tração na flexão	105
Tabela 32 - Resultados médios de módulo de elasticidade	106
Tabela 33 - Teste-t para os resultados de módulo de elasticidade	107
Tabela 34 - Resultados médios dos ensaios de permeabilidade	111
Tabela 35 - Teste-t para os resultados de permeabilidade em laboratório	112
Tabela 36 - Teste-t para os diferentes ensaios de permeabilidade em laboratório	113
Tabela 37 - Teste-t para os resultados de permeabilidade com permeômetros confrontados com o método de campo	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%	Porcentagem
a/c	Relação água/cimento
ACI	American Concrete Institute
ACPT	Advanced Concrete Pavement Technology
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
cm	Centímetros
cm ²	Centímetros quadrados
cm ³	Centímetros cúbicos
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo de prova
CPA	Camada porosa de atrito
EPA	Environmental Protection Agency
EUA	Estados Unidos da América
g	Gramas
GPa	Gigapascal
h	Horas
kg	Quilogramas
M	Teor de agregados
m ²	Metros quadrados
m ³	Metros cúbicos
mm	Milímetros
MPa	Megapascal
N	Newtons
nº	Número
PMSM	Prefeitura Municipal Santa Maria
RCD	Resíduos de construção e demolição
rpm	Rotações por minuto
s	Segundos
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	21
1.1.1	Objetivo Geral	21
1.1.2	Objetivos Específicos	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	PAVIMENTOS PERMEÁVEIS	23
2.1.1	Perda da Capacidade de Infiltração	31
2.2	CONCRETO PERMEÁVEL	35
2.2.1	Materiais Utilizados na Produção do Concreto Permeável	39
2.2.1.1	<i>Aglomerante</i>	40
2.2.1.2	<i>Agregados</i>	40
2.2.1.3	<i>Aditivos</i>	45
2.2.1.4	<i>Materiais Alternativos</i>	46
2.2.1.4.1	<i>Resíduo de Fresado Asfáltico</i>	48
2.2.2	Propriedades do Concreto Permeável	50
2.2.2.1	<i>Estado Fresco</i>	50
2.2.2.2	<i>Estado Endurecido</i>	51
2.2.3	Estudos de Dosagem, Adensamento e Cura do Concreto Permeável	58
3	METODOLOGIA	71
3.2	MOLDAGENS	77
3.2.1	Método de Mistura em Laboratório	77
3.2.2	Método de Adensamento em Laboratório	79
3.2.3	Método de Cura em Laboratório e Desmoldagem	80
3.3	ESTACIONAMENTO	80
3.3.1	Materiais	82
3.3.2	Projeto e Execução	83
3.3.2.1	<i>Método de Mistura em Usina: Central Dosadora</i>	84
3.3.2.2	<i>Métodos de Adensamento e Cura em Campo</i>	85
3.4	ENSAIOS	85
3.4.1	Ensaio Mecânicos	87
3.4.1.1	<i>Resistência à Compressão Axial</i>	87
3.4.1.2	<i>Resistência à Tração por Compressão Diametral</i>	88
3.4.1.3	<i>Resistência à Tração na Flexão</i>	89
3.4.1.4	<i>Módulo de Elasticidade</i>	90
3.4.1.5	<i>Resistência à Degradação por Impacto e Abrasão</i>	91
3.4.2	Ensaio Hidráulicos	91
3.4.2.1	<i>Permeâmetro de Carga Variável</i>	91
3.4.2.2	<i>Permeâmetro de Carga Constante</i>	92
3.4.2.3	<i>Determinação da Permeabilidade em Campo</i>	93
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	95
4.1	RESISTÊNCIAS MECÂNICAS	99
4.2	PERMEABILIDADES	110
4.3	RELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS	116
5	CONCLUSÕES	125
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	127
	REFERÊNCIAS	129

1 INTRODUÇÃO

A crescente urbanização das cidades, com a pavimentação de vias e a construção de edificações comerciais e de habitação, tem ocasionado grandes reduções nas áreas permeáveis, dificultando a infiltração das águas pluviais. Segundo Esteves (2006), áreas com revestimento impermeável possuem escoamentos superficiais com maior volume e velocidade quando comparado a regiões com superfícies naturais. Da mesma forma, Tucci (2008) salienta que o aumento do escoamento superficial é devido a impermeabilização das superfícies.

Aliado à deficiência das estruturas de drenagem, em eventos de precipitações intensas, a impermeabilização da superfície gera acúmulo superficial de água, as inundações, que acarretam em adversidades como perdas econômicas e proliferação de doenças. Para Ono et al. (2017) a inexistência de uma drenabilidade adequada para as águas pluviais provocam graves consequências ambientais e sociais que intensificam a necessidade de uma solução.

Os problemas expostos levaram à procura por alternativas no sistema de drenagem que recondicionasse a capacidade de infiltração do solo anteriormente a urbanização (ACIOLI, 2005). Para reduzir ou eliminar os problemas provocados por essa impermeabilização, vem sendo proposta a utilização de pavimentos permeáveis em substituição aos pavimentos tradicionais com estrutura impermeável, de forma a encaminhar as águas pluviais para o solo e reduzir o escoamento superficial (ALENCAR, 2013; ARAÚJO et al., 2000; GUEDES, 2015; SALES, 2008; WEISS et al., 2017).

A utilização de pavimentos permeáveis, além de auxiliar no controle das cheias, permite reutilizar a água da chuva e abastecer o lençol freático com material mais adequado, pois a estrutura do pavimento atua como filtro de impurezas e metais pesados (IMRAN et al., 2013; LUCKE e BEECHAM, 2011; YONG et al.; 2013).

De acordo com a Lei do Uso e Ocupação do Solo da Prefeitura Municipal de Santa Maria (PMSM, 2018) é permitido que até 50% do índice verde, relação entre área permeável e área total do terreno, pode ser ocupada com pavimentação permeável, logo os terrenos podem ser mais aproveitados.

Sobre as vias, as películas de água formadas durante as chuvas aumentam os riscos de acidentes no trânsito por aquaplanagem. Nesse sentido, Marchioni et al.

(2014) consideram que os pavimentos permeáveis, por reduzirem o acúmulo de água no pavimento, propiciam maior segurança ao trafegar sob condições chuvosas.

Os pavimentos permeáveis podem ser executados em calçadas, estacionamentos, praças, parques e vias de tráfego leve. Diversos materiais podem ser utilizados nesses pavimentos, entre eles asfalto poroso, concreto poroso e blocos vazados de concreto (FERGUNSON, 1994).

Existem dois grupos com técnicas e princípios de drenagem urbana distintos. O primeiro com dispositivos de infiltração que permitem a absorção da água pelo solo, reduzindo o escoamento superficial à jusante. Já o segundo, através dos dispositivos de retenção e detenção, armazena provisoriamente a água pluvial, controlando o escoamento superficial à jusante (SUDERHSA, 2002). Os pavimentos permeáveis podem atuar em qualquer um dos grupos, tanto como um dispositivo de infiltração quanto de retenção das águas pluviais.

Caldas et al. (2017) salientam que, quando comparados pavimentos revestidos com concreto permeável e concreto convencional, o ganho ambiental proporcionado por aquele com concreto permeável é relevante devido a capacidade de infiltração apresentada, apesar do consumo de cimento ser superior ao do concreto convencional e este ser um fator importante.

Contudo, existem limitações nas pesquisas que envolvem concreto permeável. Destaca-se a necessidade de relacionar os métodos utilizados em laboratório para o desenvolvimento de amostras e os métodos que são empregados no campo para a produção em grande escala do material (DEBNATH e SARKAR, 2018).

Outra contribuição ambiental que o concreto permeável pode apresentar é a utilização de resíduos de fresado asfáltico em sua composição. Para Centofante (2016), além de contribuir com a sustentabilidade por meio da destinação correta do material, a economia propiciada pela redução de materiais virgens também justifica pesquisas que propõem a utilização de fresado.

O concreto permeável também é conhecido como concreto drenante, concreto poroso, ou ainda, concreto sem finos, devido a sua composição granulométrica. Neste trabalho será atribuído ao material a nomenclatura concreto permeável, pois é dessa forma que as normativas nacionais intitulam o material.

Para que os pavimentos permeáveis possam tornar-se mais utilizados, são necessários mais estudos sobre a composição, produção e execução de suas camadas. Com o intuito de agregar conhecimento sobre concreto permeável, que é

uma das possíveis camadas de revestimento do pavimento permeável, este trabalho visa analisar o comportamento do material quando produzido em usinas de concreto, além de verificar a influência da utilização do cimento Portland CPV – ARI ou do cimento Portland CII Z e, ainda, estudar a viabilidade do fresado asfáltico como substituinte de parte do agregado. Além disso, serão comparados os efeitos do adensamento e cura realizados em campo e em amostras de laboratório na resistência mecânica do concreto permeável.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Determinar propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável frente a diferentes meios de produção, diferentes tipos de cimento Portland e com a utilização de resíduo de fresado asfáltico como parte do agregado graúdo em sua composição.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Confrontar a resistência mecânica e a permeabilidade do concreto permeável oriundo de usina com o produzido em laboratório;
- Analisar os efeitos do adensamento e cura realizados em amostras de laboratório com o adensamento e cura em campo na resistência mecânica do concreto permeável;
- Apurar a influência do tipo de cimento Portland (CPV e CII Z) utilizado, nas propriedades do concreto permeável;
- Verificar a substituição parcial do agregado graúdo por resíduos de fresado asfáltico nas propriedades do concreto permeável;
- Avaliar a diferença nos valores de permeabilidade para ensaios de laboratório com permeâmetro de carga constante e de carga variável, bem como comparar com o resultado encontrado em campo através do método especificado em norma;

- Avaliar se os parâmetros encontrados para o concreto permeável estão de acordo com as exigências da NBR 16416/2015.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item serão discutidos trabalhos encontrados na literatura a fim de gerar conhecimento sobre pavimentos permeáveis e concreto permeável que sirvam de embasamento para o desenvolvimento adequado da pesquisa.

2.1 PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

A NBR 16416 (2015) considera um pavimento permeável aquele que suporta os esforços mecânicos e condições de tráfego ao mesmo tempo que permite a percolação da água em sua estrutura sem qualquer dano.

Para ACI (2013) o pavimento permeável é composto por materiais que formam vazios contínuos e suficientes permitindo a passagem de água superficial para as camadas subjacentes.

Uma estrutura de pavimento permeável permite a percolação da água precipitada através de suas camadas. Dessa forma, o pavimento permeável é uma aplicação que reduz ou elimina o escoamento superficial de águas pluviais, armazenando este volume em sua base, que é composta por brita de graduação uniforme, seja para infiltração no solo do subleito ou para que se drene até um local adequado (BATEZINI, 2013; SONEBI et al., 2016). Rodden e Smith (2011) complementam que os pavimentos permeáveis são uma solução sustentável que substituem o pavimento tradicional, sendo uma forma natural de tratar a água.

A utilização de pavimentos permeáveis pode, além de reduzir, eliminar o escoamento superficial quando bem dimensionado (CHOPRA et al., 2010; COLLINS et al., 2008). Conforme Acioli (2005), os motivos para a implementação de pavimentos permeáveis são:

- A elevação das áreas impermeáveis, que geram inundações urbanas;
- Aumento da segurança e do conforto dos motoristas ao transitar em dias de precipitação, pois o pavimento permeável elimina o acúmulo superficial da água da chuva;
- A redução da poluição sonora quando comparado aos pavimentos convencionais.

EPA (1999) coloca as vantagens e desvantagens da implementação de pavimentos permeáveis. Algumas vantagens são:

- A melhora da qualidade das águas pluviais, considerando a remoção de poluentes;
- Redução dos canais de drenagem e de estruturas de meio-fio ao longo das vias;
- Crescimento da segurança nas vias, devido a diminuição das derrapagens;
- Aumento do conforto em vias, pois os vazios do pavimento permeável reduzem o ruído do tráfego;
- Trata-se de um dispositivo de drenagem que não precisa de uma área própria.

Entre as desvantagens citadas estão:

- Desconhecimento técnico dos engenheiros e empreendedores em relação aos pavimentos permeáveis;
- Predisposição da estrutura porosa em obstruir-se quando executado incorretamente ou quando não houver manutenção adequada;
- Problemas com a colmatação dos poros, reduzindo a capacidade de infiltração do pavimento permeável;
- Risco da contaminação do aquífero, dependendo da sua suscetibilidade e das condições do solo local.

Aproximadamente 75% das estruturas de pavimentos permeáveis nos EUA apresentaram falhas no final da década de 90, devido aos projetos inadequados, solos com permeabilidade insuficiente, trânsito de veículos pesados e recapeamento com materiais impermeáveis (EPA, 1999). Para Brattebo e Booth (2003) a execução, operação e manutenção dos pavimentos permeáveis estão conectadas a sua durabilidade.

Scholz e Grabowiecki (2006) limitam a utilização de pavimentos permeáveis a locais como:

- Calçadas residenciais;
- Rampas de acesso e serviço para veículos;

- Acostamentos de rodovias;
- Acessos de pedestres e bicicletas;
- Estabilização de taludes;
- Controle de erosão;
- Irrigação de terras.

As propriedades do subleito influenciam no funcionamento de um pavimento permeável. Caso o solo apresente permeabilidade elevada, pode-se considerar que toda água infiltrará no local. Entretanto, se o subleito não apresentar condições de infiltração, deve ser considerado no projeto drenos para remoção da água armazenada pela estrutura. Nas ocasiões em que o solo apresenta permeabilidade, mas ainda é insuficiente para os eventos de chuva, considera-se que parte da precipitação irá infiltrar no terreno e parte será conduzida pelo sistema de drenagem (EISENBERG et al., 2015).

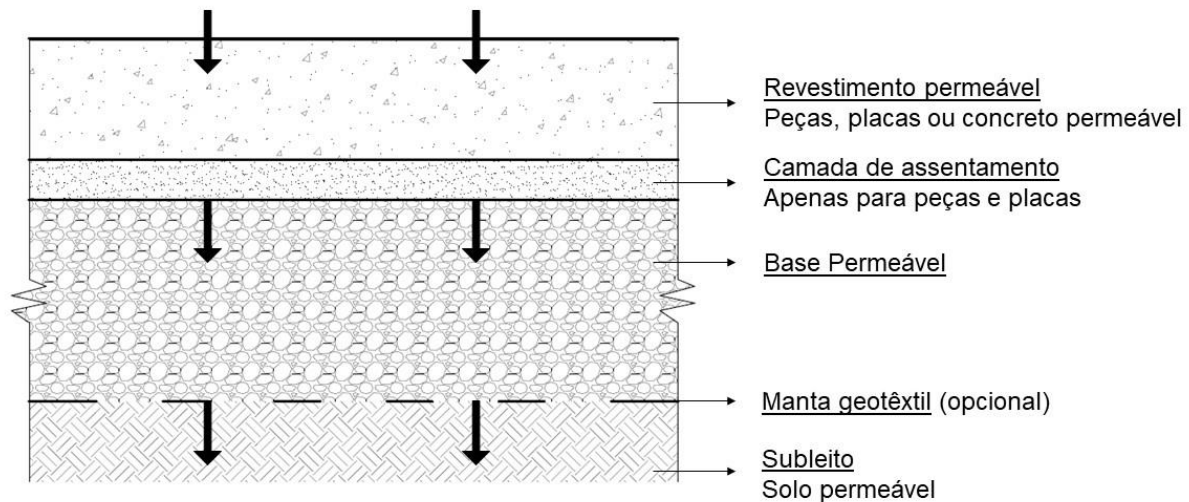
Batezini (2013) corrobora que serão necessários sistemas de drenagem para o escoamento da água armazenada se o solo do subleito apresentar baixas taxas de infiltração. O autor complementa que a base dos pavimentos permeáveis deve ser de granulometria uniforme, atuando como reservatório enquanto ocorre a infiltração no pavimento. Vieira et al. (2019) sugere a instalação de drenos quando a camada de revestimento possui permeabilidade superior que o subleito.

O pavimento permeável possui três sistemas quanto à infiltração da água precipitada em sua superfície (EISENBERG et al., 2015; NBR 16416, 2015; WOODS-BALLARD, 2015):

- Sistema de infiltração total: O solo de subleito possui boa permeabilidade e toda a água precipitada percola pela estrutura do pavimento e infiltra-se no solo ao longo do tempo. A Figura 1 representa o sistema de forma esquemática.
- Sistema de infiltração parcial: O solo do subleito é permeável, porém não suporta toda a água precipitada sobre o pavimento. Então, parte da água percola pela estrutura e infiltra no subleito, e o restante escoar através de drenos. A Figura 2 esquematiza o sistema de infiltração parcial.
- Sistema sem infiltração: O solo de subleito não apresenta capacidade de infiltração. Dessa forma, toda a água é escoada através da

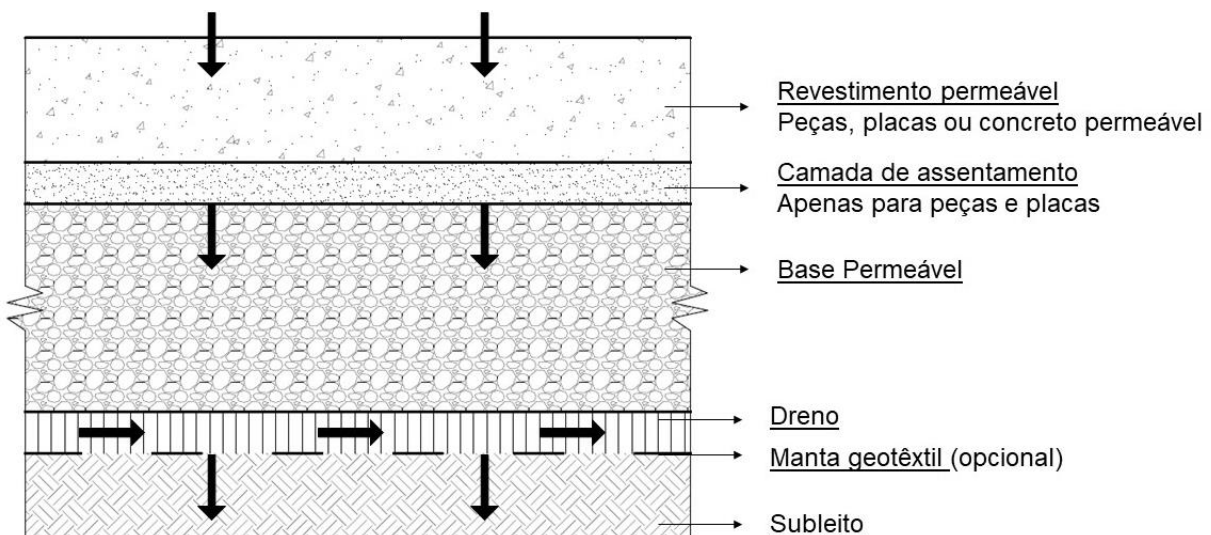
drenagem. Esse sistema pode ser implementado em locais onde o solo é permeável, porém, por determinação de projeto, não é adequada a infiltração da água. Nesse caso deve-se impermeabilizar a superfície do subleito. A Figura 3 representa este sistema.

Figura 1 – Sistema de infiltração total



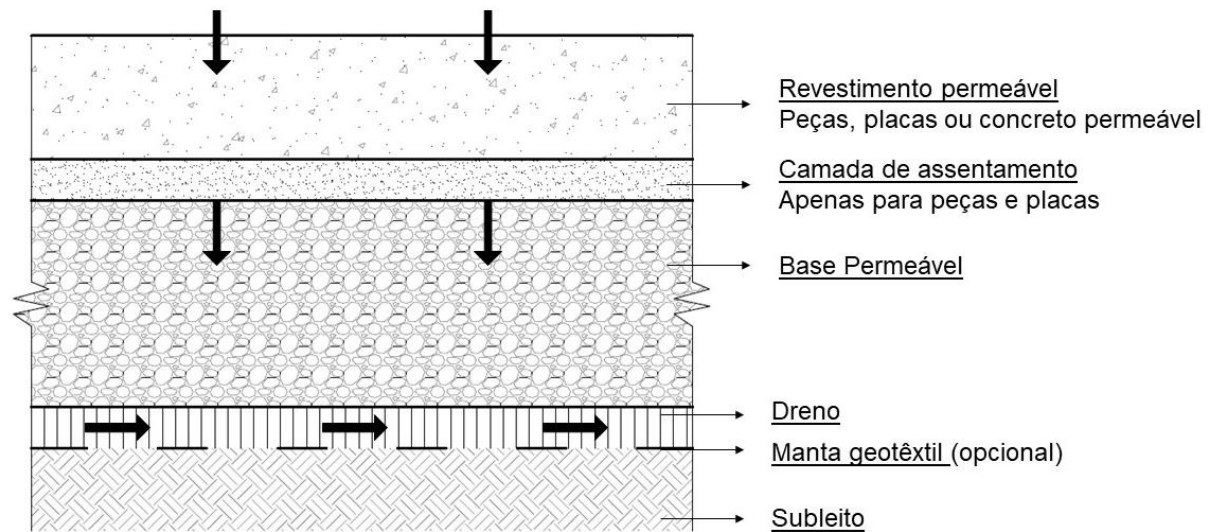
Fonte: Adaptado de NBR 16416 (2015).

Figura 2 - Sistema de infiltração parcial



Fonte: Adaptado de NBR 16416 (2015).

Figura 3 - Sistema sem infiltração



Fonte: Adaptado de NBR 16416 (2015).

Pavimentos permeáveis podem ser classificados conforme seu revestimento em quatro categorias: a) Pavimentos de asfalto permeável, onde a camada superior é composta por asfalto permeável; b) Pavimentos de concreto permeável, em que o revestimento é concreto permeável; c) Pavimento de blocos vazados intertravados de concreto, onde os blocos de concreto são assentados sobre material granular e preenchidos com vegetação rasteira; e d) Pavimento de blocos de concreto e paralelepípedos, onde a infiltração ocorre através das juntas de assentamento (GONÇALVES et al., 2014; EISENBERG et al., 2015).

Há o conceito de camada porosa de atrito (CPA), que se trata de uma mistura asfáltica sem finos utilizada como revestimento em estruturas impermeáveis, que não representa ganho significativo para os sistemas de drenagem, atuando apenas redutor do escoamento superficial (VIRGILIIS, 2009). Dessa forma, não se consideram estruturas revestidas com CPA como pavimentos permeáveis.

De acordo com Urbonas e Stahre (1993 apud Acioli, 2005), asfalto e concreto permeável são produzidos da mesma forma que os convencionais, exceto pela exclusão de parte, ou totalmente, do agregado fino. Dessa forma, o material permite a percolação da água em sua estrutura e a infiltração no solo.

A partir da análise de seis estacionamentos experimentais nos EUA, Houle et al. (2009) compararam pavimentos revestidos com asfalto permeável e concreto permeável. Os autores afirmam que a resistência à derrapagem do asfalto permeável

é superior à do concreto permeável, tanto para a superfície seca quanto para a superfície coberta por neve. Também determinaram que a temperatura do asfalto permeável é cerca de 6° C superior à do concreto permeável.

Blocos vazados intertravados devem possuir ao menos 20% da sua área superficial em vazios. Esses blocos contêm aberturas em sua estrutura por onde a água se infiltra até o solo. As aberturas podem ser preenchidas com areia, cascalho ou vegetação rasteira (UDFCD, 2010). A Figura 4 ilustra o bloco vazado intertravado preenchido com vegetação rasteira, popularmente chamado de pisograma.

Figura 4 - Pisograma



Fonte: Acervo próprio.

Os pavimentos revestidos com blocos de concreto (Figura 5), quando executados corretamente, são duráveis e suportam tráfegos pesados. O conjunto permite infiltração de água através das juntas, que são preenchidas com material granular, atribuindo características permeáveis ao sistema (VIRGILIIS, 2009). Existem blocos de concreto permeável (Figura 6), onde a percolação da água ocorre não somente pelas juntas, mas também pela estrutura do bloco. Silva (2006) salienta que a infiltração no revestimento com blocos tem grande variabilidade quanto a inclinação do pavimento.

Figura 5 - Blocos de concreto



Fonte: Acervo próprio.

Figura 6 - Bloco de concreto permeável



Fonte: Acervo próprio.

Durante o desenvolvimento de sua revisão bibliográfica, Acioli (2005) desenvolveu a Tabela 1 comparando alguns revestimentos permeáveis com um revestimento impermeável.

Tabela 1 - Comparação entre revestimento impermeável com permeáveis

Revestimento	Blocos Vazados	Asfalto Poroso	Concreto Poroso	Revestimento Impermeável
Tipo de Uso	Praças Estacionamentos Calçadas	Todos os usos, desde que com estrutura reforçada	Todos os usos, desde que com estrutura reforçada	Todos os usos
Capacidade de Absorção	Média	Boa	Boa	Nula
Periodicidade de Manutenção	6 meses a 1 ano	Varia de acordo com o uso (6 meses a 2 anos)	6 meses a 2 anos	Depende do local
Custo de Implantação	Alto	Médio	Médio	Médio
Custo de Manutenção	Alto	Médio a alto	Médio a alto	Baixo
Resistência	Boa	Média	Média a boa	Boa
Aderência	Média	Muito boa	Boa	Boa
Acústica	Média	Boa	Boa	Média

Fonte: Adaptado de Acioli (2005).

O dimensionamento adequado das camadas de um pavimento permeável considera não somente fatores mecanicistas, como o volume de tráfego, carregamento, número de solicitações, mas também aspectos hidráulicos, como a condutividade hidráulica e os tempos de armazenamento e retenção. Dessa forma, é possível projetar uma estrutura que atenda ao mesmo tempo suas exigências de infraestrutura de transportes e drenagem urbana (VIRGILIIS, 2009).

Quando utilizado concreto permeável como revestimento nos pavimentos permeáveis, o dimensionamento da espessura do subleito, da base e do revestimento deve seguir os métodos encontrados para pavimentos rígidos de concreto convencional (ALENCAR, 2013).

De acordo com Senço (2007), os pavimentos rígidos se rompem pelos esforços de tração na flexão. Dessa forma, quando utilizado o concreto permeável como revestimento, a resistência à tração na flexão deste comanda o dimensionamento do pavimento permeável, diferente do que ocorre com os pavimentos flexíveis, onde a resistência do subleito tem grande influência no dimensionamento. Então, EPA (1999) propõe que não seja realizada a compactação da camada de subleito em locais que serão implementados esses pavimentos. Afinal, CRMCA (2009) atenta que, quando o subleito for considerado permeável, a compactação deve ser mínima para não interferir na capacidade de infiltração.

No Brasil, a normatização exige parâmetros para a utilização de pavimentos permeáveis através da NBR 16416/2015: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e Procedimentos. Entre os principais tópicos, a normativa apresenta a Tabela 2 com as resistências mecânicas e espessuras mínimas para os diferentes revestimentos. Ainda, é exigido que a permeabilidade seja superior a 0,1 cm/s para pavimentos permeáveis com qualquer revestimento logo após a execução.

Tabela 2 - Exigências normativas para pavimentos permeáveis

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistências mínimas
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60	Compressão: 35 MPa NBR 9781
	Tráfego leve	80	
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	Compressão: 20 MPa NBR 9781
	Tráfego leve	80	
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	Flexão: 1 MPa NBR 15805
	Tráfego leve	80	
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60	Tração na flexão: 2 MPa NBR 12142
	Tráfego leve	100	

Fonte: Adaptado NBR 16416 (2015).

A NBR 16416/2015 admite vias de tráfego leve como aquelas em que transitam ciclomotores, motonetas, motocicletas, triciclos, quadrículos, automóveis, utilitários, caminhonetes e camionetas com volume diário médio de no máximo 400 veículos. Ainda, pode-se trafegar até 20 caminhões e ônibus por dia.

2.1.1 Perda da Capacidade de Infiltração

A capacidade de infiltração, ou seja, a permeabilidade de um pavimento permeável é medida na superfície do revestimento. O ensaio é proposto pela NBR 16416 (2015) e segue os procedimentos da ASTM C1701 (2009).

Alsubih et al. (2016) comentam que os pavimentos permeáveis oferecem uma excelente alternativa para o controle dos escoamentos superficiais, entretanto ressaltam que no meio urbano, geralmente esse escoamento incorpora sedimentos,

que por sua vez podem fechar os poros da estrutura permeável e afetar sua funcionalidade.

O pavimento permeável possui entre 6 e 20 anos de vida útil. Uma das causas da sua degradação é a colmatação causada pelo entupimento dos poros (KIA et al., 2017). Henderson et al. (2009) afirmam que a permeabilidade dos pavimentos permeáveis sofre alterações devido ao processo de colmatação. Para uma camada porosa aglomerada por cimento asfáltico de petróleo, Souza (2008) sugere um índice de vazios superior a 20% para prevenir a colmatação dos poros.

Pavimentos permeáveis recém executados geralmente apresentam taxas de infiltração altas, entretanto, reduzem significativamente ao longo do tempo. Na Holanda, a infiltração da superfície no início da vida útil desses pavimentos deve ser de 194 mm/h e as diretrizes locais recomendam que a manutenção deve ser realizada quando este valor for inferior a 20,8 mm/h (BOOGAARD et al., 2014).

Uma estrutura de pavimento permeável necessita manutenção com regularidade para eliminação dos sedimentos finos, que colmatam e obstruem a infiltração (NASCIMENTO e BAPTISTA, 2009). Dessa forma, segundo Acioli (2005) a capacidade de infiltração dos pavimentos permeáveis é preservada, evitando custos com os devidos reparos.

Pinto (2011) evidencia a necessidade de se adotar cuidados quanto a limpeza da obra durante a execução para não agravar o processo de colmatação do revestimento permeável. Acioli (2005) salienta que a utilização e a preservação correta asseguram o funcionamento dos pavimentos permeáveis, principalmente os que possuem o concreto permeável como revestimento. Henderson e Tighe (2012) ressaltam que as atividades de manutenção devem ser efetivamente realizadas para que os pavimentos permeáveis apresentem o desempenho desejado.

Para Baladès et al. (1995), a redução da condutividade hidráulica dos pavimentos permeáveis é baixa no primeiro ano de utilização, entretanto após esse período ocorre uma queda rápida e o revestimento pode perder 50% de sua capacidade inicial.

Lamberti et al. (2019a) analisaram o comportamento de módulos de pavimentos permeáveis revestidos com blocos de concreto permeável, blocos de concreto e concreto permeável. Os autores determinaram que em apenas 12 meses a capacidade de infiltração reduziu entre 25 e 80% e que a lavagem do pavimento com

mangueira de alta pressão apresentou resultados variados conforme o tipo de revestimentos.

Lamb (2014) avaliou a colmatção em placas de concreto permeável através de um dispositivo que simula precipitação, percolando 120 L de água com uma percolação aproximada de 1,3 L/s. Em uma amostra, foi utilizado água limpa e em outra água com resíduos sólidos retidos na peneira 0,6 mm, com concentração de 1,5 g/L. A placa submetida a infiltração de água com partículas sólidas apresentou cerca de 30% da permeabilidade daquela em que se utilizou água limpa.

Com o propósito de conservar os poros do concreto permeável, quando este for o revestimento, é necessário realizar a sucção a vácuo (Figura 7) na superfície do pavimento e, posteriormente, deve-se injetar água com mangueira de alta pressão, conforme apresenta a Figura 8 (EPA, 1999; CRMCA, 2009). EPA (1999) recomenda que este procedimento se repita, pelo menos, quatro vezes ao ano, já CRMCA (2009) sugere que uma vez ao ano é suficiente. Kuang et al. (2007) indicam que a recuperação da permeabilidade dos pavimentos permeáveis deve ser realizada semestralmente.

Figura 7 - Procedimento sucção ao vácuo



Fonte: Alencar (2013).

Figura 8 - Mangueira de alta pressão



Fonte: Alencar (2013).

A limpeza recomendada pela NBR 16416 (2015) é a remoção de sedimentos da superfície do pavimento por meio de varrição mecânica ou manual, seguida pelos procedimentos de sucção e jato de água sob pressão. A normativa especifica que a permeabilidade do pavimento deve apresentar 80% da capacidade inicial exigida de 0,1 cm/s, conforme comentado anteriormente.

Após a limpeza com uma máquina de sucção a vácuo de um pavimento permeável com cerca de 1500 m², Dierkes et al (2002) estabeleceram uma melhora de, aproximadamente, 130 vezes na infiltração da estrutura. Dessa forma, os autores ressaltam a necessidade e a eficiência do procedimento na permeabilidade do pavimento. Kuang et al (2007) sugerem que ao utilizar a sucção a vácuo para realizar a limpeza do pavimento, é possível recuperar 95% da capacidade inicial da permeabilidade.

Henderson e Tighe (2011) analisaram alguns métodos de manutenção em pavimentos permeáveis no Canadá e obtiveram as seguintes conclusões:

- A lavagem com mangueira de alta pressão pode empurrar os sedimentos para os vazios mais profundos e reduzir a permeabilidade em vez de melhorá-la. Entretanto, se os sedimentos forem pequenos que possam passar pelos vazios das camadas, a permeabilidade pode ser melhorada e aproximar-se do seu valor inicial;
- Varrer a superfície do pavimento permeável é eficaz apenas na remoção dos sedimentos externos as camadas, não eliminando os detritos que

colmatam os vazios do pavimento, dessa forma, não contribuindo para melhorar a infiltração.

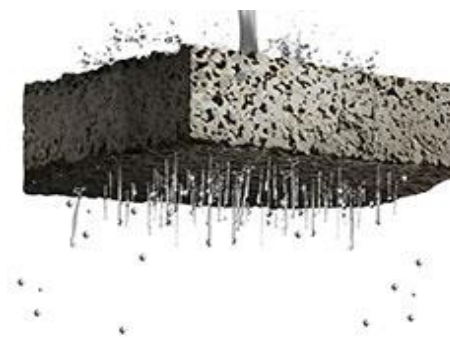
A utilização de manta geotêxtil é recomendada para evitar a redução na permeabilidade dos pavimentos permeáveis devido a colmatação. A contaminação pode ocorrer no contato com os materiais finos oriundos do subleito, colchão de areia e laterais da estrutura do pavimento (VIRGILIIS, 2009).

Lamberti et al. (2019b) salienta que problemas pontuais no solo, como por exemplo o excesso de compactação gerada durante a execução do pavimento, também podem reduzir a capacidade drenante do sistema. Assim, torna-se prudente minorar a permeabilidade do solo, durante o dimensionamento dos pavimentos permeáveis.

2.2 CONCRETO PERMEÁVEL

Concreto permeável (Figura 9) é um concreto com vazios interligados que permite a percolação de água por ação da gravidade (NBR 16416, 2015). Conforme a ACI (2010) o concreto permeável é um concreto de cimento hidráulico produzido com elevados vazios comunicantes entre 15% e 35%, que resultam em uma elevada permeabilidade do material, permitindo a infiltração da água.

Figura 9 - Concreto permeável



Fonte: Votorantim Cimentos.

O diferencial do concreto permeável é seu alto volume de vazios, todavia, ressalta-se que para o melhor desempenho hidráulico do material os vazios a serem

considerados são os vazios comunicantes, que empregam permeabilidade ao material através da conectividade do material. O concreto pode ser poroso, portanto com alto índice de vazios, entretanto, se não houver ligação entre poros, pode não apresentar boa capacidade drenante.

Alessi et al. (2006) salientam que as misturas com vazios elevados podem ser divididas em porosas e drenantes, sendo diferenciada apenas pela presença de vazios comunicantes. Yong et al. (2013) corroboram sobre o assunto e definem misturas drenantes como sendo aquelas que possuem vazios comunicantes e, portanto, permitem a percolação da água por sua estrutura. Os autores complementam que as misturas porosas também apresentam índice de vazios alto, permitindo a penetração da água, mas estes poros não estão conectados e a água sai da estrutura somente por evaporação.

Os vazios de uma mistura porosa podem ser efetivos, quando contribuem para a passagem e armazenamento da água, semi-efetivos, quando apenas permitem o armazenamento da água, ou ineficazes, quando não viabilizam nem a passagem nem o armazenamento da água (CALTRANS, 2006).

A caracterização adequada do concreto permeável se dá com a realização dos ensaios de densidade, volume de vazios e de resistência à compressão (CRMCA, 2009). O controle da densidade do material é eficiente a fim de obter-se índice de vazios adequado (COSTA et al., 2018).

O concreto permeável é a camada superior em uma estrutura de pavimento permeável. Geralmente possui 20% de vazios e possui de 10 a 20 centímetros de espessura. A base que sustenta o revestimento de concreto permeável, também chamada de reservatório, é composta por agregados com graduação aberta e, normalmente, possui 40% de vazios e profundidade variável (EISENBERG et al., 2015).

O emprego do concreto permeável é analisado a partir do interesse em renovar os métodos de drenagem urbana (HÖLTZ et al., 2011) e, segundo Alencar (2013), as atribuições do concreto permeável quando utilizado como revestimento em pavimentos permeáveis são:

- Certificar resistência mecânica a estrutura do pavimento com o mínimo de manutenção;
- Reduzir e distribuir a solicitação do pavimento para o subleito;
- Conceder conforto e segurança ao tráfego;

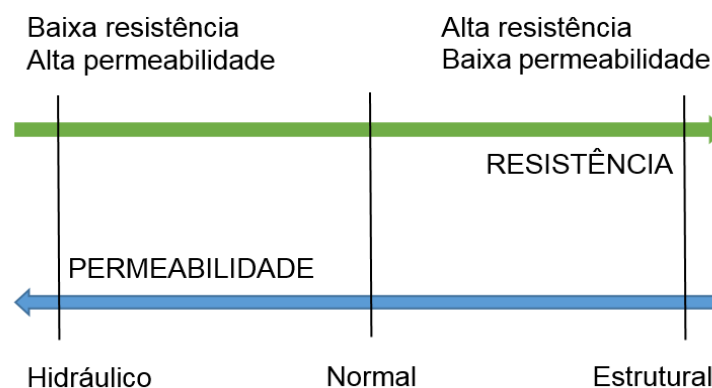
- Propiciar a percolação da água em sua estrutura;
- Atuar como filtro de impurezas aderidas à água.

Deo e Neithalath (2010) ressaltam a importância do concreto permeável na recarga das águas subterrâneas e conservação dos recursos hídricos. Segundo os autores, é uma ferramenta muito eficaz no gerenciamento das águas pluviais, quando executado em grandes áreas expostas.

O concreto permeável é conhecido há mais de 150 anos, porém sua utilização em grande escala surgiu em torno de 25 anos atrás nos EUA. O desenvolvimento dessa técnica tornou-se abrangente atualmente, visto que a utilização desse material viabiliza melhores condições de drenagem em áreas urbanas, onde o solo encontra-se amplamente impermeável (LI, 2009).

Dellate (2005) exibe uma classificação do concreto permeável de acordo com sua resistência e drenabilidade em três categorias. Primeiro, concretos permeáveis com baixa resistência e alta permeabilidade, sendo concretos permeáveis hidráulicos e não são utilizados para fins estruturais. O concreto permeável considerado convencional apresenta resistências e permeabilidades médias sendo produzido sem adição de materiais finos e pode ser aplicado em ciclovias e calçadas. Quando se adiciona agregados miúdos na composição, obtêm-se resistências mecânicas maiores e permeabilidades moderadas, logo se tem o concreto permeável estrutural e esse pode ser aplicado em estacionamentos, ruas e avenidas que disponham de tráfegos mais carregados. A Figura 10 representa de forma esquemática as categorias.

Figura 10 - Classes do concreto permeável



Fonte: Adaptado de Dellate (2005).

A produção de concreto permeável nos EUA utiliza agregados graúdos e com uniformidade na distribuição granulométrica, obtendo-se altas taxas de infiltração, cerca de 0,60 cm/s. Mas, para atingir essa permeabilidade elevada, as misturas apresentam redução nas resistências à compressão, ficando entre 6,70 MPa e 17,50 MPa (KEVERN et al., 2009).

Beeldens (2001 apud Batezini, 2013) comenta que países europeus, Japão e Austrália tinham mais êxito na utilização da técnica do concreto permeável. As misturas utilizadas por estes apresentavam resistência à compressão ao redor de 32 MPa, no entanto, as taxas de infiltração eram menores quando comparado aos traços americanos.

Alencar (2013) ressalta que a restrição da utilização de concreto permeável em vias de tráfego intenso é devido ao grande volume de vazios interconectados típicos do material. ACI (2010) recomenda o emprego do material apenas em vias de tráfego leve ou pouco intenso devido à dificuldade de atingir-se resistências elevadas.

O concreto permeável possui resistências mecânicas baixas, com resistência à compressão entre 20 MPa e 30 MPa, justificando seu emprego em quadras, calçadas e estacionamentos, pois estes lugares apresentam carregamentos menores (GHAFOORI e DUTTA, 1995b).

A resistência mecânica baixa pode ser explicada por uma zona de transição entre pasta e agregados frágil e estreita. Com a adição de agregados miúdos, o aumento da resistência ocorre devido ao preenchimento que os finos acrescentam entre a pasta de cimento e os agregados graúdos (YANG et al., 2008). Huang et al. (2009) associam as baixas resistências do concreto permeável ao seu alto volume de vazios.

A realização de pesquisas mais aprimoradas sobre a relação entre resistência mecânica e permeabilidade é fundamental para compreender a funcionalidade do concreto permeável, pois, quando utilizado como pavimento, o material deve resistir aos esforços do tráfego e, simultaneamente, possuir um coeficiente de permeabilidade adequado às condições climáticas do local de sua implementação (BATEZINI, 2013).

2.2.1 Materiais Utilizados na Produção do Concreto Permeável

Os materiais utilizados na produção do concreto permeável são os empregados nos concretos convencionais, exceto pela redução ou exclusão dos materiais finos (ACI, 2006; TENNIS et al., 2004).

Concreto permeável é um material formado por água, ligante hidráulico e brita de granulometria uniforme com a mínima quantidade de finos, recomenda-se no máximo 7%. Ainda podem ser utilizados aditivos e adições que melhorem o seu desempenho e a sua durabilidade (ACPT, 2012; BATEZINI, 2013; FERGUSON, 2005).

Ao eliminar ou diminuir os agregados miúdos da mistura do concreto, o índice de vazios atinge valores entre 15% e 30%. Dessa forma, a água precipitada infiltra nesses vazios reduzindo o escoamento das águas pluviais na superfície (HENDERSON et al., 2009).

Monteiro (2010) apresenta a Tabela 3 comparando o concreto permeável e o concreto convencional. A Tabela 4 apresenta consumos e proporções típicas dos materiais constituintes no concreto permeável.

Tabela 3 - Comparativo entre concreto convencional e permeável

Tipo	Areia	Brita	Aditivo	Resistência à compressão (MPa)
Convencional	30% a 50% do agregado total	Bem graduada, grãos arredondados	Opcional	20 a 60
Permeável	Pouco ou nenhum	Graduação aberta, grãos angulosos (Brita "0" e pedrisco)	Redutor de água, retardador de pega e incorporador de ar	3 a 30

Fonte: Adaptado de Monteiro (2010).

Tabela 4 - Materiais empregados no concreto permeável

Materiais	Consumo/proporção
Cimento hidráulico (kg/m ³)	270 a 415
Agregado graúdo (kg/m ³)	1190 a 1700
Relação água/cimento (a/c) em massa	0,27 a 0,34
Relação cimento/agregado em massa	1:4 a 1:4,5
Relação agregado miúdo/agregado graúdo em massa	0 a 1:1

Fonte: Adaptado de Batezini (2013).

2.2.1.1 Aglomerante

Assim como nos concretos convencionais, o cimento Portland é o aglomerante mais utilizado nos concretos permeáveis. Cinza volante, escória granulada de alto forno moída e sílica ativa, também são matérias adaptáveis à utilização nas dosagens de concreto permeável. Entretanto, salienta-se que a fração utilizada deve compreender uma faixa que aprimore as propriedades mecânicas resultantes e não interfira na qualidade de drenabilidade final do concreto (BATEZINI, 2013).

Conforme Helene (1992) o cimento pode ser escolhido de acordo com as propriedades que melhor se enquadrem nas condições de utilização do concreto. O autor ainda sugere que a disponibilidade de um determinado cimento em uma região intervirá na escolha do mesmo. Ferguson (2005) afirma que o concreto permeável possui consumo de cimento mais elevado que o concreto convencional.

Quanto maior o consumo de cimento dos concretos permeáveis, maior a sua resistência à compressão. Entretanto, a capacidade permeável do material é reduzida (TAVARES e KAZMIERCZAK, 2016).

A partir da análise de relações a/c entre 0,30 e 0,38, Lian e Zhuge (2010) entenderam que quando essas passam de 0,34 a resistência à compressão diminui e a permeabilidade aumenta. Ainda, definiram que o melhor resultado está na relação de 0,32 e não recomendam valores inferiores a 0,30. ACI (2010) expõem que a relação a/c do concreto permeável é, geralmente, de 0,26 a 0,40.

A relação água/cimento (a/c) juntamente com o modo de adensar na moldagem do corpo de prova são os fatores que mais interferem na resistência mecânica do concreto poroso (ACI, 2006).

Já para Huang et al. (2009) a resistência a compressão, permeabilidade e a porosidade de um concreto permeável, não são tão influenciadas pela relação água/cimento (a/c), mas sim diretamente afetadas pela graduação, tamanho das partículas e pela relação massa de agregados por massa de cimento (M).

2.2.1.2 Agregados

Para produzir o concreto permeável eliminam-se completamente os agregados miúdos ou grande parte desses. Já os agregados graúdos devem possuir granulometria bem uniforme, sem variações nos seus tamanhos com diâmetro

máximo de 19 mm. Ainda, sugere-se o uso de granulometrias inferiores no caso de haver necessidade de um aspecto estético mais agradável, pois agregados maiores causam certo desconforto na estética do concreto permeável. Entretanto, deve-se considerar que grãos maiores são favoráveis à segurança de frenagem, por exemplo, pois aumentam o atrito pneu-pavimento. Habitualmente, adotam-se brita de classificação zero, de 4,8 a 9,5 mm, e brita um, de 9,5 até 19 mm (TENNIS et al., 2004).

O agregado bem graduado reduz as resistências mecânicas do concreto permeável, entretanto o emprego de agregados finos é sugerido para elevar as resistências à compressão e tração na flexão. Já a utilização de agregados com tamanho contínuo favorece a permeabilidade do material (LIAN e ZHUGE, 2010).

O aumento dos agregados graúdos reduz as resistências mecânicas e aumentam o índice de vazios do concreto permeável (GRUBESA et al., 2018; RAJ e CHOCKALINGUAM, 2019). Os resultados de Fagundes et al. (2016) assinalam que a adição de areia em pequenas quantidades assegura resistência e permeabilidade adequadas à mistura.

Neithalath et al. (2010) afirmam que o tamanho do agregado tem grande interferência na capacidade de infiltração do concreto. Para Yang et al. (2008) o emprego de agregados miúdos reduz sua permeabilidade que, para os autores, é a principal característica do material. Isso ocorre porque os finos reduzem os vazios do material, dificultando a percolação do material em sua estrutura. Os autores afirmam que a utilização de 20% de brita zero e o restante de brita um permite um concreto com resistência e permeabilidade adequada. A pesquisa de Grubesa et al. (2018) corrobora que o índice de vazios aumenta em misturas com agregados maiores.

Para o desempenho eficaz de uma mistura drenante com garantia de um índice de vazios comunicantes adequado, o agregado deve possuir granulometria grossa e descontínua (GARCIA, 2017).

Sandoval (2014) moldou amostras de concreto permeável somente com brita zero, somente com brita um e com 50% de cada material para verificar a influência da composição granulométrica do agregado nas resistências mecânicas, permeabilidade e índice de vazios. O autor utilizou CP II F com relação a/c de 0,34 e teor de agregados $M = 3,26$. O adensamento foi realizado na mesa de consistência, em 2 camadas aplicando 20 rotações na mesa de consistência em cada camada. Os resultados encontrados pelo autor estão na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados encontrados por Sandoval (2014)

Composição dos agregados	100% brita 0	100 % brita 1	50% brita 0 + 50% brita 1
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	9,49	9,96	19,19
Resistência à tração na flexão aos 28 dias (MPa)	1,49	1,28	1,83
Índice de vazios (%)	36,44	32,26	31,47
Coefficiente de permeabilidade (cm/s)	0,15	0,28	0,16

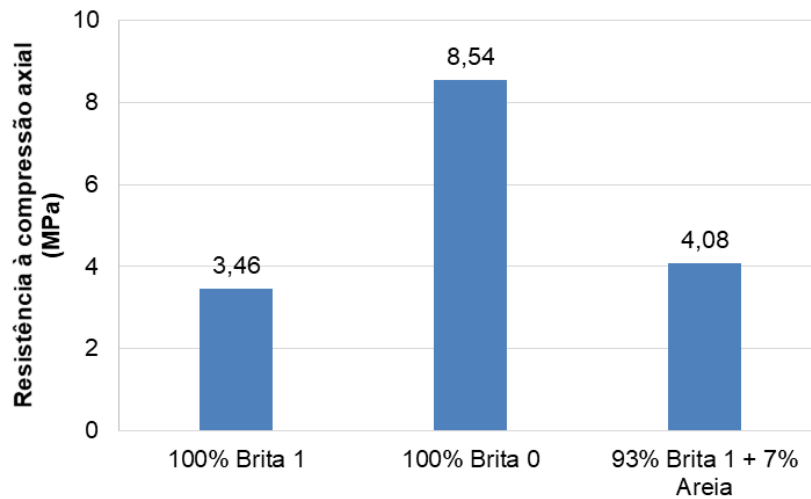
Fonte: Adaptado de Sandoval (2014).

Averiguando os resultados de resistência, percebe-se que tanto a resistência à compressão quanto a resistência à tração na flexão tiveram resultados superiores para o traço que possuía 50% de cada material, possivelmente devido a um ajuste melhor entre os materiais e por consequência menor índice de vazios. Ainda, cabe ressaltar que a permeabilidade do traço somente com brita um é significativamente superior aos demais, mesmo com índice de vazios inferior ao da mistura que possui apenas brita zero. Segundo o estudo de Neithalath et al. (2010), isso pode ocorrer porque a permeabilidade depende não somente do índice de vazios do concreto permeável, mas também da conectividade dos poros na mistura.

Conforme a Figura 11, o estudo de Hölitz (2011) determina que a utilização de brita zero atribui ao concreto permeável resistências mais elevadas que o emprego de brita um. Ainda, a adição de areia ao traço entregou ao concreto permeável elevação nos resultados de resistência à compressão axial. Nessa etapa, o autor utilizou relação a/c de 0,30 e teor de agregados $M = 4$.

Batezini (2013) estudou a influência da composição granulométrica nas propriedades mecânicas e de permeabilidade do concreto permeável. Para isso, o autor utilizou três proporções de agregados, variando seu diâmetro. A Tabela 6 exhibe as misturas analisadas.

Figura 11 - Influência da granulometria do agregado na resistência à compressão axial no estudo de Hölztz (2011)



Fonte: Adaptado de Hölztz (2011).

Tabela 6 - Misturas estudadas por Batezini (2013)

Misturas	% Material retido		
	4,8 a 6,3 mm	6,3 a 9,5 mm	9,5 a 12,5 mm
M1	0	100	0
M2	50	50	0
M3	30	40	30

Fonte: Adaptado de Batezini (2013).

O cimento utilizado foi o CP III RS, o traço possui relação a/c de 0,30 e teor de agregados de 4,44 (1:4,44). O adensamento das amostras consistiu em golpes com bastão metálico e um período em mesa vibratória. Os corpos de prova cilíndricos receberam 45 golpes com o bastão, sendo dividido em 3 camadas. Já nas amostras prismáticas foram empregados 50 golpes em duas camadas. Todas as amostras foram vibradas por 10 segundos. Os corpos de prova foram colocados em câmara úmida com umidade constante de 98% até a data de ensaio. A Tabela 7 apresenta os resultados encontrados pelo autor.

Tabela 7 - Resultados encontrados por Batezini (2013)

Índice de vazios			Massa Específica Aparente Seca (kg/m ³)		
M1	M2	M3	M1	M2	M3
0,24	0,25	0,25	1851	1851	1841
Taxa de Infiltração (cm/s)			Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)		
M1	M2	M3	M1	M2	M3
0,14	0,13	0,14	22,7	22,97	23,97
Resistência à compressão (MPa)			Resistência à tração na flexão (MPa)		
M1	M2	M3	M1	M2	M3
8,45	8,68	7,51	2,16	2,03	2,22
Módulo de elasticidade Estático (GPa)			Resistência à tração indireta por compressão diametral (MPa)		
M1	M2	M3	M1	M2	M3
15,98	15,52	16,49	1,24	1,45	1,39

Fonte: Adaptado de Batezini (2013).

Nota-se que os resultados obtidos foram muito próximos em todos os ensaios realizados para as três misturas analisadas. Dessa forma, entende-se que as relações água/cimento e cimento/agregado determinam as resistências mecânicas do concreto permeável. Salienta-se que o trabalho utilizou granulometrias próximas a da brita zero, alterando moderadamente a curva granulométrica, e que se variar o diâmetro bruscamente, utilizando agregados finos (areia) ou britas maiores (brita um) as resistências poderiam sofrer grandes alterações, como ocorreu nos trabalhos de Sandoval (2014) e Höltz (2011).

Diferente de Sandoval (2014) e Höltz (2011) que utilizaram britas com granulometrias comerciais para formar a composição pétreia da mistura de concreto permeável, Batezini (2013) peneirou e fracionou os agregados formando curvas granulométricas diferentes. Com intuito de verificar a necessidade de realizar o processo de peneiramento, que em uma produção de grande escala seria menos viável que utilizar agregados comerciais, Santos (2017) moldou corpos de prova com uma mistura semelhante a M3 de Batezini (2013) e outra mistura utilizando brita zero. O autor determinou que as resistências mecânicas e o índice de vazios entre as

misturas são muito próximos, indicando que não há necessidade de segregar o material por peneiramento e compor uma nova curva granulométrica.

Castro (2015) comparou uma mistura com 100% de brita zero e outra com substituição de 10% por areia média. As resistências à compressão, à tração por compressão diametral e à tração na flexão da mistura com areia média foram duas vezes maiores que a com apenas brita zero. A permeabilidade reduziu, aproximadamente, 25% com a adição de areia média.

Maguesvari e Narasimha (2013) resumem a influência do tamanho dos agregados nas misturas de concreto permeável da seguinte forma: O aumento de agregados miúdos resulta na redução dos vazios, que por sua vez aumentam as resistências mecânicas e diminuem a permeabilidade da mistura.

Na Tabela 8 são exibidas curvas granulométricas com diâmetros máximos de 19 mm, recomendadas para concretos permeáveis por Li (2009).

Tabela 8 - Curvas granulométricas recomendadas por Li (2009)

Abertura da peneira (mm)	Porcentagem retida acumulada		
	Curva A	Curva B	Curva C
2,36	95 - 100	-	-
4,75	80 - 100	95 - 100	95 - 100
9,50	0 - 15	80 - 100	85 - 100
16,00	0	0 - 15	40 - 60
19,00	-	0	0 - 15
26,50	-	-	0

Fonte: Adaptado de Li (2009).

A origem e a tipologia da rocha utilizada na produção do concreto permeável interferem diretamente na resistência do concreto permeável, esta influência independe da granulometria do agregado (LIAN e ZHUGE, 2010).

2.2.1.3 Aditivos

Aditivos são substâncias utilizadas a fim de aperfeiçoar as propriedades do concreto. Normalmente são líquidos adicionados à mistura em pequenos volumes (FERGUSON, 2005).

Adicionam-se aditivos ao traço do concreto permeável, quando necessário, pelas mesmas razões que são utilizados em concretos convencionais. Sua incorporação permite obter um concreto com maior qualidade, promovendo um material mais trabalhável, resistente, econômico e durável (TARTUCE, 1990). Por exemplo, dependendo da relação a/c, utilizam-se aditivos redutores de água.

Conforme abordado anteriormente, a zona de transição entre agregado e argamassa é apontada como a região mais frágil do concreto permeável. A utilização de aditivos pode reduzir a fragilidade do local e elevar as resistências mecânicas do material (KIM e LEE, 2010).

No concreto permeável a pega transcorre rapidamente, para corrigir esta propriedade, pode-se adicionar aditivo retardador de pega (ACI, 2008; TENNIS et al., 2004).

2.2.1.4 Materiais Alternativos

Diversos materiais vêm sendo empregados em concretos permeáveis buscando melhora nos desempenhos mecânico e hidráulico, por exemplo, Pindado et al. (1999) misturaram sílica ativa e polímero ao traço e determinaram um bom comportamento dos polímeros frente aos carregamentos cíclicos, ou seja, apresentam bom desempenho à fadiga.

Zaharieva et al. (2002) estudaram a incorporação de agregados reciclados na mistura do concreto permeável. A mistura com agregados reciclados atingiu, em média, 73% da resistência à compressão da mistura com agregados naturais. A porosidade das amostras com agregados reciclados aumentou, aproximadamente, duas vezes em relação às com agregados naturais.

Tavares e Kazmierczak (2016) avaliaram a utilização de agregados reciclados no concreto permeável. Os autores concluíram que as amostras em que o agregado natural foi substituído pelo reciclado, as resistências reduziram significativamente, provavelmente devido às microfissuras na interface agregado-matriz cimentícia dos concretos com agregado reciclado. As microfissuras foram detectadas por microscopia eletrônica. Quanto a permeabilidade, as misturas com agregados reciclados tiveram desempenho superior aos com agregados naturais.

França et al. (2019) colocaram agregados reciclados de concreto na confecção de pavers de concreto permeável. As autoras determinaram que a substituição de até

30% dos agregados naturais por agregados reciclados de concreto não prejudicaria a capacidade hidráulica e a resistência à compressão do material.

Lian e Zhuge (2010) atestaram que a adição de 7% de sílica ativa e 0,8% de superplastificante aumentam a resistência do concreto permeável.

Pesquisas utilizando agregados selecionados, adições de minerais finos e intensificadores orgânicos estão sendo desenvolvidas para melhorar as resistências mecânicas à compressão, tração e cisalhamento do concreto permeável. Já se encontrou cerca de 50 MPa de resistência à compressão e 6 MPa de resistência à tração (YANG e JIANG, 2002).

El-Hassan e Kianmehr (2016) estudaram o concreto permeável com 50% de escória granulada de alto forno na mistura. Os autores concluíram que a resistência mecânica do material aumentou, enquanto a porosidade diminuiu. Considerando que aumentou o material cimentício, houveram mais produtos de hidratação, que resultou em um concreto mais denso.

Huang et al (2009) adicionaram fibras de polipropileno, látex, areia e variaram o diâmetro máximo do agregado em 12,5 mm, 9,5 mm e 4,75 mm, visando aumentar as resistências mecânicas do concreto permeável sem reduzir sua capacidade de infiltração. Os resultados revelaram um ganho de resistência à tração por compressão diametral nas misturas com menor diâmetro máximo e uma contribuição significativa das fibras de látex na resistência referida. A permeabilidade se manteve elevada em todas as misturas, apesar de reduzir-se com a adição das fibras e da areia.

Pereira e Barbosa (2015) adicionaram resíduos sólidos de construção civil (RCD) em misturas com proporção cimento/agregado de 1:4,15. O RCD foi incorporado substituindo em 10 e 20% os agregados naturais, quando a relação a/c era 0,30 e apenas em 20% quando a relação a/c era 0,50. Para as duas relações a/c foram moldadas misturas de referência com 100% de agregados naturais. As misturas com relação a/c de 0,50 obtiveram resistências à tração na flexão adequadas com a NBR 16416 (2015), havendo uma pequena redução na mistura com RCD, entretanto as misturas com relação a/c de 0,30 não atingiram a resistência exigida pela norma vigente, inclusive a de referência, evidenciando-se que a resistência inadequada é devido à baixa quantidade de água para hidratação do cimento e não por conta da utilização do RCD.

2.2.1.4.1 Resíduo de Fresado Asfáltico

Segundo Bonfim (2007) a fresagem de pavimentos é o corte de uma ou mais camadas do pavimento. O material retirado neste processo é o resíduo de fresado asfáltico e, conforme Brosseaud (2011) é composto, na maioria das vezes, por agregados e cimento asfáltico de petróleo (CAP).

A reutilização desses resíduos de fresado asfáltico está ocorrendo em países de economias emergentes, atrelando a reciclagem do material à sustentabilidade, visando reduzir os impactos ambientais causados pelo descarte final desse produto (BONFIM, 2007; ROCHA SEGUNDO et al., 2016).

Para Brosseaud (2011) a reciclagem de materiais como o fresado surge como alternativa de proteção ao meio ambiente. Segundo o autor, a utilização desse recurso permite economizar recursos naturais, como os agregados pétreos, eliminar espaços físicos, onde os resíduos seriam descartados, reduzir a energia do processo de britagem e conter o avanço do efeito estufa.

Há uma grande quantidade de fresado ocioso e também uma tendência em aumentar a disponibilidade do material, pois, segundo dados da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2018), mais da metade dos pavimentos avaliados no Brasil apresentam necessidade de manutenção, visto que estão desgastados, e a fresagem parcial da estrutura faz parte do processo de restauração de pavimentos.

Fonseca (2013) corrobora que os pavimentos precisam de manutenção periódica, pois estes se degradam conforme são solicitados pelo tráfego. Ainda, o autor ressalta que a utilização do fresado acarreta benefícios pela grande quantidade livre do material, facilitando sua aquisição, reduzindo gastos com agregados naturais e, conseqüentemente, com o custo final de produção.

Dessa forma, diversos trabalhos vêm implementando o fresado em misturas de concreto permeável, entre eles Quadrelli et al. (2016), Melo et al. (2016), Porte (2017), Melo (2017) e Vieira et al. (2018).

Quadrelli et al. (2016) incorporaram ao traço do concreto permeável porcentagens (10%, 20% e 40%) de fresado em substituição ao agregado natural. Os resultados de resistências mecânicas não apresentaram diferenças significativas, atribuindo ao fresado bom comportamento como agregado em concretos permeáveis.

Da mesma forma, Porte (2017) substituiu 30% do agregado virgem por fresado asfáltico na mistura de concreto permeável e não encontrou reduções expressivas nos

ensaios de resistências mecânicas. Ressalta-se que a mistura, mesmo com o resíduo, apresentou resistência à tração na flexão superior a exigida pela NBR 16416/2015.

Melo (2017) estudou a influência da utilização de fresado asfáltico na mistura de concreto permeável quanto a permeabilidade. O autor substituiu 30% do agregado natural pelo resíduo, de forma que pouco alterou a granulometria final da mistura e determinou que não houve divergência entre as amostras com e sem o resíduo e que tanto as misturas sem fresado quanto as que possuíam fresado atingiram a permeabilidade mínima exigida pela NBR 16416 (2015).

Vieira et al. (2018) avaliaram o comportamento de duas misturas de concreto permeável, uma somente com agregados naturais e outra substituindo 30% do agregado natural por resíduo de fresado asfáltico passante na peneira 1/2" e retido na nº 4. O teor de agregados era $M = 3$ com relação água/cimento de 0,33. O adensamento realizado nas amostras cilíndricas foi com 45 golpes divididos em 3 camadas. Nos corpos de prova prismáticos, 50 golpes divididos em duas camadas. Ao final da aplicação dos golpes com haste metálica, todas as amostras foram submetidas a sete segundos em mesa vibratória. Os autores constataram os seguintes resultados sobre a substituição:

- O índice de vazios não apresentou diferenças significativas com a substituição;
- A resistência à compressão axial aos 28 dias da mistura com fresado reduziu, aproximadamente, 22% em relação a mistura somente com agregados naturais;
- Da mesma forma que para a resistência à compressão axial, houve redução da resistência à tração por compressão diametral da mistura com fresado;
- A resistência à tração na flexão da mistura sem fresado também foi superior a com fresado. Entretanto, ressalta-se que os valores encontrados para a mistura com fresado foi cerca de 40% superior ao exigido pela NBR 16416/2015 para a utilização do material em vias de tráfego leve;
- A permeabilidade das duas misturas, tanto para o ensaio com permeâmetro de carga variável quanto para o de carga constante, foram bem superiores ao mínimo exigido pela norma.

Por fim, salienta-se que o resíduo de fresado asfáltico é bastante heterogêneo, com propriedades distintas, podendo variar a origem e tipologia do agregado, o ligante asfáltico, bem como sua granulometria final, podendo ser necessário ajustes para o seu emprego como material alternativo.

2.2.2 Propriedades do Concreto Permeável

2.2.2.1 Estado Fresco

A trabalhabilidade do concreto permeável é inferior à do concreto convencional devido à consistência elevada. O ensaio de abatimento do concreto estudado resulta, habitualmente, em valores menores que 20 mm (ACI, 2010; TENNIS et al., 2004). Batezini (2013) diz que dificilmente o abatimento do concreto permeável atinge valores maiores que 50 mm. A CRMCA (2009) expressa que devido a plasticidade baixa dessas misturas, o ensaio de abatimento de tronco de cone não resulta em uma avaliação adequada.

O ensaio de abatimento de tronco de cone é utilizado como parâmetro de trabalhabilidade em concretos convencionais. Entretanto, como visto, no concreto permeável é inviável o seu emprego devido à consistência do material. Com isso, para esse concreto, adota-se o controle visual e o ensaio de massa unitária. A massa unitária do concreto poroso é cerca de 70% da massa unitária do concreto convencional. Visualmente é possível verificar a coesão da mistura. Recomenda-se comprimir uma amostra com as mãos e analisar se há aglomeração dos materiais, entendendo que o material é coeso, caso contrário, se o material se dispersar, diz-se que o material não está coeso e significa que se deve adicionar água na mistura (TENNIS et al., 2004).

Schaefer et al. (2006) determinaram que a execução da mistura do concreto permeável influencia nas propriedades do material. Sandoval (2014) constatou que 5 minutos no processo de mistura é o tempo que apresenta melhor desempenho quanto a homogeneidade e a consistência do material.

Outro fator importante é o tempo de pega. Batezini (2013) registra que, normalmente, quando comparado o concreto permeável ao concreto convencional o tempo útil de trabalho é inferior. Segundo Tennis et al. (2004), o tempo máximo recomendado entre o fim da mistura e o lançamento do concreto drenante é de 60

minutos. ACI (2010) complementa que esse tempo pode se estender para 90 minutos com a utilização de aditivos retardadores, variando com o clima do local e com o tipo de aditivo aplicado na mistura. Alencar (2013) ressalta que um atraso durante o lançamento e espalhamento pode prejudicar o desempenho mecânico do concreto permeável, devido ao rápido início da pega.

As massas específicas aparentes do concreto permeável são da ordem de 1300 kg/m^3 a 2000 kg/m^3 . Considera-se ainda, que o adensamento adotado e o traço utilizado interfiram nesse valor, bem como no índice de vazios das amostras (ALENCAR, 2013; TENNIS et al., 2004). A NBR 16416/2015 impõe que o valor da massa específica do concreto permeável deve ser maior que 1600 kg/m^3 .

2.2.2.2 Estado Endurecido

Devido ao traço do concreto permeável possuir pouco ou nenhum material fino, a mistura possui coeficiente de atrito alto, pois tem superfície rugosa. Essa característica diferencia o concreto permeável do convencional (BATEZINI, 2013).

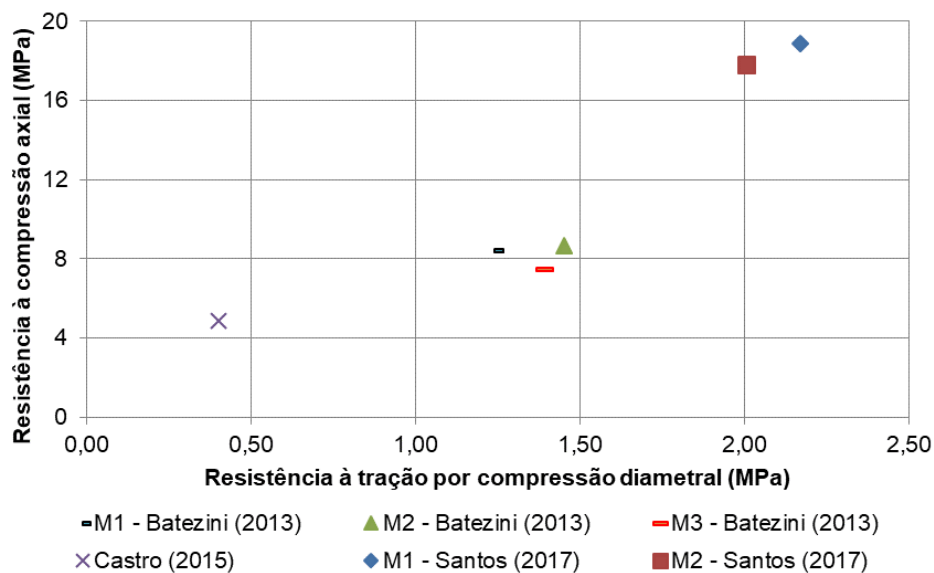
A ausência de agregados finos implica em um alto índice de vazios na mistura (MOURA, 2005). Segundo Mahalingan e Mahalingan (2016), o índice de vazios elevado implica em resistências mecânicas baixas e permeabilidade elevada.

Há diversos estudos relacionados a resistência à compressão axial e ao desempenho quanto à condutividade hidráulica do concreto permeável. Isso, possivelmente, devido à irregularidade final das amostras deste material, que dificulta a realização de outros ensaios, como por exemplo, de tração na flexão e módulo de elasticidade. Os resultados de ensaios de tração na flexão são relevantes se essa mistura for aplicada como revestimento em pavimentos permeáveis (BATEZINI, 2013).

Batezini (2013) cita que as resistências mecânicas do concreto permeável são influenciadas pelo índice de vazios. Se o índice é menor que 15% entende-se que o material possui baixa porosidade. Para se obter um concreto com porosidade alta, o referido índice deve atingir pelo menos 30%. Tennis et al. (2004) recomenda adotar índices de vazios em torno de 20% de maneira que o concreto possua boa resistência e permeabilidade conjuntamente. Aoki et al. (2012) afirmam que normalmente esse material possui cerca de 1800 kg/m^3 , com índice de vazios de 33%.

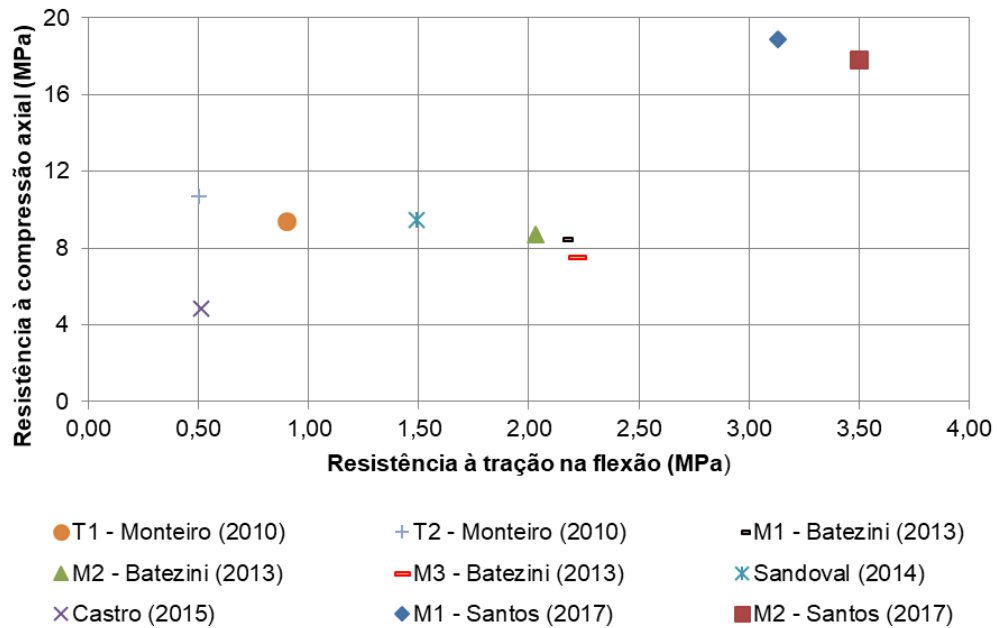
As Figuras 12 e 13 exibem as relações entre a resistência à compressão axial e as resistências à tração por compressão diametral e à tração na flexão, respectivamente, retiradas dos trabalhos de Batezini (2013), Santos (2017), Castro (2015), Monteiro (2010) e Sandoval (2014). Observa-se que as resistências possuem comportamentos diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior a resistência à compressão, maior são as outras resistências mecânicas. Essa equivalência é relevante, pois, conforme exposto anteriormente, muitos trabalhos realizam apenas o ensaio de resistência à compressão axial, devido a facilidade em fazê-lo quando comparado aos procedimentos de determinação de outras resistências mecânicas.

Figura 12 - Resistência à compressão axial x Resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Elaboração própria.

Figura 13 - Resistência à compressão axial x Resistência à tração na flexão

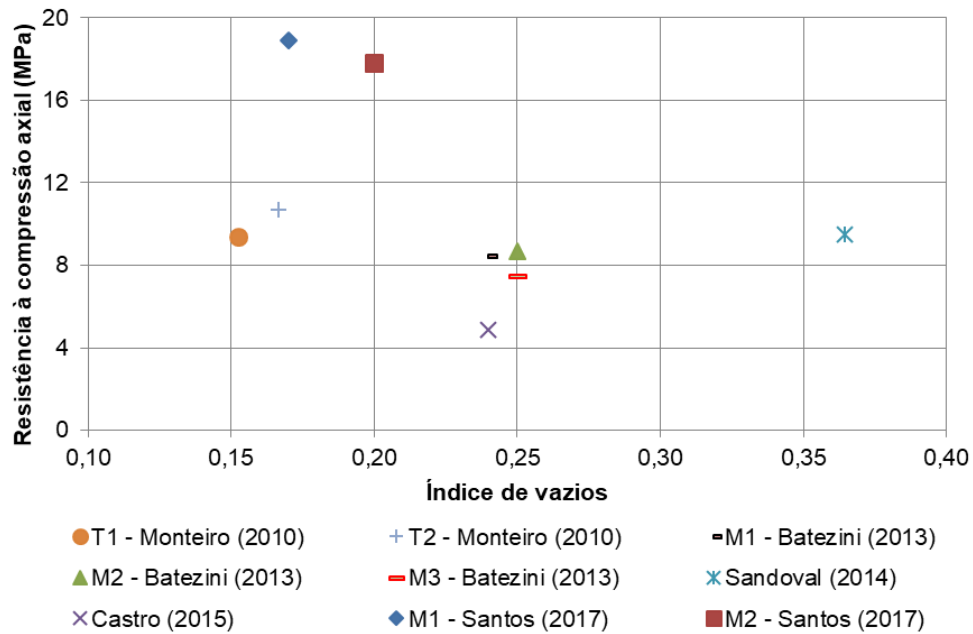


Fonte: Elaboração própria.

A relação entre o volume de vazios e as resistências à compressão e à tração na flexão é inversamente proporcional, de maneira que para o concreto permeável possuir resistências altas, a mistura deve possuir o menor volume de vazios possível (DELLATE et al., 2009; SRIRAVINDRARAJAH et al., 2012).

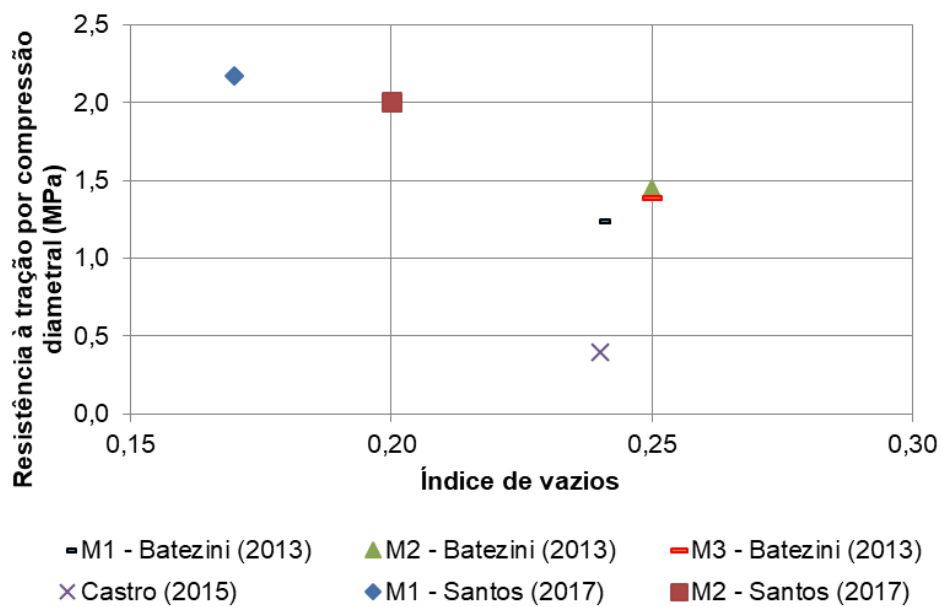
Examinando as Figuras 14, 15 e 16, que relacionam o índice de vazios com as resistências à compressão axial, à tração por compressão diametral e à tração na flexão, respectivamente, percebe-se que não há um comportamento padrão, entre resultados encontrados por diferentes autores, que indique uma influência do índice de vazios nas resistências mecânicas. Portanto, entende-se que, não somente o índice de vazios, mas também os materiais empregados, o traço e os procedimentos de mistura, adensamento e cura adotados por cada autor possuem grande contribuição na resistência do concreto permeável.

Figura 14 - Resistência à compressão axial x Índice de vazios



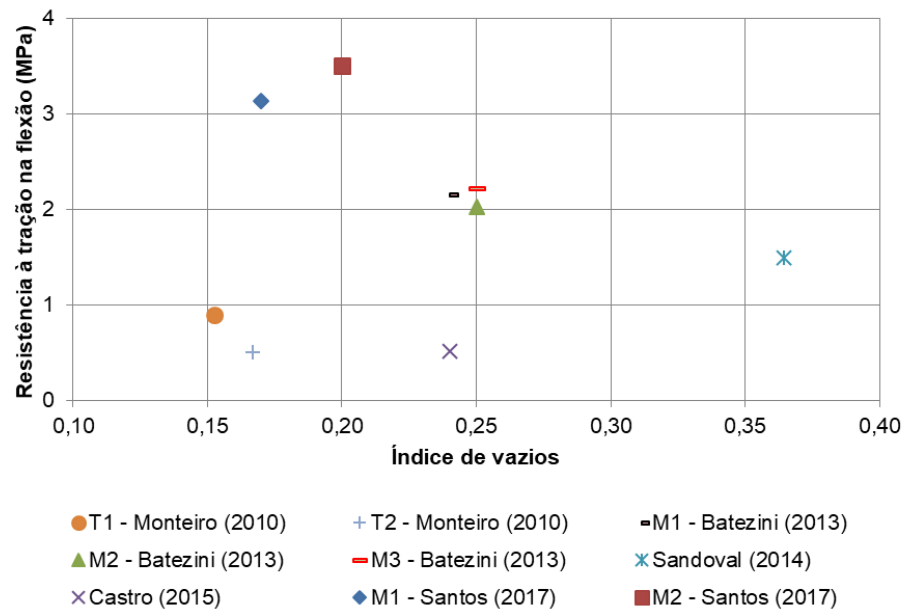
Fonte: Elaboração própria.

Figura 15 - Resistência à tração por compressão diametral x Índice de vazios



Fonte: Elaboração própria.

Figura 16 - Resistência à tração na flexão x Índice de vazios



Fonte: Elaboração própria.

Contribuindo, os estudos de Lee et al. (2009) demonstraram a grande variabilidade dos parâmetros do concreto permeável. O índice de vazios variou entre 0,3% e 29%, a permeabilidade entre 0,003 cm/s e 0,22 cm/s e a resistência à compressão entre 7,5 MPa e 18,8 MPa.

Para um concreto permeável com aproximadamente 27% de volume de vazios, Goede (2009) encontrou resistência à compressão simples variando entre 9,2 MPa e 11,5 MPa, enquanto a sua condutividade hidráulica ficou entre 0,6 cm/s e 1,4 cm/s.

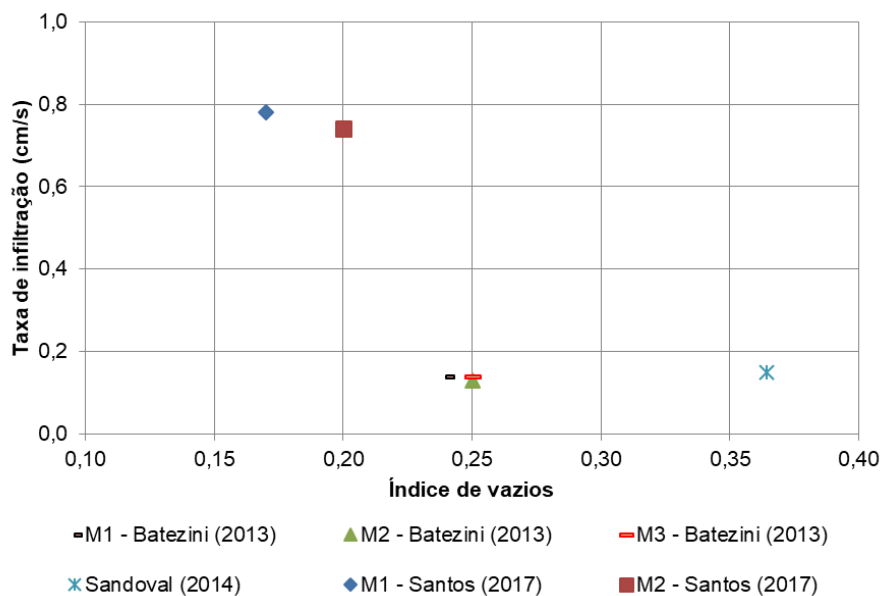
McCain e Dewoolkar (2009), em misturas sem nenhuma quantidade de agregados finos, obtiveram resistência à compressão axial entre 4,5 MPa e 7,5 MPa e taxa de infiltração em torno de 0,9 cm/s.

Chindapasirt et al. (2007) salientam que o concreto permeável é um material frágil e que sua resistência depende do seu volume de vazios. No estudo dos autores, a resistência à compressão das amostras aos 28 dias variou entre 22 MPa e 39 MPa e o índice de vazios entre 15% e 25%. Park e Tia (2003) para uma faixa do volume de vazios próxima, 18% a 31%, encontraram resistências menores, entre 10 MPa e 25 MPa. Essa diferença evidencia a grande influência dos materiais e dos métodos utilizados na produção dos concretos permeáveis.

O índice de vazios e a condutividade hidráulica estão fortemente conectados, quanto maior o índice de vazios mais elevada a condutividade hidráulica (BATEZINI e BALBO, 2015; SCHAEFER et al., 2006).

A permeabilidade do concreto permeável é ligada à granulometria do agregado e a densidade da mistura (KIM e LEE, 2010). A análise da Figura 17 corrobora com a afirmação, pois não há um padrão no comportamento de misturas de concreto permeável quando se relaciona a taxa de infiltração com o índice de vazios. Essa avaliação leva ao entendimento de que, bem como para as resistências mecânicas, os materiais utilizados e as formas de mistura e adensamento possuem grande influência na permeabilidade do concreto permeável.

Figura 17 - Taxa de infiltração x Índice de vazios



Fonte: Elaboração própria.

É importante relembrar que os autores estão diferenciando índice de vazios e vazios comunicantes, onde a primeira propriedade mede poros na estrutura do concreto permeável, e o segundo avalia os poros conectados, que permitem que a água percole pela estrutura do material. Sendo assim, a taxa de infiltração possivelmente teria melhor relação se comparada aos vazios comunicantes do concreto, porém este ainda não é um ensaio habitual para concretos permeáveis.

A NBR 16416/2015 orienta que a permeabilidade de amostras de concreto permeável seja determinada em laboratório de acordo com a NBR 13292/1995, que

estabelece o procedimento de ensaio utilizado em solos granulares. A carga hidráulica aplicada nas amostras é constante durante o desenvolvimento deste ensaio. Este método foi utilizado por Tavares e Kazmierczak (2016), Lamberti et al. (2017), Melo et al. (2017) e Vieira et al. (2018).

Outra forma bastante encontrada na literatura para a determinação no laboratório da permeabilidade, é o método proposto por Neithalath et al. (2003) e adotado pela American Concrete Institute, através da norma ACI – 522R-10 (2010). O ensaio foi utilizado por Sales (2008), Brito e Santos (2010), Hölitz (2011), Lamb (2014), Melo et al. (2017), Lamberti et al. (2017), Costa et al. (2018) e Vieira et al. (2018). Neste ensaio, a carga hidráulica aplicada no corpo de prova reduz com o andamento do procedimento.

A forma mais prática de estabelecer a permeabilidade das amostras é pelo método sugerido pela ACI – 522R-10 (2010), realizado com permeâmetro de carga variável, como é chamado na literatura. Entretanto, conforme comentado, a NBR 16416/2015 prescreve o procedimento com carga constante, já que este apresenta resultados mais confiáveis para materiais com permeabilidade elevada (LAMBERTI et al., 2017).

Os resultados utilizando permeâmetro de carga variável e de carga constante, não apresentam diferenças significativas. Dessa maneira, quando não houver permeâmetro de carga constante, a permeabilidade pode ser estimada através do permeâmetro de carga variável (LAMBERTI et al., 2017; MELO et al., 2017).

A permeabilidade de um concreto permeável varia entre 0,21 cm/s e 0,54 cm/s, sendo este o dado mais relevante do material (TENNIS et al., 2004). Bean et al. (2007) encontraram valores, em campo, oscilando entre 0,07 cm/s e 0,77 cm/s. Montes e Haselbach (2006) tiveram resultados de 0,01 cm/s a 1,32 cm/s para diversas amostras.

A condutividade hidráulica é bruscamente reduzida pelo fechamento dos poros do material, quando este for excessivamente compactado durante a execução do pavimento. Nessa situação, o revestimento se torna impermeável e pode haver formação de poças da água sobre a superfície da camada (HENDERSON et al., 2009).

Dellate et al. (2009) realizaram análises visuais e ensaios em laboratório de amostras retiradas de pavimentos revestidos com concreto permeável de vinte locais distintos nos EUA. No trabalho, em grande parte das regiões, as amostras tiveram desagregação superficial com perda de agregados. Isso ocorre devido à quebra do

contato entre o agregado e o cimento. O agregado solta-se da estrutura do pavimento. Ainda, segundo levantamento da pesquisa, seis áreas tinham vestígios de fissuração precoce. Os ensaios de laboratório revelaram que os índices de vazios da parte superior eram menores que os da parte inferior em algumas amostras. Isso, possivelmente é decorrente da colmatação dos poros na parte superior do revestimento ou do procedimento construtivo. Esse problema pode ser corrigido com os reparos que o concreto permeável exige durante sua vida útil.

Goede (2009) determinou o módulo de elasticidade estático e o coeficiente de Poisson a partir de ensaios de compressão. Para isso, foram moldados corpos de prova cilíndricos com agregado de diâmetro único de 12,50 mm e a relação água/cimento variando entre 0,27 e 0,28. Os resultados para o módulo de elasticidade variaram entre 12.100 MPa e 15.100 MPa, menores que o de concretos convencionais. Para coeficiente de Poisson, foram encontrados resultados entre 0,14 e 0,34, sendo 0,22 a média. Para Ghafouri e Dutta (1995a), os coeficientes de Poisson do concreto permeável e do concreto convencional são aproximados e estão entre 0,15 e 0,20.

2.2.3 Estudos de Dosagem, Adensamento e Cura do Concreto Permeável

Monteiro (2010) estudou dois traços distintos de concreto permeável. O primeiro (T1), com uma relação água/cimento de 0,26 e proporção cimento/agregado de 1:3 (1:M). O segundo (T2) com relação a/c de 0,30 e teor de agregados M = 4 (1:4). A autora utilizou brita zero oriunda de rocha de micaxisto e cimento Portland CP II F. Foram confeccionados moldes cilíndricos e prismáticos. Os ensaios realizados foram índice de vazios, absorção de água, massa específica da amostra seca e saturada, resistência à compressão simples e resistência à tração na flexão, sendo todos realizados aos 28 dias após a moldagem. O adensamento dos corpos de prova foi executado em mesa vibratória tanto para os moldes cilíndricos quanto para os prismáticos e o procedimento consistiu em vibrar por 30 segundos cada camada, sendo três camadas por corpo de prova (CP). Os resultados encontrados pela autora estão dispostos na Tabela 9. A permeabilidade foi constatada apenas visualmente.

A partir da análise dos resultados verifica-se que apesar dos traços serem distintos tanto na relação água/cimento quanto no teor de agregados, as resistências à compressão axial se mantiveram próximas, contrariando os valores encontrados

para a resistência à tração na flexão em que o traço com menor teor de agregados teve resultado mais satisfatório. Ainda se percebe que o aumento no consumo de cimento não representou ganho significativo de resistência.

Tabela 9 - Resultados encontrados por Monteiro (2010)

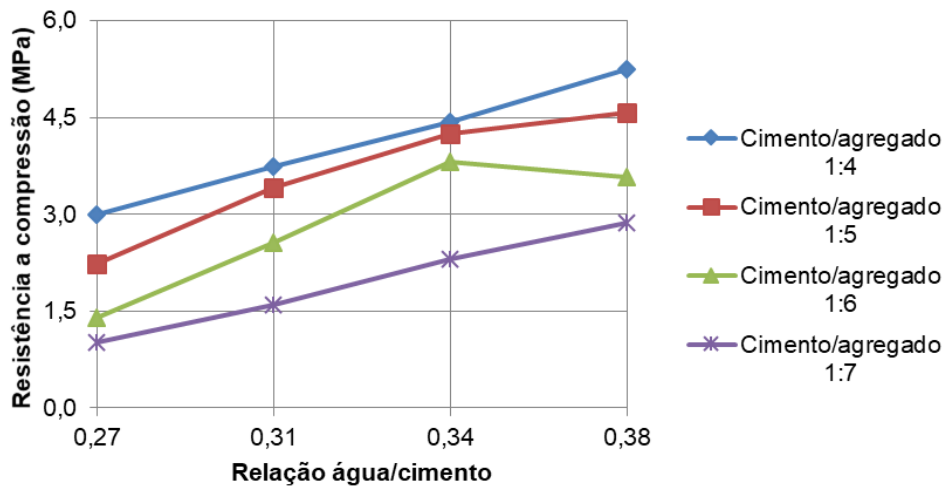
Absorção de água (%)		Volume de vazios (%)	
T1	T2	T1	T2
5,77	6,30	15,25	16,67
Massa específica da amostra seca (g/cm³)		Massa específica da amostra saturada (g/cm³)	
T1	T2	T1	T2
2,64	2,65	2,80	2,81
Resistência à compressão axial (MPa)		Resistência à tração na flexão (MPa)	
T1	T2	T1	T2
9,39	10,70	0,90	0,50

Fonte: Adaptado de Monteiro (2010).

Brito e Santos (2010) estudaram 16 traços distintos, variando a relação a/c e a proporção cimento/agregado. As amostras foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão e a determinação do índice de vazios e de permeabilidade. O cimento utilizado foi o CP II Z e o agregado composto por brita de classificação um. O adensamento das amostras foi realizado com a aplicação de 24 golpes por CP divididos em duas camadas. A cura úmida foi realizada com submersão das amostras em uma solução de água e cal hidratada, onde permaneceram até a idade do ensaio de resistência à compressão. Os índices de vazios encontrados apresentaram grande variabilidade. A Figura 18 exibe os resultados encontrados de resistência à compressão e a Figura 19 as permeabilidades dos traços estudados pelos autores.

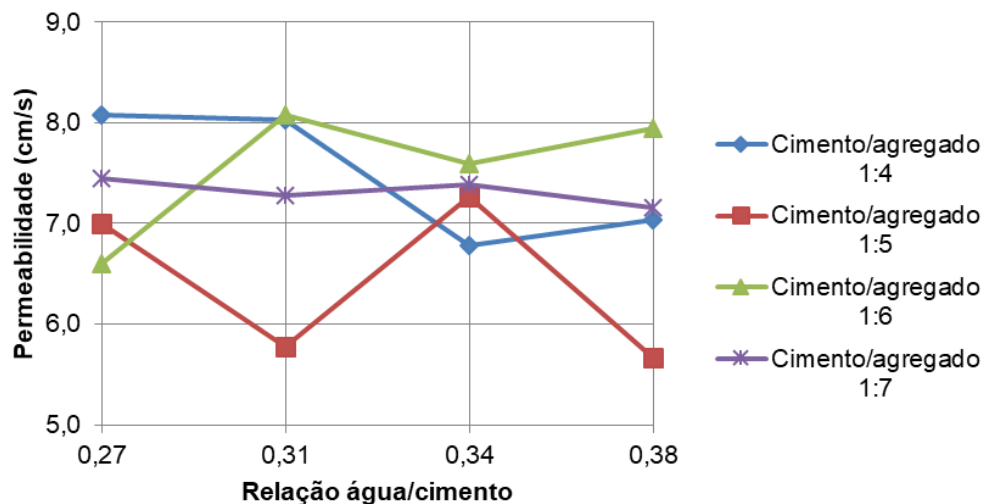
Nota-se que conforme o teor de agregados aumentou, as resistências diminuíram e conforme a relação a/c crescia também evoluíam os valores de resistência, indicando existir uma relação a/c mínima para hidratar os grãos de cimento e atingir as máximas resistências. Quanto a permeabilidade, verifica-se que não há um comportamento regular deste parâmetro em função das relações a/c e cimento/agregado, sendo os resultados encontrados bastante dispersos.

Figura 18 - Resistências encontradas por Brito e Santos (2010)



Fonte: Adaptado de Brito e Santos (2010).

Figura 19 - Permeabilidades encontradas por Brito e Santos (2010)

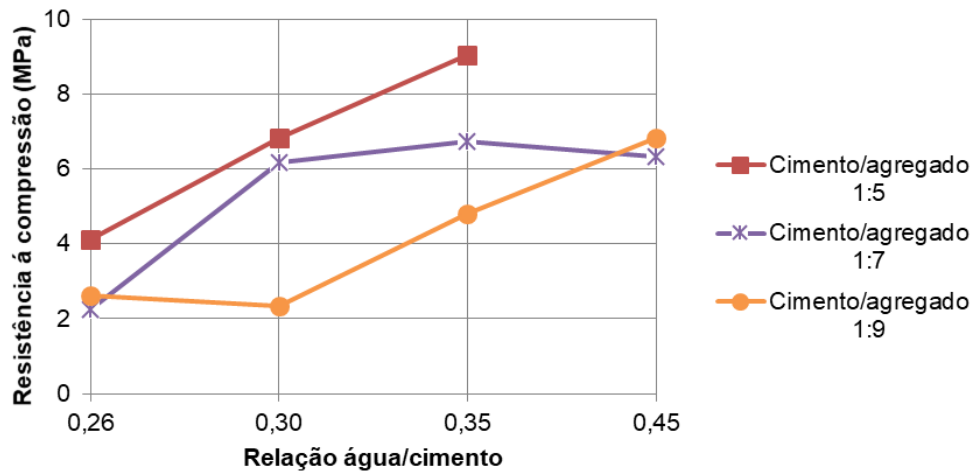


Fonte: Adaptado de Brito e Santos (2010).

Da mesma forma que Brito e Santos (2010), Hölitz (2011) analisou a influência da relação a/c e do teor de agregados na resistência à compressão do concreto permeável. As misturas foram executadas com brita 1, diâmetro máximo de 19 mm e cimento CP V – ARI. O adensamento foi realizado com haste metálica, sendo distribuídos 24 golpes divididos em duas camadas. As amostras foram desmoldadas após 24 horas e então levadas para a câmara úmida, com temperatura de 23°C e

umidade relativa superior a 95%, onde permaneceram até a data dos ensaios. A Figura 20 apresenta os resultados de resistência à compressão aos 28 dias encontrados pelo autor.

Figura 20 - Resistências encontradas por Höltz (2011)



Fonte: Adaptado de Höltz (2011).

A interpretação dos resultados encontrados induz a mesma análise realizada sobre as resistências determinadas por Brito e Santos (2010). Quanto maior o teor de agregados na mistura, menor é a resistência à compressão e o aumento da relação a/c tende a melhorar a resistência do concreto permeável, até um certo limite que possibilite a total hidratação do cimento.

Santos (2017) analisou três traços distintos, expostos na Tabela 10, e verificou, a partir dos resultados apresentados na Figura 21, que os traços 1 e 3 com maior relação água/cimento obtiveram melhores resistências à compressão axial e à tração na flexão que o traço 2, com menor relação a/c. Esses resultados concordam com análise realizada para os trabalhos de Brito e Santos (2010) e Höltz (2011), que indicam uma relação a/c mínima para hidratação do cimento. Para os traços 1 e 3, que possuem relação a/c iguais, as resistências encontradas pelo autor indicam que quanto menor o teor de agregados, maior a resistência do concreto permeável. O adensamento foi realizado com haste metálica e mesa vibratória. Nas amostras cilíndricas, submetidas ao ensaio de resistência à compressão axial, foram distribuídos 15 golpes por camada em 3 camadas. Nos corpos de prova prismáticos, submetidos ao ensaio de tração na flexão, foram aplicados 50 golpes divididos em

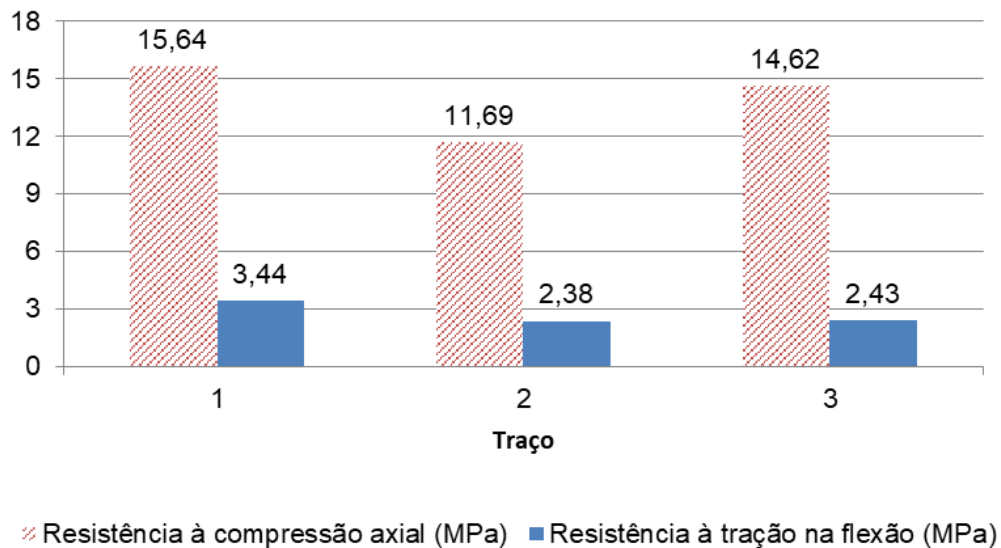
duas camadas. Ao final da aplicação dos golpes com haste metálica, todas as amostras foram submetidas a sete segundos em mesa vibratória.

Tabela 10 - Traços estudados por Santos (2017)

Traço	Teor de agregados	Relação a/c
1	3	0,33
2	3,5	0,30
3	4	0,33

Fonte: Adaptado de Santos (2017).

Figura 21 - Resultados obtidos por Santos (2017)



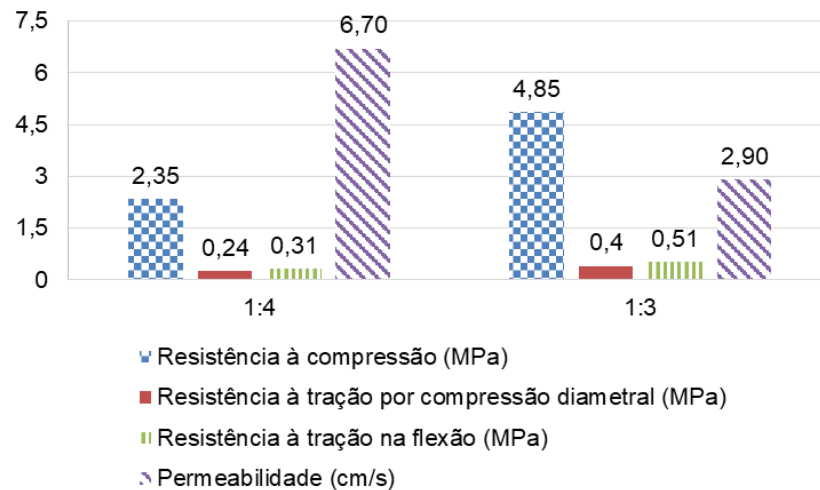
Fonte: Adaptado de Santos (2017).

Quadrelli et al. (2015) moldou amostras de concreto permeável com teor de agregados $M = 4,15$ e duas relações a/c, 0,30 e 0,50. O autor utilizou cimento CP V – ARI e brita 0. O método de adensamento utilizado não foi apresentado. Os autores encontraram resistências mecânicas consideravelmente superiores para os corpos de prova com relação a/c de 0,50. Esse estudo corrobora com os anteriores, evidenciando um valor mínimo de água para hidratação do cimento. Entretanto, a condutividade hidráulica das amostras com relação a/c inferior se mostrou superior.

Castro (2015) analisou dois teores de agregado, 1:3 e 1:4. O autor manteve a relação a/c de 0,30 para os dois traços e utilizou cimento CP IV e brita 0. O adensamento dos traços foi realizado manualmente com 15 golpes de soquete por

camada, em três camadas. Os corpos de prova ficaram submersos em água para a efetivação da cura até os 28 dias, data dos ensaios. A Figura 22 apresenta os resultados obtidos.

Figura 22 - Resultados de Castro (2015)

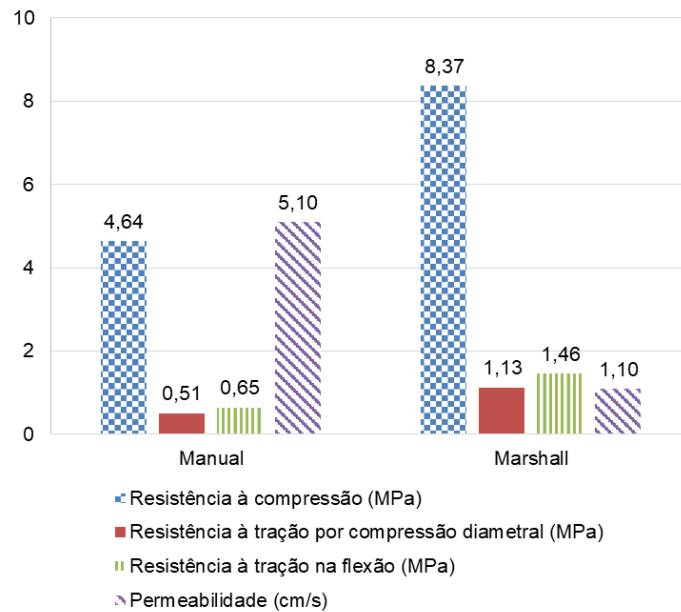


Fonte: Adaptado de Castro (2015).

Observa-se que o traço com teor de agregados menor apresentou resistências mecânicas superiores, enquanto a permeabilidade reduziu. O adensamento utilizado interfere diretamente nas propriedades do concreto permeável e também foi alvo do estudo de Castro (2015). Para isso o autor moldou dois grupos de amostras com relação a/c de 0,30 e teor de agregados $M = 4$, 90% de brita zero e 10% de areia média. O primeiro grupo foi adensado de forma já comentada, 3 camadas com 15 golpes de soquete cada (manual), e outro grupo no compactador marshall, utilizado em misturas de concreto asfáltico. O adensamento com o soquete marshall foi executada com energia normal e consistiu em 45 golpes divididos em 3 camadas. A Figura 23 exibe os resultados obtidos.

Verifica-se que as amostras submetidas à compactação marshall, devido a maior energia empregada, apresentou resistências mecânicas superiores às amostras compactadas manualmente. Entretanto, com a redução dos vazios causada pela elevada energia de compactação, a permeabilidade das amostras adensadas com o soquete marshall reduz 20% em relação aos adensados manualmente.

Figura 23 - Resultados de Castro (2015): Adensamento manual x marshall



Fonte: Adaptado de Castro (2015).

Schaefer et al. (2006) realizaram estudos sobre o adensamento em concretos com diferentes relações a/c, teores de agregados e composições granulométricas. Corpos de prova cilíndricos foram moldados e compactados com 25 golpes por camada, sendo 3 camadas por CP. Em seguida, as amostras eram levadas à mesa vibratória onde eram vibradas por 5 segundos. A maneira de se ter energias de adensamento distintas foi a utilização de mesas vibratórias com amplitudes diferentes. Para um adensamento chamado de regular, a mesa vibratória possuía uma amplitude de vibração de 0,000127 mm. Já para uma energia baixa, a amplitude era de 0,0000864 mm. Os corpos de prova foram rompidos à compressão axial e à tração por compressão diametral e analisados frente a ciclos de gelo e degelo e as suas massas unitárias. Os autores concluíram que quanto menor a energia de adensamento maior a variação nos resultados encontrados, ou seja, os resultados das amostras adensadas com energia regular se correlacionam melhores que os submetidos a energia baixa. Ainda, para os maiores índices de vazios, menores são as diferenças na resistência para as duas energias de adensamento.

O adensamento das amostras com 45 golpes de haste metálica divididos em 3 camadas e posterior vibração apresenta melhor desempenho quanto a resistência

mecânica sem prejudicar a condutividade hidráulica do concreto permeável (SULEIMAN et al., 2006).

Höltz (2011) analisou a interferência do adensamento em amostras de concreto permeável quanto a resistência à compressão axial. Para isso, moldou corpos de prova com teor de agregado $M = 4$ e relação a/c de 0,30. A composição dos agregados foi formada por 93% de brita um e 7% de areia. O autor estudou três formas de adensar:

- Por meio de mesa vibratória, onde a vibração é intensa;
- Com vibrador tipo agulha com diâmetro de 25 mm, considerada uma vibração normal e;
- Sem vibrar.

A Tabela 11 apresenta os resultados de resistência à compressão aos 28 dias para cada uma das formas de adensamento.

Tabela 11 - Efeito de diferentes formas de adensamento

Tipo de vibração	Resistência à compressão axial (MPa)
Sem vibrar	4,82
Vibrador tipo agulha com diâmetro de 25 mm	5,26
Mesa vibratória (10 segundos por camada)	6,99

Fonte: Adaptado de Höltz (2011).

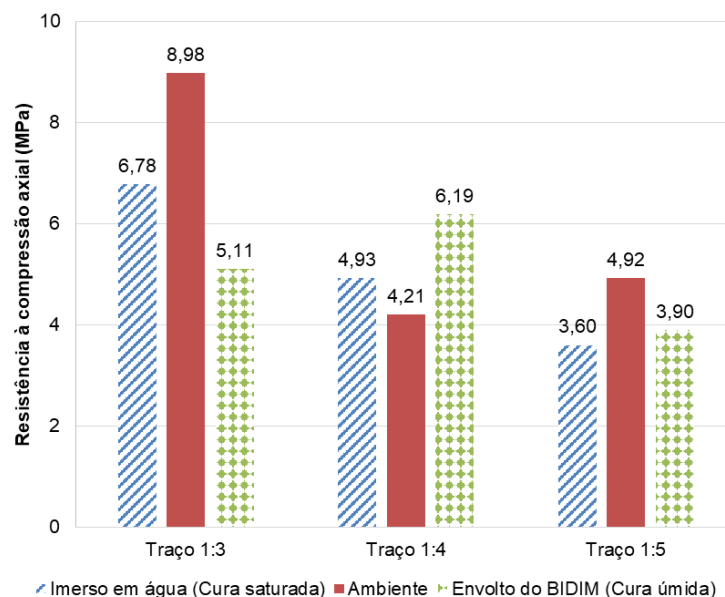
De acordo com este estudo, o adensamento por mesa vibratória pode ser considerado mais eficiente, quando comparado ao vibrador do tipo agulha, ou à não vibração. Trata-se de um pequeno tempo de vibração em mesa vibratória, entre 10 e 30 segundos, caso contrário pode haver segregação dos constituintes do concreto permeável.

Costa et al. (2018) moldaram placas de concreto adensadas com rolo de 48,8 kg/m, simulando o adensamento em campo, de onde extraíram amostras e compararam com corpos de prova moldados convencionalmente, adensadas com compactador padrão proctor em duas camadas de vinte golpes cada. Os autores

concluíram que resistência à compressão axial das amostras adensadas com rolo é inferior a adensada com o proctor. Esse fato foi relacionado com a redução da porosidade das amostras quando adensadas com o método proctor.

Schwetz et al. (2015) estudaram o processo de cura das amostras de concreto permeável. Foram estudados os traços 1:3, 1:4 e 1:5, todos com relação água/cimento de 0,30. O agregado utilizado foi o pedrisco (brita zero). Os autores analisaram a resistência à compressão do concreto permeável com cura saturada, cura ambiente e cura úmida. Para estabelecer cura úmida as amostras foram envolvidas por um geotêxtil (BIDIM) e a cura saturada foi implementada mantendo os CPs submersos. A Figura 24 expõe os resultados encontrados pelos autores.

Figura 24 - Resultados obtidos por Schwetz et al. (2015)



Fonte: Adaptado de Schwetz et al. (2015).

Em um primeiro momento não é possível definir um comportamento padrão, pois os resultados de resistência à compressão foram dispersos, de modo que não se encontra relação entre as resistências e o processo de cura que as amostras foram submetidas. Contudo, o processo de cura saturada foi o único que reduziu a resistência do concreto ao passo que aumentou-se o teor de agregados, sendo esse o comportamento esperado para o material.

Na Tabela 12 estão as principais conclusões encontradas na revisão bibliográfica dos trabalhos que serviram de embasamento para o prosseguimento desta pesquisa.

Tabela 12 - Resumo das principais conclusões da revisão bibliográfica

(continua)

Autor	Traço	Cimento e agregados	Adensamento e cura	Principais conclusões
Brito e Santos (2010)	16 distintos, variando relação a/c e teor de agregados	CP II Z B0	2 camadas de 12 golpes cada Cura com submersão de água e cal hidratada	- Aumento da relação a/c evolui a resistência - Elevação do teor de agregados diminui a resistência
Monteiro (2010)	T1 - a/c = 0,26, M = 3 T2 - a/c = 0,30, M = 4	CP II F B0	Mesa vibratória em 3 camadas de 30s cada Cura não informada	Resistências à compressão - T1: 9,3 MPa - T2: 10,7 MPa
Höltz (2011) análise "A"	12 distintos, variando relação a/c e teor de agregados	CP V B1	2 camadas de 12 golpes cada Cura em câmara úmida	- Aumento da relação a/c evolui resistência - Elevação do teor de agregados diminui a resistência
Höltz (2011) análise "B"	a/c = 0,30, M = 4	CP V 3 composições de agregados: 100% B1, 100% B0 e 93% B1 + 7% areia	2 camadas de 12 golpes cada Cura em câmara úmida	- B0 (8,54 MPa) atribui ao concreto permeável maior resistência à compressão que B1 (3,46 MPa) - Adição de areia eleva a resistência (18%)
Höltz (2011) análise "C"	a/c = 0,30, M = 4	CP V 93% B1 e 7% areia	3 formas: mesa vibratória, vibrador tipo agulha e sem vibrar	Resistências à compressão - mesa vibratória: 6,99 MPa - tipo agulha: 5,26 MPa - sem vibrar: 4,82 MPa
Batezini (2013)	a/c = 0,30, M = 4,44	CP II RS 3 composições granulométricas distintas	3 camadas de 15 golpes cada + 10s em mesa vibratória Cura em câmara úmida	- Relação a/c e teor de agregados possuem grande influência nas resistências mecânicas - Alteração na granulometria provocou pouca variação nos resultados

Tabela 12 - Resumo das principais conclusões da revisão bibliográfica

(continuação)

Autor	Traço	Cimento e agregados	Adensamento e cura	Principais conclusões
Sandoval (2014)	$a/c = 0,34$, $M = 3,26$	CP II F 3 composições de agregados: 100% B0, 100% B1 e 50% de cada	Adensamento na mesa de consistência, em 2 camadas com 20 rotações no equipamento por camada	Resistências à compressão - 100% B0: 9,4 MPa - 100% B1: 9,9 MPa - 50% de cada: 19,1 MPa
Castro (2015) análise "A"	T1 - $a/c = 0,30$, $M = 3$ T2 - $a/c = 0,30$, $M = 4$	CP IV B0	3 camadas de 15 golpes cada Cura submersa em água	Resistências à compressão - T1: 4,8 MPa - T2: 2,3 MPa
Castro (2015) análise "B"	$a/c = 0,30$, $M = 4$	CP IV B0	Manual e marshall, sendo ambos com 3 camadas de 15 golpes cada Cura com submersão em água	- Adensamento marshall resultou em resistências superiores - Permeabilidade do adensamento marshall 20% menor que o adensamento manual
Castro (2015) análise "C"	$a/c = 0,30$, $M = 4$	CP IV 2 composições granulométricas: 100% B0 e 90% B0 e 10% areia	3 camadas de 15 golpes cada Cura submersa em água	Resistências à compressão - 100% B0: 2,3 MPa - 90% B0 e 10% areia: 4,6 MPa
Quadrelli et al. (2015)	T1 - $a/c = 0,30$, $M = 4,15$ T2 - $a/c = 0,50$, $M = 4,15$	CP V B0	Não informados	Resistências à compressão - T1: 10 MPa - T2: 20 MPa
Schwetz et al. (2015)	T1 - $a/c = 0,30$, $M = 3$ T2 - $a/c = 0,30$, $M = 4$ T3 - $a/c = 0,30$, $M = 5$	Tipo de cimento não informado B0	Adensamento com rolo 3 formas de cura: saturada, ambiente e úmida	- Resultados dispersos - Cura saturada apresentou resultados mais coerentes
Santos (2017) análise "A"	T1 - $a/c = 0,33$, $M = 3$ T2 - $a/c = 0,30$, $M = 3,5$ T3 - $a/c = 0,33$, $M = 4$	CP V Composição entre B0 e B1	CP cilíndrico 3 camadas de 15 golpes cada + 7s em mesa vibratória e CP prismático 2 camadas de 25 golpes cada + 7s em mesa vibratória Cura em câmara úmida	Resistências à compressão - T1: 15,6 MPa - T2: 11,6 MPa - T3: 14,6 MPa

Tabela 12 - Resumo das principais conclusões da revisão bibliográfica

(conclusão)

Autor	Traço	Cimento e agregados	Adensamento e cura	Principais conclusões
Santos (2017) análise "B"	a/c = 0,33, M = 3	CP V 2 composições de agregados: uma com B0 e outra peneirando os materiais e formando uma curva granulométrica considerada adequada	CP cilíndrico 3 camadas de 15 golpes cada + 7s em mesa vibratória e CP prismático 2 camadas de 25 golpes cada + 7s em mesa vibratória Cura em câmara úmida	Resistências à compressão - Somente B0: 17,8 MPa - Granulometria considerada adequada: 18,9 MPa
Vieira et al. (2018)	a/c = 0,33, M = 3	CP V Composição entre B0, B1 e resíduo de fresado asfáltico substituindo 30% dos agregados naturais	CP cilíndrico 3 camadas de 15 golpes cada + 7s em mesa vibratória e CP prismático 2 camadas de 25 golpes cada + 7s em mesa vibratória Cura em câmara úmida	- A utilização de resíduo de fresado asfáltico reduziu resistência do concreto permeável e não apresentou comportamento lógico quanto a permeabilidade

Fonte: Elaboração própria.

3 METODOLOGIA

Para cumprir com os objetivos deste trabalho foram desenvolvidos cinco grupos de amostras de concreto permeável produzidas em laboratório, além de duas vagas em um estacionamento com estrutura permeável, revestido com concreto permeável oriundo de usina de onde realizou-se a extração de mais um grupo de amostras, totalizando seis grupos de amostras.

Entre os grupos de amostras estudados, há variação no cimento utilizado, CP II Z e CP V, substituição de parte do agregado gráudo natural por resíduo de fresado asfáltico e métodos diferentes de mistura, com um grupo de amostras com concreto usinado e o restante produzido em laboratório. Ainda, um grupo de amostras tiveram seus corpos de prova extraídos do estacionamento, de acordo com a NBR 7680/2015, que possui métodos de adensamento e cura de campo. A Tabela 13 resume os grupos e suas peculiaridades, ressalta-se que todos os grupos de amostras possuem o mesmo traço, e que este será especificado posteriormente.

Tabela 13 - Resumo dos grupos de amostras a serem analisados

Identificação	Procedimento de mistura	Métodos de adensamento e cura	Materiais utilizados	
			Cimento	Agregados
U - CP II Z	Usina	Laboratório	CP II Z	Somente natural
U Ext - CP II Z	Usina	Campo	CP II Z	Somente natural
Lab - CP II Z	Laboratório	Laboratório	CP II Z	Somente natural
Lab - CP II Z - F	Laboratório	Laboratório	CP II Z	Natural e fresado
Lab - CP V	Laboratório	Laboratório	CP V	Somente natural
Lab - CP V - F	Laboratório	Laboratório	CP V	Natural e fresado

Fonte: Elaboração própria.

A identificação de cada grupo de amostra se inicia pela sua produção, sendo “U” para o grupo de amostras produzido com concreto usinado e adensado conforme o método de laboratório, “U Ext” para o grupo de amostras extraídas do estacionamento que possui concreto usinado e métodos de adensamento e cura de campo, ou “Lab” para os grupos que tiveram suas amostras misturadas, adensadas e curadas de acordo com os métodos de laboratório. Posteriormente, revela-se o tipo

de cimento. Os grupos de amostras que terão parte do agregado substituído por resíduo de fresado asfáltico apresentam a letra “F” ao final da identificação.

A intervenção do procedimento de adensamento e cura realizado em campo, no estacionamento, e em laboratório foi determinada por meio dos resultados encontrados para os grupos “U - CP II Z” e “U Ext - CP II Z”, pois foram amostras produzidas com o mesmo concreto (oriundo de usina), porém o primeiro grupo adensado e curado conforme procedimento de laboratório e o segundo de acordo com o método realizado no estacionamento, como será visto a seguir.

Comparando os resultados encontrados para os grupos “U - CP II Z” e “Lab - CP II Z” é possível determinar a influência do processo de mistura nas propriedades do concreto permeável, visto que o primeiro grupo tem sua produção em usina e o segundo em laboratório.

Diversos trabalhos (Höltz, 2011; Quadrelli et al. (2015); Melo et al., 2016; Melo et al., 2017; Porte, 2017; Santos, 2017) adotaram o CP V-ARI para a produção do concreto permeável justificando que, para sua utilização como revestimento de pavimentos, sua maior resistência inicial permite a liberação do tráfego logo após a execução. Entretanto, as concreteiras da região de Santa Maria não trabalham com o CP V-ARI, sendo mais comum a utilização do CP II Z. Dessa forma, deu-se a necessidade de saber as diferenças em utilizar o CP II Z ao invés do CP V. A análise mecânica e de permeabilidade dos grupos “Lab - CP II Z” e “Lab - CP V” apresentam as diferenças impostas pela utilização de um ou outro cimento.

Os resultados encontrados para os grupos “Lab - CP II Z - F” e “Lab - CP V - F” comparados com seus semelhantes sem a adição do fresado, exibirão a viabilidade ou não de reaproveitar o resíduo como agregado em concreto permeável. O fresado asfáltico foi introduzido nas misturas “Lab - CP II Z - F” e “Lab - CP V - F” substituindo 30% da brita 0 na composição dos agregados graúdos. Essa porcentagem é baseada no trabalho de Vieira et al. (2018).

Os ensaios realizados para cada grupo de amostras, bem como em quais idades e quantos corpos de prova estão apresentados na Tabela 14. Também foi realizado o ensaio para determinação da permeabilidade em campo, nas vagas de estacionamento, em 3 pontos distintos, aos 28 dias após a execução.

Tabela 14 - Ensaios realizados, idades e número de corpos de prova

Ensaio	Idade	Grupo de amostras					
		U - CP II Z	U Ext - CP II Z	Lab - CP II Z	Lab - CP II Z - F	Lab - CP V	Lab - CP V - F
Massa específica	28	12	3	12	12	12	12
Índice de vazios	28	12	3	12	12	12	12
Vazios comunicantes	28	3	-	3	3	3	3
Resistência à compressão axial	7	4	-	4	4	4	4
	28	4	3	4	4	4	4
	91	4	-	4	4	4	4
Resistência à tração por compressão diametral	7	4	-	4	4	4	4
	28	4	-	4	4	4	4
	91	4	-	4	4	4	4
Resistência a tração na flexão	7	3	-	3	3	3	3
	28	3	-	3	3	3	3
	91	-	-	3	3	3	3
Módulo de elasticidade à compressão	28	-	-	5	5	5	5
Resistência à degradação por impacto e abrasão	28	3	-	3	3	3	3
Permeabilidade com carga variável	28	3	-	3	3	3	3
Permeabilidade com carga constante	28	3	-	3	3	3	3

Fonte: Elaboração própria.

Observa-se na Tabela 14 que foram realizados poucos ensaios com grupo de amostras extraídos do estacionamento (U Ext - CP II Z), pois a extração de um número maior de corpos de prova danificaria o pavimento.

O presente trabalho foi realizado em conjunto com a pesquisa de Lamberti (2019), pois a estrutura utilizada no estacionamento concedeu dados para os dois estudos. Antes de se executar o estacionamento, foi realizada a dosagem do concreto permeável utilizado como revestimento, de maneira experimental, avaliando 6 traços distintos, apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Traços avaliados por Lamberti (2019)

Traço	Relação água/cimento	Relação cimento/agregado	Proporção dos agregados (%)		
			Areia	Brita 0	Brita 1
REF	0,36	1:4	0	100	0
B80			0	80	20
B60			0	60	40
BA			5	95	0
B80A			5	76	19
B60A			5	57	38

Fonte: Adaptado de Lamberti (2019).

Lamberti (2019) realizou ensaios de resistência mecânica, índice de vazios, permeabilidade, massa específica, perda de massa por abrasão e perda de massa pelo ciclo gelo-degelo. Os resultados encontrados estão expostos na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados encontrado por Lamberti (2019)

Traço	Índice de vazios (%)	Permeabilidade Carga constante (cm/s)	Compressão axial (MPa)	Tração na flexão (MPa)	Massa esp. seca (kg/m ³)	Perda por abrasão (%)	Perda por congelamento (%)
REF	29,05	1,30	7,72	2,19	1593,95	0,475	1,39
B80	27,34	1,24	6,88	2,07	1604,49	0,483	1,31
B60	25,81	1,10	11,24	3,05	1684,83	0,331	1,35
BA	26,05	1,27	8,64	2,77	1639,94	0,431	1,46
B80A	24,41	0,97	15,5	3,07	1659,83	0,275	1,47
B60A	23,33	0,99	16,09	2,85	1703,36	0,346	1,25

Fonte: Adaptado de Lamberti (2019).

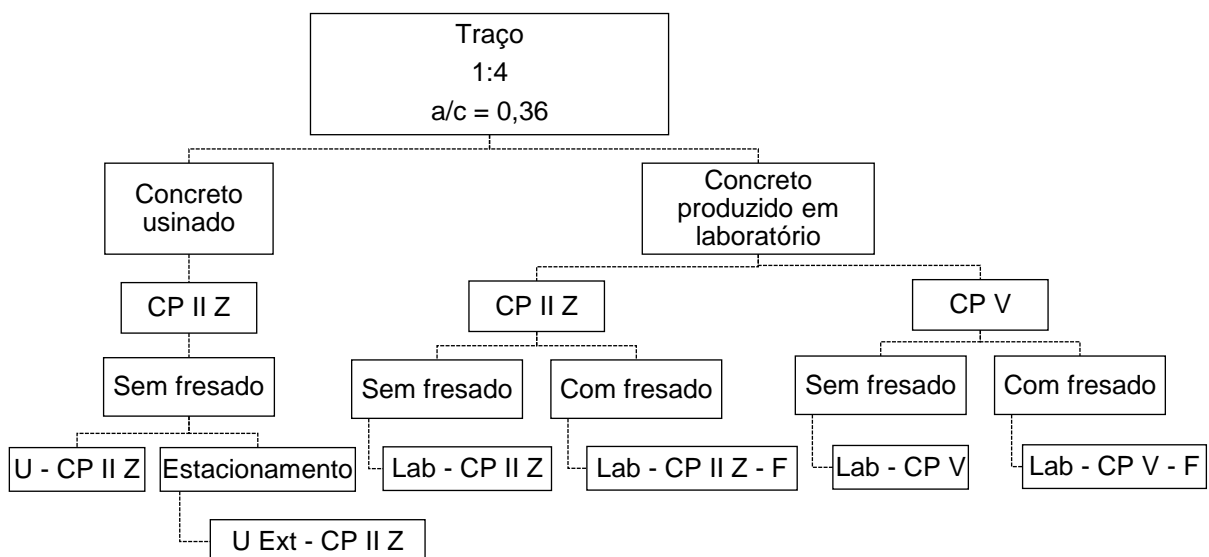
A partir da análise dos resultados encontrados, Lamberti (2019) determinou o traço B80A como o mais adequado para o prosseguimento do trabalho, pois este apresenta a melhor resistência à tração na flexão e a menor perda por abrasão, parâmetros significativos para a utilização do concreto permeável como revestimento em pavimentos. Cabe ressaltar que os outros ensaios apresentaram valores dentro dos limites estabelecidos pelas normas vigentes.

Dessa forma, o traço utilizado em todas as misturas deste trabalho foi com relação água/cimento de 0,36 e teor de agregado M = 4. A proporção dos agregados é de 5% de areia, 76% de brita 0 e 19% de brita 1, para as misturas que não possuem substituição parcial de brita 0 por resíduo de fresado asfáltico. Quando há substituição,

a proporção de areia e brita 1 se mantém em 5% e 19% respectivamente, brita 0 passa a ser 53,2% e o fresado ocupa 22,8% dos agregados. Importante lembrar que o resíduo de fresado asfáltico substitui 30% da brita 0 na composição granulométrica. O consumo de cimento do traço adotado é de 324,49 kg/m³.

Na Figura 25 exibe-se um organograma resumo da metodologia, onde apresenta-se o traço utilizado, a origem do concreto, usinado ou produzido em laboratório, o tipo de cimento, CP II Z ou CP V, e a utilização ou não de fresado asfáltico. Por fim, aparecem os grupos estudados.

Figura 25 - Organograma resumo da metodologia



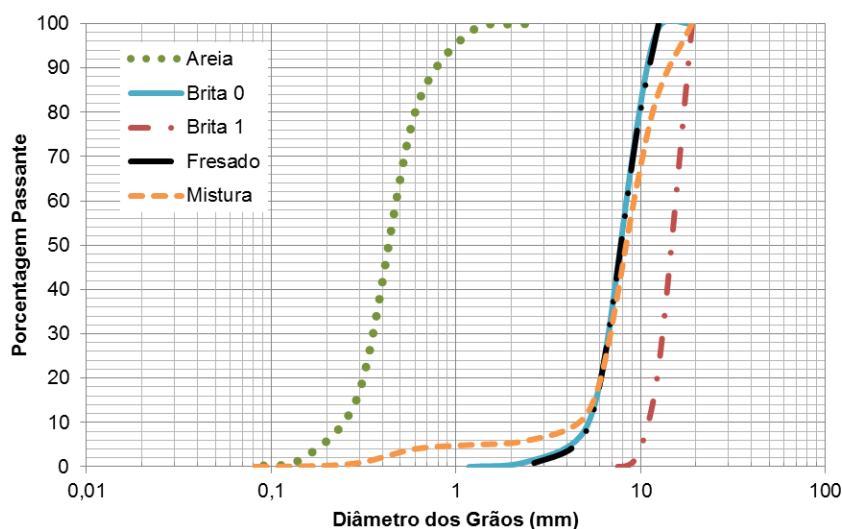
Fonte: Elaboração própria.

3.1 MATERIAIS

O agregado graúdo natural utilizado para a produção das amostras de concreto permeável é proveniente do processo de britagem da empresa Conpasul, localizada em Itaara/RS. O material pétreo é classificado como Riodacito (rocha vulcânica ácida). O resíduo de fresado asfáltico que foi utilizado como parte do agregado graúdo em dois grupos de amostras é oriundo da RS 400 em Candelária/RS, este foi peneirado para conter granulometria semelhante à da brita 0. A areia utilizada é natural do Rio Vacacaí, na região do Passo do Verde em Santa Maria/RS. Na Figura 26 apresentam-se as curvas granulométricas dos agregados individualmente e da composição final

dos agregados. Observa-se que a granulometria do fresado está sobreposta à da brita 0, dessa forma a substituição da brita zero pelo resíduo não gera diferença significativa na granulometria final da mistura, sendo assim, apresenta-se uma única curva granulométrica para a composição final, independentemente de haver ou não fresado na mistura. Na Tabela 17 exibe-se a caracterização física dos agregados.

Figura 26 - Curva granulométrica dos agregados e da mistura



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 17 - Caracterização física dos agregados

Propriedades	Areia	Brita 0	Brita 1	Fresado
Módulo de finura	2,03	6,13	6,96	6,19
Diâmetro máximo característico (mm)	1,2	12,5	19	12,5
Massa específica (g/cm ³)	2,64	2,52	2,58	2,51
Massa unitária (g/cm ³)	1,48	1,29	1,27	1,32
Índice de volume de vazios (%)	44,0	48,8	50,2	45,3
Perda por abrasão Los Angeles (%)	-	13,81	13,29	-
Absorção de água (%)	-	1,27	1,21	-

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com a classificação quanto a penetração, determinada a partir da NBR 6576/2007, o ligante do resíduo de fresado asfáltico é um CAP 50-70. O teor de

ligante do fresado, determinado por meio do ensaio de Rotarex, conforme a norma do DNER-ME 053/1994, é de 6,67%.

Conforme apresentado anteriormente, dois tipos de cimentos foram utilizados no desenvolvimento deste trabalho. A Tabela 18 apresenta os resultados dos ensaios físicos dos cimentos CP II Z – 32 – RS e CP V – ARI.

Tabela 18 - Propriedades físicas dos cimentos utilizados

Ensaio		CP II Z	CP V
Massa específica (g/cm ³)		3,06	3,10
Expansibilidade à quente (mm)		0,6	0,5
Tempo de pega (min)	Início	244	238
	Fim	306	299
Água de consistência (%)		28,5	30,0
Finura na peneira #200 (%)		0,7	0,0
Finura na peneira #325 (%)		4,6	0,6
Blaine (cm ² /g)		4257	4986
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	28,1	24,1
	3 dias	31,7	35,4
	7 dias	-	40,4

Fonte: Votorantim Cimentos.

3.2 MOLDAGENS

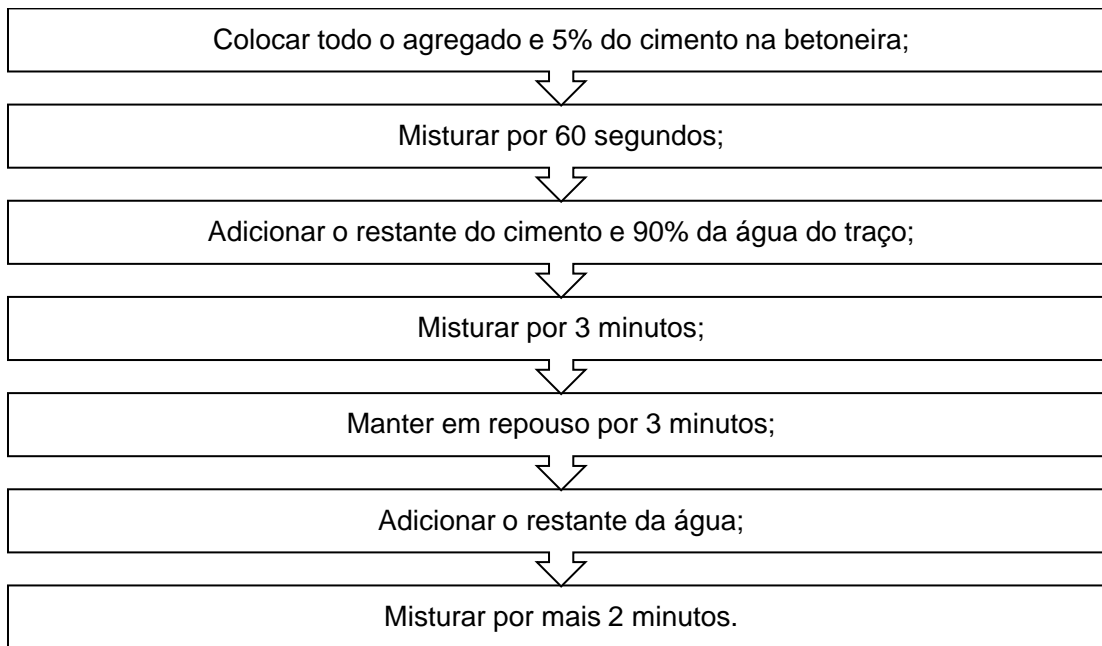
Para cada grupo de amostras foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm e prismáticos de 10 x 10 x 40 cm. Os moldes utilizados foram limpos e revestidos internamente com desmoldante. As amostras extraídas eram cilíndricas de 10 x 15 cm, pois a espessura do revestimento de concreto permeável no estacionamento possui 15 cm, como será visto na sequência.

3.2.1 Método de Mistura em Laboratório

O processo de mistura empregado na presente pesquisa para as amostras produzidas em laboratório será semelhante ao adotado por Batezini (2013), Castro (2015), Melo et al. (2016), Santos (2017), Melo et al. (2017), Porte (2017) e Melo (2017) e segue a sequência da Figura 27. Além disso, o tempo de mistura deste método soma 5 minutos após a adição da água e, conforme visto na revisão de

literatura, Sandoval (2014) considera que este é o tempo mais adequado para a homogeneização do concreto permeável. O equipamento utilizado para a realização das misturas foi uma betoneira de eixo inclinado.

Figura 27 - Metodologia adotada para a mistura dos materiais



Fonte: Elaboração própria.

O procedimento de mistura utilizado no laboratório pouco se relaciona com o empregado pelas usinas de concreto, que será discutido a seguir. Conferir as diferenças impostas pelos dois métodos é um dos objetivos desta pesquisa, visto que, conforme comentado, diversos trabalhos aplicam a metodologia apresentada na Figura 27 em suas moldagens realizadas em laboratório.

O ensaio de consistência utilizado é o tátil-visual, pois o ensaio de tronco de cone não se aplica ao concreto permeável, conforme visto na revisão de literatura. A Figura 28 exibe o aspecto que a mistura deve apresentar para considerá-la coesa.

Figura 28 - Mistura coesa



Fonte: Acervo próprio.

3.2.2 Método de Adensamento em Laboratório

Os corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm foram compactados em três camadas de 15 golpes com haste metálica (Figura 29). Já os prismáticos receberam 25 golpes por camada sendo duas camadas por amostra. Ainda, todos os corpos de prova independente da forma foram mantidos por 7 segundos em mesa vibratória. As amostras receberam melhor acabamento da face livre com auxílio de colher de pedreiro. Essa metodologia foi baseada nos trabalhos de Batezini (2013), Santos (2017) e Melo et al. (2017).

Figura 29 - Adensamento com haste metálica



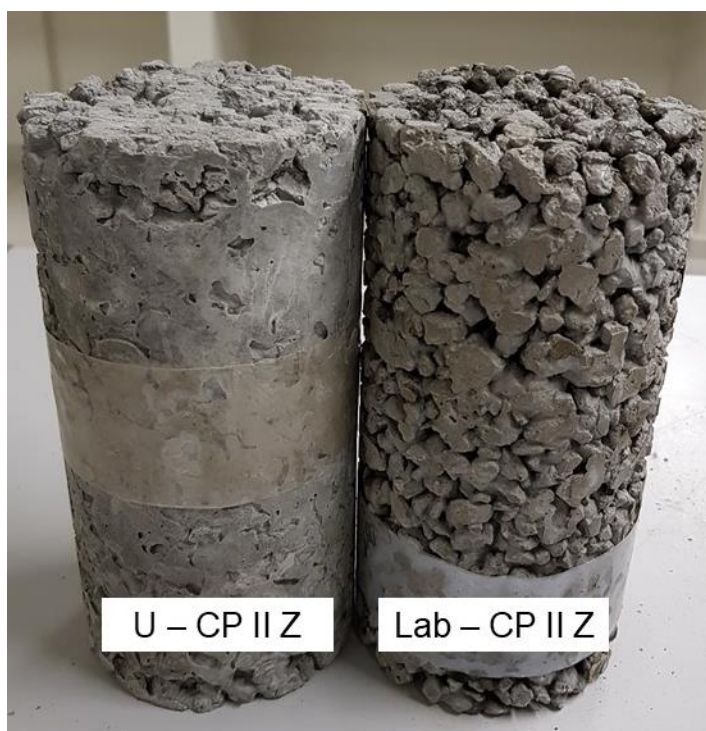
Fonte: Acervo próprio.

3.2.3 Método de Cura em Laboratório e Desmoldagem

Como se trata de um concreto sem adição de finos, as amostras não possuem estrutura sólida para serem desmoldadas em apenas 24 horas como o concreto convencional. Em vista disso, a desmoldagem dos corpos de prova foi realizada após 48 horas da execução das amostras. Enquanto moldados, os corpos de prova foram molhados, mesmo envoltos pelo molde, a cada 8 horas. Posteriormente, os corpos de prova eram devidamente identificados, medidos, pesados e logo após levados para a câmara úmida, onde permaneceram para a cura até a idade dos ensaios.

Na Figura 30 demonstra-se a diferença no aspecto final após a desmoldagem entre as amostras do grupo oriundo de usina, U – CP II Z, e as amostras dos grupos misturados em laboratório, representados pelo grupo Lab - CP II Z.

Figura 30 - Diferença de aspecto entre mistura usinada e misturas de laboratório



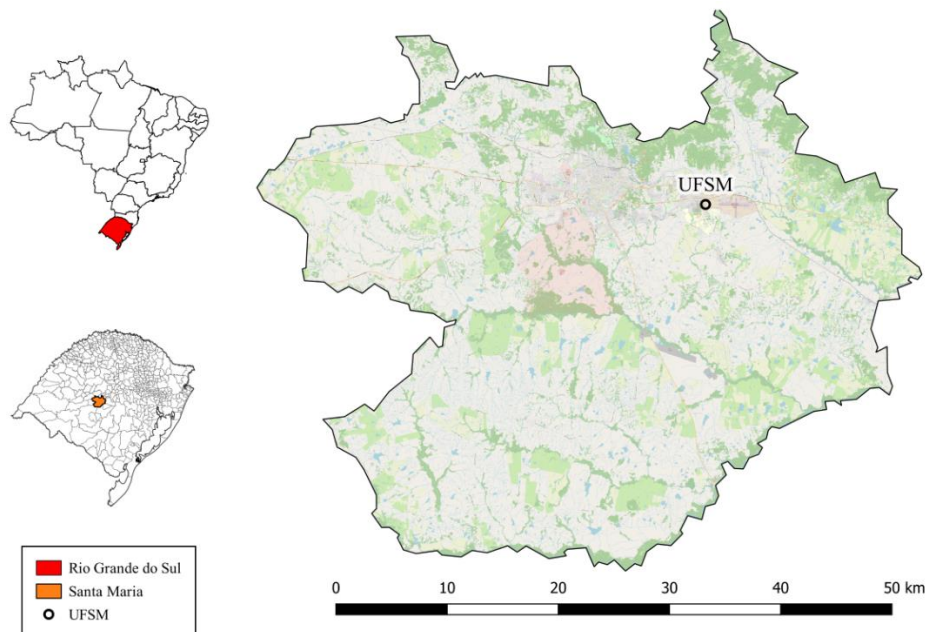
Fonte: Acervo próprio.

3.3 ESTACIONAMENTO

O estacionamento é localizado no campus da Universidade Federal de Santa Maria (Figura 31) próximo ao prédio 09E e possui duas vagas revestidas com o

concreto permeável, com 2,5 x 5,0 metros cada vaga. (Figura 32). Na laje do estacionamento foi realizado ensaio de permeabilidade em campo, aos 28 dias, bem como as extrações das amostras do grupo “U Ext – CP II Z”. Na Figura 33 mostra-se um corpo de prova extraído do estacionamento, antes do procedimento de regularização das faces.

Figura 31 - Campus da UFSM em SM/RS, local de implantação do estacionamento



Fonte: Elaboração própria.

Figura 32 – Laje do estacionamento



Fonte: Acervo próprio.

Figura 33 - Corpo de prova extraído



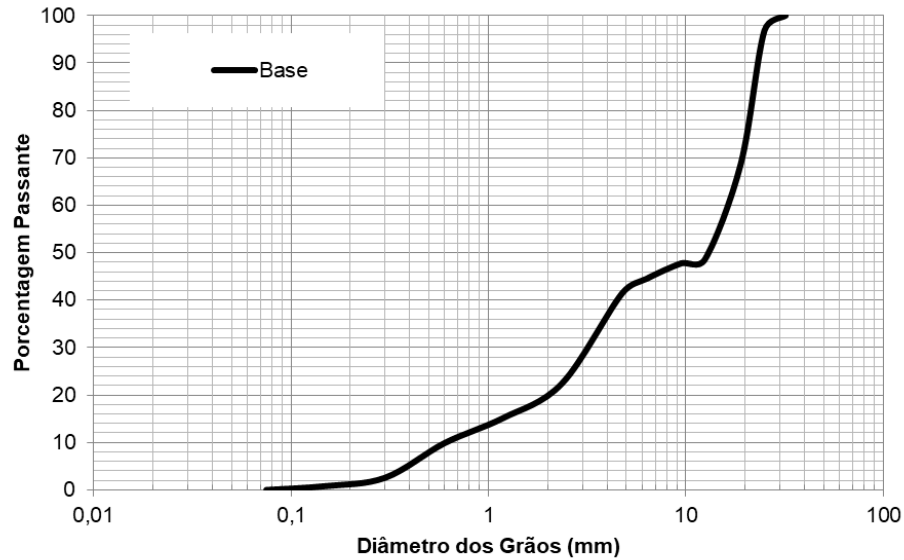
Fonte: Acervo próprio.

A comparação entre os resultados de permeabilidade obtidos no estacionamento, de acordo com o ensaio de campo, e os determinados com o procedimento em laboratório para o grupo “U - CP II Z” permitiu verificar se os ensaios de permeabilidade utilizados em laboratório possuem representatividade com a capacidade de infiltração encontrada no campo.

3.3.1 Materiais

A Figura 34 demonstra a curva granulométrica e a Tabela 19 as propriedades físicas do material utilizado como base do estacionamento. Ressalta-se que a camada de base do pavimento possui capacidade drenante, atuando como reservatório quando o solo está saturado. O concreto permeável utilizado como revestimento foi o mesmo utilizado para produzir os corpos de prova do grupo de amostras “U – CP II Z”.

Figura 34 - Granulometria do material de base do estacionamento



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 19 - Propriedades físicas do material de base

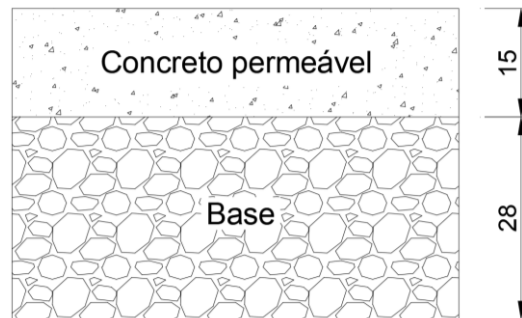
Propriedades	Base
Módulo de finura	5,91
Diâmetro máximo característico (mm)	25,0
Massa específica (g/cm ³)	2,51
Massa unitária (g/cm ³)	1,44
Índice de volume de vazios (%)	42,5
Perda por abrasão Los Angeles (%)	9,66
Absorção de água (%)	1,14

Fonte: Elaboração própria.

3.3.2 Projeto e Execução

O dimensionamento do pavimento foi realizado seguindo os critérios da IP 07/2004 (PMSP, 2004) através do software DimPav 1.0 - maiores detalhes são encontrados em Lamberti (2019) -, e resultou na estrutura apresentada na Figura 35. A estrutura possui uma manta de geotêxtil (bidim) acima do subleito para evitar que os finos do solo contaminem e preencham os vazios da camada de base. O pavimento possui declividade de 4,58%.

Figura 35 - Camadas e espessuras, em cm, da estrutura do estacionamento



Fonte: Elaboração própria.

3.3.2.1 Método de Mistura em Usina: Central Dosadora

Conforme comentado anteriormente, o concreto permeável utilizado no estacionamento é oriundo de usina, misturado com caminhão betoneira. Nesse caso, a mistura é realizada em centrais dosadoras, conforme a NBR 7212/2012. A norma estabelece que o limite de velocidade de mistura da betoneira seja de 14 ± 2 rpm. O trajeto percorrido pelo caminhão somado ao tempo de espera pelo início do lançamento do concreto durou cerca de 45 minutos, nesse período o concreto permaneceu em homogeneização. Ressalta-se que este tempo está de acordo com a normativa. Salienta-se que o concreto foi misturado em apenas uma única betonada, totalizando 5 m^3 . Na Figura 36 demonstra-se o descarregamento do caminhão, assim como o espalhamento do concreto para posterior adensamento.

Figura 36 - Lançamento e espalhamento do concreto usinado



Fonte: Acervo próprio.

3.3.2.2 Métodos de Adensamento e Cura em Campo

O adensamento e o acabamento da laje do estacionamento foram realizados com régua vibratória em uma única camada, como pode ser visto na Figura 37. A concretagem foi realizada no fim da tarde de um dia nublado, com umidade alta e temperatura amena. Para uma cura adequada do concreto, a laje foi mantida sob lona durante as primeiras 96 horas após a execução, sendo que uma vez por dia era umedecida. Após esse período, a cura foi ambiente.

Figura 37 - Utilização da régua vibratória



Fonte: Acervo próprio.

3.4 ENSAIOS

A massa específica e o índice de vazios foram determinados de acordo com as Equações 1 e 2, respectivamente, adaptadas da ASTM C1754M/2012. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos para realizar os ensaios. Todos os grupos de amostras tiveram sua massa específica e seu índice de vazios medidos, aos 28 dias.

$$M_{esp} = \frac{W_{seco}}{Vol} \quad (1)$$

Sendo:

M_{esp} : Massa específica, em kg/m³;

W_{seco} : Peso da amostra seca, em kg;

Vol : Volume da amostra, em m³.

$$V_r = 1 - \left(\frac{W_{seco} - W_{sub}}{\rho_w \times Vol} \right) \quad (2)$$

Sendo:

V_r : Índice de vazios;

W_{seco} : Peso da amostra seca, em kg;

W_{sub} : Peso da amostra submersa, em kg;

ρ_w : Massa específica da água, em kg/m³;

Vol : Volume da amostra, em m³.

O procedimento para determinação dos vazios comunicantes foi de acordo com a AFNOR NF P 98-254-2/1993. O ensaio consiste em verificar a quantidade de água que penetra no corpo de prova. Para isso as laterais e a face inferior da amostra devem ser impermeabilizadas. O parâmetro é calculado através da Equação 3. Foram ensaiados 3 CPs para cada grupo de amostras ensaiado, aos 28 dias. Não foi determinado para o grupo de amostras extraídas.

$$V_c = \frac{P}{A \times \left(h - \frac{Dmáx}{20} \right)} \times 100 \quad (3)$$

Sendo:

V_c : Vazios comunicantes, em %;

P : Peso de água que penetra no corpo de prova, em g;

A : Área da seção da amostra, em cm²;

h : Altura da amostra, em cm;

$Dmáx$: Diâmetro máximo do agregado na mistura.

3.4.1 Ensaios Mecânicos

A seguir serão descritos os ensaios e os procedimentos utilizados durante a pesquisa para determinação das propriedades mecânicas do concreto permeável. Com os resultados, foi determinado se os concretos permeáveis desenvolvidos estão de acordo com a NBR 16416/2015, que exige 2 MPa de resistência à tração na flexão.

3.4.1.1 Resistência à Compressão Axial

A execução do ensaio de resistência à compressão axial seguiu as orientações da NBR 5739/2007. Todos os grupos de amostras foram ensaiados à compressão axial. Os corpos de prova moldados com o método de laboratório são cilíndricos com 10 x 20 cm. Os CPs extraídos tinham 10 x 15 cm e tanto as correções estabelecidas pela NBR 5739/2007 devido a relação altura/diâmetro, quanto as previstas na NBR 7680/2015 devido a extração foram empregadas para determinar a resistência à compressão axial dessas amostras. Ressalta-se que durante a execução do ensaio foram utilizados discos de neoprene para regularizar as faces dos CPs. O ensaio foi realizado aos 7, 28 e 91 dias, exceto o grupo “U Ext -CP II Z” que foi ensaiado somente aos 28 dias. Em cada idade foram ensaiados 4 CPs, salvo o grupo de amostras extraídas que tiveram 3 CPs ensaiados. A resistência foi determinada pela Equação 4. Na Figura 38 pode ser visto a execução do ensaio.

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

Sendo:

f_c : Resistência à compressão, em MPa;

F : Força máxima alcançada, em N;

D : Diâmetro da amostra em mm.

Figura 38 - Execução do ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Acervo próprio.

3.4.1.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Baseado na NBR 7222/2011, a resistência à tração por compressão diametral foi calculada de acordo com a Equação 5. O grupo de amostras “U Ext - CP II Z” não foi ensaiado. Os outros foram ensaiados aos 7, 28 e 91 dias e sua representação está na Figura 39. Quatro CPs de 10 x 20 cm foram utilizados para cada idade de ensaio.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \times F}{\pi \times d \times l} \quad (5)$$

Sendo:

$f_{ct,sp}$: Resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

F : Força máxima obtida no ensaio, em N;

d : Diâmetro do corpo de prova, em mm;

l : Comprimento do corpo de prova, em mm.

Figura 39 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Acervo próprio.

3.4.1.3 Resistência à Tração na Flexão

Ao considerar a pavimentação de ciclovias, calçadas e vias de tráfego leve, por exemplo, o ensaio de resistência à tração na flexão é imprescindível, pois a NBR 16416/2015 estipula valores mínimos de resistência à tração na flexão para a aplicação do material em estudo.

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado de acordo com a NBR 12142/2010 e os valores de resistência calculados com a Equação 6. Para a realização deste ensaio foram utilizados 3 CPs para cada idade, sendo ensaiados aos 7, 28 e 91 dias, exceto o grupo “U – CP II Z”, que foi ensaiado somente aos 7 e 28 dias, e o grupo “U Ext – CP II Z” que não teve sua resistência à tração na flexão determinada. Os CPs utilizados neste ensaio são prismáticos de 10 x 10 x 40 cm, como pode ser visto na Figura 40.

$$f_{ct,f} = \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad (6)$$

Sendo:

$f_{ct,f}$: Resistência à tração na flexão, em MPa;

- F : Força máxima registrada na máquina de ensaio, em N;
 l : Dimensão do vão entre apoios, em mm;
 b : Largura média do corpo de prova, em mm;
 d : Altura média do corpo de prova, em mm.

Figura 40 - Ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Acervo próprio.

3.4.1.4 Módulo de Elasticidade

O ensaio foi realizado conforme a NBR 8522/2017. Foi determinado o módulo de elasticidade dos grupos de amostras “Lab – CP II Z”, “Lab – CP II Z - F”, “Lab – CP V” e “Lab – CPV – F”. Foram ensaiados 5 CPs cilíndricos de 10 x 20 cm para cada um dos grupos de amostras citados, aos 28 dias.

A norma permite a realização do ensaio de duas maneiras, tensão fixa ou deformação específica fixa. O método adotado para a presente pesquisa é o de tensão fixa. Com a Equação 7, calculou-se o módulo de elasticidade.

$$E_{ci} = \left(\frac{\alpha_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \right) \times 10^{-3} \quad (7)$$

Sendo:

E_{ci} : Módulo de elasticidade, em GPa;

α_b : Tensão limite superior, em MPa;

- ε_b : Deformação específica do concreto sob a tensão limite superior;
 ε_a : Deformação específica do concreto sob a tensão de 0,50 MPa.

3.4.1.5 Resistência à Degradação por Impacto e Abrasão

A ASTM C1747/2013 aborda um método específico para determinar a perda de massa de concretos permeáveis devido à degradação por impacto e abrasão. Esse método é aplicável em amostras de concreto permeável com tamanho máximo de agregado de 25 mm. O grupo de amostras extraídas não foi submetido a este ensaio, todos os grupos restantes foram ensaiados. O ensaio foi realizado aos 28 dias.

O ensaio consiste em colocar três CPs cilíndricos de 10 x 20 cm em uma máquina conhecida como *Los Angeles Machine*, que gira em torno do seu eixo com uma velocidade controlada. A normativa estima que os CPs sejam submetidos a 500 rotações, com uma velocidade entre 30 e 33 rotações por minuto. Após as rotações o material foi retirado e peneirado. O material retido na peneira de abertura 25 mm foi pesado e, então, determinou-se a perda de massa comparada ao peso inicial das amostras.

3.4.2 Ensaio Hidráulicos

Foram realizados dois ensaios de permeabilidade em laboratório, sob carga constante e sob carga variável, além do método para determinação em campo. A seguir serão descritos os procedimentos destes ensaios.

3.4.2.1 Permeâmetro de Carga Variável

O ensaio é padronizado pela ACI – 522R/2010 e consiste em determinar o tempo necessário para que o nível de água no equipamento baixe entre alturas conhecidas. Foram ensaiados 3 CPs para cada grupo de amostras, exceto para o grupo de amostras “U Ext – CP II Z”. Os CPs utilizados neste ensaio foram moldados em um tubo de PVC de 10 x 20 cm que encaixa diretamente no equipamento (Figura 41). O ensaio foi realizado aos 28 dias e o coeficiente de permeabilidade foi calculado a partir da Lei de Darcy (Equação 8).

$$k = \frac{A_1 \times L}{A_2 \times t} \times \ln\left(\frac{h_i}{h_f}\right) \quad (8)$$

Sendo:

k : Coeficiente de permeabilidade, em cm/s;

A_1 : Área da sessão da amostra, em cm²;

A_2 : Área do tubo de carga variável, em cm²;

L : Comprimento da amostra, em cm;

t : Tempo, em s;

h_i : Altura inicial, em cm;

h_f : Altura final, em cm.

Figura 41 - Permeômetro de carga variável



Fonte: Acervo próprio.

3.4.2.2 Permeômetro de Carga Constante

O equipamento de ensaio possui um reservatório que mantém o nível de água constante. O método é estabelecido pela NBR 13292/1995 e consiste em permitir a percolação de água no CP durante um tempo previamente definido e determinar o volume de água percolado. A diferença de altura entre o nível de água no reservatório

e o local de saída de água do equipamento é a carga hidráulica. Os corpos de prova ensaiados foram os mesmos utilizados no ensaio sob carga variável e também foram ensaiados aos 28 dias. Na Figura 42 demonstra-se a execução do ensaio. Com a Equação 9 calculou-se a permeabilidade.

$$k = \frac{V \times L}{h \times A \times t} \quad (9)$$

Sendo:

k : Coeficiente de permeabilidade, em cm/s;

V : Volume de água percolado, em cm³;

L : Comprimento do corpo de prova, em cm;

h : Carga hidráulica, em cm;

A : Área da seção da amostra, em cm²;

t : Tempo de percolação de água, em s.

Figura 42 - Permeômetro de carga constante



Fonte: Acervo próprio.

3.4.2.3 Determinação da Permeabilidade em Campo

O ensaio recomendado pela NBR 16416/2015 para determinar a permeabilidade de pavimentos permeáveis em campo é baseado na ASTM

C1701/2009. O ensaio foi realizado no estacionamento revestido com concreto permeável aos 28 dias, sem que este tenha sido utilizado no período.

O procedimento se inicia com uma pré-molhagem no pavimento, posteriormente, deve-se posicionar e vedar com massa de calafetar um anel de infiltração sobre o local de ensaio. Deve-se despejar uma massa de água conhecida no interior do anel e manter o nível entre 10 e 15 mm. O tempo deve ser registrado desde o momento em que a água atinge o pavimento até quando não houver mais água livre sobre a superfície do mesmo. O ensaio está representado na Figura 43. O coeficiente de permeabilidade é determinado com a Equação 10.

$$k = \frac{C \times m}{d^2 \times t} \quad (10)$$

Sendo:

k : Coeficiente de permeabilidade, em mm/h;

C : Fator de conversão de unidades igual a 4583666000;

m : Massa de água infiltrada, em kg;

d : Diâmetro interno do anel de infiltração, em mm;

t : Tempo registrado durante o ensaio, em s.

Figura 43 - Ensaio de permeabilidade em campo



Fonte: Acervo próprio.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados médios para os ensaios descritos na metodologia deste trabalho e, a partir destes, são realizadas avaliações sobre o desempenho de cada grupo de amostras frente as propriedades apuradas dos concretos permeáveis estudados.

Foram realizadas análises estatísticas pelo método do Teste de Hipóteses “t” de Student, chamado de teste-t, comparando os grupos de amostras a fim de verificar se há diferenças significativas entre eles e foi utilizado nível de significância de 5%. Esse método assume a hipótese que a diferença entre os ensaios é nula ($H_0 = 0$), ou seja, de que a diferença entre os grupos confrontados não é significativa, nesse caso o resultado é de que ‘não rejeita-se H_0 ’, se as diferenças forem significativas, resulta que ‘rejeita-se H_0 ’. Foram confrontados os grupos de amostras que são comparáveis, a fim de responder os objetivos do trabalho.

Os resultados encontrados para o ensaio de massa específica, realizado aos 28 dias, estão dispostos na Tabela 20. Verifica-se que os grupos com concreto oriundo de usina, “U – CP II Z” e “U Ext – CP II Z” possuem maiores valores quando comparado àqueles grupos com mistura em laboratório. Através da análise estatística, apresentada na Tabela 21, observa-se que a utilização de CP V ou CP II Z não apresenta diferenças significativas, portanto usar um ou outro cimento não altera essa propriedade do concreto permeável. Quanto a substituição de parte do agregado natural por resíduo de fresado asfáltico, o teste-t também não determinou diferenças entre os grupos “Lab – CP II Z” e o “Lab – CP II Z – F”, entretanto quando utilizado o CPV, há diferenças consideráveis em relação a utilização do resíduo. A diferença entre o “U – CP II Z” e o “U Ext – CP II Z” também não apresenta significância quando analisados pelo teste-t. Ressalta-se que todos os grupos de amostras obtiveram massa específica superior ao mínimo exigido pela NBR 16416/2015, em vigência no Brasil, de 1600 kg/m^3 .

Tabela 20 – Resultados médios do ensaio de massa específica

Grupo de amostras	Massa específica média (kg/m ³)	Desvio padrão (kg/m ³)	Coefficiente de variação (%)
U - CP II Z	2215,04	19,01	0,86
Lab - CP V	1916,31	43,10	2,25
Lab - CP II Z	1924,12	35,02	1,82
Lab - CP V - F	1888,02	40,43	2,14
Lab - CP II Z - F	1936,47	34,12	1,76
U Ext - CP II Z	2120,31	68,66	3,24

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 21 - Teste-t para os resultados de massa específica

Hipótese do teste	H0 = 0 (iguais)	Alpha = 0,05	
Grupos confrontados	Valor - t	Valor - P	Resultado
U - CP II Z x Lab - CP II Z	34,379042	1,5498E-30	Rejeita H0
U Ext - CP II Z x U - CP II Z	2,368968	0,070682	Não rejeita H0
Lab - CP II Z x Lab - CP V	0,727082	0,235250	Não rejeita H0
Lab - CP II Z x Lab - CP II Z - F	-1,323811	0,095624	Não rejeita H0
Lab - CP V x Lab - CP V - F	2,464888	0,008557	Rejeita H0

Fonte: Elaboração própria.

O concreto convencional possui massa específica de 2400 kg/m³, aproximadamente. Sendo assim, os grupos de amostras com concreto permeável usinado possuem cerca de 90% da massa específica de um concreto convencional, enquanto as amostras com concreto permeável moldado em laboratório representam 80%.

Constata-se que os coeficientes de variação dos grupos de amostras para o ensaio de massa específica são baixos, induzindo credibilidade na produção dos corpos de prova de concreto permeável.

Na Tabela 22 exibe-se o índice de vazios dos grupos de amostras estudados, aos 28 dias. Conforme visto no capítulo de revisão bibliográfica, este é um fator importante nos concretos permeáveis e verificou-se que o índice de vazios típico do material está entre 15% e 35%. Percebe-se que os grupos de amostras produzidos em laboratório estão nessa faixa, mas que os dois grupos com concreto oriundo de usina, “U – CP II Z” e U Ext – CP II Z”, apresentam índices de vazios inferiores. A análise estatística pelo teste-t para o índice de vazios é apresentada na Tabela 23.

Tabela 22 - Índices de vazios médios dos grupos de amostras

Grupo de amostras	Índice de vazios médio (%)	Desvio padrão (%)	Coefficiente de variação (%)
U - CP II Z	4,13	0,70	17,06
Lab - CP V	16,93	2,36	13,91
Lab - CP II Z	16,95	1,92	11,32
Lab - CP V - F	18,77	2,13	11,36
Lab - CP II Z - F	16,24	2,11	13,01
U Ext - CP II Z	9,69	2,31	23,79

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 23 - Teste-t para os resultados de índice de vazios

Hipótese do teste	H0 = 0 (iguais)	Alpha = 0,05	
Grupos confrontados	Valor - t	Valor - P	Resultado
U - CP II Z x Lab - CP II Z	-31,105704	6,1122E-29	Rejeita H0
U Ext - CP II Z x U - CP II Z	-4,131213	0,026950	Rejeita H0
Lab - CP II Z x Lab - CP V	0,026927	0,489312	Não rejeita H0
Lab - CP II Z x Lab - CP II Z - F	1,306332	0,098540	Não rejeita H0
Lab - CP V x Lab - CP V - F	-2,982452	0,002189	Rejeita H0

Fonte: Elaboração própria.

A análise estatística identificou uma diferença considerável nos resultados de índices de vazios entre o grupo de amostras “U – CP II Z” e os grupos de amostras misturados no laboratório. Exemplificando, o grupo “U – CP II Z” possui cerca de ¼ dos vazios do grupo “Lab – CP II Z”, lembrando que a diferença entre eles é apenas o método de mistura, sendo o primeiro usinado, portanto misturado em caminhão betoneira, e o segundo misturado no laboratório, com auxílio de betoneira de eixo inclinado.

Quanto ao grupo de amostras extraídas do estacionamento, “U Ext – CP II Z”, apresenta o dobro do índice de vazios do grupo “U – CP II Z”, sendo a diferença entre eles os métodos de adensamento e cura de campo para o primeiro e de laboratório para o segundo. A análise estatística resulta que a diferença encontrada possui grande relevância.

Estatisticamente, utilizar CP II Z ou CP V não provoca diferenças importantes no índice de vazios e reaproveitar o fresado na mistura do concreto permeável, nas condições impostas neste trabalho, apresentam diferenças na comparação entre o

“Lab – CP II Z” e “Lab – CP II Z – F” também não há distinção entre os resultados, mas entre o “Lab – CP V” e “Lab – CP V – F” as diferenças são consideráveis.

O concreto permeável tem poros em sua estrutura que o permitem possuir um índice de vazios considerado alto. Entretanto, se os poros não estiverem conectados não irão empregar a capacidade drenante esperada para o material. Dessa forma, o ensaio de vazios comunicantes torna-se relevante e os resultados encontrados para esta propriedade do concreto permeável, aos 28 dias, estão apresentados na Tabela 24, enquanto o teste-t para os grupos comparáveis está na Tabela 25.

Tabela 24 - Vazios comunicantes médios encontrados

Grupo de amostras	Vazios comunicantes médio (%)	Desvio padrão (%)	Coefficiente de variação (%)
U - CP II Z	12,22	1,54	12,57
Lab - CP V	18,62	1,99	10,68
Lab - CP II Z	17,01	1,51	8,86
Lab - CP V - F	21,71	0,85	3,92
Lab - CP II Z - F	20,07	1,44	7,19

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 25 - Teste-t para os resultados de vazios comunicantes

Hipótese do teste H0 = 0 (iguais) Alpha = 0,05			
Grupos confrontados	Valor - t	Valor - P	Resultado
U - CP II Z x Lab - CP II Z	-3,456994	0,020364	Rejeita H0
Lab - CP II Z x Lab - CP V	-1,115054	0,163649	Não rejeita H0
Lab - CP II Z x Lab - CP II Z - F	-2,533927	0,032198	Rejeita H0
Lab - CP V x Lab - CP V - F	-2,471919	0,034402	Rejeita H0

Fonte: Elaboração própria.

Percebe-se que o grupo de amostras “U – CP II Z” possui a menor porcentagem de vazios comunicantes em sua estrutura, resultado esperado se considerado que este grupo apresentou maior massa específica. A partir da análise estatística, verifica-se que a pequena diferença encontrada entre os grupos “Lab – CP V” e “Lab – CP II Z” não altera os vazios comunicantes, portanto os cimentos testados nessa pesquisa não apresentaram influência nessa propriedade.

Também é notável que a porcentagem de vazios comunicantes dos grupos de amostras que contêm fresado em sua composição é ligeiramente superior aos que

abrangem somente agregados naturais e, a partir da análise pelo método do teste-t, essa diferença é relevante. Isso sugere que há uma maior conectividade dos poros do concreto permeável quando utilizado o resíduo.

4.1 RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

Tratando-se de concretos, permeáveis ou não, as resistências mecânicas são elementares para sua utilização precisa.

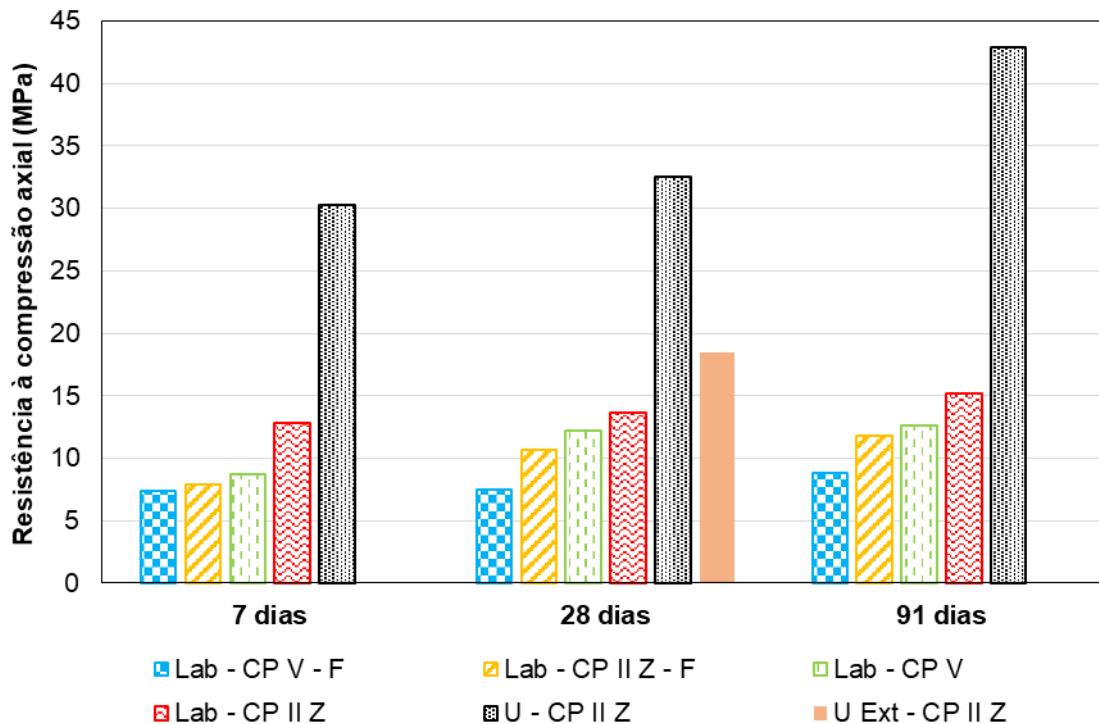
Na Tabela 26 estão apresentados os resultados de resistências à compressão axial para os grupos de amostras e na Figura 44 há a representação gráfica para uma melhor visualização e posterior análise. A Tabela 27 apresenta os resultados da análise estatística.

Tabela 26 – Resultados médios de resistências à compressão axial

Grupo de amostras	Idade (dias)	Resistência à compressão axial média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
U - CP II Z	7	30,22	0,32	1,07
	28	32,57	2,06	6,31
	91	42,85	4,31	10,06
Lab - CP V	7	8,69	0,41	4,75
	28	12,25	1,05	8,58
	91	12,61	1,40	11,07
Lab - CP II Z	7	12,80	0,78	6,06
	28	13,64	1,92	14,06
	91	15,15	1,13	7,43
Lab - CP V - F	7	7,43	0,77	10,42
	28	7,50	0,81	10,77
	91	8,81	0,67	7,62
Lab - CP II Z - F	7	7,89	0,67	8,56
	28	10,67	0,30	2,83
	91	11,81	0,93	7,91
U Ext - CP II Z	28	18,46	3,64	19,74

Fonte: Elaboração própria.

Figura 44 - Resistência à compressão axial



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 27 - Teste-t para os resultados de resistência à compressão axial

Hipótese do teste		H0 = 0 (iguais)	Alpha = 0,05	
Idade	Grupos confrontados	Valor - t	Valor - P	Resultado
7 dias	U - CP II Z x Lab - CP II Z	35,932781	0,000002	Rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP V	8,108886	0,000629	Rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP II Z - F	8,278525	0,000581	Rejeita H0
	Lab - CP V x Lab - CP V - F	2,480686	0,034080	Rejeita H0
28 dias	U - CP II Z x Lab - CP II Z	11,666871	0,000154	Rejeita H0
	U Ext - CP II Z x U - CP II Z	5,846084	0,002135	Rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP V	1,103187	0,165926	Não rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP II Z - F	2,648415	0,058943	Não rejeita H0
91 dias	Lab - CP V x Lab - CP V - F	6,200854	0,001720	Rejeita H0
	U - CP II Z x Lab - CP II Z	10,769621	0,000211	Rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP V	2,460500	0,034827	Rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP II Z - F	3,963010	0,008318	Rejeita H0
	Lab - CP V x Lab - CP V - F	4,245251	0,006604	Rejeita H0

Fonte: Elaboração própria.

Percebe-se que para todos os grupos de amostras houve evolução na resistência à compressão axial, conforme aumentou o tempo de cura. O grupo de amostras extraídas, “U Ext – CP II Z” foi ensaiado somente aos 28 dias para que não

houvesse um número de extrações demasiado, prejudicando a estrutura do estacionamento que gera banco de dados para outras pesquisas conjuntas.

Nota-se que o grupo de amostras “U – CP II Z” possui resistência à compressão axial superior a todos os outros, em todas as idades, tendo quase o triplo da resistência do seu semelhante produzido no laboratório (“Lab – CP II Z”) aos 91 dias, sendo essa diferença importante, a partir de análise estatística.

Aos 28 dias, o grupo “U Ext – CP II Z” possui, aproximadamente, 56,70% da resistência do grupo “U – CP II Z”. Essa diferença estimula que os procedimentos de adensamento e cura no campo não são bem representados por aqueles adotados no laboratório e, o teste-t, implica que essa diferença é significativa. Ressalta-se que as amostras extraídas tiveram sua resistência à compressão axial corrigidas com os coeficientes estabelecidos pela NBR 7680/2015 devido aos efeitos de extração.

A análise dos resultados encontrados para os grupos de amostras desenvolvidos em laboratório exhibe que aqueles grupos com CP II Z como aglomerante, apresentam resistência à compressão axial moderadamente superior aos grupos de amostras com CP V, e a análise estatística resultou que aos 7 e aos 91 dias esse aumento na resistência pelo CP II Z é relevante, contudo, aos 28 dias a diferença é insignificante. A utilização do resíduo de fresado asfáltico como substituinte de parte dos agregados naturais, conforme realizado na presente pesquisa, reduz a resistência do concreto permeável em aproximadamente 3,50 MPa aos 91 dias, sendo esta diferença relevante segundo a análise pelo método do teste-t.

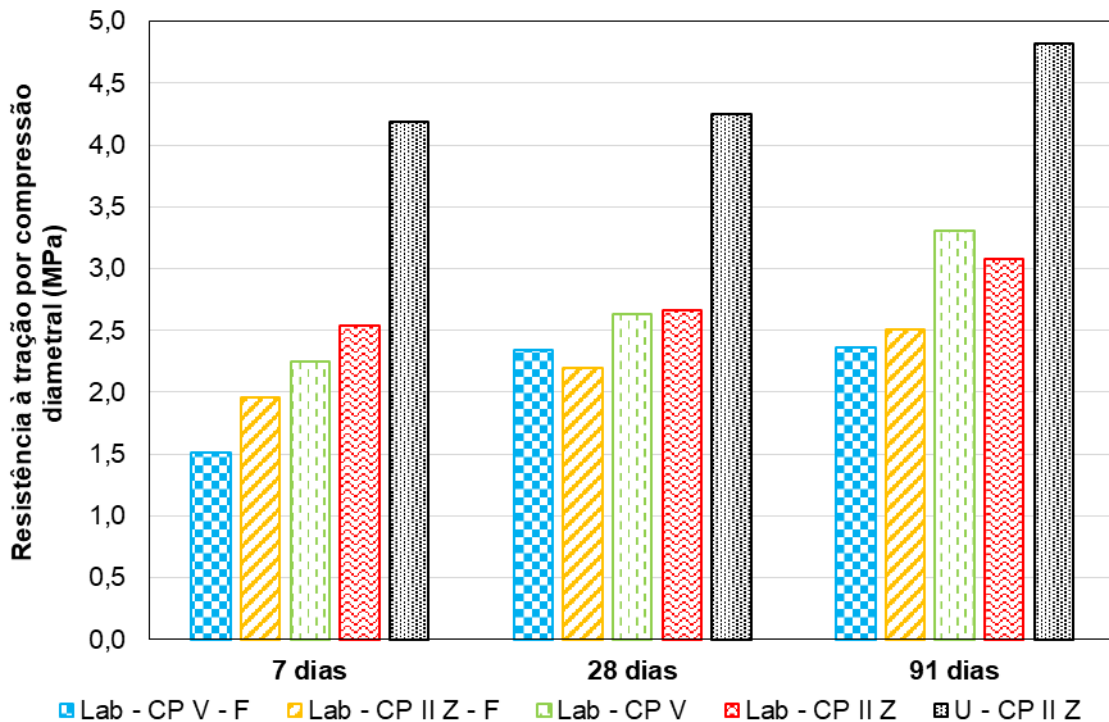
Na Tabela 28 são apresentados os resultados de resistência à tração por compressão diametral, na Figura 45 consta o gráfico e na Tabela 29 a análise do teste-t.

Tabela 28 – Resultados médios de resistência à tração por compressão diametral

Grupo de amostras	Idade (dias)	Resistência à tração por compressão diametral média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
U - CP II Z	7	4,19	0,12	2,96
	28	4,24	0,26	6,13
	91	4,82	0,72	14,95
Lab - CP V	7	2,25	0,14	6,13
	28	2,63	0,28	10,75
	91	3,31	0,38	11,61
Lab - CP II Z	7	2,54	0,32	12,64
	28	2,66	0,27	10,22
	91	3,08	0,10	3,13
Lab - CP V - F	7	1,51	0,15	10,12
	28	2,34	0,11	4,50
	91	2,37	0,13	5,42
Lab - CP II Z - F	7	1,96	0,15	7,59
	28	2,20	0,19	8,85
	91	2,51	0,35	13,80

Fonte: Elaboração própria.

Figura 45 - Resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 29 - Teste-t para os resultados de resistência à tração por compressão diametral

Hipótese do teste H0 = 0 (iguais) Alpha = 0,05				
Idade	Grupos confrontados	Valor - t	Valor - P	Resultado
7 dias	U - CP II Z x Lab - CP II Z	8,306659	0,000574	Rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP V	1,430237	0,112940	Não rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP II Z - F	2,821747	0,023872	Rejeita H0
	Lab - CP V x Lab - CP V - F	6,170781	0,001751	Rejeita H0
28 dias	U - CP II Z x Lab - CP II Z	7,296891	0,000938	Rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP V	0,132425	0,450521	Não rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP II Z - F	2,371491	0,038348	Rejeita H0
	Lab - CP V x Lab - CP V - F	1,662418	0,085882	Não rejeita H0
91 dias	U - CP II Z x Lab - CP II Z	4,152647	0,026694	Rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP V	-1,011097	0,184582	Não rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP II Z - F	2,725219	0,026351	Rejeita H0
	Lab - CP V x Lab - CP V - F	4,028985	0,007873	Rejeita H0

Fonte: Elaboração própria.

Da mesma forma que para a resistência à compressão axial, a resistência à tração por compressão diametral evolui com o aumento da idade das amostras. Percebe-se que os corpos de prova oriundos de usina, do grupo “U – CP II Z”, portam a maior resistência em todas as idades.

A utilização de CP II Z ou CP V não apresentou comportamento padrão no ensaio de resistência à tração por compressão diametral comparando os grupos “Lab - CP II Z” e “Lab – CP V”, pois aos 7 dias havia vantagem para o grupo “Lab – CP II Z”, aos 28 dias a resistência entre eles é muito próxima, e aos 91 dias o grupo de amostras composto por CP V apresenta resistência superior ao “Lab – CP II Z”. Essa variação nos resultados implica que, segundo análise estatística, não possui diferença entre utilizar um ou outro tipo de cimento.

O incremento de fresado substituindo agregados naturais reduziu, em todas as idades, a resistência à tração por compressão diametral dos grupos de amostras “Lab – CP V – F” e “Lab - CP II Z – F” quando comparado com seu semelhante sem a adição do fresado, “Lab – CP V” e “Lab - CP II Z”, respectivamente. A análise do teste-t corrobora que a utilização do resíduo é significativa na mistura do concreto permeável.

Conforme comentado anteriormente, os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão têm grande importância, pois a NBR 16416/2015 exige 2 MPa como resistência mínima para a utilização do concreto permeável em vias de tráfego leve.

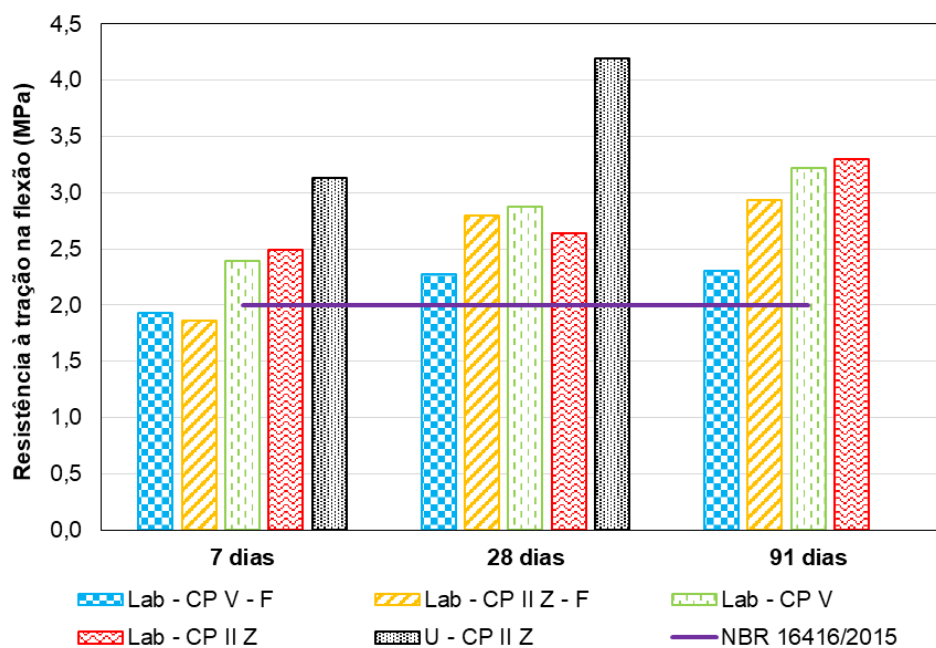
Os resultados encontrados para esse ensaio estão na Tabela 30 e são representados na Figura 46. Na Tabela 31 está a comparação entre os grupos sob perspectiva do teste-t.

Tabela 30 - Resultados médios de resistência à tração na flexão

Grupo de amostras	Idade (dias)	Resistência à tração na flexão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
U - CP II Z	7	3,13	0,20	6,53
	28	4,19	0,15	3,48
Lab - CP V	7	2,39	0,14	6,02
	28	2,87	0,37	12,85
	91	3,22	0,43	13,38
Lab - CP II Z	7	2,49	0,36	14,52
	28	2,63	0,40	15,18
	91	3,29	0,32	9,78
Lab - CP V - F	7	1,92	0,25	12,98
	28	2,27	0,26	11,37
	91	2,31	0,08	3,36
Lab - CP II Z - F	7	1,86	0,25	13,29
	28	2,79	0,11	4,10
	91	2,93	0,24	8,08

Fonte: Elaboração própria.

Figura 46 - Resistência à tração na flexão



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 31 - Teste-t para os resultados de resistência à tração na flexão

Hipótese do teste H0 = 0 (iguais) Alpha = 0,05				
Idade	Grupos confrontados	Valor - t	Valor - P	Resultado
7 dias	U - CP II Z x Lab - CP II Z	2,644643	0,028651	Rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP V	0,443219	0,340262	Não rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP II Z - F	2,518784	0,032721	Rejeita H0
	Lab - CP V x Lab - CP V - F	2,813999	0,024060	Rejeita H0
28 dias	U - CP II Z x Lab - CP II Z	6,340078	0,001585	Rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP V	-0,754668	0,246222	Não rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP II Z - F	-0,666323	0,270834	Não rejeita H0
	Lab - CP V x Lab - CP V - F	2,305421	0,041223	Rejeita H0
91 dias	Lab - CP II Z x Lab - CP V	0,235896	0,412550	Não rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP II Z - F	1,569400	0,095819	Não rejeita H0
	Lab - CP V x Lab - CP V - F	3,612727	0,034402	Rejeita H0

Fonte: Elaboração própria.

Assim como nos ensaios de resistência analisados anteriormente, houve acréscimo de resistência com o aumento da idade de ensaio. Não há resultados para o grupo de amostras “U – CP II Z” aos 91 dias por falta de corpos de prova prismáticos para execução do ensaio.

O grupo de amostras oriundas de usina (“U – CP II Z”) detêm, novamente, resistência superior aos demais grupos. Por exemplo, é cerca de 60% superior ao grupo equivalente, porém produzido em laboratório (“Lab – CP II Z”), aos 28 dias, superando os 4,0 MPa de resistência à tração na flexão.

Os grupos “Lab – CP V” e “Lab – CP II Z” tiveram resistência à tração na flexão com diferença mínima nas três idades ensaiadas, sendo irrelevante, para este ensaio, nesta pesquisa, o tipo de cimento utilizado, de acordo com a análise estatística com o método do teste-t.

A análise do teste-t também detectou que a comparação entre os grupos “Lab – CP II Z” e “Lab – CP II Z – F”, aos 7 dias há diferença significativa entre eles, mas aos 28 e 91 dias a diferença é insignificante, já para os grupos de laboratório com CP V, tanto aquele com fresado quanto o sem fresado, a diferença, em todas as idades, é relevante, tendo o resíduo de fresado asfáltico reduzido a resistência à tração na flexão dos grupos de amostras.

Quanto a exigência da NBR 16416/2015 de 2 MPa de resistência à tração na flexão, percebe-se que somente os grupos “Lab – CPV – F” e “Lab – CP II Z – F”, ou seja, os que possuem fresado asfáltico, aos 7 dias, não atingem a resistência

especificada. Esse resultado mostra que para a utilização do fresado em concretos permeáveis que serão implantados como revestimento, nas condições empregadas neste trabalho, a via deverá ser liberada para o tráfego com mais de uma semana de cura da laje do pavimento.

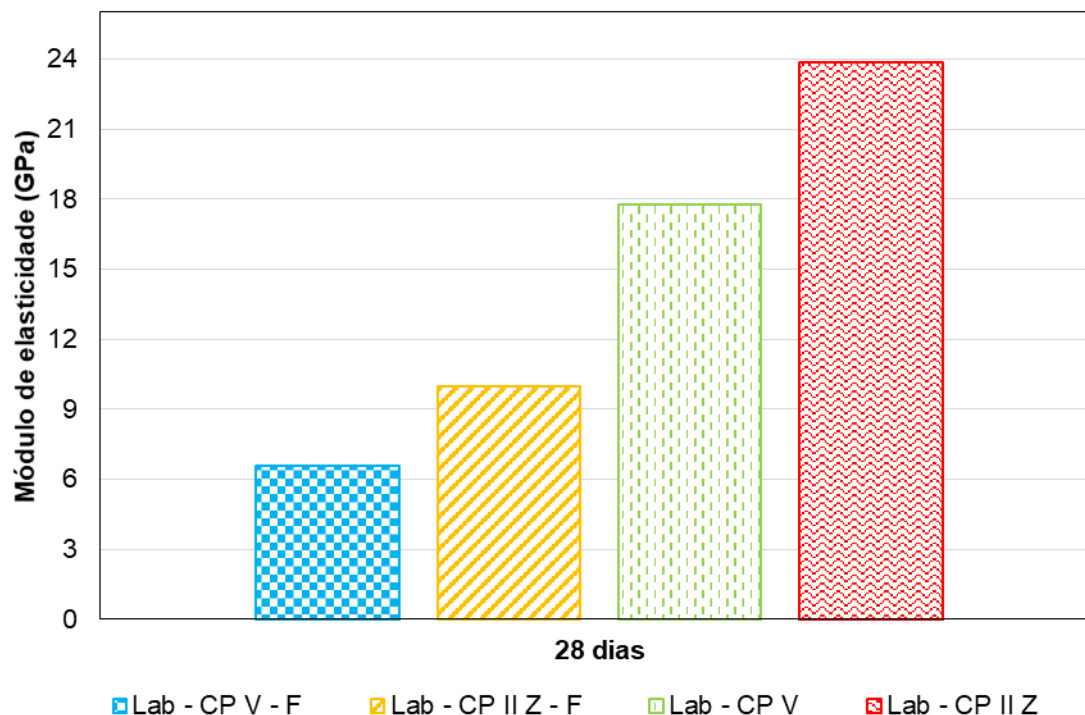
Na Tabela 32 exibe-se os resultados de módulo de elasticidade para os grupos de amostras produzidos em laboratório, aos 28 dias. A representação por gráfico está na Figura 47. A análise pelo teste-t está na Tabela 33.

Tabela 32 - Resultados médios de módulo de elasticidade

Grupo de amostras	Módulo de elasticidade médio (GPa)	Desvio padrão (GPa)	Coefficiente de variação (%)
Lab - CP V	17,78	5,49	30,87
Lab - CP II Z	23,87	5,79	24,27
Lab - CP V - F	6,58	1,88	28,53
Lab - CP II Z - F	9,97	1,74	17,47

Fonte: Elaboração própria.

Figura 47 - Módulo de elasticidade



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 33 - Teste-t para os resultados de módulo de elasticidade

Hipótese do teste	H0 = 0 (iguais)	Alpha = 0,05	
Grupos confrontados	Valor - t	Valor - P	Resultado
Lab - CP II Z x Lab - CP V	1,616260	0,075036	Não rejeita H0
Lab - CP II Z x Lab - CP II Z - F	4,635275	0,009459	Rejeita H0
Lab - CP V x Lab - CP V - F	4,319674	0,001274	Rejeita H0

Fonte: Elaboração própria.

Os coeficientes de variação apresentados na Tabela 32 destacam-se por serem muito superiores aos demais resultados apresentados até este momento. Ressalta-se que foi ensaiado um corpo de prova a mais que em outros ensaios de resistência, conforme apresentado na metodologia, justamente prevendo-se esse comportamento do concreto permeável frente ao ensaio de módulo de elasticidade.

As amostras de concreto usinado, do grupo “U – CP II Z”, não foram ensaiadas, pois este ensaio foi acrescentado à esta pesquisa com o trabalho em andamento, com as moldagens dos corpos de prova deste grupo já realizadas sem considerar este ensaio, sendo inviável realizar novamente a mistura em usina.

Confrontando os resultados dos grupos “Lab – CP II Z” e “Lab – CP V” nota-se que o desempenho do grupo com CP II Z é superior ao com CP V no ensaio de módulo de elasticidade dos concretos permeáveis, para as amostras utilizadas nessa pesquisa, entretanto, estatisticamente, a diferença encontrada não é relevante.

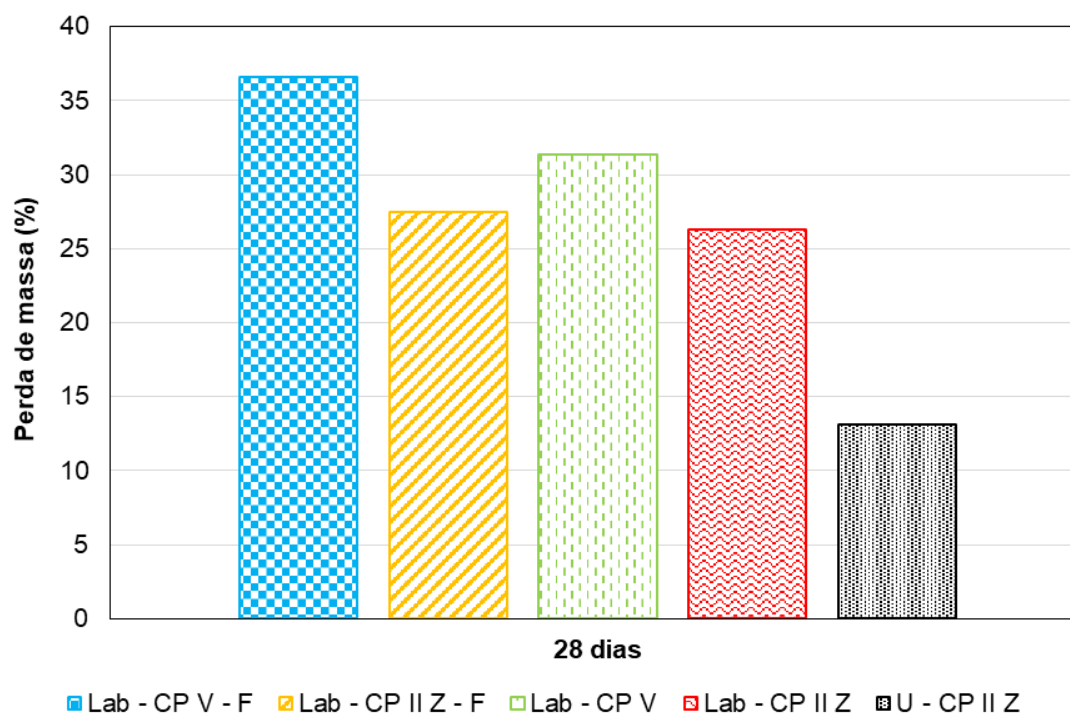
Os grupos de amostras “Lab – CP V – F” e “Lab – CP II Z – F” quando comparados aos grupos “Lab – CP V” e “Lab – CP II Z”, respectivamente, tiveram módulos de elasticidade cerca de 60% menor, devido a mistura de fresado em sua composição, ou seja, a utilização do material teve uma grande influência nesta propriedade do concreto permeável, reduzindo-a bruscamente. A partir da análise pelo teste-t a diferença encontrada é importante e deve ser considerada.

A resistência devido à degradação por impacto e abrasão é importante para um material que tem o propósito de ser utilizado como revestimento em pavimentos. Na Figura 48 apresentam-se os resultados obtidos, aos 28 dias. A resistência é medida através da perda de massa das amostras após a execução do ensaio.

A perda de massa do grupo “U – CP II Z” é a menor entre as analisadas, ou seja, o concreto usinado possui a maior resistência à degradação por impacto e abrasão. Sua perda de massa foi próxima da metade encontrada para o grupo “Lab – CP II Z”, que é similar, mas produzida em laboratório.

Percebe-se que os grupos de amostras com CP V, com e sem adição de fresado, possuem maior perda de massa, sendo mais adequado a utilização do CP II Z, pois as amostras com este cimento demonstraram maior resistência à degradação por impacto e abrasão, de acordo os resultados apresentados.

Figura 48 – Perda de massa devido à degradação por impacto e abrasão



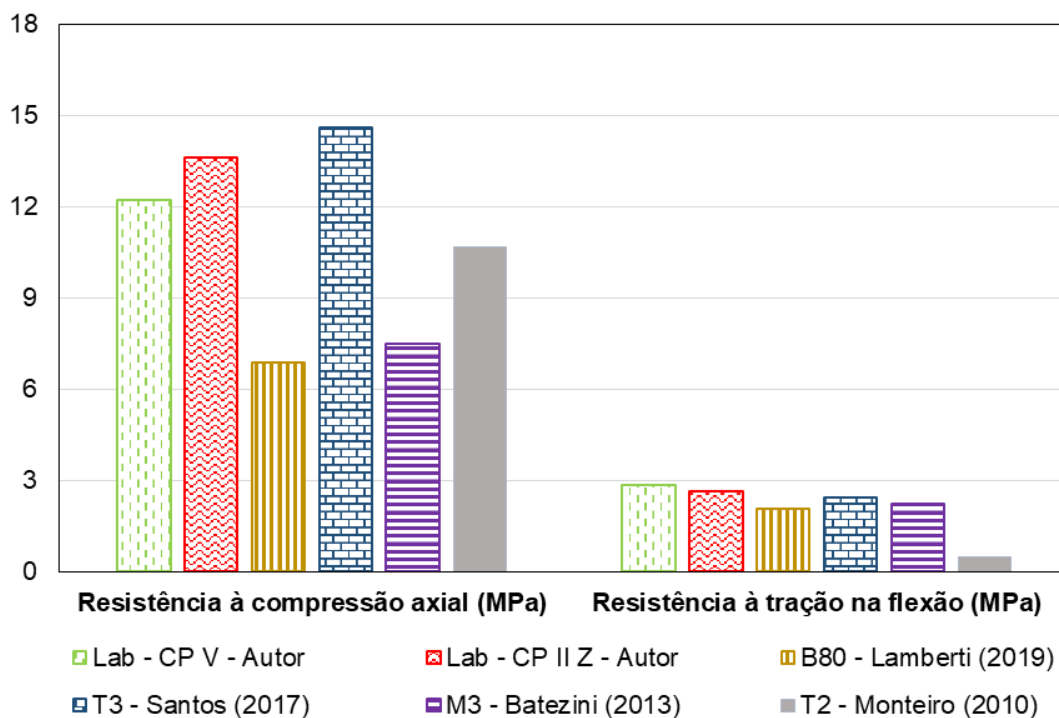
Fonte: Elaboração própria.

Quanto ao comportamento atribuído ao fresado na perda de massa, não é possível verificar um padrão, pois apesar de ter aumentado o percentual no grupo “Lab – CP V – F” em relação ao “Lab – CP V”, os grupos “Lab – CP II Z” e “Lab – CP II Z – F” obtiveram resultados semelhantes.

Na Figura 49 estão apresentados os resultados de resistências à compressão axial e à tração na flexão, aos 28 dias, dos grupos “Lab – CP V” e “Lab – CP II Z” juntamente com os valores encontrados para esse ensaio em outras pesquisas citadas na revisão de literatura deste trabalho. Foram inseridas as misturas B80 - Lamberti (2019), T3 - Santos (2017), M3 - Batezini (2013) e T2 - Monteiro (2010), salienta-se que cada trabalho utiliza traços, materiais e métodos distintos, e estes estão discutidos no capítulo de revisão bibliográfica.

Entre as misturas plotadas, a M3 – Batezini (2013) possui o maior teor de agregados, $M = 4,44$, enquanto as outras possuem o mesmo teor, $M = 4$, entretanto, a mistura não apresentou os menores valores de resistência mecânica. As misturas “Lab – CP V”, B80 – Lamberti (2019) e T3 – Santos (2017) possuem o mesmo tipo de cimento, CP V, mas não se destacam por essa razão. Quanto à relação a/c, M3 – Batezini (2013) e T2 – Monteiro (2010) são as menores, 0,30 e as misturas desenvolvidas neste trabalho, juntamente com a B80 – Lamberti (2019) são as mais elevadas, mas os resultados de resistências à compressão axial e à tração na flexão se mantêm dispersos sob esta perspectiva.

Figura 49 - Resultados de resistências comparados aos de outros trabalhos



Fonte: Elaboração própria

Logo, percebe-se que as diferenças de metodologias e materiais aplicados às misturas de concreto permeável influenciam significativamente nos resultados encontrados, pois somente analisando um ou outro quesito, como relação a/c, teor de agregados ou o cimento utilizado, não se encontram comportamentos lógicos, visto a dispersão dos resultados.

Quanto ao comportamento mecânico das misturas analisadas neste trabalho, o concreto oriundo de usina obteve resistências maiores que os concretos produzidos em laboratório, provavelmente por uma mistura mais adequada no caminhão betoneira que aumentou a massa específica do concreto usinado, e através do teste-t, foi possível verificar que as diferenças são significativas.

Ainda, de forma geral, as misturas com CP II Z apresentaram resistências superiores que àquelas com CP V na sua composição, contrariando o esperado, de que, pelo menos aos 7 dias, o CP V teria resistência mecânica superior, devido a propriedade deste cimento em hidratar-se rapidamente e apresentar alta resistência inicial, comparado ao outro CP II Z. Isso poderia estar acontecendo, pelo fato da relação *a/c* ser a mesma para ambos os cimentos, podendo indicar a necessidade de maior quantidade de água para hidratar o CP V. No entanto seriam necessários ensaios mais específicos, com diferentes tipos de cimento e de relação *a/c*, para essa afirmação. Contudo, essas diferenças nos resultados são estatisticamente desprezíveis, ou seja, a utilização de um ou outro cimento não alterou a resistência mecânica do concreto permeável.

Por fim, a adição de resíduo de fresado asfáltico na mistura do concreto permeável reduziu as resistências mecânicas, possivelmente em virtude de uma fragilidade gerada no contato entre agregados e argamassa, devido ao ligante asfáltico envolto nos agregados do fresado. A análise estatística dos resultados aponta que, na maioria dos casos, a redução das resistências é significativa, logo deve-se ser atenção ao utilizar o fresado como substituinte de agregados naturais na mistura do concreto permeável.

4.2 PERMEABILIDADES

Conforme visto na revisão de literatura, a NBR 16416/2015, em vigência, estabelece que a permeabilidade mínima de concretos permeáveis deve ser 0,10 cm/s. Dito isto, de acordo com o explicitado na metodologia desta pesquisa, a permeabilidade dos grupos de amostras foi realizada com dois permeômetros, de carga variável e de carga constante. No estacionamento foi determinada a permeabilidade através do método de campo. Os resultados encontram-se na Tabela 34. Os ensaios foram realizados aos 28 dias.

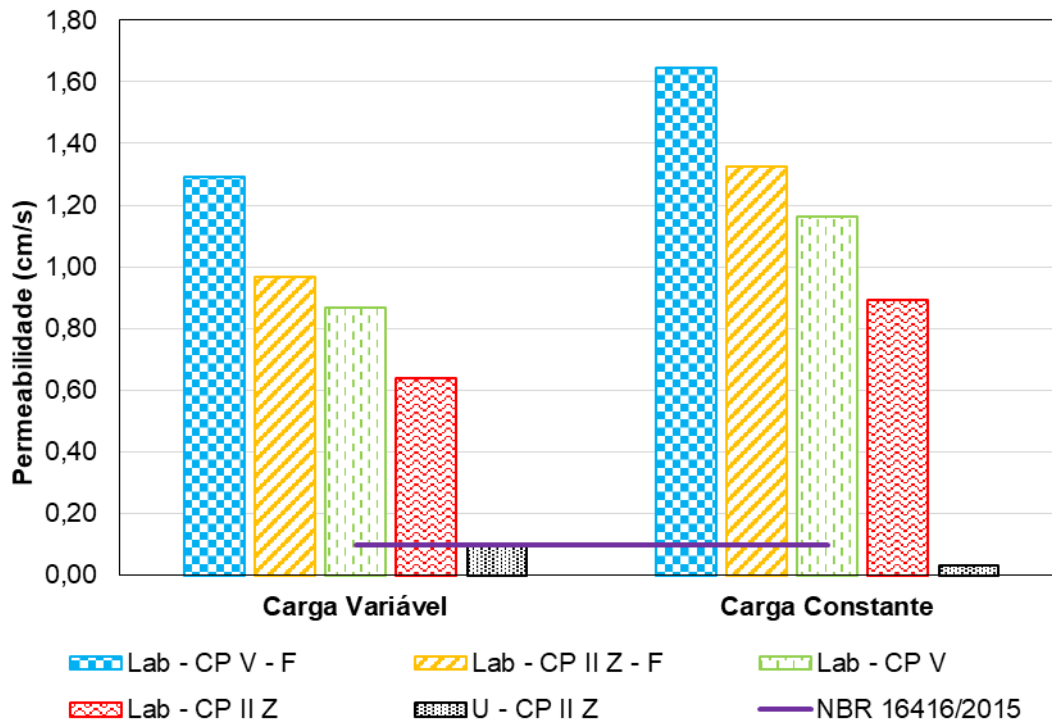
Tabela 34 - Resultados médios dos ensaios de permeabilidade

Grupo de amostras	Método de ensaio	Permeabilidade média (cm/s)	Desvio padrão (cm/s)	Coefficiente de variação (%)
U - CP II Z	Permeâmetro de carga variável	0,10	0,008	8,53
	Permeâmetro de carga constante	0,03	0,004	13,24
Lab - CP V	Permeâmetro de carga variável	0,87	0,219	25,26
	Permeâmetro de carga constante	1,16	0,241	20,67
Lab - CP II Z	Permeâmetro de carga variável	0,64	0,110	17,10
	Permeâmetro de carga constante	0,89	0,163	18,32
Lab - CP V - F	Permeâmetro de carga variável	1,29	0,152	11,75
	Permeâmetro de carga constante	1,64	0,142	8,63
Lab - CP II Z - F	Permeâmetro de carga variável	0,97	0,056	5,76
	Permeâmetro de carga constante	1,33	0,064	4,84
Estacionamento	Método de campo	0,07	0,008	11,85

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 50 estão representados os resultados encontrados no laboratório, através dos ensaios com permeômetros de carga variável e de carga constante, e na Tabela 35 os resultados obtidos pelo teste-t.

Figura 50 – Permeabilidade medida com os permeômetros em laboratório



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 35 - Teste-t para os resultados de permeabilidade em laboratório

Hipótese do teste		H0 = 0 (iguais)	Alpha = 0,05	
Idade	Grupos confrontados	Valor - t	Valor - P	Resultado
Carga constante	U - CP II Z x Lab - CP II Z	-9,133573	0,005888	Rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP V	-1,628970	0,089326	Não rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP II Z - F	-4,306471	0,006291	Rejeita H0
	Lab - CP V x Lab - CP V - F	-2,974419	0,020482	Rejeita H0
Carga variável	U - CP II Z x Lab - CP II Z	-6,632970	0,003490	Rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP V	-1,600352	0,092386	Não rejeita H0
	Lab - CP II Z x Lab - CP II Z - F	-4,607336	0,004988	Rejeita H0
	Lab - CP V x Lab - CP V - F	-2,755676	0,025538	Rejeita H0

Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que a permeabilidade do grupo “U – CP II Z” é severamente inferior a qualquer outro grupo de amostras, independente do método de ensaio, com permeômetro de carga variável ou constante. Resultado esperado, tendo em vista que este grupo, oriundo de usina, possuiu a menor quantidade de vazios comunicantes. Com o permeômetro de carga constante, o grupo “U – CP II Z” apresentou, aproximadamente, 30 vezes menos permeabilidade que o seu equivalente produzido

no laboratório (“Lab – CP II Z”), já com o permeâmetro de carga variável, a diferença foi menor, cerca de 6,4 vezes inferior. Essa diferença é, estatisticamente, expressiva, sendo a mistura um fator influenciador da permeabilidade do concreto permeável.

Nos grupos de amostras produzidos em laboratório analisa-se a influência do tipo de cimento e da utilização do resíduo de fresado asfáltico como substituinte de agregado natural. No primeiro caso, verifica-se que o grupo com CP V, “Lab – CP V”, apresentou maiores permeabilidades que seu semelhante com CP II Z, “Lab – CP II Z”. A permeabilidade do grupo “Lab – CP V” é aumentada em, aproximadamente, 0,25 cm/s comparada ao “Lab – CP II – Z” nos dois métodos de ensaio. Entretanto, através da análise estatística pelo teste-t, a diferença nos resultados não tem relevância, sendo indiferente utilizar um ou outro cimento. No segundo caso, é notável que os grupos de amostras que possuem o fresado na sua composição têm maiores permeabilidades quando confrontados com os grupos parecidos, sem a adição do resíduo, sendo este resultado esperado, pois os vazios comunicantes dos grupos com fresado foi superior. Todos esses resultados, ao serem analisados pela sob o teste-t, apresentaram-se relevantes, sendo a utilização do fresado importante na permeabilidade do concreto permeável. Também verifica-se, na Tabela 34, que os grupos com o resíduo têm coeficientes de variação bem menores, comparado aos seus semelhantes, sem o fresado.

De maneira geral, os resultados encontrados para a permeabilidade dos grupos de amostras foram superiores para o ensaio de carga constante, exceto para o grupo “U – CP II Z”, que teve a permeabilidade maior para o ensaio de carga variável. A partir da análise estatística (Tabela 36), confrontando os ensaios sob cargas constante e variável, foi possível observar que submeter os corpos de prova ao ensaio de permeabilidade sob carga constante ou carga variável não é diferente, ou seja, apesar de o ensaio sob carga constante ser o recomendado pela norma, a utilização do ensaio de carga variável apresenta resultados estatisticamente iguais e trata-se de um ensaio mais simples de se realizar.

Tabela 36 - Teste-t para os diferentes ensaios de permeabilidade em laboratório

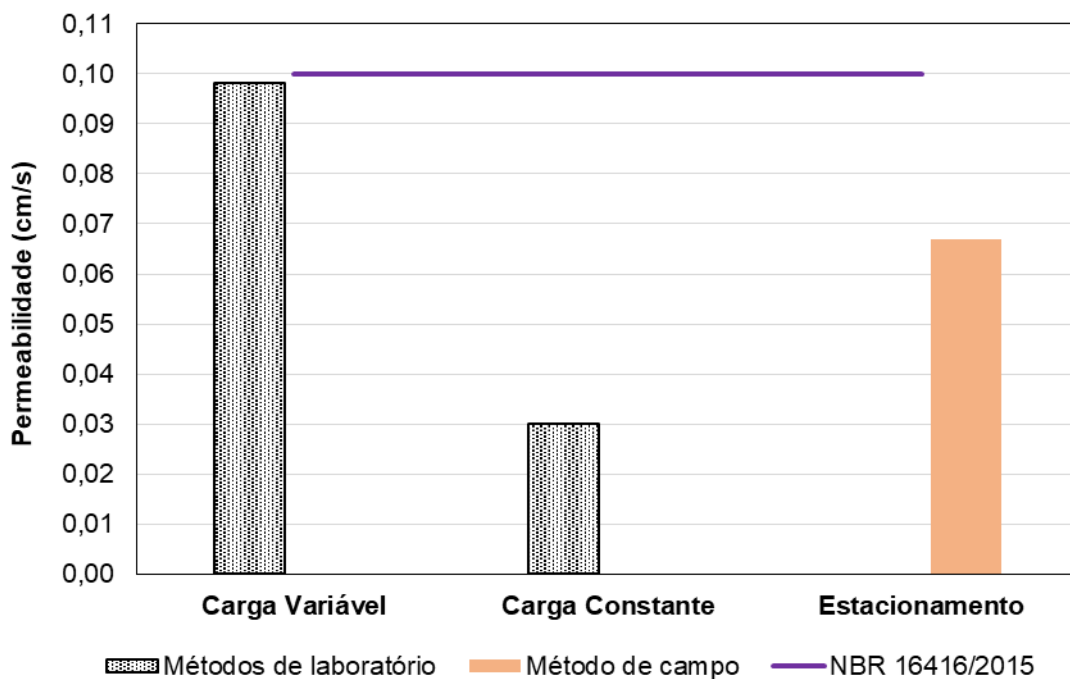
Hipótese do teste	H0 = 0 (iguais)		Alpha = 0,05
Ensaio	Valor - t	Valor - P	Resultado
Carga constante x Carga variável	1,465399	0,077401	Não rejeita H0

Fonte: Elaboração própria.

Quanto ao mínimo imposto pela norma, o grupo de amostras oriunda de usina não alcançou, em nenhum dos métodos de ensaio, com permeâmetro de carga variável ou constante, o valor de 0,10 cm/s. O restante das amostras, ou seja, as produzidas em laboratório superaram, consideravelmente, o valor nos dois ensaios.

Conforme já fundamentado, para avaliar se a permeabilidade encontrada através dos métodos empregados em laboratório, de adensamento, cura e procedimentos de ensaio (permeâmetros de cargas variável e constante), representam a permeabilidade identificada no campo, foram moldados corpos de prova com a mistura usinada ("U – CP II Z") que foi utilizada na laje de um estacionamento com pavimentação permeável, onde foi realizado o ensaio com o procedimento de campo para determinação da permeabilidade. Na Figura 51 os resultados do grupo de amostras "U – CP II Z" com os ensaios de laboratório voltam a serem representados, juntamente com o valor encontrado na laje do estacionamento, para que se possa realizar uma análise adequada dos valores obtidos.

Figura 51 - Permeabilidade encontrada para a mistura usinada pelos métodos de laboratório e encontrada no estacionamento pelo método de campo



Conforme verificado anteriormente, o grupo “U – CP II Z” não alcançou 0,10 cm/s de permeabilidade, exigido pela normativa. Agora, verifica-se que a mistura usinada, compactada e curada com os métodos de campo, no estacionamento, também não superou o valor mínimo, apresentando aproximadamente 0,07 cm/s, que é o menor valor encontrado em campo por Bean et al. (2007) em pavimentos revestidos com concreto permeável, como visto na revisão de literatura.

Nota-se que, nesse caso, os métodos de laboratório não representaram o desempenho hidráulico do concreto permeável no estacionamento. Em campo, a permeabilidade apresentou-se 30% menor que a avaliação realizada em laboratório através do permeâmetro de carga variável e 2,3 vezes maior que o resultado encontrado com o permeâmetro de carga constante. Apesar do ensaio de carga variável ter obtido no laboratório o valor mais próximo do medido em campo, a diferença é considerável e a NBR 16416/2015 propõem, como visto, o método de carga constante para determinação da permeabilidade em laboratório. Estatisticamente, pelo teste-t (Tabela 37), nem o ensaio de carga constante nem o de carga variável se relacionam relevantemente com o ensaio de campo. Contudo, ressalta-se que os métodos de mistura, adensamento e cura aplicados no campo não se relacionam com àqueles aplicados nos corpos de prova gerados no laboratório, sendo esta uma limitação durante a avaliação dos resultados obtidos.

Tabela 37 - Teste-t para os resultados de permeabilidade com permeâmetros confrontados com o método de campo

Hipótese do teste	H0 = 0 (iguais)	Alpha = 0,05	
Ensaio confrontado	Valor - t	Valor - P	Resultado
Carga constante x Método de campo	-8,733851	0,006429	Rejeita H0
Carga variável x Método de campo	-9,044915	0,006002	Rejeita H0

Fonte: Elaboração própria.

Durante a revisão da literatura verificou-se que há uma dispersão grande nos resultados obtidos em diferentes trabalhos quanto a permeabilidade dos concretos permeáveis. Por exemplo, Lee et al. (2009) sugerem que esta propriedade fique entre 0,003 e 0,22 cm/s, enquanto Goede (2009) encontrou resultados mais elevados, entre 0,6 e 1,4 cm/s. As permeabilidades dos grupos de amostras produzidos em laboratório encontram-se na faixa proposta por Goede (2009), com permeabilidades mais

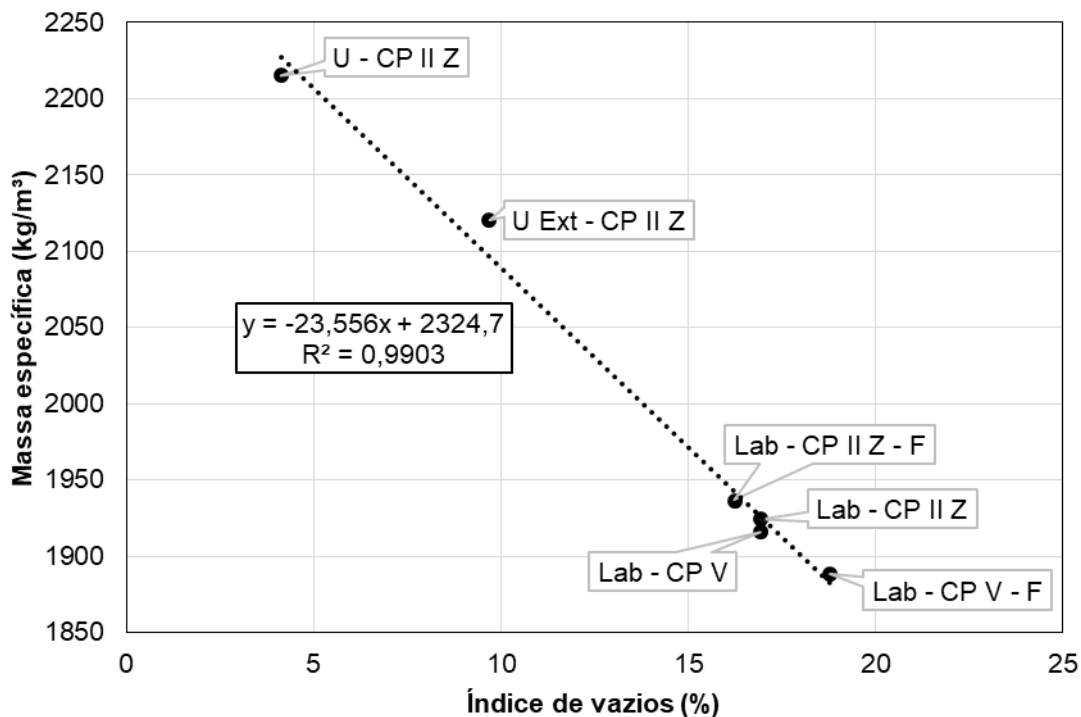
elevadas que àquela oriunda de usina, que, por sua vez, enquadram-se no intervalo apontado por Lee et al. (2009), com permeabilidades inferiores.

Conforme exposto anteriormente, o grupo de amostras oriundo de usina apresentou maior massa específica que o concreto permeável usinado, provavelmente por ser submetida a uma mistura no caminhão betoneira mais adequada que àqueles misturados em laboratório, e, conseqüentemente, menos vazios em sua estrutura, que por sua vez reduziu a permeabilidade do material. A permeabilidade dos grupos com fresado foi maior que a dos seus semelhantes sem a adição do resíduo, possivelmente, devido a presença do ligante asfáltico na mistura, que envolto ao agregado pode ter reduzido a rugosidade da mistura, facilitando a percolação de água pela estrutura.

4.3 RELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS

Na Figura 52 relacionam-se a massa específica de o índice de vazios encontrados para os grupos de amostras estudados.

Figura 52 - Massa específica x Índice de vazios

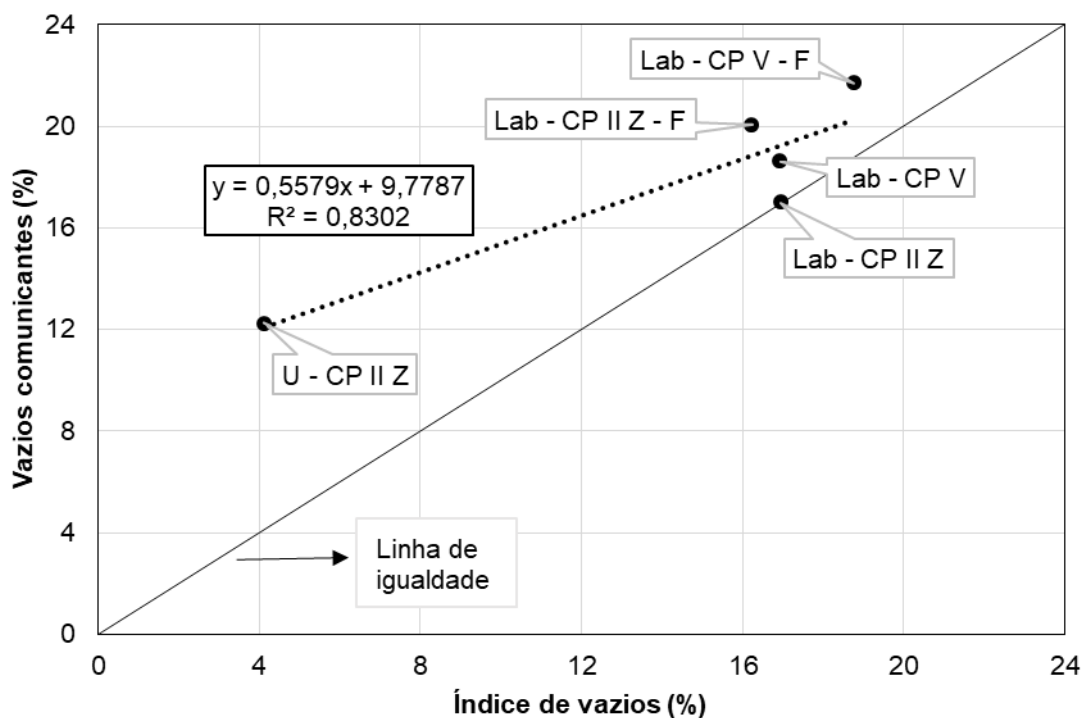


Fonte: Elaboração própria.

Verifica-se que a massa específica e o índice de vazios possuem comportamento contrários, ou seja, o aumento da massa específica reduz o índice de vazios. Para os grupos de amostras analisados nesta pesquisa, observa-se que o coeficiente de correlação (R^2) é elevado entre essas propriedades.

Conforme explicado na revisão de literatura, o índice de vazios do concreto permeável está ligado à sua permeabilidade, entretanto, a conectividade desses vazios é fundamental para que a mistura seja permeável. Nesse sentido, o ensaio de vazios comunicantes se fez necessário, visto que este mede a capacidade dos poros se interligarem. Na Figura 53 estão relacionados os resultados obtidos dos ensaios de índice de vazios e vazios comunicantes.

Figura 53 - Vazios comunicantes x Índice de vazios



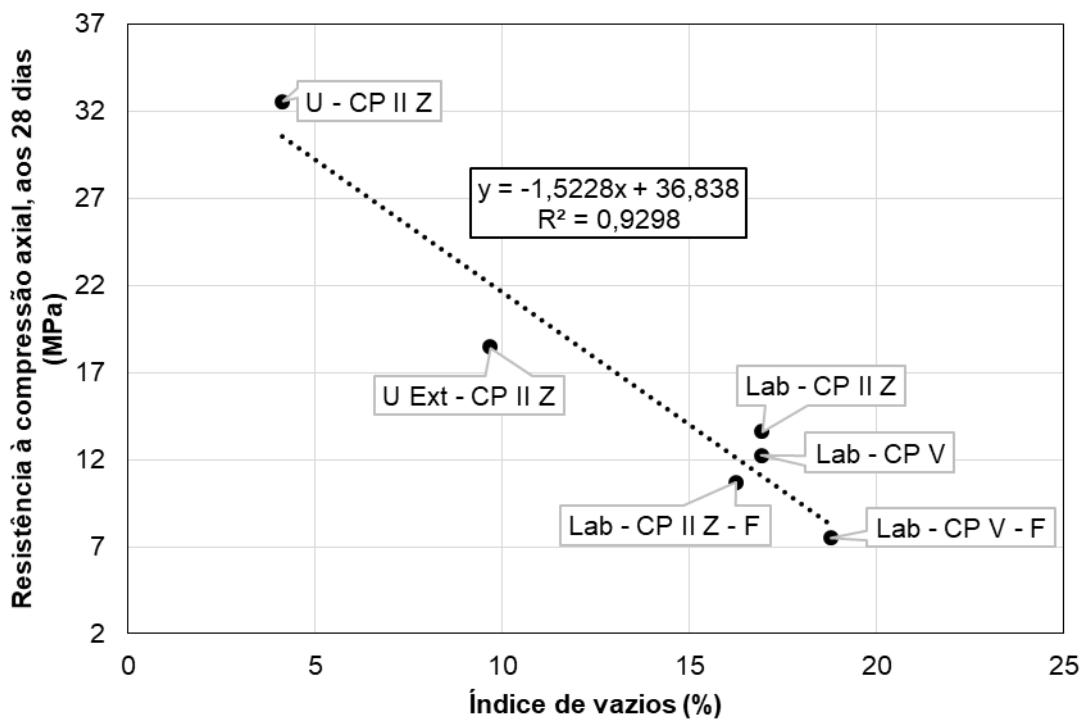
Fonte: Elaboração própria.

Nota-se que os resultados dos ensaios de vazios comunicantes e índice de vazios são proporcionais, ou seja, o aumento de um implica na elevação do outro. A correlação entre os resultados apresenta R^2 satisfatório. Os vazios comunicantes

mostram-se superiores aos índices de vazios para os grupos de amostras de concreto permeável estudados.

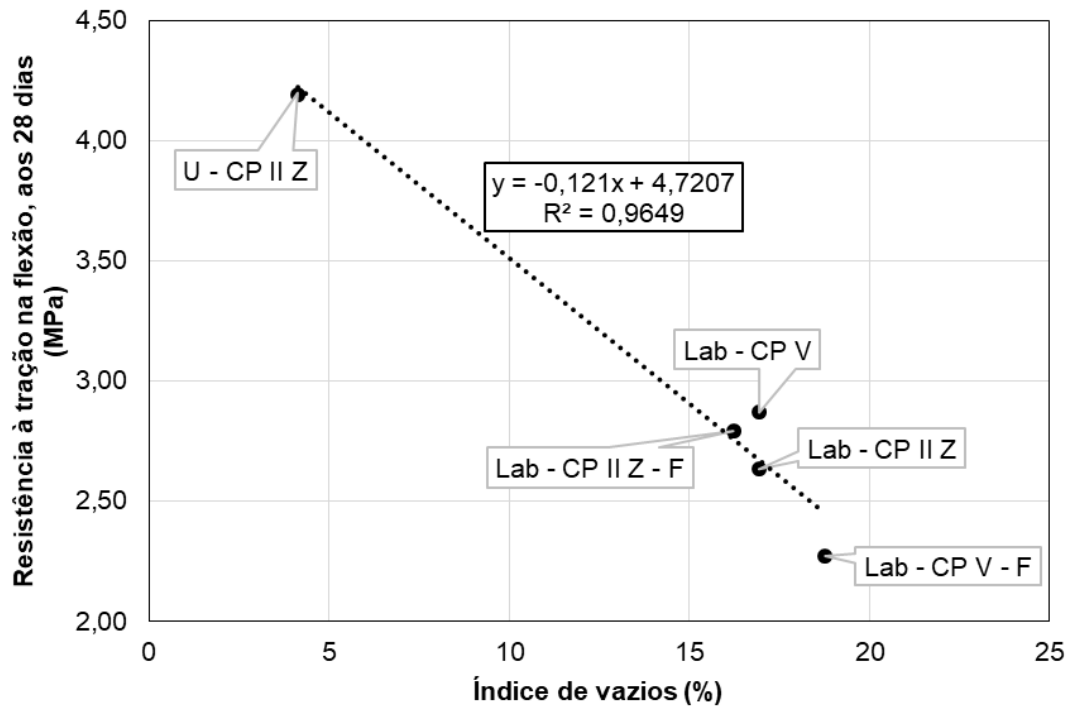
Também foi visto na revisão de literatura que o índice de vazios influencia na resistência mecânica do concreto permeável, principalmente quando forem utilizados os mesmos materiais e procedimentos de moldagem. Como mostram as Figuras 54 e 55, para os grupos de amostras estudados, os parâmetros são inversamente proporcionais, quanto maior o índice de vazios, menor as resistências mecânicas do material.

Figura 54 - Resistência à compressão axial x Índice de vazios



Fonte: Elaboração própria.

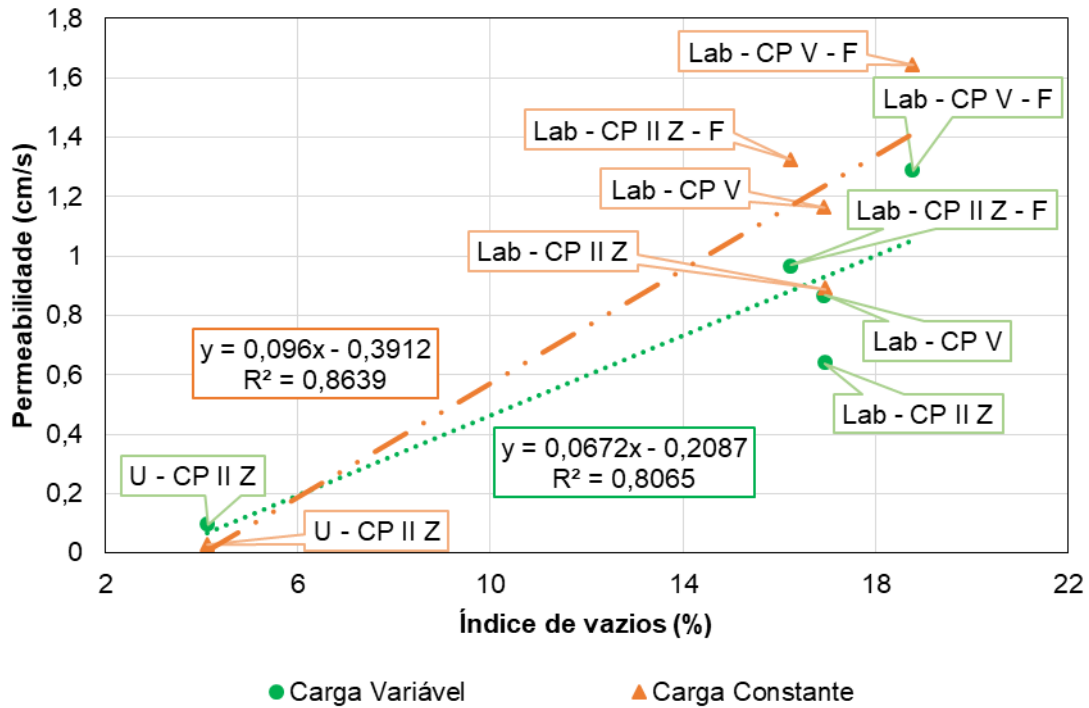
Figura 55 - Resistência à tração na flexão x Índice de vazios



Fonte: Elaboração própria.

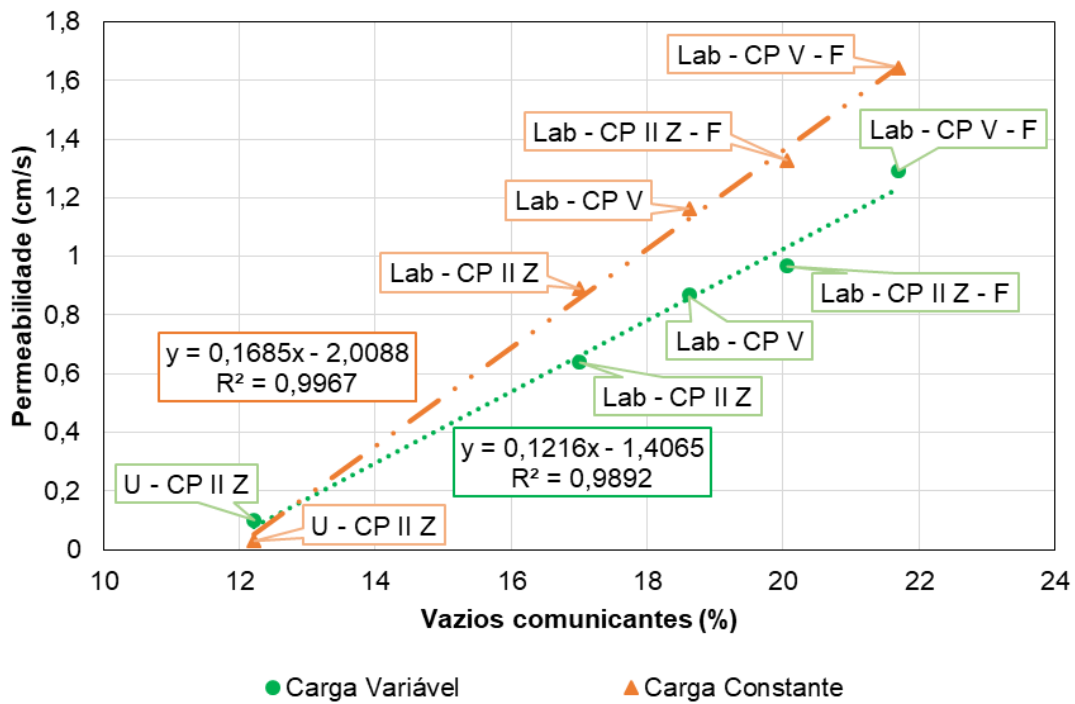
Nas Figuras 56 e 57 estão relacionadas a permeabilidade (permeâmetros de carga variável e constante) com o índice de vazios e com os vazios comunicantes, respectivamente. Vê-se que, para os dois permeâmetros, a permeabilidade sobe com o aumento do índice de vazios ou dos vazios comunicantes. Atenta-se que os coeficientes de correlação determinados para a relação permeabilidade x vazios comunicantes (Figura 57) são superiores aos da relação permeabilidade x índice de vazios (Figura 56), representando que os vazios comunicantes realmente possuem vinculação mais adequada com a permeabilidade do concreto permeável do que o índice de vazios.

Figura 56 - Permeabilidade x Índice de vazios



Fonte: Elaboração própria.

Figura 57 - Permeabilidade x Vazios comunicantes

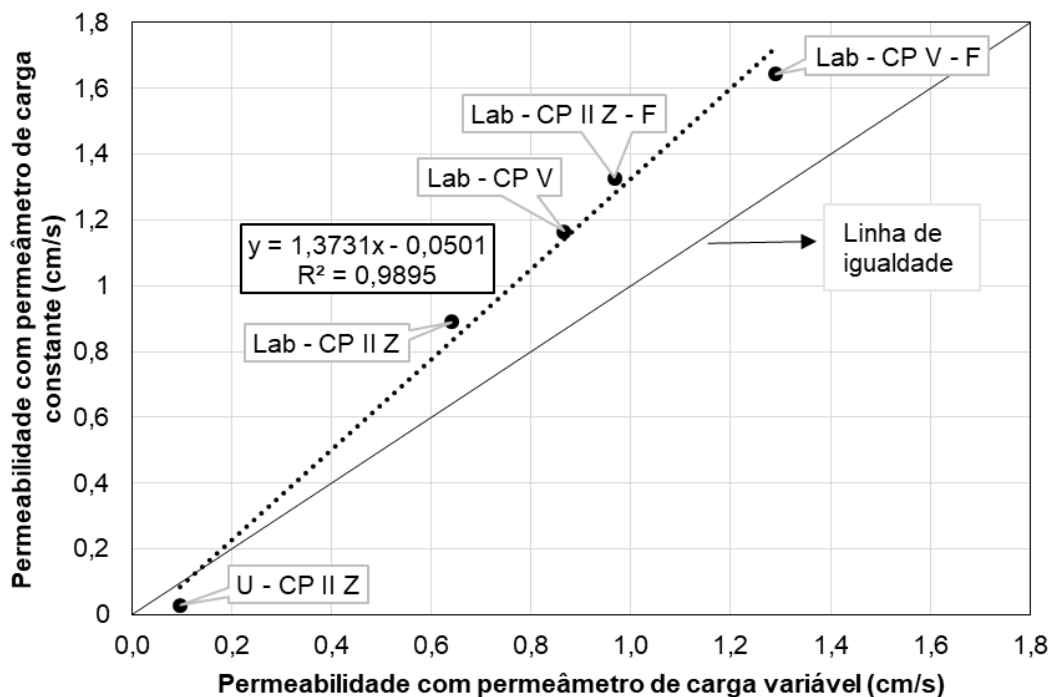


Fonte: Elaboração própria.

Outra observação é que os valores de R^2 do ensaio de carga constante são superiores nas duas relações, permeabilidade x índice de vazios e permeabilidade x vazios comunicantes, comparado aos do ensaio de carga variável. Ressalta-se que o ensaio de carga constante é o imposto pela NBR 16416/2015, entretanto como discutido na revisão bibliográfica, o ensaio de carga variável é mais prático de se executar.

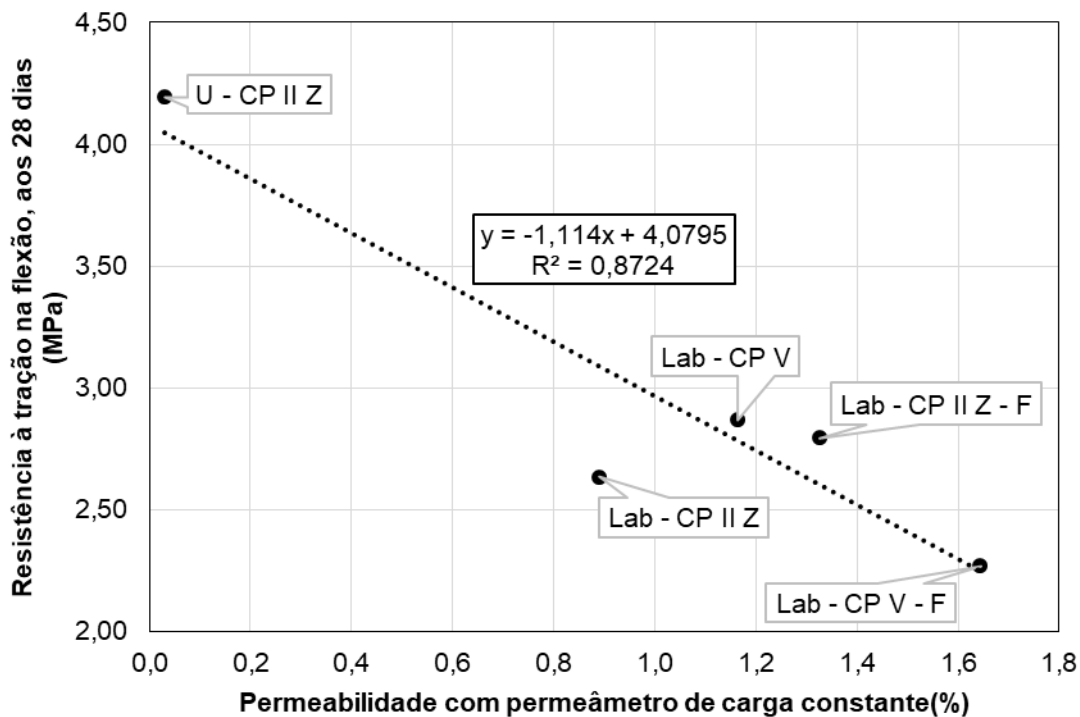
Para melhor avaliação do comportamento da permeabilidade do concreto permeável frente aos dois métodos de ensaios, na Figura 58 estão relacionados os resultados obtidos pelos procedimentos realizados com permeâmetro de carga constante x permeâmetro de carga variável. Confirma-se, agora com auxílio da linha de igualdade, que as permeabilidades com o método proposto pela norma (permeâmetro de carga constante) apresentam valores maiores que os encontrados com o permeâmetro de carga variável para os grupos de amostras produzidos em laboratório, enquanto o grupo com concreto usinado tem permeabilidade maior quando medido com ensaio de carga variável. Salienta-se que o R^2 encontrado para a relação entre os métodos é bom.

Figura 58 - Permeabilidade com permeâmetro de carga constante x Permeabilidade com permeâmetro de carga variável



Por fim, na Figura 59, relacionou-se dois dos parâmetros com exigência na NBR 16416/2015, a resistência à tração na flexão e a permeabilidade, pois o concreto permeável para ser utilizado como revestimento de pavimentos moldados in loco deve possuir, nestas propriedades, no mínimo, 2,0 MPa e 0,1 cm/s, respectivamente. Enfatiza-se que os valores de permeabilidade utilizados nesta relação para cada grupo de amostras é o determinado a partir do método de carga constante, conforme orienta a normativa.

Figura 59 - Resistência à tração na flexão x Permeabilidade com permeômetro de carga constante

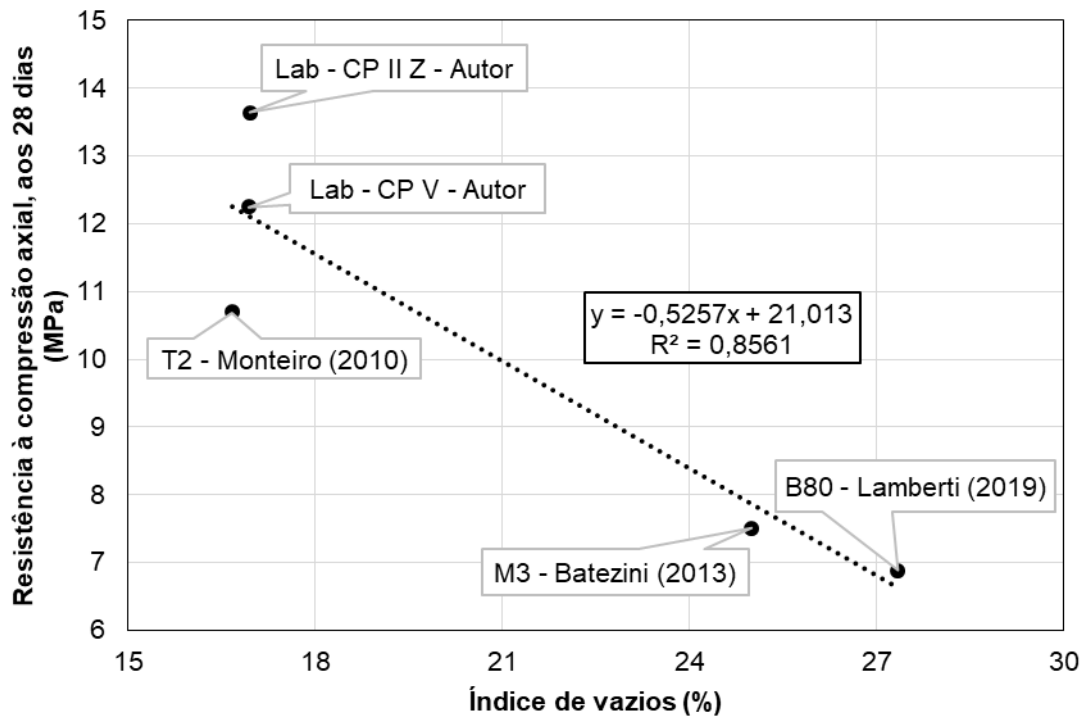


Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que são propriedades inversamente proporcionais, conforme a resistência à tração na flexão aumenta, há redução na permeabilidade do concreto permeável. Esse resultado é condizente com as relações entre resistências mecânicas x permeabilidade e índice vazios x permeabilidade já analisados, pois para a resistência ser alta, os vazios devem ser baixos, e dessa forma, a permeabilidade do concreto permeável é menor.

Também foi relacionada a resistência à compressão axial com o índice de vazios de dois grupos avaliados nesse trabalho, agora considerando resultados encontrados por outras pesquisas citadas na revisão bibliográfica (Figura 60).

Figura 60 - Resistência à compressão axial x Índice de vazios com resultados de outras pesquisas



Fonte: Elaboração própria.

Percebe-se que, nesse caso, mesmo adicionando os resultados encontrados por outros autores e sabendo-se que os materiais e métodos são distintos, a relação permanece inversamente proporcional, quanto maior o índice de vazios das amostras de concreto permeável, menor a resistência mecânica do material. Deve-se considerar que os traços dos autores incluídos nessa relação são bem próximos, com pouca ou nenhuma variação no teor de agregados e relação água/cimento.

De forma geral, todas as relações propostas apresentam comportamento esperado. Destaca-se que, sempre que houve relação entre índice de vazios e resistências mecânicas, quanto menor a primeira, maior a segunda propriedade.

Também atenta-se para os melhores coeficientes de correlação encontrados para a relação permeabilidade x vazios comunicantes quando comparado a relação

permeabilidade índice de vazios, tanto para os ensaios com permeâmetro de carga variável quanto para com permeâmetro de carga constante.

Quanto a utilização dos permeâmetros, salienta-se que os resultados do permeâmetro de carga constante quando relacionados com o índice de vazios e com os vazios comunicantes apresentaram valores de R^2 pouco superior que os valores do permeâmetro de carga variável. Esse resultado corrobora com o visto na revisão de literatura, que o permeâmetro de carga constante entrega resultados mais confiáveis tratando-se de um material de elevada permeabilidade, como é o concreto permeável dos grupos de amostras estudados.

5 CONCLUSÕES

Por meio das análises produzidas sobre os resultados encontrados para os ensaios realizados e almejando atender aos objetivos deste trabalho, as seguintes conclusões foram elaboradas:

- Em todos os ensaios de resistência mecânica avaliados neste trabalho, o concreto usinado teve desempenho amplamente superior ao produzido em laboratório, com os mesmos materiais, métodos de adensamento, cura e traço. Sendo assim, o concreto oriundo de usina se mostrou mais eficaz, entendendo-se que o método de mistura é mais adequado, com caminhão betoneira, se comparado ao método empregado no laboratório, com betoneira de eixo inclinado. Todavia, a permeabilidade do concreto oriundo de usina é, significativamente, menor que a permeabilidade encontrada para o grupo de amostras produzidas em laboratório. A elevada resistência mecânica e reduzida permeabilidade do concreto usinado pode ser explicada pelo seu índice de vazios inferior, se comparado com o grupo desenvolvido no laboratório;
- Na comparação entre as resistências à compressão axial das amostras em que o procedimento de adensamento e cura foram pelos métodos de laboratório e aquelas em que os procedimentos foram pelos métodos de campo, as primeiras obtiveram, aproximadamente, o dobro de resistência. Dessa forma, entende-se que os procedimentos de laboratório são mais eficientes, provavelmente por uma energia de adensamento maior que a empregada no campo, além de utilizar-se um controle de umidade mais propício para cura do concreto permeável;
- Considerando os resultados encontrados para os ensaios de resistências mecânica e de permeabilidade nesta pesquisa, a utilização de CP II Z ou CP V promoveu desempenhos estatisticamente iguais no concreto permeável. A avaliação do emprego de um ou outro tipo de cimento deu-se pela utilização do CP V por diversos autores justificando que este possui maior resistência inicial, sendo um fator importante para a liberação do tráfego mais rapidamente em vias que o concreto permeável for executado como revestimento, entretanto, a partir da

análise dos resultados de resistência obtidos neste trabalho, a utilização do CP V não se faz necessária, podendo ser aplicado o CP II Z, que é utilizado nas usinas de concreto da região de Santa Maria/RS;

- A substituição do agregado natural por resíduo de fresado asfáltico na mistura do concreto permeável, da forma adotada nesta pesquisa, promoveu redução das resistências mecânicas, ainda que continuem satisfatórias, e aumento da permeabilidade do material. Dessa forma, a utilização deste resíduo é indicada para locais em que a infiltração das águas pluviais seja prioridade, devido a sua contribuição na capacidade drenante do material. Contudo, é importante salientar que o fresado é um elemento bastante heterogêneo e que para sua utilização adequada, pode ser necessário o seu aperfeiçoamento;
- Os ensaios de permeabilidade realizados em laboratório, com permeômetros de carga variável e carga constante, e o exercido em campo, através de método específico, permitiram concluir que o ensaio de carga variável possui resultado mais próximo ao encontrado no estacionamento, pelo método de campo. Entretanto, ressalta-se que as amostras ensaiadas em laboratório possuem métodos de adensamento e cura distintos do realizado no campo, sendo esta uma limitação na análise dos resultados obtidos. Outro ponto avaliado a partir destes ensaios, é que para os grupos de amostras produzidas em laboratório, o ensaio de carga constante expressou permeabilidades superiores ao ensaio de carga variável, em contrapartida, para o grupo de amostras de concreto usinado, a permeabilidade medida com permeômetro de carga variável foi maior. Toda via, a partir de análise estatística, pode-se observar que utilizar o permeômetro de carga constante ou de carga variável não interfere significativamente nos resultados obtidos. Acentua-se que as permeabilidades medidas em laboratório, com os dois permeômetros, se relacionaram melhor com os vazios comunicantes do que com o índice de vazios;
- A NBR 16416/2015 impõem que a massa específica do concreto permeável seja superior a 1600 kg/m^3 , tendo todos os grupos de amostras superado esse valor;

- Referente a resistência mecânica, a norma solicita que o concreto apresente, no mínimo, 2,0 MPa de resistência à tração na flexão, quando moldado no local e utilizado em vias de tráfego leve. Os grupos de amostras com a substituição parcial dos agregados naturais por resíduo de fresado asfáltico, aos 7 dias, não atingiram essa resistência mínima, todavia, aos 28 e 91 dias, as suas resistências à tração na flexão excederam os 2,0 MPa. O restante dos grupos, sem a utilização do fresado, apresentaram, em todas as idades, resistências superiores ao exigido;
- Quanto a permeabilidade dos concretos permeáveis, a normativa solicita 0,10 cm/s, no mínimo. Os grupos de amostras produzidos em laboratório ultrapassaram este valor com facilidade, entretanto, o concreto oriundo de usina não obteve êxito nem quando avaliado em laboratório, com permeômetros de carga constante e variável, nem quando medido no estacionamento por meio do método específico de campo.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das análises realizadas durante a pesquisa, sugere-se que sejam investigados os seguintes temas:

- Variar os métodos de adensamento em campo e em laboratório para encontrar a melhor forma de realizar moldagens em laboratório que sejam coerentes com o que ocorre no campo, como por exemplo, o adensamento de amostras de laboratório e lajes em campo com vibrador do tipo agulha;
- Empregar outros tipos de cimento, como o CP IV, encontrado mais facilmente em Santa Maria/RS, investigando se ocorre alteração das propriedades do concreto permeável, assim como verificou-se para o CP V e o CP II Z;
- Estudar diferentes relações a/c, juntamente com distintos tipos de cimento para verificar a influência da quantidade de água na hidratação dos cimentos e na resistência mecânica dos concretos permeáveis;

- Aumentar e reduzir a porcentagem de resíduos de fresado asfáltico na composição do concreto permeável, visando reutilizar o fresado adequadamente, sem prejudicar o desempenho necessário do concreto;
- Realizar os ensaios de permeabilidade no laboratório, com permeômetros de carga constante e variável, em amostras extraídas de uma placa ou revestimento de concreto permeável e comparar com o resultado encontrado, nesta placa ou revestimento, com método específico de determinação da permeabilidade em campo proposto pela norma;
- Examinar o desempenho do concreto permeável frente aos esforços de fadiga.

REFERÊNCIAS

- ACIOLI, L. A. **Estudo Experimental de Pavimentos Permeáveis para o Controle do Escoamento Superficial na Fonte.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 145 p.
- ACPT. **Pervious Concrete.** Advanced Concrete Pavement Technology. Department of Transportation Federal Highway Administration, EUA, 2012. 8 p.
- ALENCAR, P. C. D. **Avaliação Experimental do Concreto Poroso na Atenuação do Escoamento Superficial em Parcelas Urbanizadas.** Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, 2013. 174 p.
- ALESSI, F.; KOKOT, P. J.; GOMES, J. **Comparação do Escoamento Superficial Gerado por Pavimentos Permeáveis em Blocos de Concreto e Asfalto Poroso.** Da Vinci, 2006. 18 p.
- ALSUBIH, M.; ARTHUR, S.; WRIGHT, G.; ALLEN, D. **Experimental Study on the Hydrological Performance of a Permeable Pavement.** Urban Water Journal, 2016. 8 p.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522.1-13:** Specification for Pervious Concrete Pavement. Farmington Hills, Michigan, 2013. 11 p.
- _____. **ACI 522R-10:** Report Pervious Concrete. Farmington Hills, Michigan, 2010. 42 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1701:** Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete. Annual Book of ASTM Standards, 2009. 3 p.
- _____. **ASTM C1747:** Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion. Annual Book of ASTM Standards, 2013. 4 p.
- _____. **ASTM C1754M:** Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete. Annual Book of ASTM Standards, 2012. 3 p.
- AOKI, Y.; RAVINDRARAJAH, R. S.; KHABBAZ, H. **Properties of Pervious Concrete Containing Fly Ash.** Road Materials and Pavement Design, 2012. 11 p.
- ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. **Avaliação da Eficiência dos Pavimentos Permeáveis na Redução de Escoamento Superficial.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 2000. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142:** Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, RJ: ABNT novembro 2010. 5 p.

_____ **NBR 13292:** Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, RJ: ABNT abril 1995. 8 p.

_____ **NBR 16416:** Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e Procedimentos. Rio de Janeiro, RJ: ABNT setembro 2015. 25 p.

_____ **NBR 5739:** Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, RJ: ABNT junho 2007. 9 p.

_____ **NBR 6576:** Materiais asfálticos – Determinação da penetração. Rio de Janeiro, RJ: ABNT junho 2007. 7 p.

_____ **NBR 7212:** Execução de concreto dosado em central — Procedimento. Rio de Janeiro, RJ: ABNT agosto 2012. 16 p.

_____ **NBR 7222:** Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, RJ: ABNT junho 2011. 5 p.

_____ **NBR 7680:** Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto, Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro, RJ: ABNT janeiro 2015. 24 p.

_____ **NBR 8522:** Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, RJ: ABNT novembro 2017. 20 p.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF P 98-254-2.** Mesure de Propriétés Liées à la Perméabilité des Matériaux des Mélanges Hydrocarbonés, partie 2, 1993.

BALADÈS, J-D.; LEGRET, M.; MADIEC, H. **Permeable Pavements: Pollution Management tools.** Water Science and Technology, 1995. 8 p.

BATEZINI, R. **Estudo Preliminar De Concretos Permeáveis como Revestimento de Pavimentos para Áreas de Veículos de Tráfego Leve.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013. 133 p.

BATEZINI, R.; BALBO, J. T.; **Estudo da Condutividade Hidráulica com Carga Constante e Variável em Concretos Permeáveis.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2015. 6 p.

BEAN, E. Z.; HUNT, W. F.; BIDELSPACH, D. A. **Field Survey of Permeable Pavement Surface Infiltration Rates.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2007. 7 p.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos.** Exceção editorial e eventos, 2007. 127 p.

BOOGAARD, F.; LUCKE, T.; GIESEN, N.; VEN, F. **Evaluating the Infiltration Performance of Eight Dutch Permeable Pavements Using a New Full-Scale Infiltration Testing Method.** Journal Water, 2014. 14 p.

BRATTEBO, B. O.; BOOTH, D. B. **Long-Term Stormwater Quantity and Quality Performance of Permeable Pavement Systems.** Water Research, 2003. 8 p.

BRITO, A.; SANTOS, D. F. **Estudo da Resistência à Compressão x Permeabilidade do Concreto sem Finos.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Positivo, 2010. 66 p.

BROSSEAUD, Y. **Reciclagem de Misturas Asfálticas: Evolução Após 20 Anos e a Situação Atual na França.** 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, Foz do Iguaçu, 2011. 17 p.

CALDAS, L. R.; LINS, D. N.; SPOSTO, R. M. **Avaliação do Ciclo de Vida de Pavimento de Concreto Drenante Considerando Diferentes Unidades Funcionais.** Mix Sustentável, 2017. 10 p.

CALTRANS. **Open Graded Friction Course Usage Guide.** California Department of Transportation, Division of Engineering Services, 2006. 19 p.

CASTRO, F. A. **Estudo de Traço de Concreto Permeável de Cimento Portland.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Santa Cruz do Sul, 2015. 57 p.

CENTOFANTE, R. **Estudo Laboratorial da Utilização de Material Fresado em Misturas Asfálticas Recicladas a Quente.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2016. 162 p.

CHINDAPRASIRT, P.; HATANAKA, S.; CHAREERAT, T.; MISHIMA, N.; YUASA, Y. **Cement Past Characteristics and Porous Concrete Properties.** Construction and Building Materials, 2007. 8 p.

CHOPRA, M.; KAKUTURU, S.; BALLOCK, C.; SPENCE, J.; WANIELISTA, M. **Effect of Rejuvenation Methods on the Infiltration Rates of Pervious Concrete Pavements.** Journal of Hydrologic Engineering, 2010. 8 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de Rodovias 2018: Relatório Gerencial.** CNT, SEST SENAT, 2018. 405 p.

COLLINS, K. A.; HUNT, W. F.; HATHAWAY, J. M. **Hydrologic Comparison of Fours Types of Permeable Pavement and Standart Asphalt in Eastern North Carolina.** Journal of Hydrologic Engineering, 2008. 12 p.

COSTA, F. B. P.; LORENZI, A.; HASELBACH, L.; SILVA FILHO, L. C. P. **Best Practices for Pervious Concrete Mix Design and Laboratory Tests.** IBRACON Structures and Materials Journal, 2018. 9 p.

CRMCA. **Specifier's Guide for Pervious Concrete Pavement Design.** Version 1.2. Colorado Ready Mixed Concrete Association, 2009. 24 p.

DEBNATH, B.; SARKAR, P. P. **Pervious Concrete as an Alternative Pavement Strategy: a State-of-the-art Review**. International Journal of Pavement Engineering, 2018. 17 p.

DELLATE, N. **Developing a Structural Design for Pervious Concrete Pavement**. CSu Pervious Pavement Demonstration. 2005. 37 p.

DELLATE, N.; MRKAJIC, A.; MILLER, D. I. **Field and Laboratory Evaluation of Pervious Concrete Pavements**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009. 8 p.

DEO, O.; NEITHALATH, N. **Compressive Behavior of Pervious Concretes and a Quantification of the Influence of Random Pore Structure Features**. Materials Science and Engineering A, 2010. 11 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **DNER-ME 053: Misturas betuminosas – percentagem de betume**. 1994. 5 p.

DIERKES, C.; KUHLMANN, L.; KANDASAMY, J.; ANGELIS, G. **Pollution Retention Capability and Maintenance of Permeable Pavements**. Global Solutions for Urban Drainage, 2002. 13 p.

EISENBERG, B.; LINDOW, K. C.; SMITH, D. R. **Permeable Pavements**. The Low Impact Development Committee, The Urban Water Resources Research Council, The Environmental and Water Resources Institute and The American Society of Civil Engineers, USA, 2015. 249 p.

EL-HASSAN, H.; KIANMEHR, P. **Pervious Concrete Pavement Incorporating GGBS to Alleviate Pavement Runoff and Improve Urban Sustainability**. Road Materials and Pavement Design, 2016. 16 p.

EPA. **Storm Water Technology Fact Sheet – Porous Pavement**. Environmental Protection Agency. Office of water, Washington, D.C. 1999. 7 p.

ESTEVES, R. L. **Quantificação das Superfícies Impermeáveis em Áreas Urbanas por Meio de Sensoriamento Remoto**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2006. 120 p.

FAGUNDES, C. K.; CADORE, J. C.; PEDRONI, G. C.; SANTOS, S. **Avaliação da Resistência Mecânica e Permeabilidade de Concretos Permeáveis com Adição de Agregado Miúdo**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC, 2016. 5 p.

FERGUNSON, B. K. **Porous Pavements**. CRC Press, 2005. 579 p.

FERGUNSON, B. K. **Stormwater Infiltration**. Lewis Publishers, 1994. 269 p.

FONSECA, L. F. S. **Análise das Soluções de Pavimentação do Programa CREMA 2ª Etapa do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. 226 p.

FRANÇA, A. P. M.; COSTA, F. B. P.; VENQUIARUTO, S. D. **Viabilização do Uso de Agregado Reciclado de Concreto na Confecção de Paviers de Concreto Permeável.** Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2019, 2019. 16 p.

GARCIA, E. S. H. **Análise da Redução da Permeabilidade de Misturas Asfálticas Drenantes em Função da Redução do Volume de Vazios.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2017. 171 p.

GHAFOORI, N.; DUTTA, S. **Laboratory Investigation of Compacted No-Fines Concrete for Paving Materials.** Journal of Materials in Civil Engineering, 1995a. 9 p.

GHAFOORI, N.; DUTTA, S. **Development of No-Fines Concrete Pavement Applications.** Journal of Transportation Engineering, 1995b. 6 p.

GOEDE, W. G. **Pervious Concrete: Investigation Into Structural Performance and Evaluation of the Applicability of Existing Thickness Design Methods.** Master thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, 2009. 188 p.

GONÇALVES, A. B.; OLIVEIRA, R. H.; FILHO, K. Z.; MARTINS, J. R. S.; PORTO, M. F. A.; BRITES, A. P. Z. **Pavimentos Permeáveis e sua Influência sobre a Drenagem.** Seminários, PHA2537 – Água em Ambientes Urbanos. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014. 10 p.

GRUBESA, I. N.; BARISIC, I.; KESER, T.; VRACEVIC, M. **Wearing Characteristics Assessment of Pervious Concrete Pavement.** Road Materials and Pavement Design, 2018. 13 p.

GUEDES, C. S. **Avaliação do Desempenho Hidrológico de Pavimentos Permeáveis.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, 2015. 95 p.

HELENE, P. R. L. **Manual de dosagem e controle do concreto.** Editora Pini. 1992. 349 p.

HENDERSON, V.; TIGHE, S. L. **Evaluation of Pervious Concrete Pavement Permeability Renewal Maintenance Methods at Field Sites in Canada.** NRC Research Press, 2011. 10 p.

HENDERSON, V.; TIGHE, S. L. **Evaluation of Pervious Concrete Pavement Performance in Cold Weather Climates.** International Journal of Pavement Engineering, 2012. 12 p.

HENDERSON, V.; TIGHE, S. L.; NORRIS, J. **Pervious Concrete Pavement: Integrated Laboratory and Field Study.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009. 9 p.

HÖLTZ, F. C.; **Uso do Concreto Permeável na Drenagem Urbana: Análise da Viabilidade Técnica e do Impacto Ambiental.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. 118 p.

HÖLTZ, F. C.; LORENZI, A.; PASSUELLO, A.; FILHO, L. C. P. S.; SHIMOMUKAY, R.; CHIES, J. A. **Aplicação de Concreto Permeável na Drenagem de Zonas Urbanas**. Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011. 14 p.

HOULE, K. M.; ROSEEN, R. M.; BALLESTERO, T. P.; BRIGGS, J. F.; HOULE, J. J. **Examinations of Pervious Concrete and Porous Asphalt Pavements Performance for Stormwater Management in Northern Climates**. Low Impact Development: Redefining Water in the City, 2010. 18 p.

HUANG, B.; WU, H.; SHU, X.; BURDETTE, E. G. **Laboratory Evaluation of Permeability and Strength of Polymer-Modified Pervious Concrete**. Construction and Building Materials, 2009. 6 p.

IMRAN, H. M.; AKIB, S.; KARIM, M. R. **Permeable Pavement and Stormwater Management Systems: A Review**. Environmental Technology, 2013. 9 p.

KEVERN, J. T.; SCHAEFER, V. R.; WANG, K. **Temperature Behaviour of Pervious Concrete Systems**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009. 8 p.

KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C. R. **Clogging in Permeable Concrete: A Review**. Journal of Environmental Management, 2017. 13 p.

KIM, H. K.; LEE, H. K. **Influence of Cement Flow and Aggregate Type on the Mechanical and Acoustic Characteristics of Porous Concrete**. Applied Acoustics, 2010. 9 p.

KUANG, X.; KIM, J.-Y.; GNECCO, L.; RAJE, S.; GAROFALO, G.; SANSALONE, J. J. **Particle Separation and Hydrologic Control by Cementitious Permeable Pavement**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007. 7 p.

LAMB, G. S. **Desenvolvimento e Análise do Desempenho de Elementos de Drenagem Fabricados em Concreto Permeável**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014. 150 p.

LAMBERTI, L. A. **Desempenho Hidrológico de Revestimentos de Concreto de Cimento Portland Aplicados a Pavimentos Permeáveis**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

LAMBERTI, L. A.; PICCILLI, D. G. A.; CERVO, T. C.; MINETTO, B.; PERIUS, C. F.; SANTOS, J. R.; BOCCHI, J. P. P.; FONTOURA, J. R. **Eficiência da Manutenção de Pavimentos Permeáveis pelo Método de Aspersão de Alta Pressão de Água – Resultados Preliminares**. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2019^a. 8 p.

LAMBERTI, L. A.; PICCILLI, D. G. A.; PERIUS, C. F.; BULÉ, B. P.; SANTOS, J. R. **Dimensionamento e Execução de Pavimentos Permeáveis na Universidade Federal de Santa Maria – RS**. 8º Fórum Internacional ECOINNOVAR, 2019b. 13 p.

LAMBERTI, L. A.; SANTOS, J. R.; CASSOL, M. A.; MELO, W. W.; PICCILLI, D. G. A.; CERVO, T. C. **Caracterização da Permeabilidade de Concretos Por Meio de Permeâmetro de Carga Variável e Carga Constante.** Anais do 59º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2017, 2017. 16 p.

LEE, M-G.; CHIU, C-T.; KAN, Y-C.; YEN, T. **Experimental Study of Pervious Concrete on Parking Lot.** GeoHuman International Conference. Material Design, Construction, Maintenance, and Testing of Pavements, 2009. 7 p.

LI, J. **Mix Design of Pervious Recycled Concrete.** GeoHunan International Conference, 2009. 6 p.

LIAN, C.; ZHUGE, Y. **Optimum Mix Design of Enhanced Permeable Concrete – An Experimental Investigation.** Construction and Building Materials, 2010. 8 p.

LUCKE, T.; BEECHAM, S. **Field Investigation of Clogging in a Permeable Pavement System.** Building Research e Information, 2011. 13 p.

LPE Engenharia. **Pavimento Intertravado: É sempre permeável?** Disponível em: <lpe.tempsite.ws/blog/index.php/pavimento-intertravado-e-sempre-permeavel>. Acesso em 25/08/18.

MAGUESVARI, M. U.; NARASIMHA, V. L. **Studies on Characterization of Pervious Concrete for Pavement Applications.** 2nd Conference of Transportation Research Group of India, 2013. 10 p.

MAHALINGAM, R.; MAHALINGAM, S. V. **Analysis of Pervious Concrete Properties.** Gradevinar 68, 2016. 9 p.

MARCHIONI, M. L.; SILVA, C. O.; MAYOR, A. V. **Conceitos e Requisitos para Pavimentos de Concreto Permeável.** Prática Recomendada PR-3. Associação Brasileira de Cimento Portland e Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem, 2014. 8 p.

McCAIN, G. N.; DEWOOLKAR, M. M. **Strength and Permeability Characteristics of Porous Concrete Pavements.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009. 14 p.

MELO, W. W. **Análise de Diferentes Ensaios de Permeabilidade em Concretos Porosos.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Maria, 2017. 67 p.

MELO, W. W.; PORTE, C. S.; SANTOS, J. R.; CERVO, T. C.; KIRCHOFF, L. D. **Estudo da Viabilidade do Uso de Concreto Drenante para Emprego como Pavimento de Vias de Tráfego Leve.** Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2016, 2016. 16 p.

MELO, W. W.; SANTOS, J. R.; PORTE, C. S.; CERVO, T. C. **Análise de Desempenho de Concretos Drenantes para Pavimentação**. 20ª Reunião da Pavimentação Urbana, 2017. 12 p.

MONTEIRO, A. C. N. **Concreto Poroso: Dosagem e Desempenho**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Goiás, 2010. 36 p.

MONTES, F.; HASELBACH, L. **Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete**. Environmental Engineering Science, 2006. 10 p.

MOURA, T. A. M. **Estudo Experimental de Superfícies Permeáveis para o Controle do Escoamento Superficial em Ambientes Urbanos**. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, 2005.

NASCIMENTO, N. O.; BAPTISTA, M. B. **Técnicas Compensatórias em Águas Pluviais**. Manejo de Águas Pluviais Urbanas, Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 2009. 397 p.

NEITHALATH, N.; OLEK, J.; WEISS, J.; MAROLF, A.; SELL, E.; THORNTON, W. **Development of Quiet and Durable Porous Portland Cement Concrete Paving Materials**. Final Report, The Institute for Safe, Quiet and Durable Highways, 2003. 179 p.

NEITHALATH, N.; BENTZ, D. P.; SUMANASOORIYA, M. S. **Predicting the Permeability of Pervious Concrete**. Concrete International, 2010. 6 p.

ONO, B. W.; BALBO, J. T.; CARGNIN, A. P. **Análise da Capacidade de Infiltração em Pavimento Permeável de Bloco de Concreto Unidirecionalmente Articulado**. Revista Transportes, 2017. 12 p.

PARK, S-B.; TIA, M. **An Experimental Study on the Water-Purification Properties of Porous Concrete**. Cement and Concrete Research, 2003. 8 p.

PEREIRA, K. K.; BARBOSA, M. P. **Desenvolvimento de Composição de Concreto Permeável com Agregados Oriundos de Resíduos de Construção Civil da Região de Campinas**. Anais do V Encontro de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, 2015. 6 p.

PINDADO, M. A.; AGUADO, A.; JOSA, A. **Fatigue Behavior of Polymer Modified Porous Concretos**. Universitat Politècnica de Catalunya, School Of Civil Engineering, 1999. 11 p.

PINTO, L. L. C. A. **O Desempenho de Pavimentos Permeáveis como Medida Mitigadora da Impermeabilização do Solo Urbano**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2011. 255 p.

PORTE, C. S. **Utilização de Fresado Asfáltico na Produção de Concreto Drenante**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Maria, 2017. 65 p.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SANTA MARIA (PMSM). **Lei do Uso e Ocupação do Solo, Parcelamento, Perímetro Urbano e Sistema Viário do Município de Santa Maria**. Lei Complementar nº 117, de 26 de Julho de 2018. 69 p.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO (PMSP). **IP 07/2004 – Dimensionamento de Pavimentos de Concreto**. 39 p.

QUADRELLI, A. C.; OLIVEIRA, L. C. B.; KERTIS, T. B.; BARBOSA, M. P.; JACINTHO, A. E. A. P.; CAMARINI, G. **Avaliação “In Loco” de Pisos de Concreto Permeável de Resíduos de Fresado Asfáltico sobre Diferentes Sub-bases**. Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto, 2016. 16 p.

RAJ, J. L.; CHOCKALINGAM, T. **Strength and Abrasion Characteristics of Pervious Concrete**. Road Materials and Pavement Design, 2019. 19 p.

ROCHA SEGUNDO, I. G.; BRANCO, V. T. F. C.; VASCONCELOS, K. L.; HOLANDA, A. S. **Misturas Asfálticas Recicladas a Quente com Incorporação de Elevado Percentual de Fresado como Alternativa para Camada de Módulo Elevado**. Revista Transportes, 2016. 10 p.

RODDEN, R.; SMITH, T. **Structural and Hydrological Design of Sustainable Pervious Concrete Pavements**. Annual Conference of the Transportation Association of Canada, 2011. 17 p.

SALES, T. L. **Pavimento Permeável com Superfície em Blocos de Concreto de Alta Porosidade**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008. 173 p.

SANDOVAL, G. F. B. **Desempenho do concreto poroso com agregados sustentáveis**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Londrina, 2014. 108 p.

SANTOS, J. R. **Determinação do Traço e Caracterização da Resistência Mecânica de um Concreto Drenante**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Maria, 2017. 79 p.

SCHAEFER, V.; WANG, K.; SULEIMAN, M.; KEVERN, J. **Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates**. Final Report, Civil Engineering, Iowa State University, 2006. 67 p.

SCHOLZ, M.; GRABOWIECKI, P. **Review of Permeable Pavement Systems**. Building and Environment, 2006. 7 p.

SCHWETZ, P. F.; SILVA FILHO, L. C. P.; LORENZI, A.; FERREIRA, L. Z.; LINHARES, V.; PARISOTO, M. **Concreto permeável: Otimização do traço para pavimentação de fluxo leve**. CONPAT2015. 11 p.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo, Editora Pini, 2 ed., 2007. 764 p.

SILVA, G. B. L. **Avaliação Experimental Sobre Eficiência de Superfícies Permeáveis com Vistas ao Controle do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas.** Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 2006. 180 p.

SONEBI, M.; BASSUONI, M.; YAHIA, A. **Pervious Concrete: Mix Design, Properties and Application.** RILEM Technical Letters, 2016. 7 p.

SOUZA, S. A. **Avaliação da Capacidade de Escoamento da Água em Mistura Asfáltica Drenante: Proposta de Ensaio de Laboratório.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008. 121 p.

SRIRAVINDRARAJAH, R.; WANG, N. D. H.; ERVIN, L. J. W. **Mix Design for Pervious Recycled Aggregate Concrete.** International Journal of Concrete Structures and Materials, 2012. 8 p.

SUDERHSA. **Manual de drenagem urbana – Região metropolitana de Curitiba/PR.** Superintendência de desenvolvimento de recursos hídricos e saneamento ambiental. 2002. 162 p.

SULEIMAN, M. T.; KEVERN, J.; SCHAEFER, V. R.; WANG, K. **Effect of Compaction Energy on Pervious Properties.** Proceedings of Concrete Technology Forum: Focus on Pervious Concrete, 2006. 8 p.

TARTUCE, R. G. **Princípios Básicos sobre Concreto de Cimento Portland.** São Paulo. Editora Pini, 1990. 108 p.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. **The Influence os Recycled Concrete Aggregates in Pervious Concrete.** IBRACON Structures and Materials Journal, 2016. 8 p.

TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. **Pervious Concrete Pavements.** EB302.02, Portland Cement Association, Skokie Illinois , e National Ready Mixed Association, Silver Spring Maryland, USA, 2004. 36 p.

TUCCI, C. E. M. **Águas Urbanas.** Estudos Avançados 22, 2008. 16 p.

UDFCD. **Urban Storm Drainage Criteria Manual (V. 3).** Urban Drainage and Flood Control District, Denver, Colorado, 2010. 597 p.

VIEIRA, A. D. B.; SANTOS, J. R.; LAMBERTI, L. A.; CERVO, T. C. **Utilização de Fresado Asfáltico como Substituto de Agregados Naturais na Produção de Concreto Permeável para Utilização em Vias de Tráfego Leve.** 32º ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2018. 10 p.

VIEIRA, A. D. B.; SANTOS, J. R.; LAMBERTI, L. A.; ILHA, P. S.; VIEIRA, R. S.; CERVO, T. C. **Caracterização do Solo para Implantação de um Pavimento Permeável em Santa Maria – RS.** X Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul, 2019.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de Projeto e Execução de Pavimentos Permeáveis Visando Retenção e Amortecimento de Picos de Cheias**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009. 191 p.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Tipos de Concreto**. Disponível em: <www.votorantimcimentos.com.br/produtos/concreto>. Acesso em 25/08/2018.

WEISS, P. T.; KAYHANIAN, M.; GULLIVER, J. S.; KHAZANOVICH, L. **Permeable Pavement n Northern North American Urban Areas: Research Review and Knowledge Gaps**. International Journal of Pavement Engineering, 2017. 21 p.

WOODS-BALLARD, B.; WILSON, S.; UDALE-CLARKE, U.; SCOTT, T.; KELLAGHER, R. **The SuDS Manual**. CIRIA C753, London, 2015. 940 p.

YANG, J.; JIANG, G. **Experimental Study on Properties of Pervious Concrete Pavement Materials**. Cement and Concrete Research, 2002. 6 p.

YANG, Z.; MA, W.; SHEN, W.; ZHOU, M. **The Aggregate Gradation for the Porous Concrete Pervious Road Base Material**. Journal of Wuhan University of Technology-Mater, 2008. 4 p.

YONG, C. F.; McCARTHY, D. T.; DELETIC, A. **Predicting Physical Clogging of Porous and Permeable Pavements**. Journal of Hydrology, 2013. 8 p.

ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; SKCZYLAS, F.; WIRQUIN, E. **Assessment of the Surface Permeation Properties of Recycled Aggregate Concrete**. Cement e Concrete Composites, 2002. 10 p.