

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Gustavo Araujo Carvalho

**Estudo de concreto asfáltico permeável com asfalto polímero e adição de
fibras de celulose.**

Juiz de Fora

2021

Gustavo Araujo Carvalho

Estudo de concreto asfáltico permeável com asfalto polímero e adição de fibras de celulose.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Luciano de Oliveira Marques

Juiz de Fora

2021

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Carvalho, Gustavo Araujo.

Estudo de concreto asfáltico permeável com asfalto polímero e adição de fibras de celulose / Gustavo Araujo Carvalho. -- 2021. 185 f.

Orientador: Geraldo Luciano de Oliveira Marques

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

1. Pavimentação. 2. Concreto Asfáltico Permeável. 3. Fibras de Celulose. I. Marques, Geraldo Luciano de Oliveira, orient. II. Título.

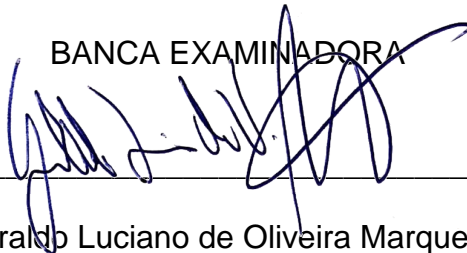
Gustavo Araujo Carvalho

Estudo de concreto asfáltico permeável com asfalto polímero e adição de fibras de celulose.

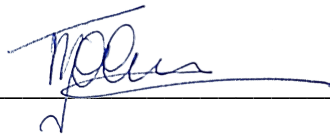
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovada em 16 de setembro de 2021

BANCA EXAMINADORA



Prof. D.Sc. Geraldo Luciano de Oliveira Marques - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF



Prof. D.Sc. Thaís Mayra de Oliveira
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF



Prof. D.Sc. Ronderson Queiroz Hilário
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Dedico este trabalho aos meus pais que
estão sempre ao meu lado...

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Maurilio e Neuza por me motivarem a seguir meus objetivos e me auxiliarem incondicionalmente em todos os momentos. A vocês toda a minha gratidão por serem meu alicerce.

Agradeço também ao professor Geraldo pela entrega e parceria durante a pesquisa, compartilhando seus conhecimentos, se mostrando aberto às minhas sugestões e estando sempre presente tanto na concepção do tema quanto na parte prática.

Aos membros das bancas de qualificação Prof^a. Thaís Mayra de Oliveira e Prof. Guilherme Soldati Ferreira agradeço pelo aceite em participar da etapa e pelas sugestões para melhorias no trabalho.

Agradeço à Prof^a. Thaís Mayra de Oliveira e ao Prof. Ronderson Queiroz Hilário por aceitarem o convite para participar da banca de defesa da presente dissertação.

Agradeço aos meus colegas de laboratório Guilherme e Marlilene por auxiliarem minha pesquisa e tornar possível a execução de três trabalhos simultaneamente.

Sou grato também ao técnico e amigo Victor por me ajudar na execução dos ensaios e ser uma figura de apoio no laboratório, me ensinando seus conhecimentos.

Ademais, gostaria de agradecer aos amigos com quem compartilhei a evolução da dissertação dia a dia e vibraram com cada pequeno passo dado.

Aos meus avós e demais familiares, o meu muito obrigado por me incentivarem a seguir meu caminho, respeitando minhas limitações e exaltando minhas qualidades. Com os valores que apreendi ao longo da minha vida foi que essa etapa foi possível de se concluir.

RESUMO

A agência norte-americana de práticas ambientais (EPA, 2009), dentro da proposta de práticas sustentáveis, sugere a substituição de revestimentos impermeáveis por outros como o de concreto asfáltico permeável. O uso desse revestimento permite redução do acúmulo de água, aumento da aderência, maior segurança de tráfego em condições de pista molhada e redução de ruídos relacionados ao rolamento. O presente trabalho visou estudar a influência da adição de quatro diferentes teores de fibra de celulose em uma mistura de concreto asfáltico permeável com ligante modificado por polímeros. Utilizaram-se agregados da faixa I de granulometria da norma de Camada Porosa de Atrito (DNER-ES 386/99). O teor de ligante de projeto foi de 4%, correspondente a 18,3% de vazios. Com a utilização de 0%, 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibras, analisaram-se cinco parâmetros: coeficiente de permeabilidade (adaptação do método prescrito na norma ACI 522R – 06); teor de vazios comunicantes (AFNOR-NF-P-98-254-2 - 1993); perda ao cântabro (DNER-ME 383/99); resistência à tração por compressão diametral (DNIT 136/2018 – ME) e módulo de resiliência (DNIT 135/2018-ME). Na ausência de uma norma que regulamente o processo de medição do coeficiente de permeabilidade, criou-se um equipamento capaz de ensaiar CPs compactados segundo a DNER-ES 386/99. O aparato, inspirado em uma norma norte-americana, mostrou-se bastante eficiente; de forma a constituir uma possibilidade de complemento da norma de camada porosa de atrito. Os parâmetros nos quais a porcentagem de fibra exerceu influência significativa foram Módulo de Resiliência (MR) e Coeficiente de Permeabilidade (k). O valor de MR foi máximo quando o teor de fibras foi de 0,25%, semelhante ao obtido para o grupo com 0% e significativamente distinto dos grupos com 0,50% e 0,75%. O valor de k foi significativamente distinto para cada grupo, mostrando um aumento até a adição de fibras em 0,50%. O grupo com 0,50% de fibras apresentou o maior valor de k e MR 32% inferior ao grupo com 0,25%. Quando comparado aos grupos sem fibra e com teor de 0,75%, o grupo com 0,25% apresentou os maiores valores de MR e k.

Palavras-chave: Concreto asfáltico permeável. Fibras de celulose. Drenagem urbana. Ensaio de permeabilidade.

ABSTRACT

The American Environmental Practices Agency (EPA, 2009), within the proposal of sustainable practices, suggests the replacement of waterproof coatings for others such as permeable asphalt concrete. The use of this coating allows reduction on water accumulation, increased grip, increased traffic safety in wet road conditions and reduced rolling noise. The present work aimed to study the influence of the addition of four different contents of cellulose fiber in a mix of permeable asphalt concrete with polymer modified binder. Aggregates of the particle size range I of the Porous Friction Layer standard (DNER-ES 386/99) were used. The design binder content was 4%, corresponding to 18.3% voids. Using 0%, 0.25%, 0.50% and 0.75% of fibers, five parameters were analyzed: permeability coefficient (adaptation of the method prescribed in the ACI 522R – 06); content of communicating voids (AFNOR-NF-P-98-254-2 - 1993); loss to cantabrian (DNER-ME 383/99); tensile strength by diametrical compression (DNIT 136/2018 - ME) and resilience modulus (DNIT 135/2018-ME). In the absence of a standard that regulates the permeability coefficient measurement process, an equipment capable of testing compacted CPs according to DNER-ES 386/99 was created. The apparatus, inspired by an american standard, proved to be efficient; the methodology constitutes a possibility of complement of the porous friction layer standard. The parameters on which the fiber percentage exerted a significant influence were Resilience Modulus (MR) and Permeability Coefficient (k). The MR value was maximum when the fiber content was 0.25%, similar to the obtained for the 0% group and significantly different from the 0.50% and 0.75% groups. The k value was significantly different for each group, showing an increase up to the addition of fibers by 0.50%. The group with 0.50% fiber had the highest value of k and MR 32% lower than the group with 0.25%. When compared to the groups without fiber and with a content of 0.75%, the group with 0.25% presented the highest values of MR and k.

Keywords: Permeable asphalt concrete. Cellulose fibers. Urban drainage. Permeability test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Balanço hídrico em uma bacia urbanizada	23
Figura 2	– Comportamento hidrológico conforme grau de impermeabilização do solo	23
Figura 3	– Ilustração de uma bacia de infiltração.....	24
Figura 4	– População urbana de acordo com as regiões do Brasil.....	26
Figura 5	– Alturas da lâmina d'água antes e após a urbanização.....	27
Figura 6	– Sistema clássico de drenagem urbana.....	31
Figura 7	– Técnicas Alternativas de Drenagem.....	32
Figura 8	– Vistas aéreas de local submetido a dois tipos de sistema de drenagem.....	33
Figura 9	– Estrutura dos pavimentos permeáveis.....	37
Figura 10	– Dinâmica da água nos pavimentos permeáveis.....	37
Figura 11	– Sistema com dutos drenantes para pavimentos permeáveis.....	38
Figura 12	– Sistema de Infiltração Parcial.....	39
Figura 13	– Blocos vazados de concreto com vazios preenchidos por grama.....	41
Figura 14	– Blocos intertravados de concreto sobre camada de areia.....	42
Figura 15	– Diferentes paginações de blocos intertravados de concreto.....	42
Figura 16	– Trecho em que peças pré-moldadas de concreto foram deslocadas.....	43
Figura 17	– Concreto permeável de cimento Portland.....	45
Figura 18	– Concreto permeável como revestimento em estacionamento.....	46
Figura 19	– Ensaio de permeabilidade em uma placa de concreto permeável.....	47
Figura 20	– Concreto Asfáltico Permeável logo após sua fabricação e compactação...	48
Figura 21	– Redução da formação de névoa pelo efeito de spray d'água em pavimentos revestidos de concreto asfáltico permeável.....	50
Figura 22	– Tipos de vazios em uma camada de concreto asfáltico poroso.....	55
Figura 23	– Fenômeno de Hidroplanagem Dinâmica.....	56
Figura 24	– Projeção de água pelo pneu em revestimento impermeável.....	57
Figura 25	– Ausência do efeito de projeção devido à utilização de revestimento permeável.....	57
Figura 26	– Mecanismos de aderência entre pneu e pavimento.....	59

Figura 27	– Penetração do ar nos vazios do concreto permeável.....	62
Figura 28	– Ilustração do processo de colmatação.....	63
Figura 29	– Ilustração do rolo compactador ideal para revestimentos asfálticos permeáveis.....	68
Figura 30	– Fibra de vidro.....	72
Figura 31	– Detalhe do intertravamento na zona de contato entre partículas de agregado.....	73
Figura 32	– Permeâmetro utilizado no estudo de Carvalho (2015).....	78
Figura 33	– Ensaio Cântabro realizado no estudo.....	78
Figura 34	– Estrutura química do polímero SBS.....	81
Figura 35	– Exemplo de uma trilha de roda.....	82
Figura 36	– Pavimento deteriorado em razão da repetição de deformações elásticas... ..	83
Figura 37	– Permeâmetro de carga variável utilizado por Homem (2002).....	88
Figura 38	– Aumento da espessura do filme de ligante entre os agregados.....	89
Figura 39	– Infiltrômetro da Universidade de Cantábria.....	90
Figura 40	– Permeâmetro utilizado por Schneider (2016).....	96
Figura 41	– Agregados.....	103
Figura 42	– Agregados separados em faixas granulométricas distintas.....	103
Figura 43	– Ligante em temperatura ambiente.....	104
Figura 44	– Ligante aquecido até a temperatura de mistura.....	105
Figura 45	– Fibras de celulose.....	106
Figura 46	– Concreto asfáltico espalhado sobre bandeja metálica.....	107
Figura 47	– Aplicação de pressão de vácuo.....	107
Figura 48	– Pesagem do recipiente com concreto asfáltico e água.....	108
Figura 49	– Material retido na peneira N° 10.....	112
Figura 50	– Material passante na peneira N° 10.....	112
Figura 51	– Disposição dos agregados na estufa.....	113
Figura 52	– Mistura dos elementos componentes do concreto asfáltico permeável.....	114
Figura 53	– Anéis de compactação.....	115
Figura 54	– Compactador Marshal.....	115
Figura 55	– CPs após compactação.....	116

Figura 56	–	Corpo-de-prova.....	116
Figura 57	–	CP posicionado dentro do tambor.....	117
Figura 58	–	CP após Ensaio do Cântabro.....	118
Figura 59	–	Comparação de CP íntegro e após o ensaio.....	118
Figura 60	–	CP posicionado para realização do ensaio.....	119
Figura 61	–	CP após ruptura.....	120
Figura 62	–	CP submetido a ensaio de Módulo de Resiliência.....	121
Figura 63	–	Equipamento para Ensaio de Permeabilidade.....	123
Figura 64	–	Aparelho para o Ensaio de Permeabilidade.....	124
Figura 65	–	Detalhe da abertura no cano.....	125
Figura 66	–	Demarcação dos Níveis Superior e Inferior.....	125
Figura 67	–	Peças do Aparelho para Ensaio de Permeabilidade.....	126
Figura 68	–	Procedimento de selagem da junção entre os elementos 2 e 3.....	127
Figura 69	–	Encaixe do CP na luva.....	128
Figura 70	–	Encaixe do CP no tê.....	128
Figura 71	–	Água sendo vertida na extremidade do cano de 25 mm.....	129
Figura 72	–	Filme de água sobre o corpo-de-prova.....	129
Figura 73	–	Detalhe do preenchimento do tubo de 100 mm.....	130
Figura 74	–	Nível da água em relação à marca inferior.....	131
Figura 75	–	Posicionamento das linhas de poliamida no CP.....	132
Figura 76	–	Linha de poliamida encerada e fio metálico.....	133
Figura 77	–	Procedimento utilizado para envolver o CP em fita crepe.....	134
Figura 78	–	Fusão da parafina e imersão do CP.....	135
Figura 79	–	Posicionamento dos CPs para aguardar a secagem.....	135
Figura 80	–	Corpos-de-prova preparados para o ensaio.....	136
Figura 81	–	Distribuição de água sobre a superfície do CP.....	137
Figura 82	–	Formação do filme de água sobre o corpo-de-prova.....	137
Figura 83	–	Configuração no GraphPad Prism para Teste de Normalidade.....	139
Figura 84	–	Configuração no GraphPad Prism para ANOVA com medidas repetidas e Teste de Tukey.....	140
Figura 85	–	Configuração no GraphPad Prism para Teste de Kruskal-Wallis e Teste de Dunns.....	140

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Crescimento populacional mundial nos meios rural e urbano.....	25
Gráfico 2	– Análise da vazão conforme o tempo antes e após a urbanização.....	29
Gráfico 3	– Distribuição da chuva ao longo do ano na cidade de Juiz de Fora.....	30
Gráfico 4	– Diferentes efeitos da precipitação em diferentes tipos de bacias.....	35
Gráfico 5	– Relação entre Coeficiente de Atrito Longitudinal e Nível Sonoro para diversos pavimentos.....	61
Gráfico 6	– Efeito da colmatção no escoamento superficial em pavimentos com e sem manutenção.....	67
Gráfico 7	– Vida de Fadiga para cada ligante em diferentes idades.....	83
Gráfico 8	– Teores Ótimos de Ligantes.....	85
Gráfico 9	– Porosidades obtidas para as misturas estudadas.....	86
Gráfico 10	– Perda no Cântabro após 7 dias de envelhecimento.....	86
Gráfico 11	– Perda ao cântabro para diferentes misturas asfálticas.....	91
Gráfico 12	– Permeabilidade para diferentes tipos de misturas asfálticas.....	92
Gráfico 13	– IDT e MR para diferentes tipos de misturas asfálticas.....	92
Gráfico 14	– Perda ao cântabro para diferentes tipos de misturas asfálticas.....	93
Gráfico 15	– Permeabilidade para diferentes tipos de misturas asfálticas.....	94
Gráfico 16	– IDT e MR para diferentes tipos de misturas asfálticas.....	94
Gráfico 17	– Perda ao cântabro para diferentes tipos de misturas asfálticas.....	95
Gráfico 18	– Perda ao cântabro.....	97
Gráfico 19	– Resistência à tração por compressão diametral.....	97
Gráfico 20	– Curva granulométrica do pó de pedra.....	100
Gráfico 21	– Curva granulométrica da brita 0.....	101
Gráfico 22	– Limites da Faixa I e distribuição granulométrica adotada por autores.....	101
Gráfico 23	– Curva granulométrica da mistura de agregados utilizada.....	102
Gráfico 24	– Volume de Vazios e Teores de Ligante.....	110
Gráfico 25	– Perda ao Cântabro para misturas com diferentes teores de fibra.....	142
Gráfico 26	– Resistência à Tração para misturas com diferentes teores de fibra.....	144
Gráfico 27	– Módulo de Resiliência para misturas com diferentes teores de fibra.....	147

Gráfico 28	– Coeficiente de Permeabilidade para CPA com diferentes teores de fibra.....	149
Gráfico 29	– Vazios Comunicantes para CPA com diferentes teores de fibra.....	153

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	– Ocorrências urbanas que influenciam na drenagem da água.....	28
Quadro 2	– Consequências observadas e relacionadas à drenagem urbana.....	28
Quadro 3	– Comparativo entre os tipos de revestimento.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Porcentagem populacional em áreas urbanas.....	25
Tabela 2	– Prescrições de granulometria da DNER-ES 386 (1999).....	76
Tabela 3	– Composição dos dois concretos estudados por Carvalho (2015).....	77
Tabela 4	– Características das misturas VD 4 e VD 7.....	84
Tabela 5	– Resultados do estudo de Schneider (2016).....	96
Tabela 6	– Caracterização do pó de pedra.....	99
Tabela 7	– Caracterização da brita 0.....	99
Tabela 8	– Análise granulométrica do pó de pedra.....	100
Tabela 9	– Análise granulométrica da brita 0.....	100
Tabela 10	– Granulometria utilizada no estudo.....	102
Tabela 11	– Características do ligante asfáltico.....	104
Tabela 12	– Massa de ligante para cada teor.....	106
Tabela 13	– Valores de G_{MM}	109
Tabela 14	– Valores de M_{ea}	110
Tabela 15	– Pesos dos agregados para cada faixa granulométrica.....	111
Tabela 16	– Temperaturas de mistura e compactação do ligante CAPFLEX 60/85 E..	113
Tabela 17	– Resultados de perda ao cântabro.....	141
Tabela 18	– Comparativo de perda ao cântabro entres trabalhos da literatura.....	143
Tabela 19	– Resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	144
Tabela 20	– Comparativo de RT entres trabalhos da literatura.....	145
Tabela 21	– Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência.....	146
Tabela 22	– Comparativo de MR entres trabalhos da literatura.....	148
Tabela 23	– Resultados do ensaio de Permeabilidade.....	149
Tabela 24	– Comparativo de Permeabilidade entres trabalhos da literatura.....	150
Tabela 25	– Resultados do ensaio de Vazios Comunicantes.....	152
Tabela 26	– Comparativo de Vazios Comunicantes entres trabalhos da literatura.....	154

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACI	American Concrete Institute
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	Association Française de Normalisation
BMP	Best Management Practices
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CP	Corpo-de-prova
CPs	Corpos-de-prova
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EPA	Environmental Protection Agency
GNCDS	Groupe National “Caractéristiques de Surface de Chaussées”
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LID	Low Impact Development
MAPLU	Manejo de Águas Pluviais Urbanas
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostras de Domicílios
SBS	Styrene-Butadiene-Styrene

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS GERAIS.....	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.3	RELEVÂNCIA.....	19
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	20
2	DRENAGEM URBANA.....	21
2.1	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO EM ÁREAS URBANAS.....	21
2.2	URBANIZAÇÃO E IMPACTOS HIDROLÓGICOS.....	24
2.3	SISTEMA CLÁSSICO DE DRENAGEM URBANA.....	30
2.4	SISTEMA ALTERNATIVO DE DRENAGEM URBANA.....	32
3	PAVIMENTOS PERMEÁVEIS.....	36
3.1	BLOCOS VAZADOS E INTERTRAVADOS DE CONCRETO.....	40
3.2	REVESTIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL.....	44
3.3	REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO PERMEÁVEL.....	48
4	TÓPICOS ESPECIAIS DO CONCRETO ASFÁLTICO PERMEÁVEL.	53
4.1	PERMEABILIDADE.....	53
4.2	ADERÊNCIA ENTRE PNEU E PAVIMENTO.....	58
4.3	RUÍDO E ABSORÇÃO ACÚSTICA.....	60
4.4	COLMATAÇÃO.....	62
4.5	DURABILIDADE.....	64
4.6	MANUTENÇÃO DO REVESTIMENTO.....	65
4.7	FABRICAÇÃO, TRANSPORTE E COMPACTAÇÃO NO LOCAL.....	67
4.8	VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO CONCRETO ASFÁLTICO PERMEÁVEL.....	68
4.9	GERAÇÕES.....	70
4.10	LIGANTES MODIFICADOS POR POLÍMEROS E COM ADIÇÃO DE FIBRAS.....	71
4.11	AGREGADOS UTILIZADOS.....	74
5	ESTUDOS COM LIGANTES MODIFICADOS POR POLÍMEROS E COM ADIÇÃO DE FIBRAS.....	77

6	MATERIAIS E METODOLOGIA.....	99
6.1	AGREGADOS.....	99
6.2	LIGANTE ASFÁLTICO.....	104
6.3	FIBRAS DE CELULOSE.....	105
6.4	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE PROJETO DO LIGANTE.....	106
6.5	MISTURA E COMPACTAÇÃO.....	111
6.6	ENSAIO DE PERDA AO CÂNTABRO.....	117
6.7	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	119
6.8	MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	120
6.9	ENSAIO DE PERMEABILIDADE.....	122
6.10	TEOR DE VAZIOS COMUNICANTES.....	131
6.11	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	138
7	RESULTADOS E ANÁLISES.....	141
7.1	PERDA AO CÂNTABRO.....	141
7.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	143
7.3	MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	146
7.4	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE.....	149
7.5	VAZIOS COMUNICANTES.....	152
8	CONCLUSÕES.....	155
8.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	157
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	158
	APÊNDICE A – Análise estatística de perda ao cântabro.....	172
	APÊNDICE B – Análise estatística de resistência à tração por compressão diametral.....	174
	APÊNDICE C – Análise estatística de módulo de resiliência.....	176
	APÊNDICE D – Análise estatística do coeficiente de permeabilidade.....	179
	APÊNDICE E – Análise estatística de vazios comunicantes.....	182
	APÊNDICE F – Porcentagens de vazios dos CPS.....	184

1 INTRODUÇÃO

Souza *et al.* (2004) afirmam que a magnitude da ocupação geográfica humana e as atividades de construção civil exercem impacto direto no comportamento dos fenômenos e elementos do meio ambiente.

As atividades humanas compreendem expansão de centros urbanos, ocupação de áreas vizinhas a cursos d'água e impermeabilização do solo. Segundo Batezini (2013), esses fatores, associados a eventos de elevada precipitação em um curto período de tempo, são determinantes para a ocorrência de inundações distribuídas ao longo da malha urbana. Cho e Mun (2015) apontam o papel a impermeabilização do solo como fator significativo para a diminuição da recarga das águas subterrâneas.

Tucci (2009) analisou as principais problemáticas conectadas ao processo de urbanização rápida e sem planejamento adequado, com enfoque na impermeabilização do solo; isso é, a substituição de áreas previamente com cobertura vegetal por vias pavimentadas, estacionamentos, construções residenciais e industriais, dentre outras. O autor foca na diminuição da capacidade de infiltração da água no solo, aumento das velocidades de escoamento da água sobre as superfícies impermeabilizadas e retenção em locais específicos (geralmente associados ao perfil topográfico local), caracterizando as enchentes.

Ainda de acordo com Tucci, o princípio tradicional da drenagem urbana é o de drenar e direcionar de modo mais rápido e eficaz as águas precipitadas para a jusante da rede. Entretanto, esse sistema e a impermeabilização do solo são responsáveis pela geração de um fluxo hídrico superior à capacidade dos sistemas de drenagem existentes.

Fazendo frente a essa problemática e buscando soluções para a gestão da água pluvial, surge o conceito de “Best Management Practices” ou “Melhores Práticas de Gestão”, que são práticas de gestão urbana cuja finalidade é possibilitar a drenagem da água no próprio local em que ela precipitou, alterando tanto a funcionalidade das estruturas urbanas quanto a paisagem das cidades. Uma das alternativas que pode ser adotada é a substituição dos pavimentos impermeáveis por pavimentos com revestimento permeável (EPA, 2009).

O pavimento permeável, por sua vez, é um dispositivo em que se desvia a água do escoamento superficial, através de uma camada permeável, para um

reservatório de pedras. A água desse reservatório pode ser captada lentamente por tubos coletores ou se infiltra no solo (PARK *et al.*, 2014).

Ao redor do mundo, esse material tem sido aprimorado cada vez mais. Pesquisas avaliam seus comportamentos hidráulicos e mecânicos. Uma tendência que vem se confirmando é a utilização de fibras e polímeros no ligante asfáltico que envolve as britas do compósito permeável. O principal objetivo que os estudos procuram atender é a melhoria em termos de resistência e durabilidade do material (ZHANG *et al.*, 2015).

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Neste trabalho tem-se em vista estudar o comportamento do concreto asfáltico poroso modificado por polímeros, uma das medidas capazes de proporcionar melhores resultados em termos de drenagem urbana, com a adição de diferentes teores de fibra de celulose na mistura asfáltica. O objetivo é realizar um comparativo entre compósitos com diferentes percentuais de fibras de celulose e com ligante asfáltico modificado por polímeros, de forma a analisar o comportamento apresentado em relação a permeabilidade, teor de vazios comunicantes, perda no ensaio cântabro, resistência à tração na compressão diametral e módulo de resiliência.

Em vista da ausência de um método de ensaio de permeabilidade para o revestimento em questão, objetiva-se a criação de um aparelho para medição do coeficiente de permeabilidade “k” que seja capaz de condicionar a passagem da água exclusivamente pelos vazios do corpo-de-prova, com custo acessível e resultados coerentes para CPs do tipo Marshall.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Busca-se determinar as quantidades referentes a pó de pedra, brita zero e do teor de projeto do ligante para a mistura asfáltica do estudo.

Ainda, esta pesquisa visa analisar a eficácia da adaptação da norma norte-americana ACI 522R – 06 (2006) para a medição do parâmetro de permeabilidade dos corpos-de-prova Marshall de concreto asfáltico permeável; sugestão de complemento para a norma brasileira de Camada Porosa de Atrito.

1.3 RELEVÂNCIA

É consenso entre autores como Tucci (2009) que, conforme se observa o crescimento demográfico e a intrínseca ocupação irregular do solo, fenômenos hidrológicos tendem a acarretar cada vez mais prejuízos em termos financeiros e humanos.

Paula Junior (2019) ilustra que a tendência atual nas áreas urbanizadas é de que os picos das enchentes atinjam valores maiores e em menor tempo em relação a áreas não-urbanizadas.

Na cidade mineira de Juiz de Fora, nos três primeiros meses do ano de 2020, as chuvas tomaram destaque nas manchetes. De acordo com o jornal Tribuna de Minas (2020), no dia 23 de janeiro de 2020, a Defesa Civil estimava uma precipitação de 75 mm em 24 horas (20% do previsto para o mês); no dia 03 de março de 2020 registrou-se em 36 horas uma precipitação de 74,4 milímetros, equivalente ao esperado para o mês inteiro.

Em 06 de janeiro de 2021, o mesmo veículo de imprensa divulgou que apenas os seis primeiros dias do ano já somavam um volume de precipitação correspondente a 56% dos 322 mm previstos para todo o mês. Este volume foi alcançado 5 dias depois (11 de janeiro), destacando-se a precipitação de 113 mm em um único final de semana. Em três dias, a Defesa Civil registrou 132 ocorrências.

Becker e Pinheiro (2019) alertaram sobre os aumentos na ocorrência de enchentes e contaminação dos corpos d'água por razão do escoamento superficial das águas de chuva nas áreas densamente urbanizadas.

Uma alternativa apontada por autores como Carvalho (2015) e Virgillis (2009) é a adoção de pavimentos permeáveis, os quais são capazes de reduzir ou anular o escoamento superficial e, dessa forma, reduzir os picos de cheia.

Este trabalho busca, então, avaliar aspectos do concreto asfáltico permeável que tornem sua aplicação viável tanto do ponto de vista mecânico quanto do hidráulico. Segue-se, então, a tendência da última geração de concretos asfálticos permeáveis e, ao adicionar fibras de celulose e polímeros na mistura, busca-se obter um material cujo comportamento frente ao meio a que é exposto seja positivo a ponto de estimular as entidades responsáveis pelo planejamento urbano a adotá-lo como prática sustentável capaz de mitigar os impactos humanos no meio ambiente.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O primeiro capítulo apresenta uma contextualização do tema e demonstra a relevância do estudo. São descritos os objetivos gerais e específicos do trabalho.

Os três capítulos seguintes consistem em uma revisão de literatura, apresentando os conceitos da nova proposta de drenagem urbana e as particularidades do revestimento de concreto asfáltico permeável.

No capítulo cinco reuniram-se trabalhos encontrados na literatura com temática semelhante à abordada no presente, de modo a mostrar metodologias empregadas e resultados obtidos.

O sexto capítulo, intitulado “Materiais e Métodos”, aborda a metodologia utilizada para determinação do teor de ligante utilizado, a escolha dos agregados e os procedimentos laboratoriais normativos executados.

No sétimo capítulo é apresentada uma análise dos resultados obtidos, de modo a compará-los entre si e com outros valores obtidos por diferentes autores.

O penúltimo capítulo consiste na conclusão, com a apresentação de um texto cuja finalidade é de apontar os pontos observados a partir da realização da pesquisa.

No capítulo “Referências Bibliográficas”, são apresentadas as fontes consultadas com a finalidade de embasar o presente estudo.

2 DRENAGEM URBANA

Observa-se, com o decorrer do desenvolvimento das civilizações, que as aglomerações urbanas se concentravam em torno dos cursos d'água. A proximidade em relação aos mananciais constituía vantagens em diversos setores, tais como agricultura, navegação, comércio e consumo próprio. A ocupação territorial às margens do rio Nilo, no antigo Egito, é um dos maiores exemplos que se tem da importância da conexão com a água para o desenvolvimento de uma civilização.

Problemas como enchentes devidas à ocorrência natural das cheias dos rios e demais fontes de água eram comuns de acontecer, afetavam as populações que em torno desses habitavam, mas eram tidas como uma situação comum e cujos prejuízos eram menores que as vantagens de se morar nos referenciados locais.

Baptista *et al.* (2005) relatam porém que, conforme as civilizações se desenvolviam, a deposição da água utilizada para consumo próprio passou a causar uma situação problemática de higiene e saneamento. Esse recurso hídrico sem tratamento era simplesmente destinado às áreas urbanas comuns e ali se acumulavam.

Com o passar do tempo, surgiram as práticas higienistas, tais como as de canalização do caminho percorrido pela água. Essas medidas buscavam solucionar problemas relacionados às práticas sanitárias e à ocorrência de doenças relacionadas a um saneamento ineficiente.

De acordo com Pinto (2011), a partir do século XX, o processo de urbanização apresentou uma importância significativa no cenário global. As cidades, em sua grande maioria, se expandiram de forma rápida e sem o devido planejamento. Surgiram, então, problemas de inundações, justificadas pela ocupação indevida do solo e ao gradual processo de impermeabilização do mesmo, fazendo com que águas que anteriormente eram drenadas por ele passassem a escoar na superfície impermeável. Logo, foram sendo cada vez mais visíveis os problemas de eficiência dos sistemas de macrodrenagem pré-existentes.

2.1 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO EM ÁREAS URBANAS

Tucci (2006) e Kamali *et al.* (2017 apud Hu *et al.*, 2018) analisam as problemáticas associadas ao aumento do escoamento superficial, tangenciando a

infraestrutura urbana em países em desenvolvimento, tais como os da América Latina, a saber: concentração populacional elevada em pequenas áreas, expansão descontrolada das periferias por moradores com menores condições financeiras, planejamento urbano destinado apenas a locais ocupados por populações de renda alta e média, deficiências de saneamento básico e drenagem urbana, ocupação de locais naturalmente sujeitos a inundações nas zonas ribeirinhas, impermeabilização do solo e aumento da vazão de cheia em até sete vezes.

Tucci (2006) atribui essas problemáticas a fatores chave da logística urbana, como desconhecimento por parte da população e de profissionais (por exemplo, após episódios de enchentes é comum os moradores clamarem pela canalização do curso d'água; solução tal que apenas transfere o problema para locais a jusante), concepção inadequada dos projetos urbanos por parte dos profissionais da área de engenharia, visão setORIZADA do planejamento urbano (negligenciando a integração entre os diversos componentes da bacia hidrográfica) e falta de capacidade para o gerenciamento das águas por parte do município.

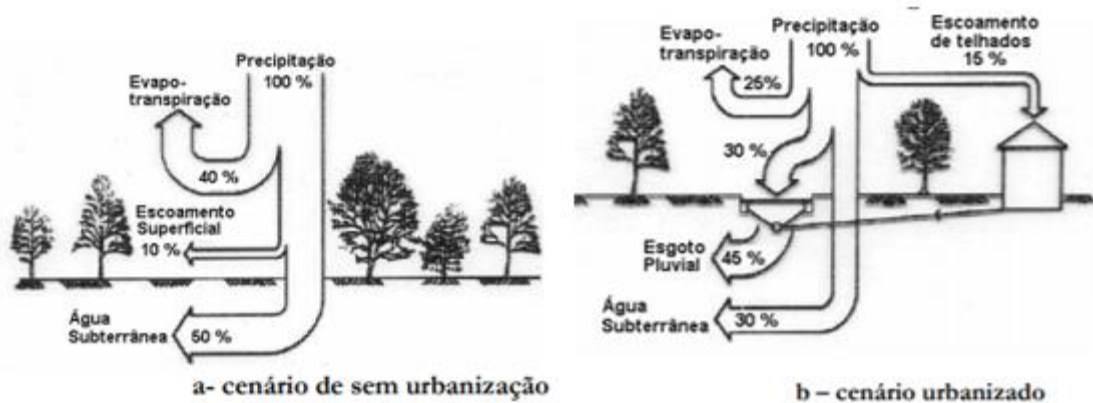
Batezini e Balbo (2015) afirmam que, na atualidade, o fato de o crescimento demográfico urbano ser observado com maior intensidade nas regiões de periferia implica em áreas anteriormente de viés rural passarem a se caracterizar como regiões urbanizadas. Tornaram-se fenômenos recorrente nessas localidades, ao alterar a ocupação da bacia demográfica, tanto enchentes quanto deslizamentos de terra.

Pinto (2011) destaca a inexistência ou ineficiência do planejamento da ocupação de áreas urbanas como fator significativo na impermeabilização das bacias hidrográficas e consequente elevação na ocorrência de alagamentos.

Segundo Cardoso (2017), anteriormente retida pela vegetação e, aos poucos, infiltrada no solo, a água passou cada vez mais a escoar superficialmente, ocasionando uma demanda maior dos condutos dimensionados para uma vazão de pico referente a períodos anteriores.

Essa mudança acarreta uma alteração no comportamento do ciclo hidrológico das localidades, conforme apontado por Tucci (2006). Da Figura 1 é importante destacar dois pontos: a recarga das águas subterrâneas no momento da precipitação é reduzida de 50% para 30% quando comparada uma localidade não urbanizada à uma urbanizada; o teor de evapotranspiração é reduzido de 40% para 25% quando o local passa por um processo de urbanização.

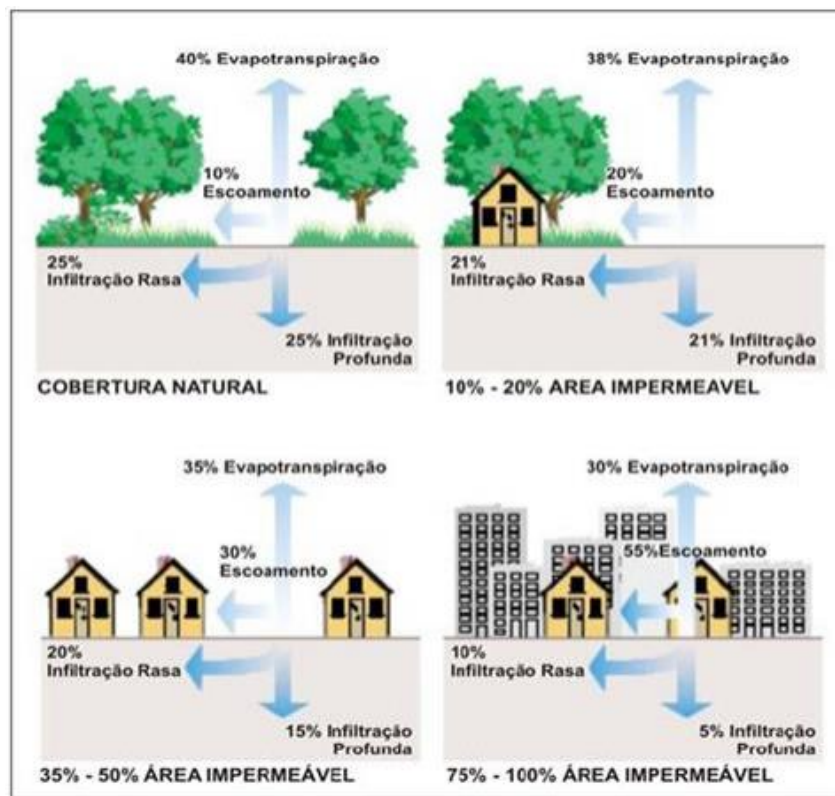
Figura 1 – Balanço hídrico em uma bacia urbanizada.



Fonte: OECD (1986 apud TUCCI, 2006).

Uma análise interessante apresentada na dissertação de Coutinho (2011) demonstra graficamente, a partir de uma imagem adaptada da United States Environmental Protection Agency (2005), as mudanças que ocorrem conforme o grau de impermeabilização do solo aumenta, vide Figura 2.

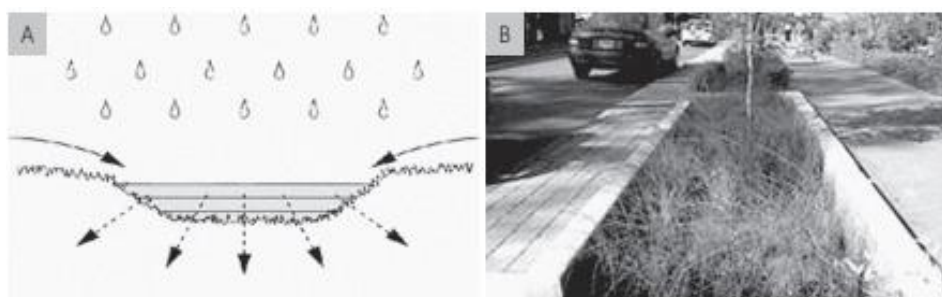
Figura 2 – Comportamento hidrológico conforme grau de impermeabilização do solo.



Fonte: Coutinho (2011).

MAPLU (2009), um guia de boas práticas para o manejo de águas pluviais, aborda algumas medidas mitigadoras para os problemas intrínsecos à urbanização, tais como: conscientização da população acerca do descarte irregular de lixo nas vias públicas, adoção de bacias e valas de infiltração (áreas distribuídas pelo cenário urbano capazes de absorver a água precipitada e direcioná-la às camadas de solo inferiores, vide Figura 3), utilização de pavimentos permeáveis (capazes de amortizar o escoamento superficial das águas e atuar como micro-reservatórios do volume de água pluvial) e reaproveitamento da água da chuva para fins residenciais.

Figura 3 – Ilustração de uma bacia de infiltração.



Fonte: MAPLU (2009).

MAPLU (2009) aponta ainda que o processo de impermeabilização do solo com adoção de revestimentos pouco permeáveis e o aumento do número de construções urbanas são fatores tais que afetam a infiltração e o regime de escoamento superfícies em níveis que se mostram superiores inclusive aos impactos provocados pelo processo de desmatamento.

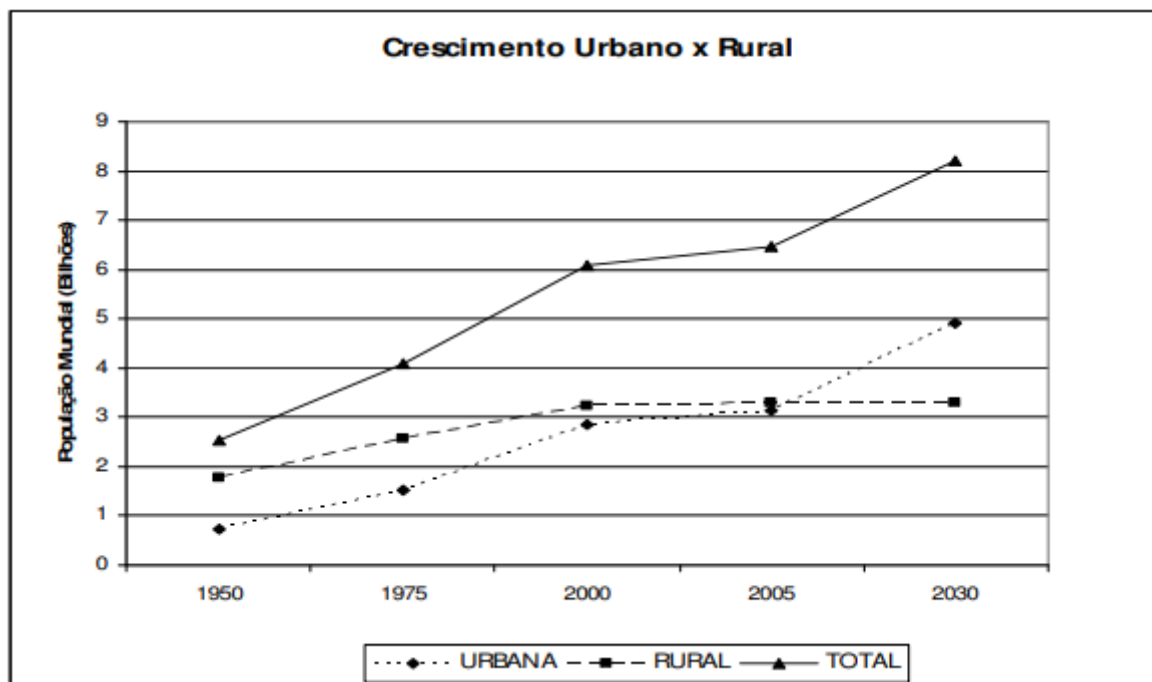
Segundo Ferguson (2005), as áreas ocupadas por edificações correspondem de 30 e 35% do total das superfícies impermeabilizadas, enquanto o restante é associado às áreas pavimentadas como vias de tráfego e estacionamentos.

2.2 URBANIZAÇÃO E IMPACTOS HIDROLÓGICOS

Ainda em consonância com as deficiências observadas atualmente nos serviços de drenagem urbana, há um fator muito importante a ser trazido em questão: o elevado crescimento demográfico da população ao redor do globo. Segundo relatório da Organização das Nações Unidas (2006 apud Virgiliis, 2009), a partir da segunda metade do século XX o número de habitantes do planeta começou

a apresentar um crescimento elevado, como pode ser observado no Gráfico 1, no qual são ilustrados valores precisos até o ano de 2005 e uma projeção populacional para o ano de 2030.

Gráfico 1 – Crescimento populacional mundial nos meios rural e urbano.



Fonte: World Urbanization Prospects (2006 apud VIRGILIIS, 2009).

A Tabela 1, por sua vez, explicita de forma mais enfática a mudança no perfil populacional. De acordo com as estatísticas, até a terceira década deste milênio, cerca de 60% dos habitantes do planeta irão residir em zonas urbanas, em oposição aos 40% de áreas rurais.

Tabela 1 - Porcentagem populacional em áreas urbanas.

População concentrada em áreas urbanas (%)				
1950	1975	2000	2005	2030
28,9	37,2	46,7	48,7	59,9

Fonte: Adaptado de World Urbanization Prospects (2006 apud VIRGILIIS, 2009).

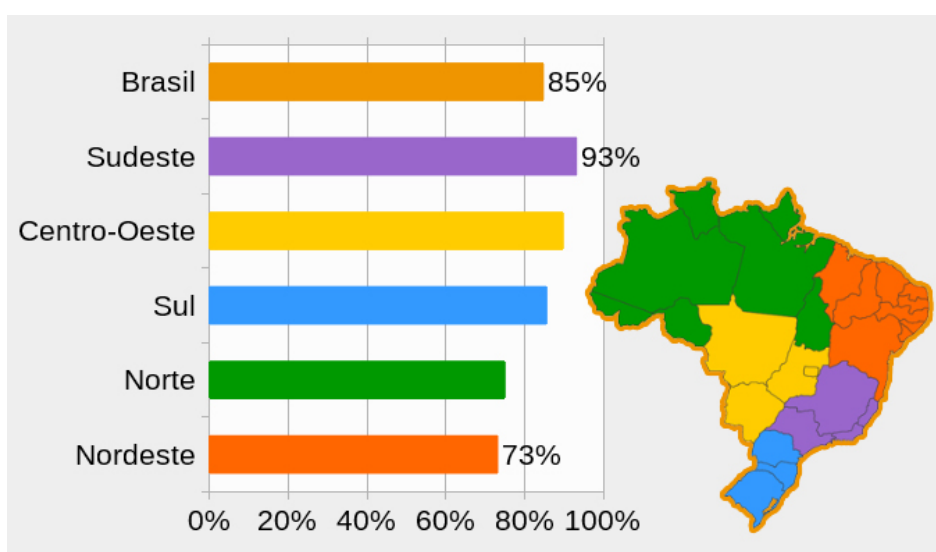
No Brasil, de acordo com Virgiliis (2009), estudos do IBGE apontavam na época para um crescimento populacional urbano na ordem de 84%.

Pode-se dizer que a concentração populacional em meios urbanos no país, em termos percentuais, superou a expectativa global apresentada pela World Urbanization Prospects em 2006. No ano de 2015, dados da Pesquisa Nacional por

Amostras de Domicílios (PNAD) do IBGE apontaram que 84,72% dos brasileiros residiam em áreas urbanas enquanto os 15,28% restantes ainda se estabeleciam no meio rural.

A Figura 4 ilustra que a região Sudeste é a que apresenta maior índice de urbanização em termos populacionais. Em contrapartida, a região Nordeste apresenta o menor percentual nesse quesito dentre as demais do país, sendo, todavia, superior às projeções internacionais para o globo como um todo.

Figura 4 – População urbana de acordo com as regiões do Brasil.



Fonte: IBGE (2015).

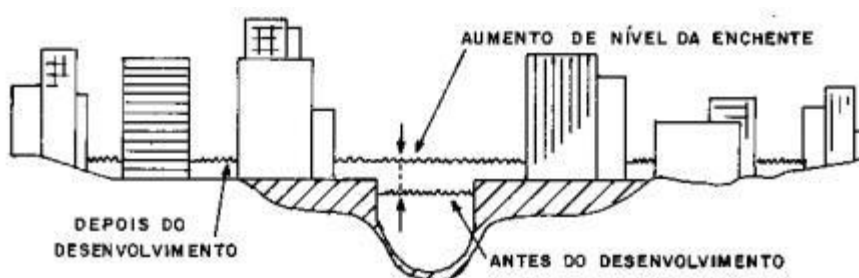
Na localidade referente a este estudo, Juiz de Fora (Minas Gerais), de acordo com o censo demográfico do IBGE (2010), a população era de 516.247 habitantes e a densidade demográfica de 359,59 habitantes por km², a décima nona cidade mais povoada do estado de Minas Gerais.

O crescimento desordenado, acompanhado da concentração populacional cada vez maior, vêm a ser agravados por problemas de gestão urbana, com sistemas de esgotamentos pluvial e sanitário ineficientes e, na maioria dos municípios, sem a presença de um Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (COUTINHO, 2011).

De acordo com MAPLU (2009), com esse cenário de crescimento populacional, deficiências no planejamento da ocupação do solo e falta de fiscalização adequada das ocupações urbanas, as áreas afetadas se multiplicaram. Anteriormente eram predominantemente os entornos das margens dos cursos

d'água e as localidades mais à jusante dos aglomerados ribeirinhos. Conforme o panorama urbano foi sendo alterado, as enchentes passaram a ocorrer em diversos pontos da malha urbana, distribuindo-se de acordo com o perfil topográfico municipal e da taxa de impermeabilização do solo em cada região. A Figura 5 ilustra o comportamento do nível da lâmina d'água nas regiões próximas a corpos d'água antes e após o processo de urbanização.

Figura 5 – Alturas da lâmina d'água antes e após a urbanização.



Fonte: Tucci (2006).

O aumento tanto na intensidade das inundações quanto no grau de distribuição no ambiente urbano traz em voga uma abordagem diferente do esquema de drenagem urbana, uma que considere o problema das águas como uma questão bem mais ampla, em que cada sistema local de drenagem faz parte da bacia hidrográfica como um todo. Medidas tradicionais, como a canalização de componentes fluviais, por exemplo, isentos de uma análise adequada, podem impactar a jusante do córrego, de modo a agravar a situação (TUCCI, 2009).

Tucci afirma que os recursos clássicos de drenagem demandam um elevado investimento financeiro, interferem na dinâmica diária da malha urbana e não são medidas sustentáveis, uma vez que precisam ser sempre redimensionados conforme as mudanças nas necessidades da população.

O autor significa como necessária a abordagem mais abrangente possível entre o ambiente urbano, a bacia hidrográfica e as atividades humanas. A compreensão de que o sistema de drenagem pluvial é um conjunto de sistemas integrados e de que a interferência em um local ou em uma atividade podem ocasionar consequências em outros vem sendo debatido. Tucci assinala que, uma vez que exista uma falta de harmonia entre o funcionamento dos diversos sistemas,

vêm à tona problemas (listados no Quadro 1) que resultam em uma série de efeitos negativos ligados às precipitações, conforme os listados no Quadro 2.

Quadro 1 – Ocorrências urbanas que influenciam na drenagem da água.

Fatores Urbanos
Ocupação irregular do solo
Sistemas de drenagem deficientes
Desmatamento
Deposição irregular de resíduos sólidos

Fonte: Adaptado de Tucci (2009).

Quadro 2 – Consequências observadas e relacionadas à drenagem urbana.

Problemas associados à drenagem urbana
Prejuízos com enchentes
Erosão
Obstrução das bocas de lobo e condutos
Ocorrência de doenças (como leptospirose)
Aumento dos volumes e picos das precipitações

Fonte: Adaptado de Tucci (2009).

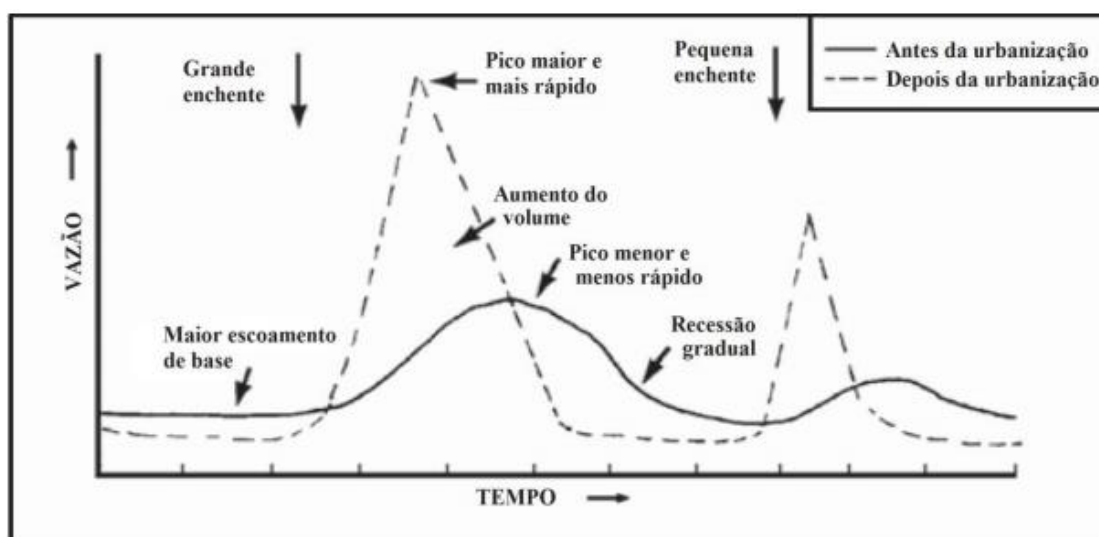
Dibaba (2018) relaciona a quantidade de lixo disperso em vias públicas à densidade populacional, ao grau de tráfego de pedestres e veículos, além do grau de instrução e educação da população. Os materiais que ficam depositados em bocas de lobo e sarjetas podem ser embalagens, matéria orgânica, folhas e dejetos animais. Essas ocorrências são diretamente responsáveis pela diminuição da capacidade do sistema de drenagem urbana através da metodologia clássica.

Segundo Scarati Martins (2006), a erosão é, por sua vez, uma ocorrência ligada a áreas desprovidas da vegetação original e está também diretamente conectada à urbanização e ao escoamento superficial, sendo dividida em três etapas, a saber: desagregação das partículas de solo, transporte e deposição.

Geralmente tido como um processo lento e contínuo, observa-se que, na atualidade, com a ocupação irregular de áreas topograficamente classificadas como de risco, cerceadas de solo impermeabilizado ou cuja vegetação original foi desmatada, esse processo toma os noticiários na forma de deslizamentos que acabam por ceifar vidas.

No que tange as enchentes em si, o autor aponta que a urbanização afeta principalmente três parâmetros, sendo eles a vazão de pico, o tempo e o volume de escoamento superficial. Conforme pode ser interpretado a partir do Gráfico 2, observa-se que, tanto para pequenas quanto grandes enchentes, a vazão de pico atinge valores maiores e mais rapidamente em áreas urbanizadas. Enquanto cenários não urbanizados apresentam um gráfico com perfil tênue e que remete a uma parábola, o comportamento para ambientes urbanizados assemelha-se a um triângulo (evidenciando de maneira clara qual é a vazão de pico).

Gráfico 2 – Análise da vazão conforme o tempo antes e após a urbanização.



Fonte: Tucci (2006).

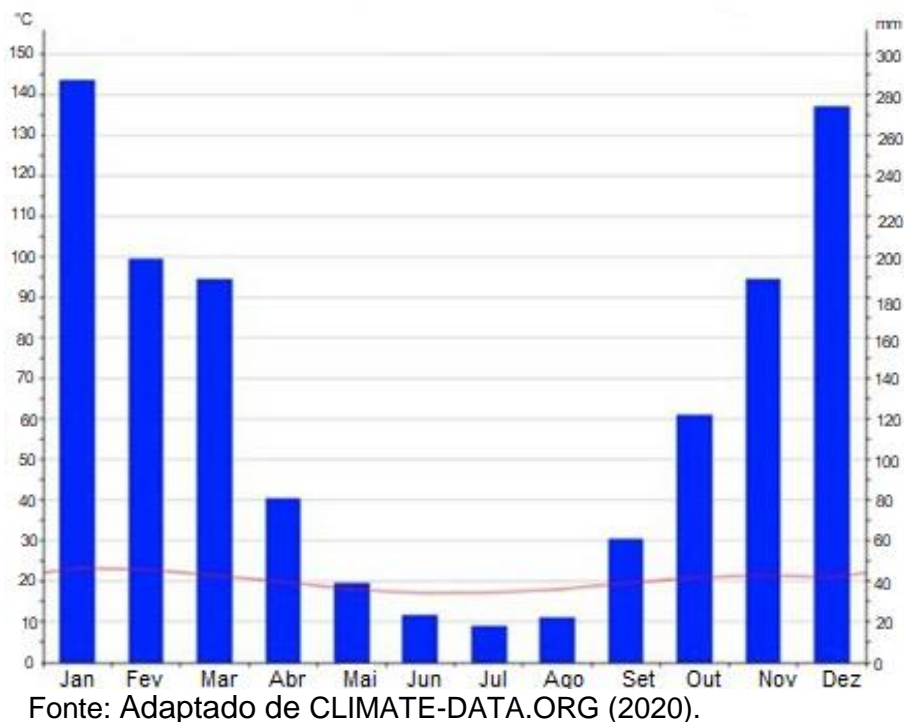
É importante definir que o valor volumétrico do escoamento superficial, condicionante do valor de vazão de pico, é influenciado por fatores listados por Scarati (2006), sendo os principais o volume da precipitação, percentual de impermeabilização do solo, capacidade de infiltração nas áreas permeáveis, volume da última precipitação e tempo decorrido desde a ocorrência da mesma.

As ocorrências de inundações, por sua vez, tomam destaque principalmente na estação chuvosa do ano, em que o volume precipitado é superior ao dos demais períodos. Na cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais, os meses com maior volume pluviométrico são aqueles entre novembro e março, vide o Gráfico 3.

Para os valores apresentados, cabe ressaltar que eles são obtidos por meio da média dos quantitativos observados nos últimos trinta anos. Os meses de

novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março historicamente são os que apresentam os maiores volumes de chuvas, superiores a 180 mm mensais.

Gráfico 3 – Distribuição da chuva ao longo do ano na cidade de Juiz de Fora.



As práticas de drenagem clássicas, em especial nesses períodos mais chuvosos, vêm se mostrando falhas; soluções essas que se concentram em execuções estruturais de canalizações, construção de sistemas de drenagens com condutos e alterações do traçado longitudinal dos rios e córregos (Canholi, 2005).

2.3 SISTEMA CLÁSSICO DE DRENAGEM URBANA

Segundo os autores Baptista *et al.* (2005), as diretrizes desse mecanismo de drenagem se baseiam em alternativas com elementos de micro-drenagem, ou seja, um conjunto de elementos de captação superficial (sarjetas e bocas de lobo) e de transporte das águas pluviais por meio de galerias usualmente subterrâneas ou por meio de canais artificiais abertos, conduzindo-as de forma imediata até os pontos onde se encontram com os mananciais. Foi o primeiro sistema a surgir, conforme eram disseminados os preceitos higienistas de rápida destinação das águas precipitadas nas áreas urbanas.

A Figura 6 ilustra a distribuição dos componentes do sistema de drenagem clássico ao longo da malha urbana, como eles estão interligados e seus aspectos visuais.

Figura 6 – Sistema clássico de drenagem urbana.



Fonte: Baptista *et al.* (2005).

Existem, todavia, pontos negativos no que tange esse tipo de sistema, a saber os principais: necessidade de manutenção recorrente dos seus elementos (envolvendo a retirada de materiais capazes de obstruir o fluxo pleno da água, tais como lixo); necessidade de redimensionamentos e recuperações da estrutura (em especial das galerias); e a alternância das situações de alagamentos para regiões localizadas à jusante de onde o sistema está instalado (ROY *et al.*, 2008; ZHOU, 2012).

Baptista *et al.* (2005) afirmam que, apesar de esses elementos convencionais de drenagem, na maioria das situações até a época de seu estudo, se adaptarem bem quando avaliados sob a ótica quantitativa do escoamento superficial urbano, há, todavia, efeitos maléficos quando se pensa no manejo e na qualidade das águas

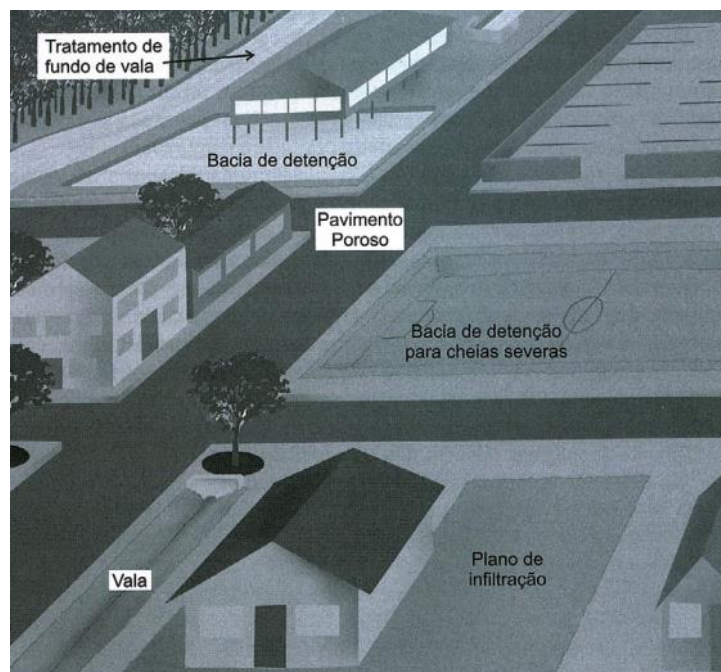
pluviais. O autor aponta que existem soluções capazes de proporcionar resultados melhores frente aos indicadores de poluição hídrica.

2.4 SISTEMA ALTERNATIVO DE DRENAGEM URBANA

Surgem, posteriormente aos métodos clássicos ou higienistas, técnicas capazes de compensar as consequências negativas advindas do processo da urbanização sobre a dinâmica dos mananciais. Os precursores das técnicas foram países da Europa, a partir da década de 1970. Justamente por entenderem a bacia como um conjunto de elementos integrados, essas novas ideias analisam o impacto de cada medida no todo (BAPTISTA *et al.*, 2005; LIN *et al.*, 2012).

Os autores afirmam que essas novas técnicas buscam controlar já na fonte a problemática dos excedentes hídricos devido aos impactos da impermeabilização, adotando medidas que permitam a infiltração da água e que evitem a condução demasiadamente rápida para os trechos à jusante. Medidas não estruturais são as propostas que estão em voga quando se trata desse assunto, tais como execução de bacias e reservatórios de detenção, pavimentos porosos (tanto para infiltração no solo quanto para armazenamento temporário) que podem ser empregados em vias de tráfego ou estacionamentos e de estruturas como valas de infiltração, vide Figura 7.

Figura 7 – Técnicas Alternativas de Drenagem.



Fonte: Baptista *et al.* (2005).

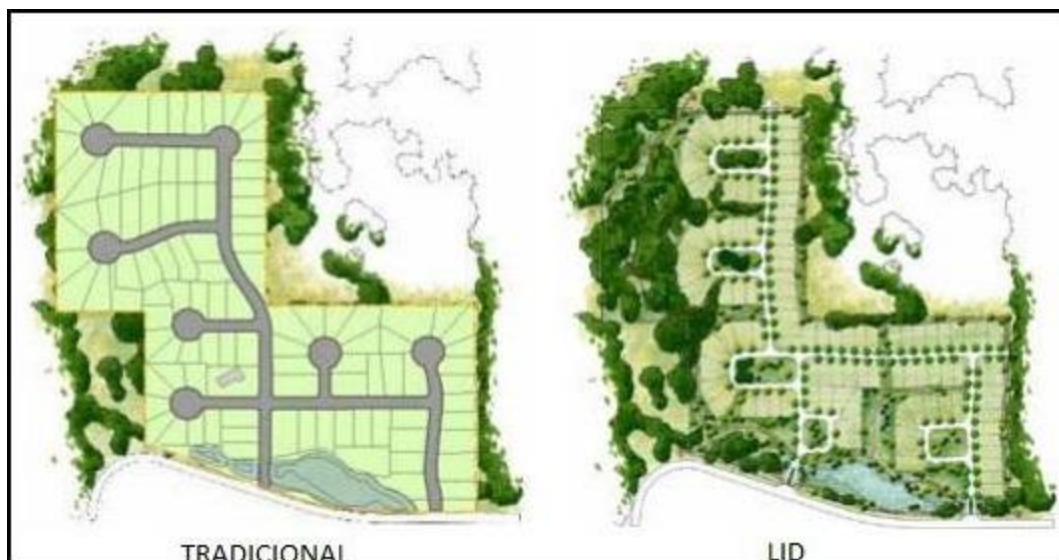
Os autores ressaltam que, através de estruturas de armazenamento temporário, seria possível continuar o processo de desenvolvimento urbano sem custos excessivos para os municípios, aliar a drenagem urbana às questões urbanísticas e modulação do sistema ao decorrer do crescimento urbano. Além de serem, se bem empregadas, medidas sustentáveis para o desenvolvimento humano.

A Environmental Protection Agency (EPA) utiliza a sigla LID para designar medidas tidas como de “Low Impact Development” (Desenvolvimento de Baixo Impacto), sendo elas maneiras de lidar com as águas pluviais de forma a gerar o menor impacto possível na paisagem e nas atividades humanas, visando uma postura de sustentabilidade por parte do poder público.

As LID compreendem as medidas alternativas ou compensatórias de drenagem urbana, atentando para meios de reduzir o escoamento superficial, criar condições de infiltração da água no próprio local de precipitação e controlar a sua qualidade. A sigla foi criada pelo Departamento de Recursos Ambientais de Maryland e, de acordo com Fassman e Blackbourn (2010), pavimentos permeáveis são uma das opções disponíveis para colocar as LID em prática em larga escala.

As diretrizes de técnicas de drenagem alternativa expostas pela EPA (2009) propõem uma mudança no cenário urbano tanto funcional quanto urbanística, vide a Figura 8 que compara as vistas aéreas de um mesmo local submetido à drenagem clássica e, em seguida, de acordo com as práticas LID.

Figura 8 – Vistas aéreas de local submetido a dois tipos de sistema de drenagem.



Fonte: Adaptado de EPA (2009).

As medidas compensatórias de drenagem, de acordo com a agência, são boas alternativas para controlar o escoamento superficial e capazes de aproximar o comportamento, em situações de precipitação, ao observado em áreas não urbanizadas. As “Best Management Practices” (BMP) ou “Melhores Práticas de Gestão”, em português, são técnicas que poderiam desde já começarem a ser adotadas, dando-se ressalva, para o caso da presente dissertação, para a utilização de pavimentos permeáveis. De acordo com Lal *et al.* (2014), a utilização de revestimentos permeáveis mostrou ser uma ferramenta eficiente no manejo da água em várias cidades em que foram utilizados.

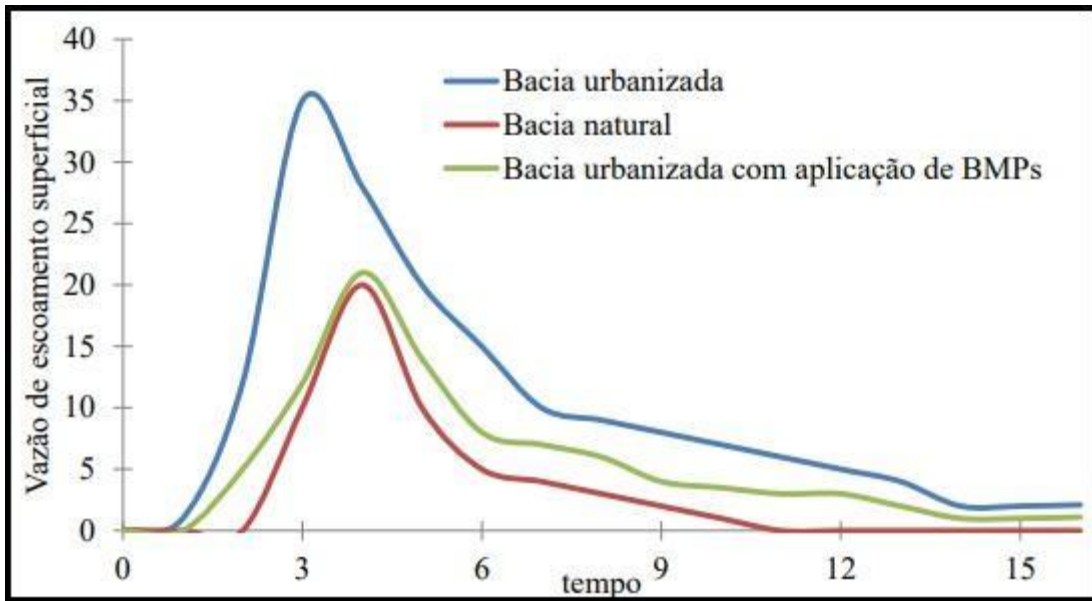
Hu *et al.* (2018) salientam que medidas como adoção de pavimentos permeáveis podem solucionar inclusive situações relacionadas à qualidade da água, ao realizar um procedimento de filtragem.

Motivando uma nova abordagem, Villanueva (1997) destaca a importância de se planejar bem antes de ocupar um dado espaço, visto que, se aplicadas as soluções higienistas clássicas e existindo a posteriori a necessidade de se solucionar problemas, com o espaço urbano completamente ocupado, as soluções possíveis (canalizações, reservatórios de retenção de água, dentre outros) tornam-se exageradamente onerosas.

Onde se conclui que, a partir do momento atual, deve-se começar a planejar espaços cada vez mais integrados à bacia como um todo, com menores taxas de impermeabilização do solo e onde sejam aplicadas técnicas de drenagem alinhadas à LID.

O Gráfico 4 ilustra a amortização dos efeitos negativos da urbanização através de adoção de práticas alternativas (BMP), no que diz respeito ao escoamento superficial.

Gráfico 4 – Diferentes efeitos da precipitação em diferentes tipos de bacias.



Fonte: Coutinho (2011).

A utilização de mecanismos para controlar a precipitação na fonte retarda os picos de cheias e diminui seus valores.

3 PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Utilizam-se os termos “revestimento permeável” e “revestimento poroso”, de maneira abrangente, para descrever uma forma de tratamento da superfície que, ao mesmo tempo em que consegue suportar o tráfego, possui características de permeabilidade e porosidade tais que influenciam no comportamento hidrológico a ponto de causar efeitos benéficos ao ambiente (VIRGILLIS, 2009, FWA *et al.*, 2015).

Segundo Brown e Borst (2014), ao conjunto do revestimento permeável e da estrutura sob o mesmo dá-se a denominação de “pavimento permeável”. O funcionamento dessa composição envolve a passagem da água por meio dos poros do revestimento e, em seguida, a infiltração nas camadas inferiores. Os autores utilizam o termo “infraestrutura verde” para evidenciar o caráter ambientalmente positivo desses pavimentos.

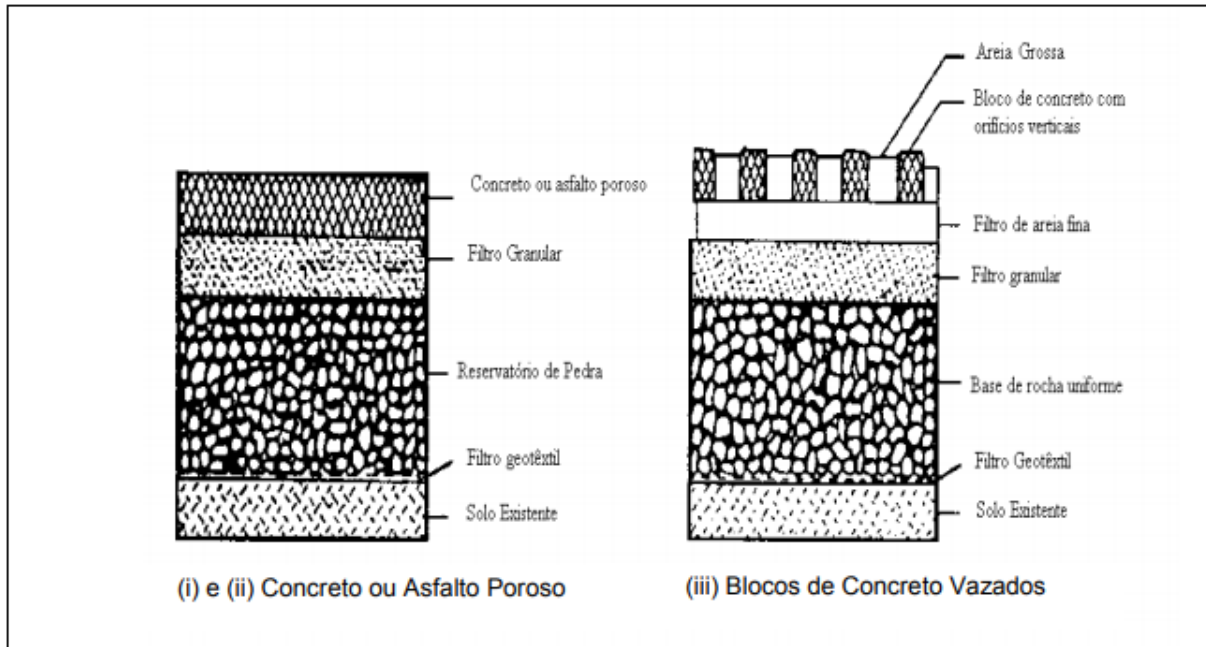
Os pavimentos permeáveis têm uma concepção diferente da referente aos tradicionais, os quais são projetados para operar sem interferência da água e em que a presença de umidade no solo é indesejável, uma vez que conduz a perdas no comportamento mecânico e a degradação do revestimento (com surgimento de trincas e demais aberturas). O sistema do pavimento permeável, por sua vez, pressupõe a exposição à água e tanto o revestimento quanto as camadas inferiores de base e sub-base, por exemplo, devem estar preparadas para garantir um bom desempenho mecânico frente à exposição frequente a precipitações e, ao mesmo tempo, atuar como dispositivos de drenagem do solo urbano (PAULA JÚNIOR, 2019; BECKER, 2019).

Urbanas e Stahre (1993) definem pavimento permeável como aquele capaz de desviar o escoamento superficial, por meio de um revestimento permeável, para um reservatório de pedras, de forma a reduzir a possibilidade de formar-se lâmina de água no pavimento durante a precipitação. Ou seja, é uma estrutura capaz de manejar a água da chuva na própria fonte (DRAKE *et al.*, 2014).

Hu *et al.* (2018) destacam a eficácia desse revestimento em controlar o escoamento superficial de água. Ele possui espessura variável entre 5 e 10 cm; a água prossegue infiltrando por uma camada filtro de 2,5 cm constituída por agregados de diâmetro de 1,25 cm até chegarem ao reservatório de maior profundidade constituído por agregados de diâmetro compreendido na faixa de 3,8 a

7,6 cm (SCHUELLER, 1987). O esquema da sequência dos componentes desses pavimentos pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 – Estrutura dos pavimentos permeáveis.



Fonte: Urbonas e Stahre (1993 apud ARAÚJO, 2000).

Segundo o grupo nacional francês GNCDS (1996), uma possibilidade de destinação da água seria o escoamento por percolação. Na base da camada drenante (o dito reservatório), é posicionada uma membrana impermeável com dada declividade. A movimentação da água ocorre de maneira lenta e gradual da região saturada para outros locais, tais como os bordos de uma via de tráfego. Tal processo é ilustrado na Figura 10.

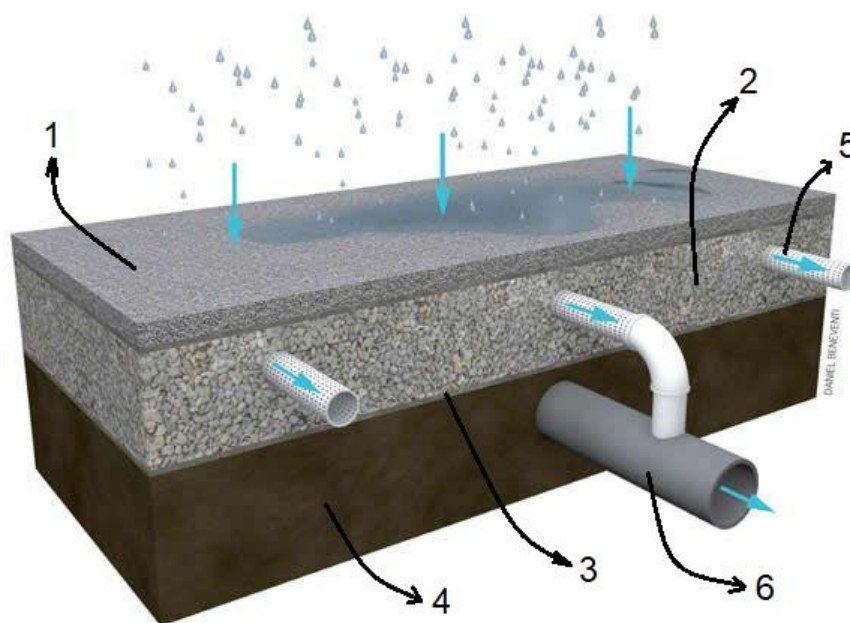
Figura 10 – Dinâmica da água nos pavimentos permeáveis.



Fonte: GNCSC (1996 apud MEURER FILHO, 2001).

Schueller (1987), por sua vez, evidencia duas possibilidades para a drenagem da água: dispensar a membrana impermeável e permitir a infiltração no subsolo ou estruturar uma série de condutos de drenagem capazes de captar a água percolada e direcioná-la a canais de saída, vide Figura 11, em que: 1 representa o revestimento permeável; 2, o reservatório de brita; 3, a membrana geotêxtil; 4, o solo; 5, condutos de drenagem e 6, canais de saída.

Figura 11 – Sistema com dutos drenantes para pavimentos permeáveis.



Fonte: Adaptado de Mazzonetto (2011).

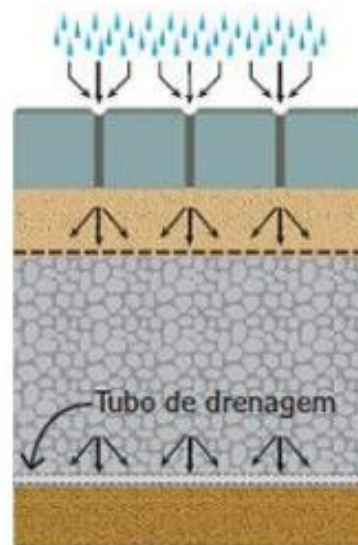
O autor denota a importância de se dimensionar camadas de base e sub-base capazes de absorver o volume de água precipitada no caso dos sistemas de infiltração total. Os sistemas em que não ocorre infiltração, por sua vez, tendem a recolher o volume inicial que traz consigo grande concentração de poluentes e direcioná-los para os condutos de captação pluviais urbanos.

Outra classificação dos pavimentos permeáveis é feita por Baptista *et al.* (2005), cabendo destacar dois principais: os pavimentos com revestimentos permeáveis e os pavimentos porosos de retenção. O primeiro tipo tem como função permitir que a água acesse as camadas subjacentes do pavimento de modo a promover redução no volume de escoamento superficial; o segundo tangencia a definição de Urbonas e Stahre (1993) que entendem pavimento permeável como aquele capaz de atuar como um reservatório temporário, cujo volume de

armazenamento depende de parâmetros como massa específica da mistura, teor de vazios e porosidade (PARK *et al.*, 2014).

Silva (2012) acrescenta uma terceira possibilidade: a infiltração parcial. Parte da água precipitada infiltra no solo e o restante é captado por dutos. Nesse tipo de sistema não é posicionada nenhuma membrana impermeável na base da camada reservatório e é acrescida ao conjunto uma rede de tubulações com a finalidade de drenar a água, conforme Figura 12.

Figura 12 – Sistema de Infiltração Parcial.



Fonte: Silva (2012).

De acordo com Drake (2014), a maior parte da água infiltra no solo nativo, enquanto o restante é captado pelos sistemas subterrâneos de drenagem e recebe a denominação de efluente. O autor ainda ressalta a filtragem realizada durante a drenagem da água, de forma a reter sólidos suspensos e metais pesados.

Bean *et al.* (2004) e Lin *et al.* (2013) listam quatro tipos de revestimento como soluções sustentáveis e alinhadas com as diretrizes das “Best Management Practices”:

- a) concreto de cimento Portland permeável;
- b) concreto asfáltico permeável;
- c) blocos de concreto intertravados vazados preenchidos com material granular ou vegetação (como areia e grama, respectivamente);
- d) blocos de concreto intertravados não-vazados.

Dentre esses quatro, todavia, segundo Urbonas e Stahre (1993) apenas três podem ser considerados revestimentos permeáveis, excluindo-se dessa classificação os blocos de concreto intertravados não-vazados, nos quais a infiltração da água ocorre por meio das juntas existentes entre as peças. Araújo *et al.* (2000) define essas peças em seu estudo como revestimento “semi-permeável”.

Barros (2018) e Paula Junior (2019), em suas pesquisas, abordam uma nova perspectiva dos blocos intertravados. Em vez de utilizar o concreto convencional, os autores estudaram o emprego de blocos intertravados constituídos de concreto permeável. Sob essa nova óptica, então, é possível classificar o material como uma espécie de revestimento permeável.

Schueller (1987) afirma que o potencial de uso de todos esses tipos de BMPs é elevado, devendo-se, todavia manter cuidados, tais como observar se a permeabilidade do subsolo é superior ao necessário para ocorrer a infiltração adequada, verificar o nível do lençol freático abaixo da estrutura do pavimento e realizar uma manutenção preventiva periódica a cada três meses das estruturas de drenagem.

3.1 BLOCOS VAZADOS E INTERTRAVADOS DE CONCRETO

Blocos vazados são peças de concreto com um padrão de desenho do perímetro e aberturas no centro, preenchidas por materiais como areia e grama (Figura 13). Segundo Virgiliis (2009), tendem a ser duráveis e possuem vida útil satisfatória quando expostos a cargas elevadas; devendo para tanto operar com solidez, tendo as bordas das peças confinadas umas nas outras, de modo a restringir movimentações. O autor avalia, ainda, que possuem excelentes expoentes no que se refere à condutividade hidráulica.

Schvaickardt e Mattos (2018) atentam para a influência dos equipamentos para confecção, materiais utilizados e dosagem na qualidade dos blocos produzidos. Manipulações distintas do maquinário específico implicam em blocos com diferentes resistências à compressão, por exemplo.

Figura 13 – Blocos vazados de concreto com vazios preenchidos por grama.



Fonte: Mevo Brasil (2018).

Os blocos intertravados de concreto, por sua vez, são maciços, ou seja, não apresentam aberturas. A passagem da água para as camadas inferiores ocorre através das juntas existentes entre as peças.

Gunatilake e Mampearachchi (2017) destacam a utilização desse material em países em desenvolvimento devido aos menores custos observados durante o ciclo de vida do revestimento em comparação aos compósitos asfálticos e de concreto Portland. Os autores afirmam que, após ter emergido como uma técnica de custo baixo, as particularidades desse material vêm sendo estudadas a fim de desenvolver essa modalidade de revestimento.

Uygunoglu (2016) considera como principal vantagem do pavimento com blocos intertravados a possibilidade de se retirar as peças danificadas e substituí-las por outras intactas.

Faria (2011 apud Colnago *et al.*, 2018) afirma que, além da resistência do bloco, fatores importantes para um bom desempenho do revestimento são as dimensões dos mesmos e o assentamento adequado. No quesito espessura, quanto maior (na faixa de 6 a 10 cm), melhor é o intertravamento dos blocos.

No que diz respeito ao assentamento, de acordo com Araújo *et al.* (2000), os blocos devem ser assentados sobre uma camada de areia (Figura 14), sob a qual deve haver um filtro geotêxtil com a finalidade de evitar a movimentação da areia fina para a camada granular do pavimento. A finalidade da camada de areia é conferir ao conjunto mais porosidade e permeabilidade, sendo benéfica à proposta de drenagem.

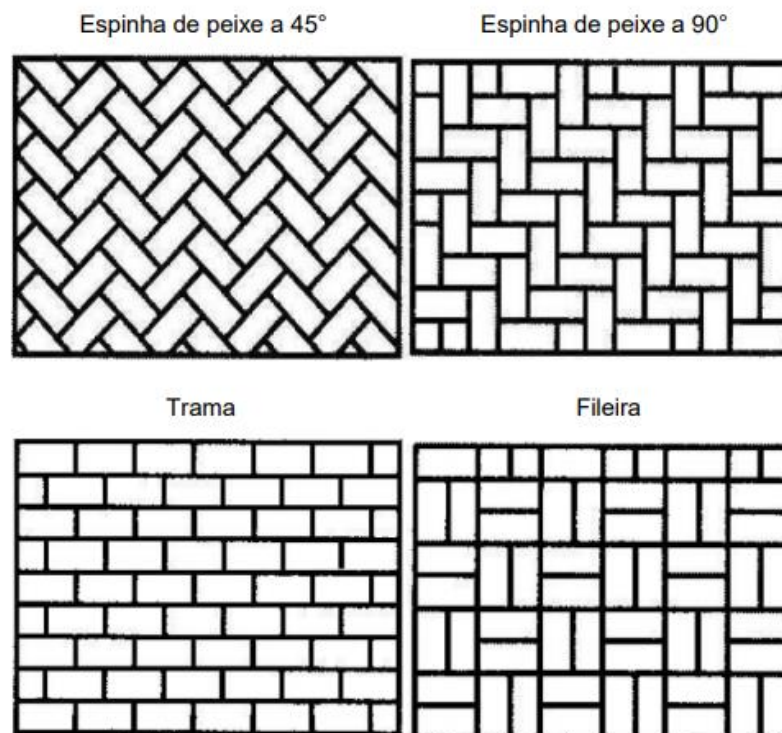
Figura 14 – Blocos intertravados de concreto sobre camada de areia.



Fonte: Tecnosil (2021).

Quanto às diferentes paginações de assentamento, as mais comuns estão ilustradas na Figura 15, dando-se destaque ao tipo “espinha de peixe” como o mais indicado para áreas de tráfego veicular por ser o mais eficaz em manter as peças intertravadas durante a fase de utilização (ICPI, 2017 apud BARROS, 2018).

Figura 15 – Diferentes paginações de blocos intertravados de concreto.



Fonte: Simiele (2010 apud BARROS, 2018).

Virgillis (2009) aponta, por fim, que uma das desvantagens desse tipo de material é que revestimento como um todo é sensível a deformações, tanto no sentido longitudinal de rolamento quanto nas camadas de base, sub-base e subleito.

A Figura 16 diz respeito ao comportamento observado em revestimento de blocos intertravados hexagonais de concreto assentados sobre areia. O trecho é sujeito ao tráfego esporádico de caminhões pesados; por ser uma subida em curva, com solicitações superiores aos trechos planos em reta, verifica-se o deslocamento das peças pré-moldadas. A realização de restaurações nesse trecho deve ser rotineira.

Figura 16 – Trecho em que peças pré-moldadas de concreto foram deslocadas.



Fonte: Autor (2019).

Os estudos de Bean *et al.* (2004) em 27 trechos nos estados norte-americanos da Carolina do Norte, Maryland e Delaware indicaram que a manutenção periódica de pavimentos revestidos tanto com blocos vazados quanto com intertravados implica em uma melhora direta no parâmetro de permeabilidade a

um nível de confiança de 99,8%. Essa pesquisa, associada aos pontos negativos apresentados neste trabalho, demonstram a necessidade de se realizar manutenções nesses tipos de pavimento, em especial se houver tráfego de veículos pesados no local para garantir eficiência em termos de drenagem e conforto aos usuários da via.

3.2 REVESTIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL

O concreto permeável cujo ligante é o cimento Portland é definido no item 3.12 da NBR 16416 (ABNT, 2015) como um material com vazios conectados de modo a permitir a passagem de água. Henderson *et al.* (2009), afirmam que as técnicas existentes permitem a fabricação de um material com índice de vazios entre 15% e 30%. No presente trabalho, esse material será tratado pela nomenclatura “concreto permeável”.

De acordo com Lamb (2014), a distinção principal entre o concreto tradicional e o permeável consiste no elevado índice de vazios que este possui. Vazios esses que são intencionalmente produzidos no material, de forma a permitir a infiltração de água, enquanto o convencional é presumido como impermeável e apresenta densidades elevadas. Outro adendo que o autor faz é que quanto maior o índice de vazios, maior a permeabilidade do concreto, porém ocorre uma redução nos valores de resistências mecânicas.

Segundo Batezini (2013), a principal utilização desse compósito é a execução dos chamados revestimentos permeáveis, aliando uma alternativa à drenagem urbana a um material que pode apresentar bons parâmetros de desempenho e de durabilidade. Esses revestimentos, por sua vez, são definidos no item 3.11 da norma NBR 16416 (ABNT, 2015) como aqueles sujeitos a cargas dinâmicas de veículos, tráfego de pessoas e cargas estáticas, possuindo ainda características capazes de satisfazer as exigências em termos dos parâmetros de permeabilidade.

Quanto à sua composição, Alves (2016) afirma que esse tipo de concreto é constituído por agregado graúdo, cimento, água e aditivo, sem apresentar, portanto, nenhuma porcentagem de agregados miúdos; seu aspecto é ilustrado na Figura 17. A ausência de agregados miúdos é o fator ao qual Tennis *et al.* (2004) atribui a textura rugosa desse concreto. Segundo o autor, tal tipo de superfície apresenta um

coeficiente de atrito superior ao dos concretos tradicionais, diminuindo-se os riscos de hidroplanagem.

Figura 17 – Concreto permeável de cimento Portland.



Fonte: Mazzonetto (2011).

Listados os componentes desse material, é importante salientar que a composição de cada concreto permeável varia de acordo com as proporções e as características de agregados e ligantes. Assim sendo, é preciso avaliar cuidadosamente a etapa de dosagem dos materiais, examinando as condições a que o concreto será submetido. O ideal é encontrar um equilíbrio entre condições de exposição ambiental e de tráfego, permeabilidade e resistência, visto que: quanto mais porosa a mistura é, melhor sua capacidade de drenagem, mas menores são seus valores de resistências mecânicas e maiores serão as exposições aos agentes do meio (MAZZONETTO, 2011).

Tennis *et al.* (2004) acrescentam à discussão do assunto que, somado às proporções entre agregados e suas propriedades, o método de compactação interfere nos valores de massa específica aparente do concreto permeável, compreendidos entre 1.300 kg/m³ e 2.000 kg/m³ no estado fresco.

Mazzonetto (2011) ressalta a importância da associação desse revestimento a base e sub-base granulares, de modo a assegurar uma drenagem eficiente do pavimento e permitir a infiltração água no solo ou a captação da mesma por sistemas de drenagem urbana.

Em seus estudos, Tucci (2006) analisa as vantagens e desvantagens na utilização desse material. No que se refere aos pontos positivos, o autor aponta:

diminuição da lâmina d'água ao utilizar esse concreto como camada de revestimento em estacionamentos (Figura 18) e vias de tráfego, redução do escoamento superficial das águas pluviais, redução de elementos de drenagem e, conseqüentemente, eliminação de alguns gastos com o sistema de drenagem urbana.

Figura 18 – Concreto permeável como revestimento em estacionamento.



Fonte: Grupo Tecno (2021).

Huffman (2005) corrobora que a utilização desse material como revestimento permeável pode auxiliar na redução dos custos dispendidos nas estruturas de drenagem. O autor salienta que a multifuncionalidade é um dos pontos mais interessantes a se considerar, uma vez que essa camada de concreto funciona tanto como parte de um pavimento quanto como um sistema de drenagem, podendo, quando bem dimensionado, absorver a totalidade do volume precipitado, tornando nulo o volume de escoamento superficial ao drenar até 19 litros por minuto.

Paula Junior (2019) atenta que, a fim de ser considerado um pavimento permeável, é necessário que a estrutura permita a percolação da totalidade da água precipitada no local e tenha uma inclinação máxima de 5%, de acordo com a prescrição da norma NBR 16416 (ABNT, 2015).

O potencial hidráulico do concreto permeável é mostrado nos estudos de Araújo *et al.* (2000), em que peças de pavimento intertravado apresentaram escoamento superficial entre 11% e 22% superior ao observado em solos compactados, enquanto praticamente não foi observado nenhum escoamento nos concretos permeáveis.

Por possuir um elevado índice de vazios, a execução desse compósito requer uma quantidade inferior de materiais em relação ao concreto tradicional. Além disso, os funcionários não necessitam possuir um treinamento sofisticado para executá-lo e a produção do concreto é totalmente *in loco* (HUFFMAN, 2005).

Quando a abordagem é referente aos pontos negativos, os três principais são: obtenção de resistências mecânicas menores e maiores custos de execução em comparação aos concretos convencionais, além da necessidade de manutenção para combater os efeitos negativos da colmatção (TUCCI, 2006).

Barros (2018) define colmatção como o processo de obstrução dos vazios da estrutura em função da deposição de detritos, de maneira a ocasionar uma perda na capacidade de condutividade hidráulica nos concretos permeáveis de forma lenta e progressiva.

O material, de acordo com as diretrizes da NBR 16416 (ABNT, 2015), deve possuir coeficiente de permeabilidade mínimo de 10^{-3} m/s quando recém fabricado; ao longo do tempo, com a ocorrência da colmatção, ao atingir coeficiente de permeabilidade igual ou inferior a 10^{-5} m/s, devem-se realizar limpezas a fim de se recuperar o comportamento hidráulico original. A medição desse coeficiente é prescrita pela mesma norma e a execução do ensaio pode ser vista na Figura 19.

Figura 19 – Ensaio de permeabilidade em uma placa de concreto permeável.



Fonte: Autor (2018).

3.3 REVESTIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO PERMEÁVEL

A norma francesa AFNOR NF P 98-134 (2000) define concreto asfáltico permeável como uma mistura betuminosa composta por agregados minerais e ligantes asfálticos puros ou modificados, de maneira a possuir uma porcentagem de vazios próxima de 20% após o compósito ser compactado. A execução do revestimento envolve as etapas de dosagem, aquecimento dos elementos, mistura, transporte e compactação *in loco*.

Wei e Jing-jing (2012) e Zhao *et al.* (2020) conceituam o material como uma mistura de granulometria aberta, de elevada permeabilidade, capaz de promover a redução de ruídos e com capacidade de oferecer boa resistência à derrapagem, com índice de vazios superior a 18%.

O aspecto superficial desse concreto após a compactação pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 – Concreto Asfáltico Permeável logo após sua fabricação e compactação.



Fonte: Autor (2021).

O ligante asfáltico utilizado é o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), obtido do processo de refinamento do petróleo e que, segundo Samanos (1995 apud Alencar, 2005), é um material termoplástico, impermeável à água e pouco reativo. Assume o estado líquido quando aquecido a uma determinada temperatura e, ao resfriar, retorna à consistência original; essas características tornam o CAP um ligante ideal

para utilização em procedimentos de pavimentação. Segundo Bernucci *et al.* (2008), a composição química dos cimentos asfálticos do petróleo influencia diretamente nas características físicas e mecânicas do revestimento.

A norma brasileira DNER- ES 386/99 conceitua a Camada Porosa de Atrito (CPA) como um tipo de mistura asfáltica porosa com índice de vazios entre 18% e 25%. O Concreto Asfáltico Permeável, por sua vez, em concordância com os estudos de Meurer Filho (2001) e Bernucci (2007 apud Dantas, 2017), pode possuir uma porosidade total de até 30% quando tem a granulometria dos agregados minerais devidamente selecionada.

Fwa *et al.* (2015) destaca que o elevado índice de vazios permite a eliminação de lâminas d'água na superfície do revestimento à medida que a água precipitada é drenada pelos vazios comunicantes. Dumke (2005) aponta como outra vantagem advinda da utilização desse material a redução do ruído oriundo do tráfego de veículos, uma vez que o ar comprimido durante o rolamento dos pneus penetra nos vazios da mistura.

Porto (1999 apud Meurer Filho, 2001) ressalta, todavia, que o revestimento deve admitir tanto o fluxo de tráfego quanto a passagem da água em seus vazios e ambos processos geram efeitos que podem comprometer a funcionalidade da estrutura do pavimento. Ao se considerar que o índice de vazios traz consigo também um lado negativo, é preciso, para cada caso específico, adotar uma porcentagem máxima que não comprometa as características mecânicas do revestimento frente às solicitações dinâmicas do trânsito de veículos.

Justamente por apresentarem uma grande área de contato com os agentes ambientais, Jerjen *et al.* (2015) atentam para a possibilidade de que o revestimento sofra deterioração de modo mais rápido em relação aos concretos asfálticos tradicionais.

Os estudos sobre esse compósito começaram no final da década de 1970, segundo Baptista *et al.* (2005) e Ahmad *et al.* (2018), em países da Europa e nos Estados Unidos, sendo inicialmente empregado em áreas de estacionamento e vias de tráfego leve.

Segundo Dumke (2005), os intensos estudos permitiram ainda na década de 1970 a aplicação do revestimento tanto em rodovias quanto em aeroportos. Na época, a FAA (Federal Aviation Administration) e a FHWA (Federal Highway

Administration), duas importantes agências americanas, já haviam inclusive ditado prescrições técnicas para a utilização do concreto asfáltico permeável.

Com o decorrer do tempo, as pistas experimentais foram tornando-se cada vez mais sofisticadas. Pesquisas ao redor do globo permitiram uma evolução tecnológica do material na intenção de possibilitar a execução de pistas cada vez mais seguras e que oferecessem mais conforto aos usuários, como pode ser visto na Figura 21 em razão da redução ou eliminação do chamado “spray d’água” ao se utilizar concreto asfáltico permeável, implicando em um revestimento que fornece maior visibilidade em condições de precipitação (Poulikakos *et al.*, 2013).

Zhang *et al.* (2016) apontam que cerca de 90% das principais rodovias na Holanda são revestidas com esse tipo de asfalto, justamente visando redução de ruídos e por permitir a passagem da água pluvial, diminuindo as projeções de água.

Figura 21 – Redução da formação de névoa pelo efeito de spray d’água em pavimentos revestidos de concreto asfáltico permeável.



Fonte: LCPC (1997) adaptado por Dumke (2005).

Os estudos com pistas experimentais seguiram ao longo das décadas seguintes por países como Estados Unidos, Japão, África do Sul, Espanha e Bélgica (DUMKE, 2005, HSU *et al.*, 2011).

De acordo com Xu *et al.* (2011), o estudo do material na China começou na década de 1980 e tem assumido um papel de destaque nos anos recentes. Essa afirmação é de fato verdadeira, visto que, dentre os artigos internacionais, observa-se a recorrência de autores chineses. Nos anos recentes, autores como Zhao *et al.*

(2019) têm utilizado aparatos tecnológicos para compreender o comportamento do compósito permeável.

Essas pesquisas, ao longo dos anos, geraram duas tendências, interpretadas por Meurer Filho (2001) como: americana e europeia. A tendência americana engloba as Camadas Porosas de Atrito, dedicando maior importância às propriedades de aderência entre o pneu e o pavimento, aumentando o coeficiente de atrito, em detrimento de propriedades hidráulicas e acústicas; de espessuras de até 2 cm, teor elevado de material betuminoso (entre 6 e 7%), granulometria do agregado descontínua entre as peneiras de malha 2 mm e 7 mm e diâmetro máximo de 10 mm. A tendência europeia, em contrapartida, visava obter concretos com teor de vazios superiores a 20%, maximizando as propriedades hidráulicas, além de possuir espessuras até 2 vezes superiores às adotadas pelos americanos (PORTO, 1999 apud MEURER FILHO, 2001; CAMPOS, 1998 apud MEURER FILHO, 2001).

As primeiras aplicações desse tipo de revestimento em pavimentos de aeroportos no Brasil ocorreram em 1983 no Aeroporto Internacional Tancredo Neves (Minas Gerais) e em 1987 no Aeroporto Santos Dumont (Rio de Janeiro). A primeira experiência em rodovias, por sua vez, foi iniciada em 1992 com a implantação de um trecho experimental na Rodovia dos Bandeirantes (SOUZA, 2008).

Os estudos sobre esse material vêm se aprofundando no decorrer dos anos a fim de obter parâmetros cada vez melhores e estudar o quão significativo o emprego desse tipo de pavimento pode ser. Um estudo recente de Becker e Pinheiro (2019), por exemplo, corrobora a eficiência do revestimento permeável na redução do escoamento superficial e traz números importantes no tocante à qualidade da água filtrada pela camada: redução de 70% dos sólidos suspensos totais e mais de 90% dos metais pesados.

Hu *et al.* (2018) afirmam, ainda, que a espessura do revestimento e o teor de vazios são pontos fundamentais no processo de filtração da água pluvial. Em sua pesquisa, os autores afirmam, por exemplo, que para um concreto asfáltico permeável com 6 cm de espessura, o ideal é que ele possua 18% de vazios.

Acikli (2005) em sua revisão de literatura apresenta um comparativo entre os diversos tipos de revestimento aplicáveis em pavimentos, evidenciando as características inerentes ao concreto asfáltico permeável, vide Quadro 3.

Quadro 3 – Comparativo entre os tipos de revestimento.

Material Critérios	Solo natural	Blocos Vazados	Asfalto poroso	Concreto poroso	Revestimento impermeável
Tipo de uso*	Praças Estacionamentos Vias de pedestres Quadras esportivas	Praças Estacionamentos Vias de pedestres Calçadas	Todos os usos, desde que com estrutura reforçada	Todos os usos, desde que com estrutura reforçada	Todos os usos
Capacidade de absorção*	Varia de acordo com o material	Média	Boa	Boa	Nula
Aspecto visual*	Rústico	Bom, com possibilidade de variação de cores	Semelhante ao asfalto comum	Semelhante ao concreto comum	
Periodicidade de manutenção*	6 meses	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*	Baixo	Alto	Médio	Médio	Médio
Custo de manutenção*	Médio	Alto	Médio a alto	Médio a alto	Baixo
Resistência/arrancamento*	Medíocre	Boa	Média	Média a boa	Boa
Aderência*	Baixa	Média	Muito boa	Boa	Boa
Acústica*	Ruim	Média	Boa	Boa	Média
Retenção de partículas sólidas**	NP	Muito boa	Muito boa	Muito boa	Muito boa
Retenção de metais pesados dissolvidos**	NP	Muito boa	Baixa	Muito boa	Baixa

Fonte: Azzout *et al.* (1994) e Fach *et al.* (2002 apud ACIOLI, 2005).

Atualmente, existem estudos focados nas propriedades do ligante asfáltico. Observa-se cada vez mais a utilização de ligantes modificados por polímeros ou com adições de fibra. Esse será o enfoque do presente trabalho, utilizando-se do ensejo de Gonçalves *et al.* (2000) e Terra *et al.* (2017) de que a utilização de ligantes modificados por polímeros e com fibras proporcionam maiores resistências aos processos de oxidação e desagregação, ao passo que os ligantes tradicionais trazem consigo maiores chances de fissuração e degradação do revestimento.

4 TÓPICOS ESPECIAIS DO CONCRETO ASFÁLTICO PERMEÁVEL

Neste capítulo são abordadas as particularidades inerentes ao concreto asfáltico permeável, incluindo suas propriedades, suas limitações e procedimentos de campo direcionados à sua execução e manutenção.

4.1 PERMEABILIDADE

Huang *et al.* (2020) afirmam que o concreto asfáltico permeável está sendo amplamente utilizado como revestimento de pavimentos devido às suas excelentes características em termos de drenagem.

Permeabilidade ou drenabilidade de um revestimento é entendida por MOMM (2002) como a propriedade de drenar a água advinda da superfície nas aberturas entre as rugosidades do concreto. O coeficiente de permeabilidade “k” representa uma das características mais significativas ao se tratar de concretos permeáveis (TENNIS *et al.*, 2004; ACQUA *et al.*, 2012; SAÑUDO-FONTANEDA *et al.*, 2013).

É importante ressaltar que há autores como Dumke (2005) e Terra *et al.* (2017) que não consideram a área do corpo-de-prova nos cálculos de “k”, apenas a altura da coluna d’água sobre o concreto; torna-se complexo, então, comparar os coeficientes com os expostos em trabalhos cujos autores se valeram da Lei de Darcy e consideraram a área superficial de cada CP ensaiado.

Para que a permeabilidade do revestimento seja considerada significativa na utilização de um revestimento, é necessário que a porcentagem de vazios eficazes se destaque entre a de vazios totais. Os tipos de vazios, por sua vez, são conceituados conforme um projeto de diretrizes para pavimentos porosos executado pela Associação das Rodovias do Japão em 1996.

Dumke (2005) simplifica a classificação japonesa para essa característica intrínseca ao concreto asfáltico permeável em três conceitos, a saber:

- a) vazios eficazes: conjunto de poros que permitem tanto a passagem quanto o armazenamento da água;
- b) vazios semi-eficazes: poros que apenas possibilitam o armazenamento da água, sem acrescentar nada ao processo de passagem da mesma;
- c) vazios ineficazes: poros sem função no que diz respeito à permeabilidade do revestimento, pois nem armazenam água e nem permitem o seu fluxo.

Jiang *et al.* (2015) ressaltam que fatores tão importantes quanto o percentual de vazios são as características microscópicas desses, tais como número, tamanho e formato dos mesmos. Justamente pela dificuldade em analisar tais fatores é que a maioria significativa dos pesquisadores utilizam como parâmetro principal dos concretos asfálticos permeáveis somente o teor de vazios da mistura.

Zhao *et al.* (2019), em sua pesquisa, afirmaram que todos os vazios do material asfáltico permeável estudado eram conectados entre si; porém, através de imagens de raio-X, observou-se que apenas 82,1% desses vazios eram válidos para a permeabilidade.

Segundo Anupam *et al.* (2016), a quantidade de vazios comunicantes ou eficazes pode chegar a representar 90% do total de vazios da mistura, sendo que quanto maior essa porcentagem melhor o comportamento hidráulico do material.

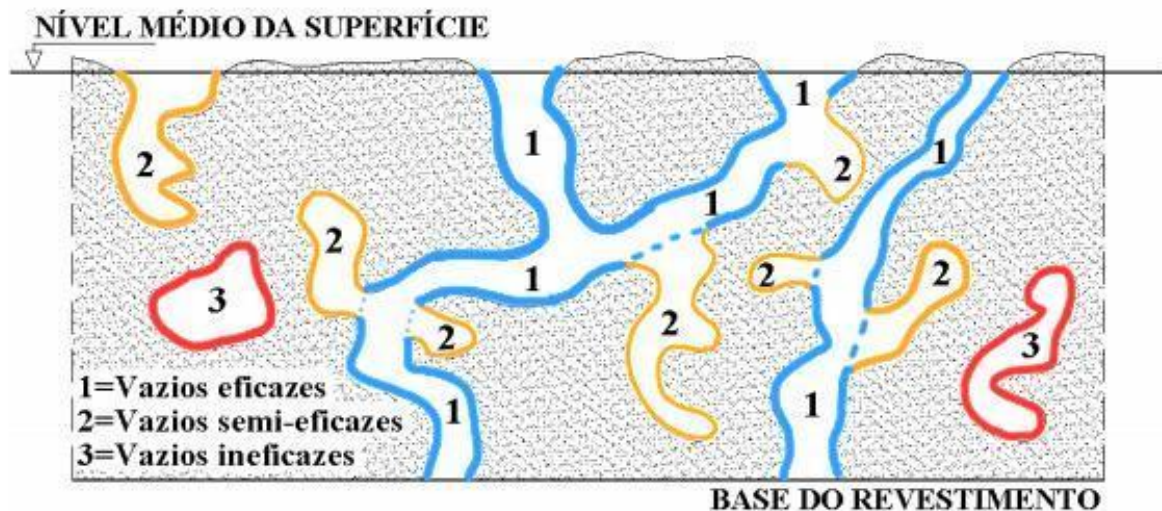
Fwa *et al.* (2015), por sua vez, ressaltam que a permeabilidade dos concretos asfálticos permeáveis é inferior à apresentada por misturas de concreto permeável e essa diferença tende a ser maior conforme o teor de vazios do compósito aumenta.

Segundo Sañudo-Fontaneda (2013), nos processos de concepção e execução do pavimento, torna-se visível a importância de se assegurar a existência de vazios eficazes no compósito, uma vez que são eles os que possibilitam a passagem da água da superfície da pista, através do concreto, até as camadas drenantes (reservatórios).

Jing *et al.* (2019) apontam que a forma e o tamanho dos agregados exercem efeito direto sobre a porosidade do compósito. Por exemplo, agregados com formas menos simples ou, nas palavras dos autores, formatos mais “complicados”, são os que tendem a formar uma quantidade maior de poros na estrutura do revestimento e, ao mesmo tempo, implicam no aumento da porosidade efetiva, característica extremamente importante para a qualificação de um revestimento enquanto material permeável.

A Figura 22 ilustra como são classificados os vazios de um revestimento asfáltico permeável.

Figura 22 – Tipos de vazios em uma camada de concreto asfáltico poroso.



Fonte: Adaptado de Rushmore Borough Council (1998 apud DUMKE, 2005).

Assim como o concreto permeável, pode-se realizar tanto a captação para o sistema de drenagem urbano quanto permitir a infiltração no solo. De modo geral, observa-se nos estudos a tendência em executar a captação, por meio de um conduto, da água armazenada na camada de brita. (LUGÃO, 2008; ACQUA, 2012; DANTAS, 2017).

Na fase de utilização, além das características granulométricas dos agregados, Swart (1997) aponta alguns fatores responsáveis por reduzir a eficiência hidráulica, todos relacionados com o preenchimento dos vazios. O autor indica que, por exemplo, em locais onde as velocidades de tráfego são maiores, o processo de colmatação é menor (visto que os pneus exercem um efeito de limpeza sobre as partículas acumuladas nos vazios do pavimento).

De acordo com Poulidakos *et al.* (2013), a drenagem da água possibilita a diminuição da lâmina sobre a superfície do pavimento e até mesmo a sua eliminação; implica, então, positivamente na redução das chances de ocorrência de hidroplanagem.

Hidroplanagem, também conhecida como aquaplanagem, é um fenômeno em que os pneus do veículo (terrestre ou aeronave), em virtude da presença de uma lâmina de água, perdem absolutamente o contato com a superfície do pavimento, vide Figura 23 (LUGÃO, 2008).

Figura 23 – Fenômeno de Hidroplanagem Dinâmica.



Fonte: Lugão (2008).

A hidroplanagem, segundo Lugão (2008), pode ser tanto viscosa quanto dinâmica. No primeiro caso, é a viscosidade de uma película fina de água a responsável pelo processo e ocorre quando os veículos trafegam em baixas velocidades. Quando se refere à dinâmica, o fator determinante para que ela ocorra é a espessura da lâmina d'água que forma um filme sobre o pavimento.

Segundo Fwa *et al.* (2015), um pavimento dotado de sistema de drenagem superficial eficiente é uma solução para eliminar os riscos aos usuários da via, justificando-se fisicamente porque a espessura do filme será inferior à espessura crítica (mínima para que ocorra hidroplanagem dinâmica).

Luo *et al.* (2015) citam a utilização de misturas asfálticas permeáveis de granulometria aberta em províncias chinesas e nos Estados Unidos, de modo que se obteve maior segurança de tráfego, reduzindo riscos de hidroplanagem e projeção de água pelos pneus durante condições de precipitação.

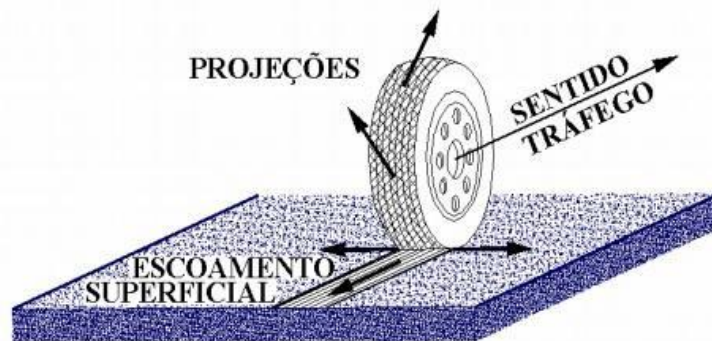
Tang *et al.* (2019) reiteram que operações seguras em rodovias devem ser uma das principais preocupações por parte dos engenheiros e das autoridades responsáveis pela pavimentação. Sendo assim, a redução da resistência ao fenômeno de derrapagem do veículo em condições chuvosas apresenta um elevado risco para o motorista ao qual é imprescindível uma direção segura. Além de fatores como as condições dos pneus e a permeabilidade do revestimento, os autores buscam uma ferramenta baseada na metodologia de elementos finitos para relacionar os volumes precipitados, a microtextura do pavimento asfáltico permeável e os fluxos de água horizontal e vertical.

O modelo computacional desenvolvido foi capaz de, não só avaliar o escoamento superficial, mas também de simular a infiltração da água nos poros do revestimento. A comprovação da eficácia foi obtida através de ensaios experimentais e procedimentos empíricos. Dessa maneira, a pesquisa tornou possível a observação do comportamento do pavimento antes mesmo da sua execução (TANG *et al.*, 2019).

Um pavimento drenante eficiente pode trazer ainda outro benefício: a redução do “spray d’água”, uma espécie de névoa que ocorre devido à projeção de água presente na superfície de rolamento. Essa névoa pode gerar nos motoristas dificuldade de observar o tráfego e os detalhes da pista. O revestimento permeável, ao reduzir ou eliminar a lâmina d’água, atua como um fator que restringe as projeções do spray de água, assegurando aos usuários da via mais segurança e conforto em períodos de chuva (GNCDS, 1996; ACQUA, 2012; LUO *et al.*, 2015).

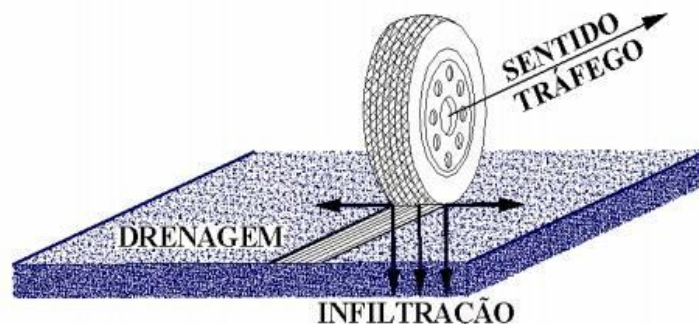
As Figuras 24 e 25, adaptadas da nota de informação francesa por Lugão (2008), ilustram a eliminação desse efeito.

Figura 24 – Projeção de água pelo pneu em revestimento impermeável.



Fonte: Lugão (2008).

Figura 25 – Ausência do efeito de projeção devido à utilização de revestimento permeável.



Fonte: Lugão (2008).

4.2 ADERÊNCIA ENTRE PNEU E PAVIMENTO

As condições de aderência entre os pneus do veículo e o pavimento influenciam na segurança do tráfego, permitindo o motorista guiá-lo conforme desejado ou sujeitando-o a condições que favoreçam fenômenos como hidroplanagem e derrapagem. Dependendo da aderência disponível, o condutor poderá ou não evitar um acidente nas condições climáticas em que dirige (LUGÃO, 2008; JING *et al.*, 2019).

Segundo Souza *et al.* (1994), a aderência depende do valor da força de atrito entre as duas superfícies. Esse cenário, de acordo com Cardoso *et al.* (1995), merece atenção especial em situações em que o pavimento se encontra em um momento de condições climáticas chuvosas. Para garantir a aderência necessária, devem ser observadas a espessura do filme de água, a capacidade do pneu de expulsar o líquido entre as suas ranhuras e a textura superficial do revestimento.

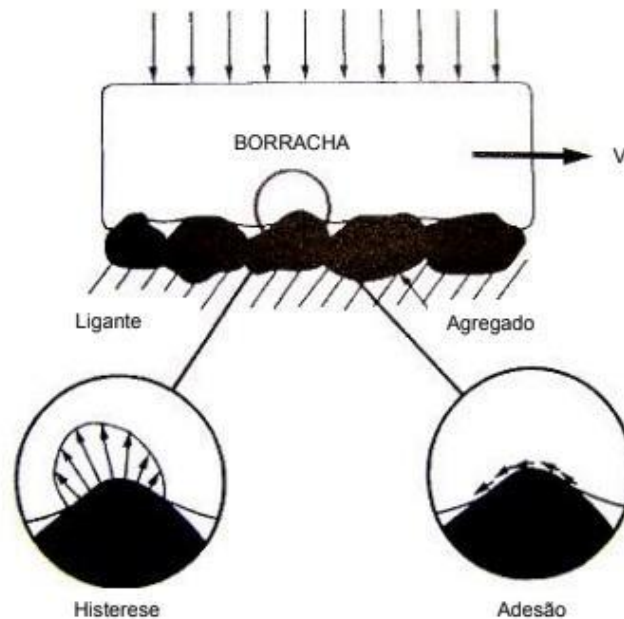
Destaca-se que o atrito desenvolvido em pistas molhadas é consideravelmente inferior ao obtido em pistas secas, uma vez que não é possível eliminar totalmente a água entre pneu e pavimento.

Rodrigues Filho (2006) e Poncino (2001 apud Oliveira, 2003) citam que, além da espessura da lâmina d'água e das texturas do pavimento e do pneu, fatores como pressão do pneu, carga do veículo, velocidade de tráfego e área de contato são fatores importantes ao se avaliar o coeficiente de atrito.

A aderência é dividida em duas parcelas de acordo com os efeitos causados por cada uma, a saber: atritos por adesão e por histerese. O atrito por adesão é oriundo dos efeitos intermoleculares de contato entre a borracha do pneu e os agregados do revestimento; é relacionado ao pavimento em sua condição seca, reduzindo significativamente quando ele é molhado. Já a histerese orna à aderência uma parcela de atrito relacionado à perda de energia da borracha do pneu ao deslizar sobre as irregularidades da superfície do pavimento e não é um fenômeno sensível à existência de água na pista de rolamento (MEURER FILHO, 2001; LUGÃO, 2008; SILVA, 2008; KOGBARA, 2016).

Os fenômenos físicos de adesão e histerese são ilustrados na Figura 26.

Figura 26 – Mecanismos de aderência entre pneu e pavimento.



Fonte: Santos (2004).

O diferencial do concreto asfáltico permeável está em sua textura rugosa. Segundo Jerjen *et al.* (2015), esse parâmetro é, em concordância com os demais fatores, capaz de definir o comportamento de uma via de tráfego especialmente quando ela encontra-se molhada ou os veículos transitam a elevadas velocidades.

A macrotextura do revestimento é diretamente relacionada à sua rugosidade superficial. Observa-se que os agregados se destacam na superfície de acordo com seus diâmetros, angulosidades e formas. O concreto permeável apresenta uma superfície em que os agregados graúdos possuem protuberâncias suficientemente agudas e compridas. Esse revestimento com superfície mais irregular e rugosa, em relação ao usual, oferece uma resistência à derrapagem superior à de pavimentos tradicionais. (SOUZA *et al.*, 1993; LEFEBVRE, 1993; ACQUA, 2012).

Jing *et al.* (2019) reiteram que o estudo da microestrutura do concreto asfáltico é primordial para entender o comportamento do material em diversos parâmetros. Pode-se afirmar, então, que, além dos agregados, as características dos poros presentes na mistura são determinantes para a obtenção do comportamento desejado do material.

Ahmad *et al.* (2018) citam que, de acordo com um estudo japonês, a segurança propiciada pelo material é tal que com a utilização de revestimentos

asfálticos permeáveis, 80% dos acidentes transcorridos em condições de precipitação podem ser evitados.

4.3 RUÍDO E ABSORÇÃO ACÚSTICA

Ruído é um “som indistinto sem harmonia” (RUÍDO, 2020). Está diretamente ligado à frequência de cada som produzido e o impacto que essa frequência pode causar na percepção e no conforto humanos. Wang *et al.* (2016) afirmam que a poluição sonora pode afetar a saúde humana e que grande parte dos ruídos urbanos advém do tráfego de veículos.

A fim de definir ordens de grandeza e facilitar a compreensão do nível de poluição sonora produzida pela circulação de veículos, cita-se o estudo de De Marco (1982). O autor atribui ao tráfego em ruas de elevado movimento valores de pressão acústica de 80 a 90 dB; valor superior ao observado em uma conversa normal (60 a 70 dB) e inferior ao produzido por aviões a jato (110 a 120 dB). A unidade de medida dB é referente à decibel e traduz o nível sonoro de um dado local.

Arquer e Loranca (1997) dividem o ruído oriundo do tráfego em três categorias, a saber: ruídos emitidos pelos componentes mecânicos do veículo, ruídos aerodinâmicos e ruídos de rolagem, cujo cerne encontra-se nas vibrações tanto dos pneus quanto do ar aprisionado entre eles e o revestimento do pavimento. O ruído devido à rolagem, por sua vez, é influenciado por uma série de fatores, sendo os principais: estado de conservação e tipo do pneu (largura, ranhura), peso e velocidade do veículo, presença de água na superfície do pavimento, textura do revestimento e nível de absorção acústica do pavimento. A utilização de revestimentos asfálticos de graduação aberta mostra-se eficaz na redução dos ruídos (WOODSIDE *et al.*, 1997; LUO *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2016).

A absorção acústica é uma característica do revestimento de maior influência em pavimentos permeáveis. De acordo com Arquer e Loranca (1997), esse parâmetro é influenciado pelo teor e pela forma dos vazios, o modo como eles conectam entre si e a espessura da camada.

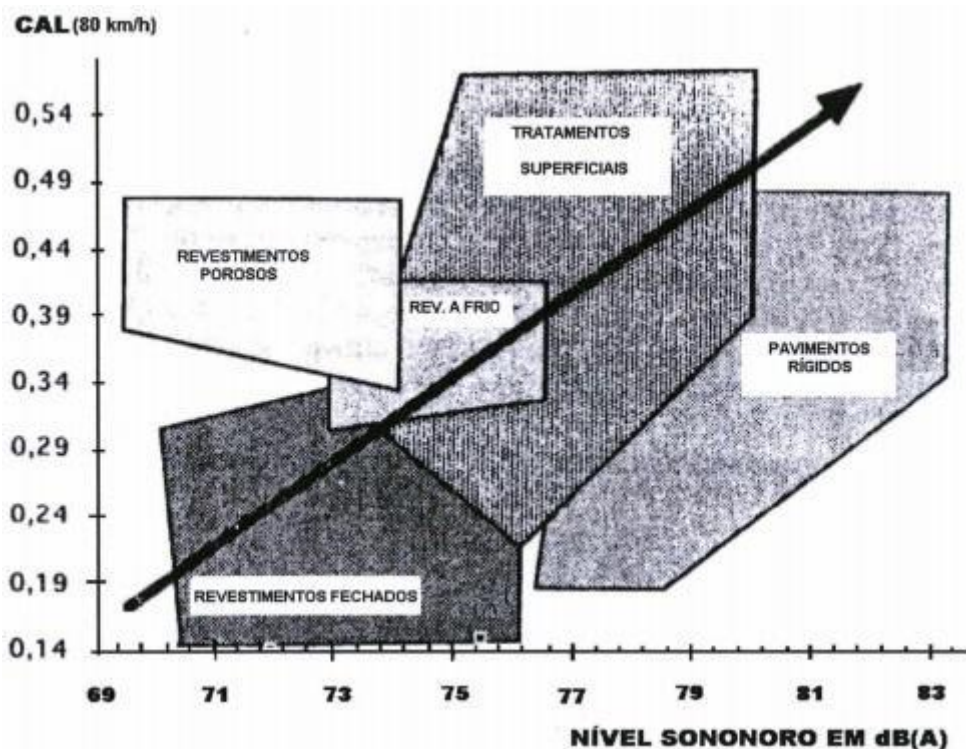
De acordo com os autores, os pavimentos permeáveis apresentam um bom comportamento frente à geração de ruídos e a textura é o fator principal quando se analisa esse tipo de revestimento poroso. Devido a esse comportamento, Poulikakos

et al. (2013) classificam revestimentos asfálticos permeáveis como “ambientalmente amigáveis”.

Poulikakos e Partl (2012), em uma pesquisa sobre a influência da umidade nos concretos asfálticos permeáveis, chegam a afirmar que, dentre as características do material, a mais importante e que justifica sua ampla utilização ao redor do mundo é justamente a capacidade de reduzir os ruídos provenientes do tráfego.

O ideal, ao se projetar uma via, seria conseguir balancear a equação de modo a se obter um nível baixo de ruído associado a uma aderência satisfatória. Observa-se esse comportamento para pavimentos permeáveis (porosos) no Gráfico 5 (na qual CAL é abreviatura de Coeficiente de Atrito Longitudinal) que ilustra a relação entre ruído e aderência para diversos tipos de pavimentos.

Gráfico 5 – Relação entre Coeficiente de Atrito Longitudinal e Nível Sonoro para diversos pavimentos.



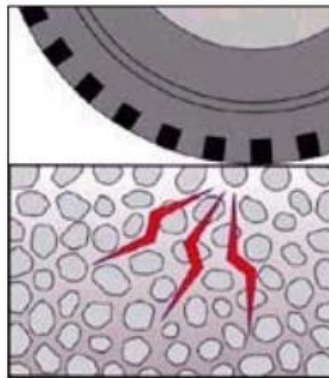
Fonte: Arquer e Loranca (1997).

A redução de ruído devido à utilização de revestimentos permeáveis no lugar dos convencionais pode ser de até 6 dB (para velocidades entre 110 e 120 km/h). Perez-Jimenez *et al.* (1997) reforçam o quão significativa é a redução da poluição

sonora; para velocidades de tráfego usuais em vias urbanas (60 a 80 km/h), observou-se uma redução da faixa de ruído de 76 a 83 dB para 71 a 76 dB.

A estrutura mais porosa da superfície permeável e a comunicação entre os poros permitem reduzir os efeitos de compressão e expansão do ar na interface pavimento/pneu. O mecanismo de penetração do ar nos vazios do concreto permeável é simbolizado na Figura 27 (LUO *et al.*, 2015).

Figura 27 – Penetração do ar nos vazios do concreto permeável.



Fonte: Japan Highway Institute (1999 apud Oliveira, 2003).

Pesquisas como a de Wang *et al.* (2016) fazem jus à importância desse parâmetro de desempenho do revestimento ao avaliar as influências do teor de vazios e da estrutura da mistura na absorção acústica proporcionada pelo pavimento. Segundo os autores, um material com poros de raios maiores possuem coeficiente de absorção acústica menor; ao aumentar o teor de vazios (de 15% para 25%), o módulo desse coeficiente reduz, mas a faixa de frequências captadas se expande, abrangendo diferentes fontes de geração de ruídos.

4.4 COLMATAÇÃO

Colmatação é o processo de preenchimento dos vazios do revestimento com partículas e, segundo Dumke (2005), esse processo é o principal responsável pelas perdas das características hidráulicas e acústicas do revestimento, representado na Figura 28.

Figura 28 – Ilustração do processo de colmatção.



Fonte: Betina (2016).

Fwa *et al.* (2015) discutem a importância de, ao se planejar um revestimento com elevada permeabilidade e porosidade, garantir que os poros não sejam obstruídos com o passar do tempo e as características hidráulicas sejam mantidas por meio de um serviço eficiente de limpeza. Um fator importante a ser analisado é a propriedade de cada mistura asfáltica permeável de resistir à colmatção.

A velocidade da colmatção é ditada por uma série de fatores, como grau de poluição da região, formato e distribuição dos vazios, tipo de tráfego e velocidade de utilização da via. Observa-se esse problema mais intensamente em vias urbanas cujo tráfego é lento (BOCHOVE *et al.*, 1997; ACIOLI, 2005; VIRGILIIS, 2009; SAÑUDO-FONTANEDA *et al.*, 2013).

Em vias de tráfego intenso e altas velocidades, repara-se que a passagem dos veículos tende a provocar uma sucção nos vazios e descolmatá-los (processo chamado de “pumping”), expulsando os materiais pulverulentos; dessa maneira, nesses locais, a colmatção tem sua velocidade reduzida. É inclusive discutido na literatura por alguns estudiosos se medidas de manutenção precisam ser executadas nesse tipo de via, visto que experiências mostram que a colmatção não é significativa para as vias supracitadas (PORTO, 1999; ACIOLI, 2005; VIRGILIIS, 2009).

Jing *et al.* (2019) afirmam que a morfologia dos poros, sua conectividade, tamanhos e tortuosidade são fatores que estão também intrinsecamente relacionados ao processo de colmatção; os autores utilizam a expressão de que a resistência à colmatção define a “durabilidade da permeabilidade” em pavimentos permeáveis. Afirmam ainda que agregados com granulometria uniforme tendem a

produzir concretos asfálticos permeáveis com melhores resistências frente a colmatação. Em contrapartida, há uma redução na permeabilidade do revestimento.

Procedimentos comuns para manutenção do pavimento por meio da descolmatação dos vazios são utilização de vassouras para varrer o revestimento seco ou molhado, aplicação de jatos d'água sobre a superfície, aspiração do revestimento e utilização de equipamentos mais sofisticados de limpeza. Um tipo desses aparelhos é a chamada máquina autopropulsada, com aplicação de jatos de água, aspiração e filtragem da água, ou seja, com reaproveitamento durante a utilização. Todavia, esse processo apresenta um custo elevado em virtude do preço do equipamento em si (RAZ, 1997; ACIOLI, 2005; VIRGILIIS, 2009).

4.5 DURABILIDADE

Segundo Bonnot (1997), apesar de o ligante asfáltico envelhecer de maneira mais rápida por causa dos vazios e do processo de oxidação, o maior cobrimento dos agregados (cuja superfície específica é inferior à dos agregados utilizados em pavimentos convencionais) pela película de aglomerante suplanta o efeito negativo. Ainda de acordo com o autor, esse tipo de pavimento apresenta bons parâmetros mecânicos durante sua vida útil, destacando-se pela elevada resistência à ocorrência de trilhas de roda devido ao tráfego de veículos. Quanto à durabilidade, Quantao e Shaopeng (2014) afirmam que, para assegurar um período satisfatório de utilização, o desgaste do pavimento deve ser prevenido e uma medida que vem sendo amplamente empregada nos estudos é a modificação do ligante por polímeros ou adição de fibras.

Luo *et al.* (2015) citam que dois trechos de vias com tráfego denso foram revestidos com concreto asfáltico permeável na Nova Zelândia, um com 20% de vazios e outro com 30%. O artifício utilizado foi a modificação do ligante por meio da adição de epóxi e o resultado obtido foi de que, após três anos de utilização intensa, o material ainda se apresentava em boas condições.

Liu *et al.* (2014) comparam o tempo de vida útil de um concreto asfáltico denso e um permeável em rodovias holandesas; enquanto o primeiro apresenta boas condições até cerca de 18 anos de idade, o segundo tem durabilidade entre 10 e 12 anos. Os autores apontam que cerca de 70% da manutenção ou substituição

do revestimento se deve à ocorrência do processo “ravelling” (a desagregação dos agregados da superfície do revestimento).

Anupam *et al.* (2016) afirmam que os revestimentos asfálticos permeáveis são expostos a tensões maiores que os revestimentos convencionais e a justificativa dessa tendência é que os primeiros possuem um conteúdo menor de mastic (conjunto de agregados e ligante) e maior percentual de vazios; a borracha dos pneus pode penetrar nos vazios da mistura e exercer elevadas tensões de contato.

4.6 MANUTENÇÃO DO REVESTIMENTO

Bazin (1967 apud Xu *et al.*, 2019) reporta a possibilidade de induzir o fenômeno de cura do concreto asfáltico permeável, isso é, promover a recuperação estrutural do compósito após um período de utilização. Desde então, engenheiros rodoviários e cientistas começaram a pesquisar métodos para reparar as microfissuras desse material.

A pesquisa de Xu *et al.* (2019), por exemplo, envolve o emprego de cápsulas de alginato de cálcio a fim de promover o rejuvenescimento do material. Os autores utilizaram o método de aquecimento por indução e verificaram uma taxa de rejuvenescimento singela e limitada, sendo a metodologia limitada a revestimentos pouco solicitados.

Uma outra alternativa, apresentada pela Delf University of Technology, para produzir revestimentos asfálticos permeáveis resistentes a esse processo é a adição de lã de aço na mistura asfáltica e posterior aquecimento por indução do compósito, a fim de restaurar as microfissuras. Liu e Garcia (2010 apud Liu *et al.*, 2014) aferiram que um revestimento deteriorado, com adição de lã de aço, após o processo de aquecimento por indução até 120°C, recuperou cerca de 85% da sua resistência à flexão.

Knight (2007), por sua vez, apresentou um estudo qualitativo das propriedades de um estacionamento com revestimento de concreto asfáltico permeável após três anos de utilização. O compósito, projetado para possuir *in loco* uma porosidade de 30%, através de análises visuais não apresentava nenhuma evidência de dano estrutural nem danos por congelamento e descongelamento ou entupimento significativo dos poros por sedimentos. Em contrapartida, observou-se

um desgaste abrasivo com exposição dos agregados mais perceptível em relação ao revestimento convencional de referência.

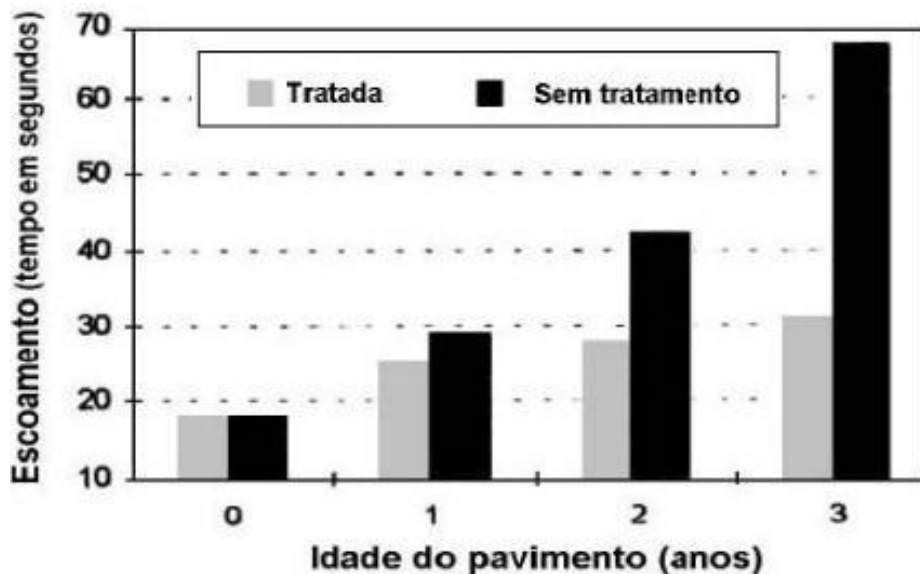
Zhang *et al.* (2016) estudaram justamente uma alternativa para combater os efeitos do desgaste superficial do revestimento ao avaliar os resultados de uma manutenção preventiva com material de tratamento de superfície. A medida é considerada economicamente viável e sustentável.

O tratamento superficial preventivo não influencia de forma significativa nem no teor de vazios e nem nas propriedades do revestimento de asfalto permeável. As perdas por abrasão, todavia, apresentam melhores resultados com melhora na resistência ao desgaste. Há também uma melhora na resistência ao dano por fadiga nas regiões de contato entre o agregado e o ligante (ZHANG *et al.*, 2016).

Na utilização, principalmente em vias de tráfego, a fim de manter as vantagens do concreto permeável ao longo do tempo, a literatura preconiza que, para cada tipo específico de revestimento asfáltico permeável, medidas de manutenção devem ser planejadas e executadas conforme as necessidades apresentadas pela via. Autores como Virgiliis (2009) recomendam que a primeira manutenção ocorra logo um ano após a execução do pavimento. Em geral, não há um período do ano ideal para a execução do serviço de limpeza dos vazios; com a exceção da primeira limpeza ou da manutenção de pavimentos muito antigos, para os quais recomenda-se a execução do serviço logo após um período de intensas precipitações (RAZ, 1997).

Os estudos de Raz (1997) em rodovias da Espanha ilustram o aumento do escoamento superficial nos pavimentos conforme o passar dos anos; esse efeito é mais significativo em pavimentos que não receberam medidas de manutenção (Gráfico 6).

Gráfico 6 – Efeito da colmatação no escoamento superficial em pavimentos com e sem manutenção.



Fonte: Raz (1997).

Fwa *et al.* (2015), em sua pesquisa analisaram o efeito de uma colmatação gradual em dois tipos de revestimento (um concreto permeável e um concreto asfáltico permeável) com diferentes porcentagens de vazios, a saber: 10%, 15%, 20% e 25%. Ao medir a permeabilidade ao longo do processo de preenchimento dos vazios, os autores puderam concluir que: o concreto permeável apresenta menor sensibilidade em termos de diminuição do coeficiente de permeabilidade em relação ao revestimento asfáltico permeável; para ambos revestimentos a permeabilidade e a resistência ao entupimento aumentam substancialmente quando a porosidade da mistura ultrapassa os 20%.

4.7 FABRICAÇÃO, TRANSPORTE E COMPACTAÇÃO NO LOCAL

O processo de fabricação do concreto asfáltico permeável é bem semelhante ao do concreto asfáltico convencional e ocorre em usinas com o aquecimento dos materiais constituintes até determinadas temperaturas. Deve-se ficar atento ao fenômeno de escorrimento do ligante, visto que esse tipo de compósito apresenta menor teor de finos e a mistura ocorre em temperaturas superiores às de asfaltos comuns. O escorrimento pode acontecer devido a inúmeros fatores como: teor de ligante além do ideal, temperatura de mistura acima da recomendada, utilização de

material ligante não apropriado e tempo de transporte muito elevado (SILLER, 1997; MEURER FILHO, 2001).

No que diz respeito ao transporte, Orue-Echevarria *et al.* (1997), em seu artigo no Congresso Europeu de Misturas Drenantes, recomendam que o tempo de transporte não ultrapasse duas horas, tendo em vista a vibração imposta pelo próprio veículo. Situações em que esse tempo precise ser estendido podem ser resolvidas com a utilização de ligantes asfálticos modificados por polímeros e fibras.

Por ser uma mistura com esqueleto formado por um elevado percentual de vazios, os métodos utilizados na fase de compactação podem afetar a performance do material e a estrutura interna do compósito (HUANG *et al.*, 2020).

Sugere-se que, após o espalhamento do material, seja feita a utilização de rolos estáticos metálicos secos e lisos (Figura 29), reprimendo-se a utilização de rolos vibratórios que oferecem riscos de fragmentação dos agregados da superfície.

Com a utilização desse equipamento, Huang *et al.* (2020) afirmam que a adoção de frequências de vibração maiores e por um período de tempo mais elevado tendem a gerar resultados benéficos no grau de compactação das partes média e inferior do revestimento.

Figura 29 – Ilustração do rolo compactador ideal para revestimentos asfálticos permeáveis.



Fonte: Loxam Degraus (2021).

4.8 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO CONCRETO ASFÁLTICO PERMEÁVEL

As vantagens da utilização de concreto asfáltico permeável como revestimento de um pavimento foram sutilmente apresentadas, à medida que se

apresentaram suas propriedades, no presente trabalho. Autores como Castro (2005), Fwa (2015) e Chen *et al.* (2016) apontam como principais pontos positivos os seguintes:

- a) redução dos riscos de hidroplanagem e derrapagem com pavimento molhado;
- b) possibilitar distâncias menores de frenagem em condições de chuva;
- c) redução significativa do efeito de projeção de água (“spray”), permitindo uma visibilidade melhor da pista;
- d) redução da reflexão da iluminação de faróis na pista molhada;
- e) aumento da aderência;
- f) viés de desenvolvimento urbano sustentável;
- g) redução dos ruídos provocados pelo tráfego;
- h) melhor comportamento drenante da via, permitindo que a água permeie os vazios e seja conduzida às camadas abaixo do revestimento.

Como resultados positivos das vantagens apresentadas, Zhang *et al.* (2015) afirmam que há um aumento na satisfação dos usuários das vias e uma melhora no fluxo de tráfego em condições de precipitação.

No que diz respeito aos fatores limitantes, cabe citar a ocorrência de colmatação, oxidação e o custo do material. Para combater os efeitos negativos da colmatação, deve-se executar um planejamento de manutenção da via a fim de manter seus pontos positivos tanto de drenagem quanto acústicos; Castro (2005) recomenda que, para um bom funcionamento durante a sua vida útil, o teor mínimo de vazios seja próximo de 20%.

Bonnot (1997) destaca que, para rodovias e vias urbanas com velocidades projetadas para menos de 60 km/h ou com ocorrência frequente de congestionamento, o risco de colmatação e poluição por hidrocarbonetos é tão elevada que se desencoraja a aplicação de concreto permeável nesses locais.

Outro aspecto negativo desse revestimento é o fenômeno descrito como “ravelling”, isto é, a desagregação dos agregados pétreos que ocorre na superfície do revestimento, justificada por Mo *et al.* (2014) pelo elevado teor de vazios da mistura.

Com relação ao custo, Campos (1998 apud Meurer Filho, 2001) afirma que pode chegar a ser duas vezes superior ao dispendido na execução de pavimentos convencionais. Nos estudos de Acioli (2005), a utilização de revestimento asfáltico

permeável (sem computar os gastos com a camada de reservatório) respondeu por um custo 21% superior ao inerente a um revestimento convencional (sem considerar os gastos de incremento na rede a jusante que deveriam ser contabilizados no dimensionamento de um sistema convencional) e 32% superior quando comparado a revestimentos de blocos vazados. A autora ressalta a importância do dimensionamento meticuloso do reservatório de britas sob o pavimento, uma vez que ele respondeu por 31% do custo total da estrutura. Virgiliis (2009), por sua vez, analisa os fatores que impactam nesse aumento, listando-os como:

- a) utilização de agregados de melhor qualidade, necessitando-se, ocasionalmente, buscá-los em locais mais distantes do sítio de aplicação;
- b) prática de modificação do asfalto por polímero, cujo preço impacta no orçamento final;
- c) maior consumo de tinta utilizada para sinalização das faixas, pois parte dela adentra os vazios da superfície;
- d) execução de uma camada impermeável sob a camada de reservatório quando a finalidade é de captação e drenagem da água somente;
- e) execução de revestimentos com espessuras maiores, visto que as resistências mecânicas são inferiores às demonstradas por concretos asfálticos tradicionais;
- f) custos de manutenção superiores aos convencionais, a fim de garantir, além da funcionalidade, as características relacionadas à condutividade hidráulica.

Tendo em vista os pontos positivos e limitações apresentados, em consonância com os novos preceitos de desenvolvimento sustentável e de “Best Management Practices”, cabe ao setor responsável pelo planejamento urbanístico avaliar o quão benéfico será utilizar esse tipo de revestimento. Deve-se, ainda, analisar o efeito que eles podem gerar na dinâmica dos centros urbanos em momentos de precipitação intensa e no cenário de inundações apresentado.

4.9 GERAÇÕES

Existe na literatura uma classificação dos concretos asfálticos permeáveis quanto às épocas em que começaram a ser fabricados e às porcentagens de vazios. Segundo Porto (1999), a primeira geração foi desenvolvida na década de 1980 e a

segunda, na década de 1990. A terceira está em estudo no presente, ainda em desenvolvimento e aprimoramento (MOMM, 2002).

A primeira geração de misturas permeáveis possui índices de vazios da ordem de 20% e velocidade de percolação da água em torno de 1,2 cm/s. Observava-se, todavia, que essas misturas, conforme ocorria o processo de colmatação, perdiam significativamente as vantagens em relação a permeabilidade e redução de ruídos. Foram observadas reduções do coeficiente de permeabilidade de 25% do valor original após quatro anos de uso da via. Surgia, então, a necessidade de se aprimorar esse concreto de modo a aumentar o índice de vazios do revestimento (GANGA *et al.*, 1997; MICHAUT, 1997; RUBIO, 1997; MOMM, 2002).

A segunda geração, por sua vez, foi marcada por compósitos com teores de vazios superiores aos da primeira (entre 20% e 25%). O índice de permeabilidade também sofreu aumento de 67%, atingindo valores da ordem de 2,0 cm/s. Essas características foram possíveis de se obter devido ao uso somente de agregados granulares, evitando-se os finos. Observou-se, todavia, que, com o passar do tempo, a textura da superfície tendia a perder sua integridade devido à fragilidade das ligações entre os agregados, ocasionada pelo teor baixo do ligante e ausência de finos e areia (GANGA, 1997; MEURER FILHO, 2001; MOMM, 2002).

A terceira geração é a atual, em que se utilizam ligantes modificados por polímeros e com adições de fibras, por exemplo. Segundo Zhou *et al.* (2014), a performance dos pavimentos melhorou consideravelmente, de modo a chamar a atenção dos órgãos rodoviários e dos construtores de vias.

Os teores de vazios nesse material podem superar os 25%. Estudos avaliam as vantagens agregadas pela utilização de ligantes modificados, buscando valores ideais para se obter um revestimento com as características mais interessantes para cada situação (MOMM, 2002).

4.10 LIGANTES MODIFICADOS POR POLÍMEROS E COM ADIÇÃO DE FIBRAS

Observa-se na literatura que a modificação dos asfaltos por polímeros ou a adição de fibras tem como objetivo conferir ao concreto melhores parâmetros de qualidade e de durabilidade. Dentre os polímeros, de acordo com os estudos realizados, os mais utilizados são os termoplásticos e os elastômeros. As fibras, por

sua vez, podem ser minerais ou orgânicas, por exemplo, de vidro (Figura 30) e celulose, respectivamente.

Corté (1998 apud Homem, 2002) afirma que, dentre as fibras, as que apresentam melhores capacidades de se ligarem ao ligante asfáltico são as de celulose e algumas minerais. Tal comportamento não é observado em fibras de aço, sintéticas e nas de vidro, apesar de apresentarem propriedades mecânicas interessantes.

Figura 30 – Fibra de vidro.



Fonte: Barros *et al.* (2019).

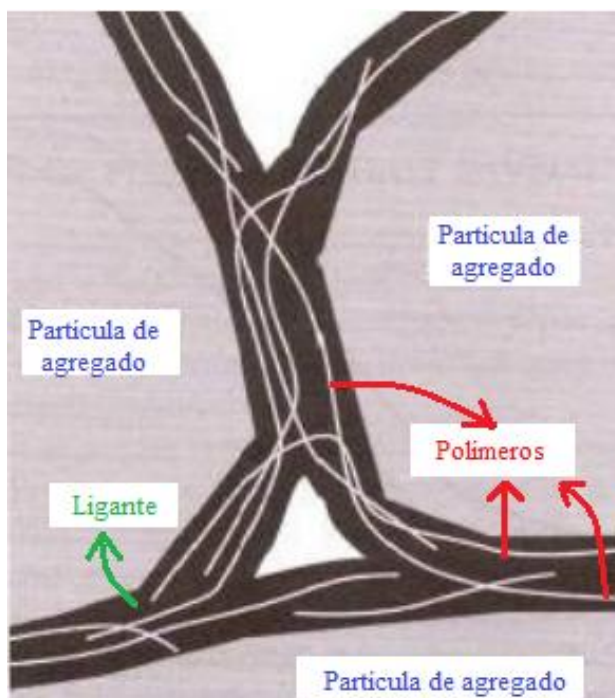
Kuennen (2003) aponta que a viscosidade dos ligantes modificados por aditivos químicos poliméricos apresentam aumento de quatro a seis vezes em comparação aos utilizados em revestimentos convencionais. Obtém-se, então, uma superfície com menores chances de ter desagregação dos materiais constituintes e uma estrutura mais porosa. O teor de utilização dessas adições corresponde de 0,3% a 0,4% do volume de ligante asfáltico da mistura.

Aponta-se que o ligante, ao envolver o polímero, protege o concreto asfáltico da oxidação e melhora o cenário de ligação entre os agregados, de forma a preservar a sua união e conferir um comportamento mais interessante em relação tanto à desagregação quanto à deformação.

Outros aspectos dos polímeros são que eles são finos em ordem microscópica e seu comprimento não ultrapassa 6 mm, de modo que produzem um intertravamento ao se entrelaçarem dentro da película asfáltica e são responsáveis

pelo aumento da força de ligação, tal qual as fibras, vide Figura 31 (LUO *et al.*, 2015).

Figura 31 – Detalhe do intertravamento na zona de contato entre partículas de agregado.



Fonte: Adaptado de Ferguson (2005).

A interação entre os maltenos do cimento asfáltico e os polímeros provoca o inchamento dos mesmos, resultando em alterações nas propriedades do ligante; o processo confere ao ligante modificado maior viscosidade e comportamento dito “gel”, aumentando sua elasticidade e resistência ao estiramento (LEITE, 1999).

A utilização desses aditivos e adições de fibras, além de impedir que o ligante preencha os vazios no interior da estrutura, também possibilita um aumento na incorporação de ligantes de 30% a 40%, recobrando completamente a superfície dos agregados e os protegendo dos efeitos da oxidação (VIRGILIIS, 2009).

A adição de fibras confere às ligações e à estrutura como um todo maior estabilidade. Esse aumento de resistência na ligação entre agregados permite a utilização de materiais com diâmetros até duas vezes superiores aos usados em concretos asfálticos permeáveis da segunda geração, aumentando, concomitantemente, o coeficiente de permeabilidade do revestimento e o seu índice de vazios (CHEN *et al.*, 2012).

Quanto às porcentagens de asfalto em relação ao total da mistura, Ruiz (1997) define as faixas de 4,5% a 5,2% para ligantes modificados por polímeros, de 5% a 5,5% para asfaltos com adição de fibras e de 5,5% a 6,8% para ligantes que possuem tanto o aditivo quanto a adição. O autor comenta que esses valores podem ser inferiores quando não ocorre utilização de areia enquanto agregado.

Dentre os polímeros, por sua vez, existem as subdivisões; os termoplásticos são caracterizados por amolecerem frente ao calor (comportamento semelhante ao do ligante asfáltico) e os mais utilizados são polipropileno e polietileno; os elastômeros, por sua vez, contribuem de maneira mais significativa para incremento das características de elasticidade e coesão da mistura, sendo os mais utilizados o SBS e o EPDM (SOTO, 1997).

Chen *et al.* (2012), Luo *et al.* (2015) e Chen *et al.* (2016) discutem, ainda, outras vantagens em se utilizar aditivos poliméricos em concretos asfálticos permeáveis, cabendo a este trabalho citar as principais, sendo:

- a) maior coesão, ou seja, maior a energia demandada para provocar ruptura na camada do ligante;
- b) maior resistência em idades avançadas em comparação ao convencional;
- c) melhores parâmetros em relação a deformações permanentes;
- d) aumento da durabilidade em até oito anos.

A contribuição dos polímeros para o desempenho em campo do compósito é tal que na Suíça a norma de concretos asfálticos permeáveis requer a utilização de ligantes modificados (POULIKAKOS E PARTL, 2012).

Chen *et al.* (2012) apontam que a utilização de fibras promove menores perdas no ensaio de cântabro em comparação ao compósito com ligante convencional.

4.11 AGREGADOS UTILIZADOS

Neste estudo, a mistura asfáltica permeável seguirá a tendência da terceira geração utilizando apenas agregados graúdos, ou seja, sem adição de areia. Os agregados graúdos, por sua vez, apresentam peculiaridades no tocante à distribuição granulométrica. Em trabalhos como o de Huang *et al.* (2020), pode-se observar a tendência atual em utilização de agregados com descontinuidade granulométrica.

Segundo Meurer Filho (2001) e Chen *et al.* (2012), essa descontinuidade é um fator importante para as características desse tipo de concreto, exercendo influência na permeabilidade da mistura por meio da existência de vazios comunicantes. Ao decorrer da revisão bibliográfica, foi possível observar a recorrência da utilização de uma dada proporção entre materiais retidos e os passantes na peneira de malha 2 mm. Os materiais de diâmetros menores correspondem a um teor de 10% a 15% do total, enquanto os agregados restantes estariam presentes na faixa de 85% a 90%. Esse percentual é o mesmo utilizado nas rodovias holandesas, de acordo com Hsu *et al.* (2011).

Ahmad *et al.* (2018) afirmam que quanto maior o teor de finos, maior será a durabilidade e resiliência à deformação, porém o coeficiente de permeabilidade tende a reduzir.

Dumke (2005) afirma que as características requeridas dos agregados dos concretos permeáveis são semelhantes às das demais misturas asfálticas. Deseja-se a formação de um esqueleto mineral resistente à fragmentação e à abrasão; os agregados devem possuir boa adesividade ao ligante, formato cúbico, faces limpas e não podem, de modo algum, ser reativos.

Até o presente ano de 2021, não há nenhuma norma brasileira específica que aborde características necessárias para misturas asfálticas permeáveis. Um concreto asfáltico permeável, todavia, apresenta as características de uma camada porosa de atrito e é exatamente por isso que se convencionou tratar os agregados desse concreto conforme o preconizado pela norma de Camada Porosa de Atrito, a DNER-ES 386/99 (1999). Dessa forma, os agregados graúdos, devem apresentar valores de abrasão Los Angeles inferiores a 30%, admitindo-se valores superiores caso tenham apresentado desempenho satisfatório em utilização anterior.

Huang *et al.* (2020) explicitam a importância dos diâmetros de 2,36 mm (ou 2 mm para estudos nacionais) e 4,75 mm na porcentagem de vazios da mistura, de forma que, no seu estudo, os autores manipularam os agregados graúdos para obter um aumento significativo de agregados retidos na malha de 4,75 em relação à de abertura superior (9,5mm). Ainda segundo os autores, a dimensão máxima nominal do agregado não interfere de maneira significativa na porcentagem de poros comunicantes para misturas com o mesmo teor de vazios. Para teores de 20% de vazios e diferentes diâmetros máximos, os autores obtiveram quantidades de vazios comunicantes sempre superiores a 90% dos vazios totais.

As granulometrias utilizadas no estudo de Wei e Jing-jing (2012) possuíam agregados com porcentagem passante na peneira de 2,36 mm na faixa de 15% e na de 4,75 mm de no máximo 30%; os valores para o diâmetro máximo de 13,2 mm acompanham outros estudos e estão na faixa de 90% a 100%. Para granulometrias inferiores a 2,36 mm, as porcentagens passantes são valores decrescentes e próximos entre si. O teor de vazios foi de 20% para as três misturas estudadas.

A mesma tendência de distribuição granulométrica é observada nas pesquisas de Cho e Mun (2015) e de Jiang *et al.* (2015). De forma mais detalhada, a primeira utilizou diâmetro máximo de 13,2 mm. Para essa dimensão, a porcentagem passante foi de aproximadamente 98%, seguida por 70% na peneira de 9,5 mm e uma porcentagem retida de cerca de 77% na malha de 4,75 mm, observando-se o comportamento descontínuo da granulometria. O teor passante na malha de 2,36 mm segue a tendência, aproximando-se de 15%. Os números citados se aproximam bastante do que se pode observar no trabalho de Jiang *et al.* (2015).

Observa-se que há uma tendência na obtenção das curvas granulométricas desses estudos; dentro do panorama nacional, existe uma classificação para Camadas Porosas de Atrito e todo concreto asfáltico poroso também é, por natureza, uma Camada Porosa de Atrito; é possível utilizar a norma DNER-ES 386 (1999) para definir a distribuição granulométrica recorrente na literatura internacional (Tabela 2).

Tabela 2 – Prescrições de granulometria da DNER-ES 386 (1999).

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passando, em peso (faixas)					Tolerância na curva de projeto (%)
ABNT	Abertura, mm	I	II	III	IV	V	
3/4"	19,0	-	-	-	-	100	-
1/2"	12,5	100	100	100	100	70-100	± 7
3/8"	9,5	80-100	70-100	80-90	70-90	50-80	± 7
Nº 4	4,8	20-40	20-40	40-50	15-30	18-30	± 5
Nº 10	2,0	12-20	5-20	10-18	10-22	10-22	± 5
Nº 40	0,42	8-14	-	6-12	6-13	6-13	± 5
Nº 80	0,18	-	2-8	-	-	-	± 3
Nº 200	0,075	3-5	0-4	3-6	3-6	3-6	± 2
Ligante polimerizado solúvel no tricloroetileno, %		4,0 - 6,0					± 0,3

Fonte: DNER-ES 386 (1999).

5 ESTUDOS COM LIGANTES MODIFICADOS POR POLÍMEROS E COM ADIÇÃO DE FIBRAS

Carvalho (2015) avaliou as propriedades de revestimentos permeáveis com a utilização de agregados presentes na cidade portuguesa de Covilhã. O ponto inicial do estudo consistiu em determinar o teor em massa do ligante asfáltico da mistura. Para isso, a autora utilizou-se da Equação 1:

$$Pb = 0,035 \cdot A + 0,045 \cdot B + K \cdot C + F \quad (1)$$

Em que:

Pb – percentagem de ligante asfáltico em relação à massa total da mistura;

A – percentagem de agregados retidos na peneira de malha 2,36 mm;

B – percentagem de agregados passantes na peneira 2,36 mm e retidos na peneira 0,075 mm;

C – percentagem de agregados passantes na peneira de malha 0,075 mm;

K – constante relacionada à quantidade de material passante na malha de 0,075 mm;

F - fator de absorção dos agregados (entre 0 e 2%); utilizando-se $F=0,7\%$ na falta de resultados do ensaio.

O estudo utilizou dois tipos de compósitos permeáveis, cujas proporções dos materiais, em massa, encontram-se discriminados em termos percentuais na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição dos dois concretos estudados por Carvalho (2015).

Mistura	Brita (%)	Cal (%)	Fibra Celulósica (%)	Total (%)
E	96,0	4,0	0,0	100,0
F	96,0	3,5	0,5	100,0

Fonte: Adaptado de Carvalho (2015).

Para as duas misturas, utilizando-se da Equação 1, obteve-se uma percentagem de ligante de 3,5% em relação à massa total do compósito. O teor de vazios foi de 22%.

No ensaio de permeabilidade, a autora optou pela utilização de um permeâmetro de carga variável, vide Figura 32.

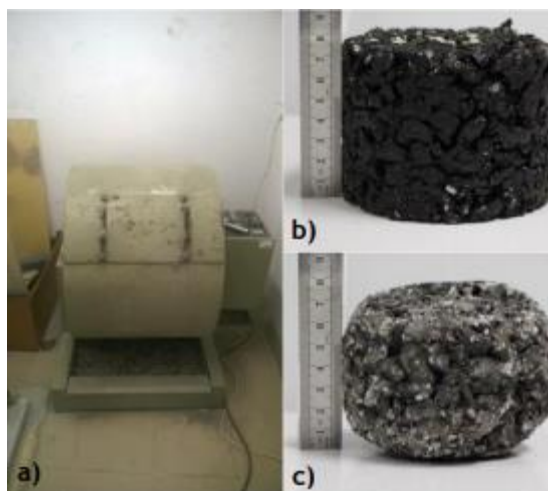
Figura 32 – Permeômetro utilizado no estudo de Carvalho (2015).



Fonte: Carvalho (2015).

O corpo-de-prova permeável foi posicionado na base do sistema, com sua face inferior parafinada, enquanto a medição do tempo e a variação do nível de água são utilizadas na Lei de Darcy para obtenção do coeficiente de permeabilidade. O ensaio de cântabro, por sua vez, foi realizado na máquina de abrasão Los Angeles, sendo ilustrado na Figura 33.

Figura 33 – Ensaio Cântabro realizado no estudo.



Fonte: Carvalho (2015).

Como conclusões de seu estudo, Carvalho (2015) aponta que ambas as misturas não atendem à perda máxima preconizada pelo Caderno de Encargos (de

Portugal); consultando, porém, o Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3, OC29/2011) a mistura F foi capaz de apresentar resultados de perda por desgaste inferiores aos limites estabelecidos (de 35% a 40%, a depender do tráfego do local) tanto nas condições imersa e à seco (32,8% e 22,1% respectivamente), evidenciando a importância das fibras no desempenho da mistura em termos de resistência à abrasão e indicando bons parâmetros de durabilidade *in loco*.

No que diz respeito à permeabilidade das misturas E e F, de acordo com a norma europeia Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 19: Permeability of specimen (12697-19:2004), ambas misturas atenderam aos requisitos para concretos asfálticos permeáveis. Observou-se, todavia, uma redução de 33% no módulo do coeficiente de permeabilidade ao introduzir as fibras de celulose na mistura.

Alencar (2005), por sua vez, produziu uma pesquisa em Fortaleza (Ceará) com a abordagem das propriedades apresentadas por cimentos asfálticos do petróleo (CAP) modificados por copolímero de etileno e acetato de vinila (EVA).

O ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/60. Os polímeros, por sua vez, foram divididos em três grupos: EVA fornecido pela Petrobrás, EVA cedido por indústria de calçados proveniente das aparas (EVAR) e o SBS fornecido pela SHELL em forma de pó.

Em uma análise realizada sob o ponto de vista da química, a autora aponta como pontos principais:

- a) os ligantes modificados apresentam-se mais resistentes em temperaturas frias;
- b) para os ligantes modificados, em temperatura ambiente, observaram-se estabilidades térmicas semelhantes às dos ligantes convencionais;
- c) os ligantes modificados, em especial o EVAR, apresentaram melhores parâmetros no tocante à resistência ao envelhecimento;
- d) CAPs modificados por polímeros apresentaram aumento na viscosidade em comparação aos ligantes não modificados.

Em seus estudos, Dumke (2005) avalia a influência de diferentes tipos de ligantes modificados (por fibras ou polímeros) no comportamento da mistura asfáltica. Como conclusões, em relação aos ligantes, é apontado que:

- a) independentemente do tipo de aditivo ou adição utilizado e da granulometria dos agregados, as porcentagens de vazios, de vazios comunicantes e a permeabilidade diminuem conforme o teor de ligante asfáltico aumenta;
- b) para diferentes ligantes modificados observou-se menor tendência de desagregação no ensaio cântabro ao aumentar o teor de ligante da mistura.

A autora estudou os parâmetros de perda ao cântabro, permeabilidade, porcentagem de vazios e vazios comunicantes para três misturas, cujos aglomerantes são:

- a) ligante CAP 50/60 com 2% de polímeros Eastman EE-2;
- b) ligante CAP 20 com 15% de borracha moída de pneus;
- c) CAP 50/60 com 0,3% de fibras de celulose.

Concluiu-se que a mistura com ligante modificado por asfalto-borracha apresentou valores de porcentagem de vazios, vazios comunicantes, permeabilidade e perdas no desgaste de desagregação no ensaio Cântabro inferiores aos obtidos para as duas outras.

Terra *et al.* (2017), ao analisar o trabalho de Dumke (2005) aponta que, em relação ao índice de vazios, as três misturas apresentaram resultados dentro do preconizado pela norma brasileira DNER-ES 386/99. O ligante modificado por borracha moída de pneus foi o que apresentou o menor percentual de vazios, devido ao fato de ser o que possuiu o maior teor de ligante ótimo (5%), ocupando, dessa forma, mais espaço entre os agregados.

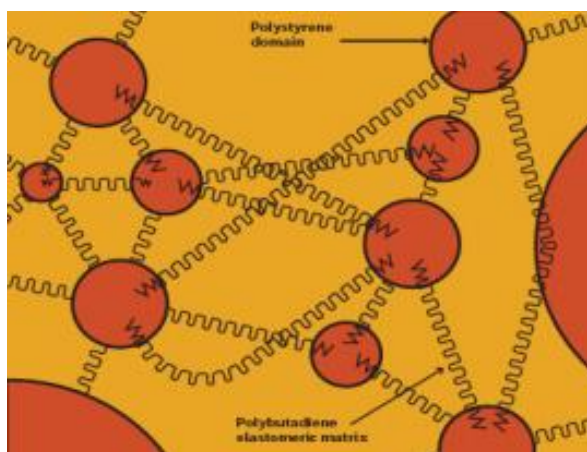
A adição de fibras, por sua vez possibilitou a obtenção de maiores coeficientes de permeabilidade e de teores de vazios comunicantes; as perdas ao desgaste no ensaio do Cântabro, por sua vez, foram inferiores à mistura de referência (DUMKE, 2005).

As misturas modificadas com polímero EE-2 apresentaram parâmetros de permeabilidade e teores de vazios superiores aos de referência, porém as perdas por desgaste ao Cântabro foram elevadas, de acordo com Dumke (2005).

O pesquisador Maciel (2010) focou seu estudo em apenas um modificador de ligante, ao avaliar o emprego de borracha termoplástica do tipo estireno-butadieno-estireno (SBS) em cimentos asfálticos do petróleo.

A Figura 34 ilustra a estrutura do polímero SBS, em que as molas representam os micro-domínios butadiênicos e as esferas, os estirênicos. Ao associar o polímero com o ligante asfáltico, os compostos estirênicos interagem com os compostos aromáticos do asfalto e formam uma espécie de gel estabilizado; a sequência butadiênica é responsável por manter a estrutura espacialmente estável. Segundo o autor, é desse processo que se extrai a justificativa para os melhores comportamentos mecânicos observados em ligantes modificados em relação aos CAPs tradicionais na fabricação de concretos asfálticos.

Figura 34 – Estrutura química do polímero SBS.



Fonte: Kraton (2000 apud MACIEL, 2010).

Como conclusões da sua pesquisa, em que o ligante foi modificado por 4% de SBS, Maciel (2010) aponta os principais tópicos:

- a) houve uma redução considerável nos afundamentos por trilhas de rodas quando comparado ao concreto asfáltico com CAP 50/70;
- b) o aumento da resistência à deformação permanente é proporcional ao teor de polímero utilizado na modificação do ligante;
- c) o material com ligante modificado apresentou melhores resultados em termos de envelhecimento, indicando melhor comportamento frente às ações externas, em comparação ao convencional; tal fato foi atribuído ao rearranjo reológico sofrido pelo CAP após a adição do polímero.

Amaral (2000), por sua vez, desenvolveu seu estudo com base nos agregados disponíveis no estado do Pará. Os tipos de compósitos produzidos diferiram essencialmente nos ligantes utilizados: um CAP-40 convencional e um asfalto modificado por polímero SBS.

Uma conclusão interessante do estudo que corrobora as ideias de autores já citados no presente trabalho é que as densidades aparentes dos compósitos produzidos a partir de ligantes modificados são ligeiramente superiores aos convencionais com menores volumes de vazios. Confirma-se, dessa maneira, a maior eficiência do ligante modificado em cobrir as áreas superficiais dos agregados.

No que diz respeito aos parâmetros mecânicos, as misturas com asfaltos modificados apresentaram resistências à tração na flexão superiores às aquelas com ligantes convencionais para todos os teores de ligante estudados. Para os valores de módulo de resiliência por compressão diametral, os resultados obtidos indicaram que as misturas com asfalto com polímero SBS apresentaram valores maiores que os das convencionais; essa conclusão denota que a utilização de adições semelhantes à polimérica da pesquisa pode viabilizar que a mistura asfáltica suporte maiores tensões sem a ocorrência de danos estruturais à camada do revestimento.

Valkering *et al.* (1990 apud Zegarra, 2007) apontam que a utilização de ligantes asfálticos modificados é uma solução aplicável à problemática das trilhas de rodas. O efeito nas deformações plásticas ao utilizar ligantes modificados por polímeros do tipo SBS foi tal que reduziu de 60 a 70% a profundidade dos afundamentos nas regiões em que se observa maior tendência de rolamento dos pneus na pista (Figura 35).

Figura 35 – Exemplo de uma trilha de roda.



Fonte: Zegarra (2007).

Zegarra (2007), por sua vez, produziu um conteúdo científico analisando, dentre outros parâmetros, a vida de fadiga de revestimentos modificados por polímero. O autor define vida de fadiga como o número de repetições de uma carga, sob um dado estado de tensões, para que a camada atinja a ruptura. Esse processo

ocorre de forma gradual: a repetição do tráfego sobre o revestimento gera deformações elásticas e essa movimentação constante de deformação e recuperação produz tensões de tração nas camadas inferiores do revestimento. A cada ciclo, os efeitos se acumulam até a ruptura da camada de rolamento (Figura 36).

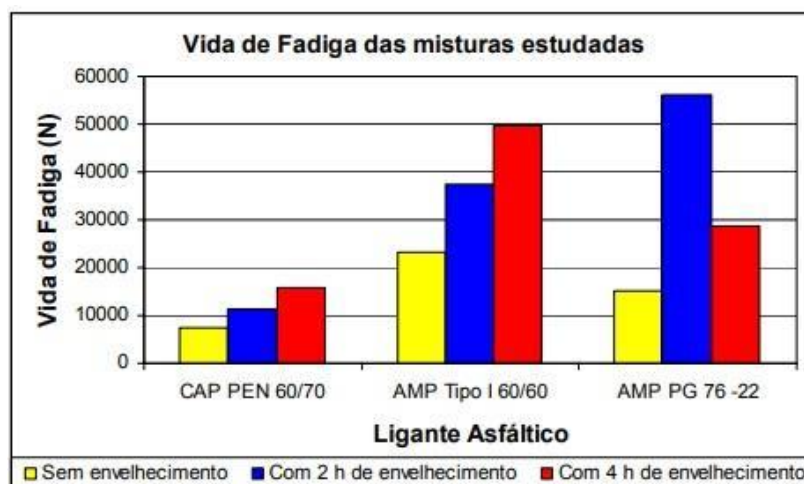
Figura 36 – Pavimento deteriorado em razão da repetição de deformações elásticas.



Fonte: Flek (2017).

O autor comparou as vidas de fadiga de asfaltos peruanos convencionais e modificados por polímeros SBS tipo I 60/60 e PG 76-22. As misturas com ligantes modificados apresentaram vidas de fadiga de 200 a 500% superiores às obtidas para o CAP PEN 60/70 (Gráfico 7). Os ensaios laboratoriais foram realizados para diferentes condições de envelhecimento das misturas, sendo que os resultados mais significativos, em termos percentuais, foram obtidos para um tempo de envelhecimento de duas horas a 135°C.

Gráfico 7 – Vida de Fadiga para cada ligante em diferentes idades.



Fonte: Zegarra (2007).

Outras conclusões que Zegarra (2007) apresenta são que: para os seus experimentos, os compósitos com ligantes modificados por SBS obtiveram valores de resistência à tração e módulos de resiliência superiores aos obtidos pela mistura convencional para todas as idades de envelhecimento (sem envelhecimento, duas horas e quatro horas) e nas duas temperaturas de ensaio (5°C e 25°C); os ligantes modificados apresentaram menores índices de susceptibilidade térmica e maiores resistências ao envelhecimento em comparação aos tradicionais.

Esses resultados são interessantes quando comparados à conclusão obtida na pesquisa de Oliveira (2003), em que o autor aponta que para revestimentos asfálticos porosos sem modificação dos ligantes obtiveram-se valores de módulo de resiliência significativamente inferiores aos apresentados por revestimentos convencionais. A adição de componentes poliméricos ou fibras apresenta-se como uma alternativa para alterar esse comportamento.

Ainda estudando os efeitos da utilização do polímero SBS em ligantes, Poulikakos e Partl (2012) compararam as misturas VD4 e VD7 (segundo a nomenclatura adotada pelos autores; ambas com adição de SBS) a uma mistura convencional. A diferença entre os compósitos modificados encontra-se essencialmente na granulometria dos agregados utilizados, na porcentagem de vazios e no teor de ligante (Tabela 4).

Tabela 4 – Características das misturas VD 4 e VD 7.

	Peneira (mm)	Mistura	
		VD 4	VD 7
Granulometria dos Agregados (Porcentagem Passante)	16	100	100
	11,2	95	97
	8	49	57
	5,6	20	29
	4	15	19
	2,8	13	16
	2	11	13
	1	7	9,8
	0,5	6	8,1
	0,09	4,8	5,6
Porcentagem de Vazios		22,8	22,2
Teor de Ligante (%)		4,8	4,63

Fonte: Adaptado de Poulikakos e Partl (2012).

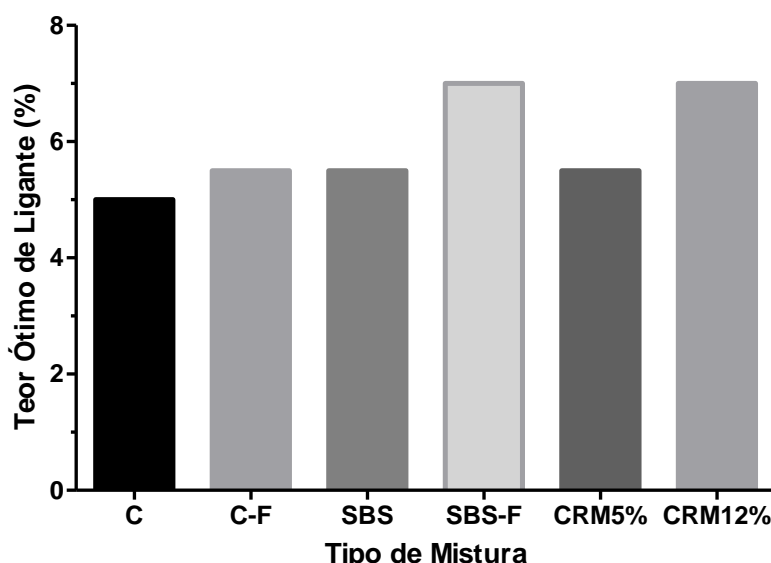
Os autores estudaram os materiais tanto em escala macro quanto micro e como conclusões expressaram que, nas misturas VD4 e VD7, em relação à convencional, os agregados se distribuíram de maneira mais uniforme na mistura e o ligante cobriu de maneira mais eficiente as áreas superficiais dos agregados. Observou-se ainda que, mesmo após micro-rupturas dos agregados, para a mistura tipo VD4, o ligante modificado continuava unindo-os.

Outra pesquisa envolvendo a modificação dos ligantes de concretos asfálticos porosos foi realizada nos Estados Unidos pelos autores Lyon e Putman (2013). Estudaram-se cinco tipos de misturas asfálticas permeáveis com ligantes modificados por aditivos e com adições e uma convencional, a saber:

- a) ligante do tipo PG 64-22 (C);
- b) ligante do tipo PG 64-22 com 3% de polímero SBS, vendido como PG 76-22 (SBS);
- c) ligante do tipo PG 64-22 com adição de 5% de pó de borracha (CRM5%);
- d) ligante do tipo PG 64-22 com adição de 12% de pó de borracha (CRM12%);
- e) ligante do tipo PG 64-22 com adição de fibras de celulose e polímero SBS (SBS-F);
- f) ligante do tipo PG 64-22 com adição de 0,3% de fibras de celulose (C-F).

Lyon e Putman (2013) apresentam os teores ótimos de ligante utilizados para cada mistura no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Teores Ótimos de Ligantes.

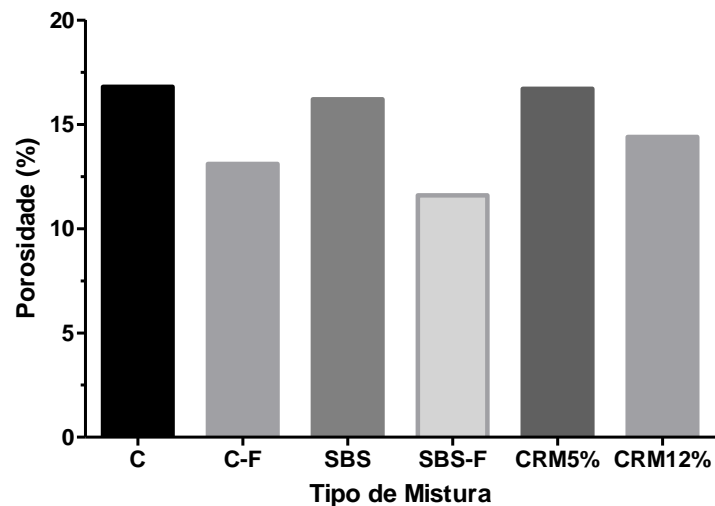


Fonte: Adaptado de Lyon e Putman (2013).

O pó de borracha foi obtido através do processamento de tiras de pneus de automóveis. De acordo com os autores, a norma ASTM D5603 (2008) classifica o material utilizado como Classe 30-1; 30 porque apresentou percentual retido acumulado na peneira de malha 30 (6 mm) inferior a 10% e 1 por ser oriunda de pneus de carro, ônibus ou caminhões com fibras e materiais metálicos removidos antes do processo de beneficiamento.

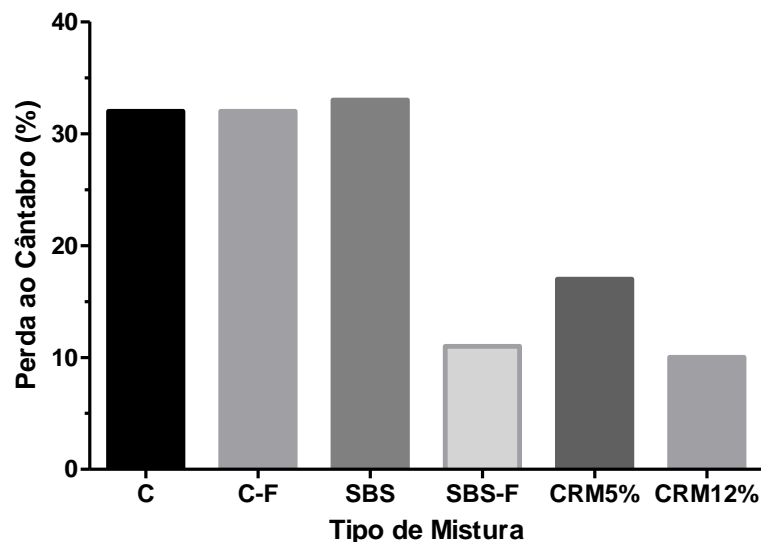
Os resultados relacionados às propriedades de porosidade e perda no ensaio de Cântabro encontram-se ilustradas nos Gráficos 9 e 10.

Gráfico 9 – Porosidades obtidas para as misturas estudadas.



Fonte: Adaptado de Lyon e Putman (2013).

Gráfico 10 – Perda no Cântabro após 7 dias de envelhecimento.



Fonte: Adaptado de Lyon e Putman (2013).

Observa-se a partir do Gráfico 9 que todas as misturas com adição de fibras apresentaram um percentual de vazios eficazes inferiores ao do compósito convencional; o CRM5% e o SBS foram os dois materiais que mais se aproximaram do comportamento do concreto do tipo C.

As misturas com pó de borracha (CRM) e com polímero SBS combinado a fibras de celulose apresentaram desgaste ao Cântabro menor do que o concreto asfáltico permeável convencional. Segundo Lyon e Putman (2013), para o material envelhecido a 60°C durante sete dias, o valor máximo limite de perda ao Cântabro deveria ser de 30%; observa-se que os compósitos SBS-F, CRM5% e CRM12% apresentaram valores inferiores a esse limite.

Como conclusões, os autores apontam o aspecto positivo da utilização de ligantes modificados e com adição de fibras. Os teores empregados, todavia, devem ser cuidadosamente avaliados a fim de garantir parâmetros mecânicos satisfatórios e, ao mesmo tempo, o máximo de permeabilidade possível, visto que a principal finalidade desse pavimento é auxiliar no sistema de drenagem das vias. Atenta-se, ainda, que a granulometria dos agregados influencia diretamente nas propriedades avaliadas.

Homem (2002) realizou um estudo abordando as características apresentadas por compósitos produzidos com ligantes modificados tanto por polímeros quanto pela adição de fibras de vidro. O autor justifica a escolha do polímero SBS pela conclusão do estudo de Verhaeghe (1993) de que ele apresenta um desempenho superior em relação aos demais polímeros. Variaram-se tanto os teores de fibras (de 0 a 1%) quanto as proporções de agregados e de ligante modificado em 4% de SBS.

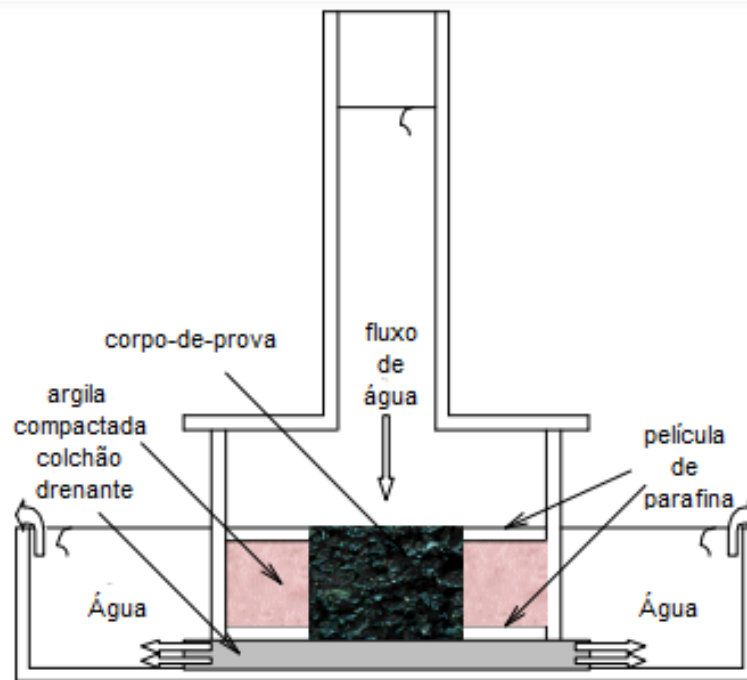
Em termos de resistência ao desgaste no ensaio do Cântabro, observou-se que a utilização de teores de asfalto superiores a 4,1% foi o que permitiu a obtenção de valores de resistência à abrasão considerados suficientes pelo autor.

No tocante ao módulo de resiliência, ensaios a 25°C não mostraram nenhuma tendência em relação ao teor de fibras. Já os ensaios realizados a 45°C indicaram que o módulo aumentou conforme o teor de fibras foi sendo incrementado, indicando uma contribuição positiva das fibras conforme o aumento da temperatura.

Por fim, utilizando o permeâmetro de carga variável (Figura 37), Homem (2002) obteve coeficientes de permeabilidade que possibilitaram o autor afirmar que tanto o aumento no teor de fibras quanto no de ligante atuaram no sentido de reduzir

a permeabilidade da mistura. Apesar disso, todos os teores ensaiados estiveram dentro do padrão de condutividade hidráulica mínima estabelecida de 25 m/dia.

Figura 37 – Permeâmetro de carga variável utilizado por Homem (2002).



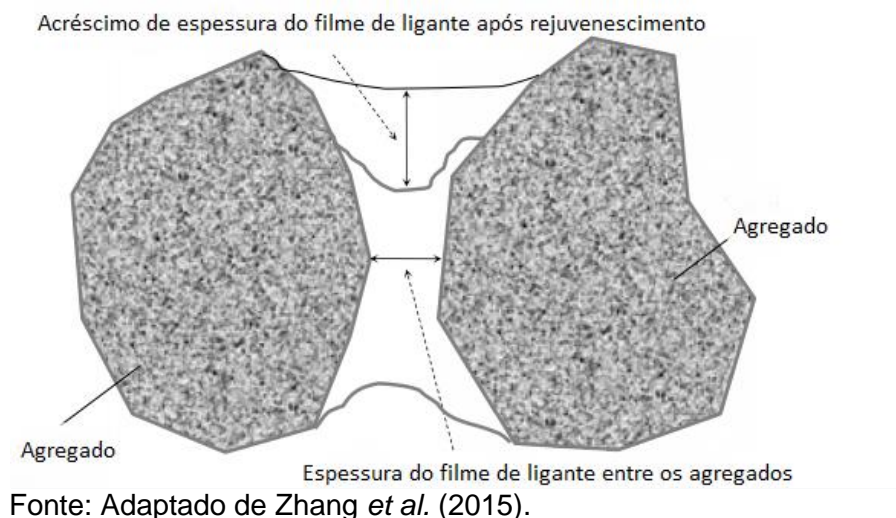
Fonte: Adaptado de Homem (2002).

Zhang *et al.* (2015) realizaram uma outra abordagem sobre o concreto asfáltico permeável com ligantes modificados. Os autores observaram os efeitos da aplicação de materiais de rejuvenescimento em um trecho de 2 km de uma rodovia holandesa após cinco anos de operação da mesma.

Aplicaram-se sobre a superfície do revestimento um ligante asfáltico (chamado pelos autores de BB) e as emulsões asfálticas BE-1 e BE-2. Seções finas de concreto asfáltico permeável foram, então, preparadas para inspeção microscópica óptica.

Os autores observaram na superfície de referência a existência de microfissuras na estrutura do revestimento, as quais foram devidamente preenchidas ao se utilizar os materiais BB e BE-2; observou-se, ainda, o aumento da espessura da película de ligante ao redor dos agregados (Figura 38). O quesito que apresentou destaque na pesquisa foi a melhoria nos parâmetros de flexibilidade ao se utilizar as emulsões asfálticas BE-1 e BE-2.

Figura 38 – Aumento da espessura do filme de ligante entre os agregados.



Em uma pesquisa posterior, Zhang *et al.* (2016) exemplificam detalhadamente um tipo de material para rejuvenescimento como uma emulsão asfáltica catiônica de rápida fixação, com conteúdo de ligante na faixa de 53% a 57% em massa.

Os estudos com a participação de Zhang explicitam que é possível, com a emulsão e o procedimento de aplicação corretos, restaurar a estrutura microscópica de um revestimento asfáltico permeável. Esse procedimento, aliado à utilização de ligantes modificados na composição do concreto podem permitir a utilização da via por um período de tempo maior que o possibilitado pelo concreto asfáltico permeável convencional. Todavia, os testes de resistência à tração indireta não indicam alteração após o rejuvenescimento, devendo-se medir os efeitos advindos do procedimento por outros meios. Ainda cabe ressaltar que nada se afirmou sobre os efeitos da aplicação dos materiais asfálticos no que diz respeito à permeabilidade.

Sañudo-Fontaneda *et al.* (2014), por sua vez, avaliaram exclusivamente o comportamento de infiltração da água em pavimentos com revestimento asfáltico permeável em comparação a um concreto permeável de cimento Portland. Ambos os revestimentos possuíam polímeros em sua composição; todavia, não foi especificado nem o tipo e nem o percentual utilizados.

O material utilizado foi o PA-16 (“Porous Asphalt” com agregados com diâmetro máximo de 16 mm). O revestimento asfáltico permeável possuía uma espessura de 10 cm, massa específica aparente de 2050 kg/m³ e um teor de 23,45% de vazios. O revestimento de concreto permeável (PMPC), por vez, teve a mesma

espessura de 10 cm, um índice de vazios próximo ao do PA-16 (25%) e uma massa específica aparente de 1778 kg/m³.

Em comparação com o concreto permeável de cimento Portland, os autores, utilizando do ensaio de simulação de chuva com o infiltrômetro CF da Universidade de Cantábria (Figura 39), observaram que, logo após a confecção das placas, o PMPC apresentou coeficiente de permeabilidade de 0,020 m/s, 40% superior aos 0,012 m/s obtidos com o PA-16.

Figura 39 – Infiltrômetro da Universidade de Cantábria.



Fonte: Adaptado de Sañudo-Fontaneda *et al.* (2014).

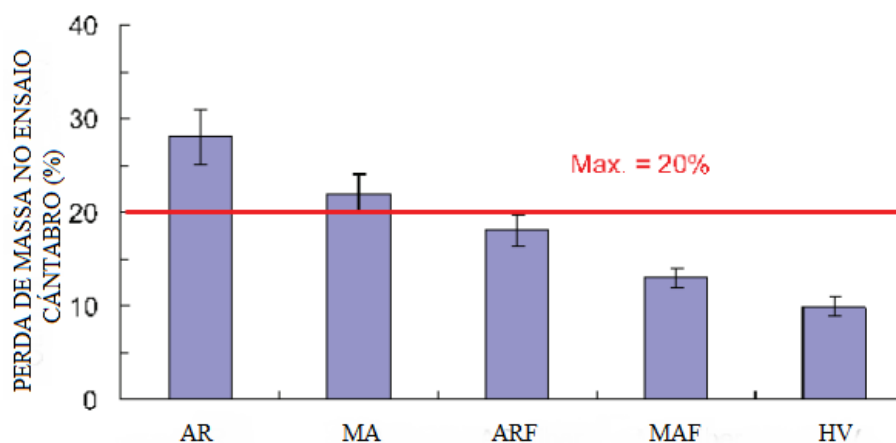
Objetivando simular uma condição de colmatação das superfícies, Sañudo-Fontaneda *et al.* (2014) aplicaram cal (86%) e matéria orgânica fina (14%) sobre as superfícies, ocasionando o preenchimento parcial dos vazios dos compósitos.

Após a colmatação, pôde-se afirmar que o PMPC sofreu menor influência no quesito de permeabilidade que o PA-16. Isso porque o novo coeficiente de permeabilidade do PMPC foi cerca de 2,4 vezes superior ao do PA-16. Ou seja, os autores concluíram que, para o processo de colmatação simulado na pesquisa, o compósito de concreto asfáltico permeável sofreu uma redução de 64,16% na capacidade de infiltração, ao passo que o PMPC respondeu por uma perda de 33,05%, indicando a maior sensibilidade do PA-16 ao processo de deposição de finos nos vazios comunicantes ao longo do tempo.

Chen *et al.* (2012) realizaram um estudo comparativo entre um concreto asfáltico permeável convencional (AR), um modificado por polímeros SBS (MA), um com ligante altamente viscoso (HV), um com adição de fibras (ARF) e um modificado por polímeros SBS e com adição de fibras (MAF). A adição de fibra de celulose, na revisão da literatura, mais uma vez é indicada na porcentagem de 0,3% da massa total da mistura.

Com os resultados dos ensaios laboratoriais e de campo, observou-se que o HV, o ARF e o MAF apresentaram as menores perdas no ensaio de cântabro. O MA teve perdas até 6% inferiores às do AR e o MAF apresentou perdas correspondentes à metade das obtidas para o concreto AR (Gráfico 11), de maneira a ilustrar a influência das fibras nesse parâmetro, de forma a aumentar a durabilidade do material. É interessante ressaltar que, para esse estudo, apenas a utilização de asfalto modificado por polímeros não foi capaz de resultar em perdas inferiores a 20% (o limite máximo preconizado pelos autores), enquanto a utilização somente de fibras atendeu ao requisito.

Gráfico 11 – Perda ao cântabro para diferentes misturas asfálticas.

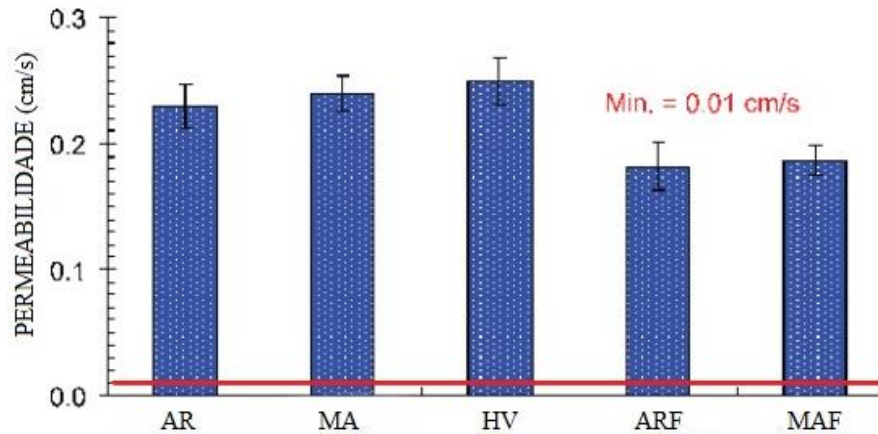


Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2012).

Os testes no trecho experimental de 3 km demonstraram que o MA apresentou maiores coeficientes de permeabilidade (k) em relação ao AR; o MAF e o ARF, porém, apresentaram valores menores, de forma a indicar que a adição de fibras esteve ligada a perdas nas propriedades hidráulicas (Gráfico 12). Todas as misturas apresentaram valores de k superiores ao mínimo adotado pelos autores de 0,01 cm/s.

A eficiência de drenagem do asfalto modificado foi assegurada por um período de até dois anos e meio de serviço (CHEN *et al.*, 2012).

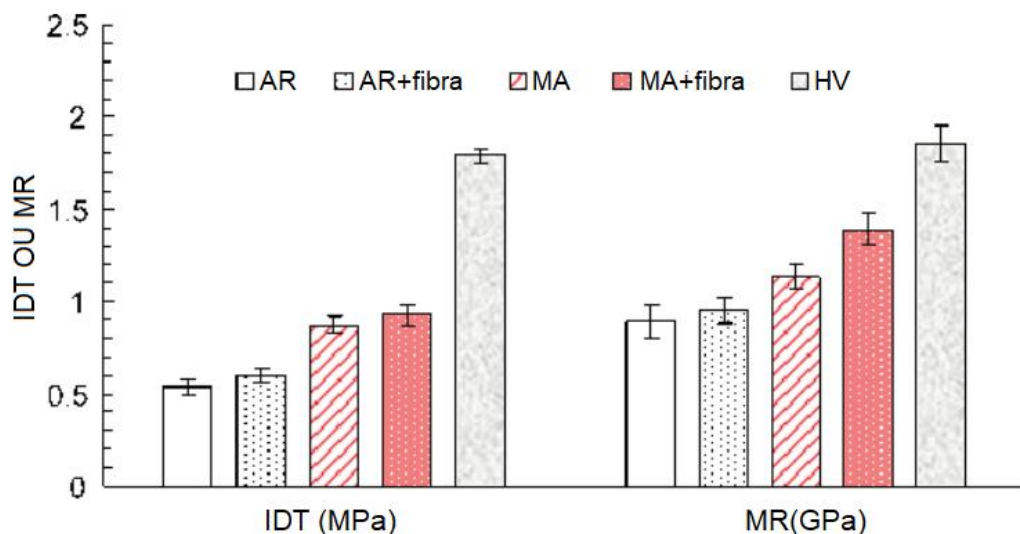
Gráfico 12 – Permeabilidade para diferentes tipos de misturas asfálticas.



Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2012).

Os autores analisaram também a resistência à tração por compressão diametral (IDT) e o módulo de resiliência (MR) de cada material. A mistura com fibras e polímeros apresentou valores superiores aos obtidos para a convencional (AR). Observou-se que a adição de fibras conduziu a resultados de fato distintos apenas quando o MA e o MAF são comparados no tocante ao módulo de resiliência. Nas outras situações, a adição de fibras responde por acréscimos sutis nos dois parâmetros (Gráfico 13).

Gráfico 13 – IDT e MR para diferentes tipos de misturas asfálticas.



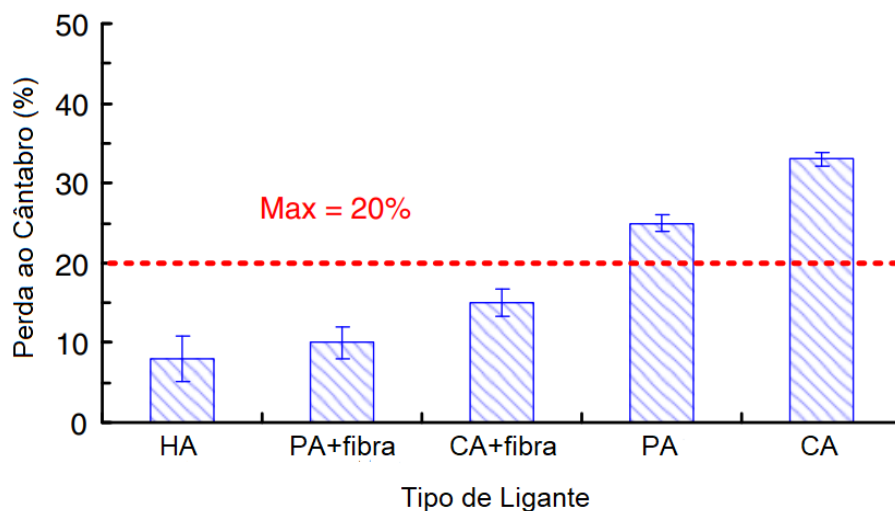
Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2012).

Chen *et al.* (2016) buscaram avaliar a performance do concreto asfáltico permeável modificado por polímeros e com adição de fibras (PA + fibra), em comparação com outros quatro materiais: CPA convencional (CA), CPA modificado por polímeros (PA), CPA com adição de fibras (CA + fibra) e CPA com ligante de alta viscosidade (HA).

O compósito do tipo PA + fibra utilizou um teor ótimo de ligante de 5%, 0,3% de fibras de celulose, 12% dos agregados passantes na peneira de malha 2,36 mm, agregados com dimensão máxima de 19 mm e 20% de vazios na mistura.

Os resultados dos testes indicam que a adição de fibras permitiu a obtenção de valores de perda ao cântabro inferiores ao limite fixado pelos autores de 20%. Ao se utilizar um ligante modificado (PA), a perda percentual é reduzida em relação à mistura convencional CA, mas não a ponto de atender o limite estabelecido (Gráfico 14).

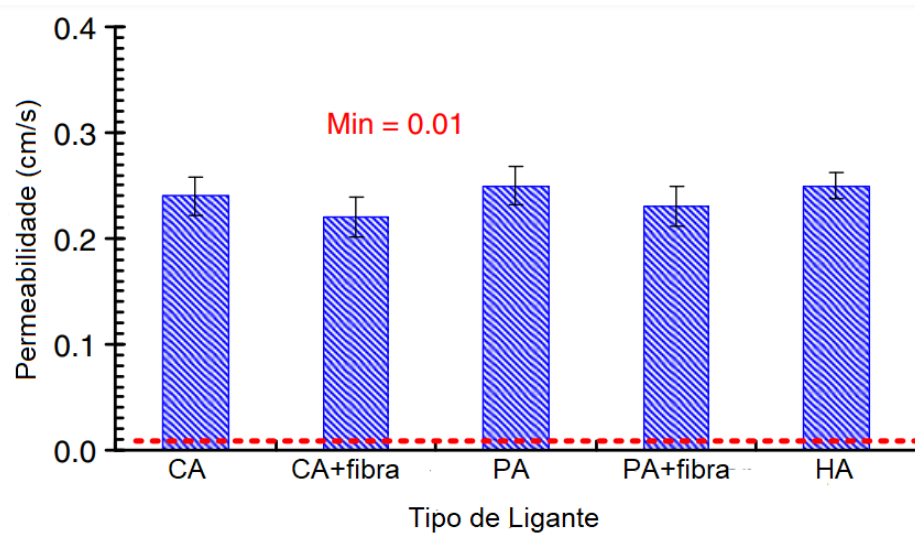
Gráfico 14 – Perda ao cântabro para diferentes tipos de misturas asfálticas.



Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2016).

Quanto à permeabilidade, os valores obtidos através da utilização de um permeâmetro de carga variável, demonstraram um comportamento similar para os CPAs dos tipos CA, PA e HA. Ao comparar CA com CA + fibra e PA com PA + fibra, observam-se reduções nos coeficientes de permeabilidade, de modo a concluir que nesse trabalho a adição de 0,30% de fibras de celulose na mistura está ligada à diminuição da permeabilidade do material (Gráfico 15).

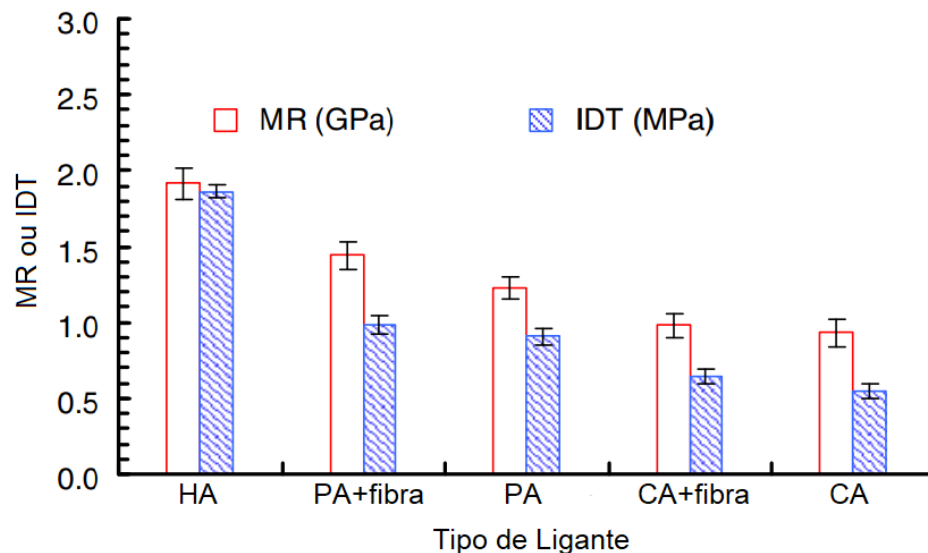
Gráfico 15 – Permeabilidade para diferentes tipos de misturas asfálticas.



Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2016).

Quanto à resistência de tração indireta (IDT), a utilização de polímeros demonstrou-se um artifício capaz de elevar a resistência do CPA. A utilização de fibras, por sua vez, promoveu um incremento graficamente visível no módulo de resiliência (MR) para a mistura PA, já modificada por polímeros (Gráfico 16).

Gráfico 16 – IDT e MR para diferentes tipos de misturas asfálticas.

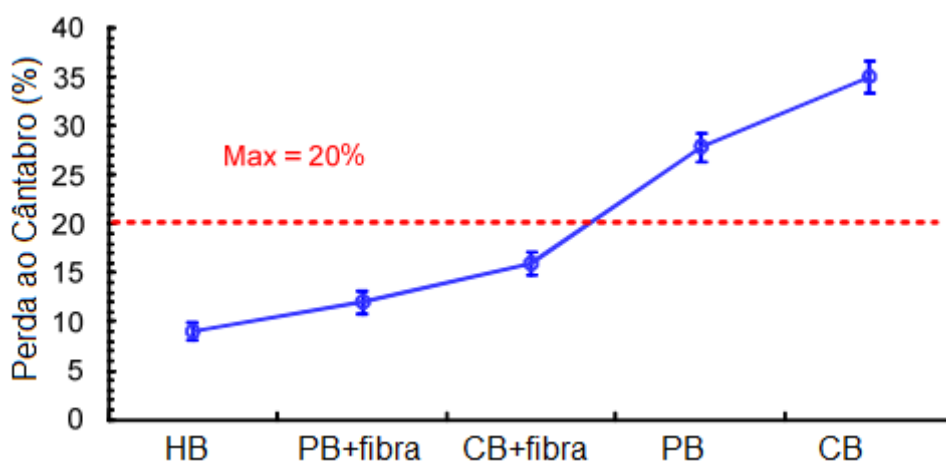


Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2016).

Em outro estudo de Chen no ano de 2016, o autor e outros pesquisadores avaliaram o desgaste ao cântabro para cinco concretos asfálticos permeáveis distintos: CB (com ligante convencional), PB (com ligante modificado por polímeros),

CB + fibra (convencional com adição de 0,30% de fibras de celulose), PB + fibra (com ligante modificado por polímeros e com adição de 0,30% de fibras de celulose) e HB (com ligante de elevada viscosidade). O comportamento exibido no Gráfico 17 com os valores de Chen *et al.* (2016) é semelhante ao observado no Gráfico 11, de Chen *et al.* (2012).

Gráfico 17 – Perda ao cântabro para diferentes tipos de misturas asfálticas.



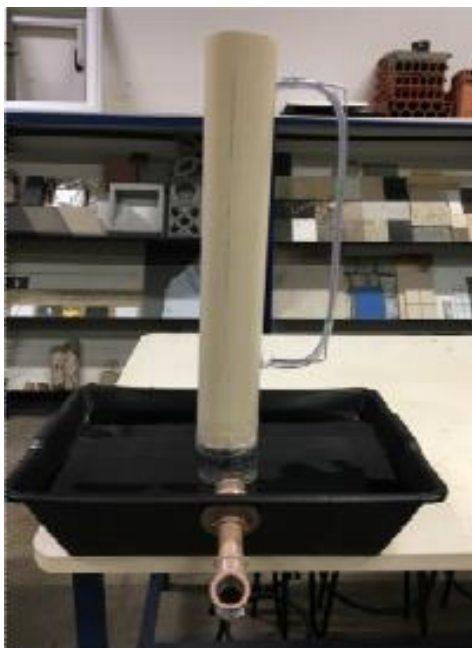
Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2016).

Nas conclusões do artigo, os autores evidenciam que a utilização de polímeros foi responsável por perdas por abrasão no ensaio Cântabro inferiores às observadas em concretos com ligantes convencionais; a adição de fibras, por sua vez, impactou diretamente na diminuição da perda de ligante entre os agregados e culminou em perdas menores frente ao ensaio.

Schneider (2016) estudou a utilização de diferentes teores de ligante asfáltico modificado por polímero SBS (chamado de AMP 55/75) em uma mistura a fim de determinar, de acordo com as diretrizes da NBR 386/99, qual compósito atenderia os pré-requisitos necessários para ser considerado uma camada porosa de atrito.

O permeâmetro utilizado pelo autor para medir o coeficiente de permeabilidade foi do tipo carga variável e o corpo-de-prova foi posicionado dentro de um tubo e submerso em água, vide Figura 40. Os resultados hidráulicos e mecânicos obtidos para um teor de ligante de 4% encontram-se na Tabela 5.

Figura 40 – Permeâmetro utilizado por Schneider (2016).



Fonte: Schneider (2016).

Tabela 5 – Resultados do estudo de Schneider (2016).

Resultados Obtidos por SCHNEIDER (2016)	
Vazios	18,98%
Coefficiente de Permeabilidade	0,14 cm/s
Resistência à tração por Compressão Diametral	0,91 MPa
Módulo de Resiliência	3985 MPa
Perda ao Cântabro	19,15%

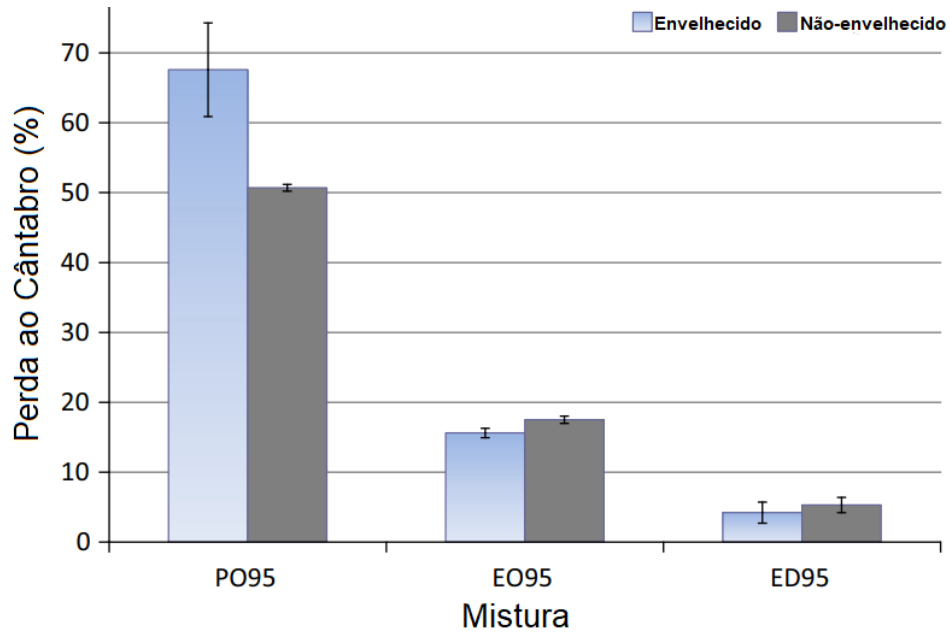
Fonte: Adaptado de Schneider (2016).

Luo *et al.* (2015) estudaram três concretos asfálticos permeáveis: com agregados de granulometria aberta modificado por polímeros epóxi (EO95); com a mesma distribuição granulométrica e com ligante convencional (PO95); com granulometria densa e epóxi no ligante (ED95).

Os teores de ligante asfáltico empregados para produzir as misturas foram de 5,9% e 6,5% para as com granulometria aberta e com granulometria densa, respectivamente. O diâmetro máximo dos agregados foi de 12,5 mm e o percentual de vazios totais de 22%.

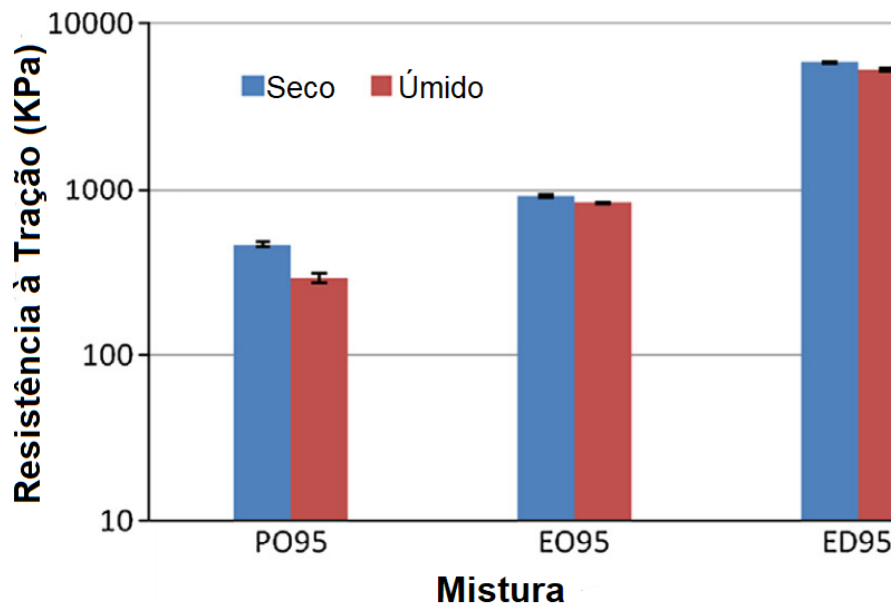
Os Gráficos 18 e 19 exibem os resultados obtidos nos ensaios de perda ao cântabro e de resistência à tração por compressão diametral.

Gráfico 18 – Perda ao cântabro.



Fonte: Adaptado de Luo *et al.* (2015).

Gráfico 19 – Resistência à tração por compressão diametral.



Fonte: Adaptado de Luo *et al.* (2015).

Quanto ao parâmetro de durabilidade, expresso através dos resultados do ensaio de perda ao cântabro, os autores explicitam que as misturas com ligantes modificados por polímeros tiveram um índice de perda de massa menor que aquela com ligante convencional. O concreto com agregados de distribuição granulométrica uniforme (ED95) foi o que demonstrou melhor comportamento frente ao desgaste, com valores de perda ao cântabro inferiores a 10%.

Outra interpretação dos resultados feita pelos autores é de que a perda diminui conforme o envelhecimento para os materiais que têm resina epóxi em sua composição, provavelmente devido à continuação da cura do epóxi nas misturas em temperaturas elevadas, o que leva a um nível de ligação maior entre os agregados.

Quanto à resistência à tração por compressão diametral ou tração indireta (termo encontrado na literatura internacional), a incorporação do epóxi nos ligantes foi responsável pela obtenção de resistências maiores que a do concreto asfáltico poroso com ligante convencional. A utilização de agregados com granulometria densa responde por uma elevação no módulo dos valores de resistência à tração.

Dessa maneira, compreende-se que, para os parâmetros mecânicos avaliados, a mistura com granulometria densa e ligante modificado por polímeros apresenta melhores resultados ao analisar a utilização em campo. Todavia, esse estudo não realiza a abordagem dos parâmetros hidráulicos.

Em contrapartida, Garcia *et al.* (2019) buscaram analisar somente os parâmetros de permeabilidade para uma CPA com ligante modificado com 6% de polímero do tipo SBS. Os autores realizaram a compactação do material em placas de 50 cm por 18 cm de largura e 5 cm de espessura com o auxílio de uma mesa compactadora.

O concreto asfáltico demonstrou um volume de vazios de 23,28%, sendo que os vazios comunicantes responderam por um percentual de 75,86% do total de vazios. Com a utilização de um permeâmetro de carga variável e seguindo-se as diretrizes da norma espanhola NLT-327/00, chegou-se em um valor de coeficiente de permeabilidade de 0,65 cm/s; valor superior aos 0,12 cm/s sugeridos pelo National Center of Asphalt Technology (NCAT) em 2006.

6 MATERIAIS E METODOLOGIA

Neste tópico são apresentados os materiais utilizados na composição da mistura asfáltica, bem como as características de cada um deles. São abordados ainda os tópicos das metodologias, a fim de explicitar os procedimentos envolvidos na obtenção dos resultados laboratoriais.

6.1 AGREGADOS

Os materiais utilizados neste estudo foram pó de pedra e brita 0, oriundos do processo de britagem de uma pedreira na cidade de Matias Barbosa, Minas Gerais, e são comercializados pela empresa Petra Agregados. Como os agregados desse sítio apresentaram desempenho satisfatório em outros estudos, puderam ser utilizados, apesar de apresentarem valor de abrasão Los Angeles ligeiramente superior a 30%. As Tabelas 6 e 7 apresentam as características do pó de pedra e da brita 0, respectivamente, em relação aos valores de massa específica real, massa específica aparente e absorção de água.

Tabela 6 – Caracterização do pó de pedra.

Agregado: Pó de pedra	
Massa específica aparente (DNIT 411/2021 - ME)	2,647 g/cm ³
Massa específica real (DNIT 411/2021 - ME)	2,698 g/cm ³

Fonte: Autor (2021).

Tabela 7 – Caracterização da brita 0.

Agregado: Brita 0	
Massa específica aparente (DNIT 413/2021 - ME)	2,656 g/cm ³
Massa específica real (DNIT 413/2021 - ME)	2,739 g/cm ³
Absorção de água (DNIT 413/2021 - ME)	1,152 %

Fonte: Autor (2021).

As distribuições granulométricas, obtidas por meio das prescrições normativas da DNER-ME 083/98, encontram-se nas Tabelas 8 e 9 e nos Gráficos 20 e 21.

Tabela 8 – Análise granulométrica do pó de pedra.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA PÓ DE PEDRA (DNER-ME 083/98)	
Peneiras (mm)	% Passante
12,5	100,0
9,5	100,0
4,8	99,6
2,0	77,0
0,42	39,5
0,075	14,5
Fundo	0,0

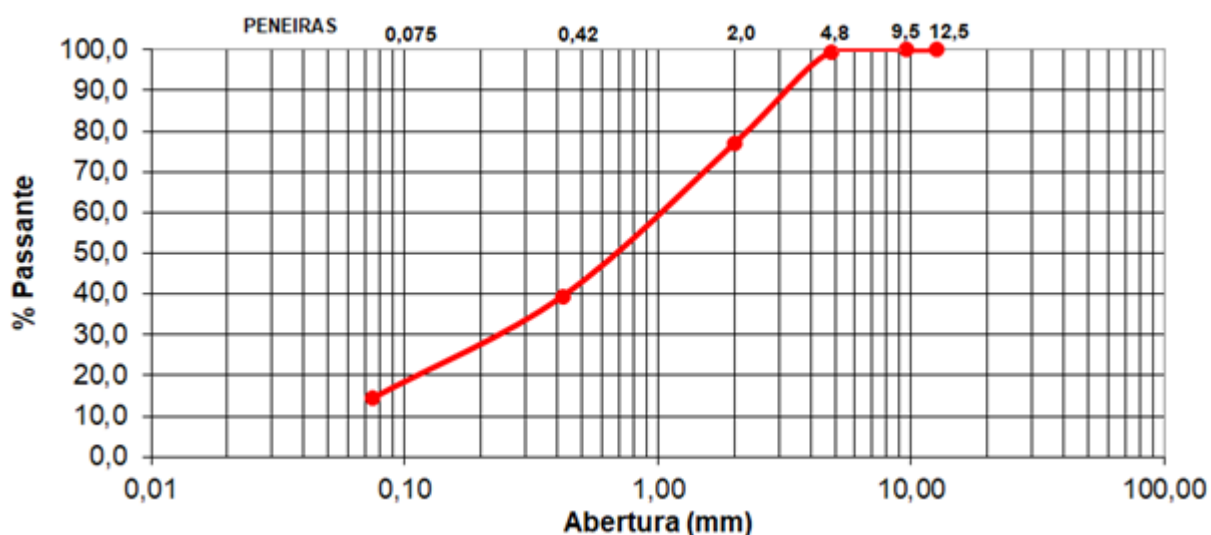
Fonte: Autor (2021).

Tabela 9 – Análise granulométrica da brita 0.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA BRITA 0 (DNER-ME 083/98)	
Peneiras (mm)	% Passante
12,5	100,0
9,5	99,1
4,8	23,9
2,0	1,7
0,42	1,1
0,075	0,1
Fundo	0,0

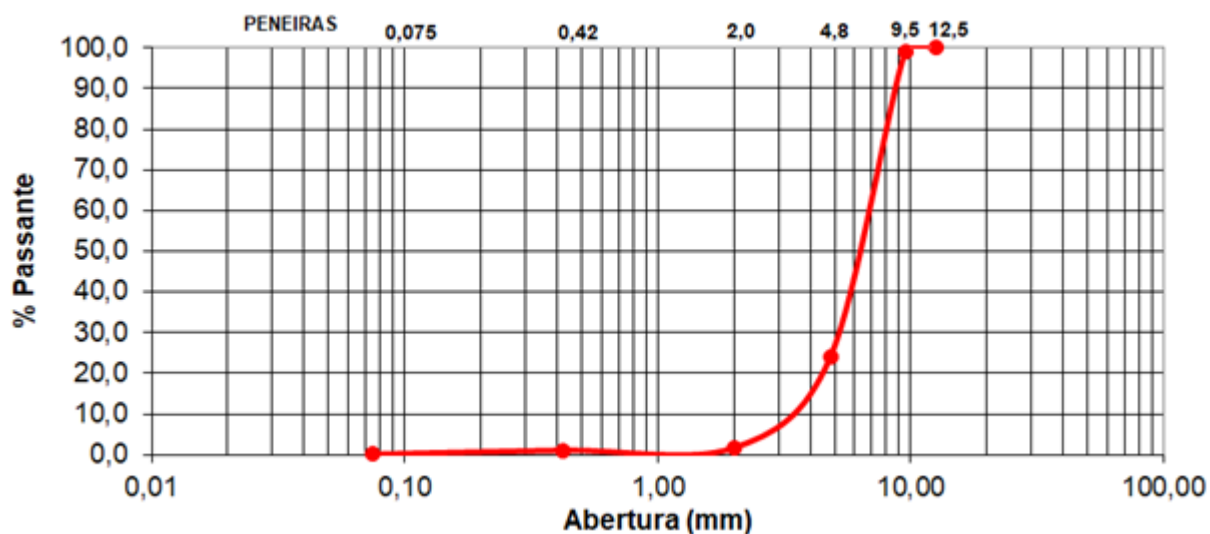
Fonte: Autor (2021).

Gráfico 20– Curva granulométrica do pó de pedra.



Fonte: Autor (2021).

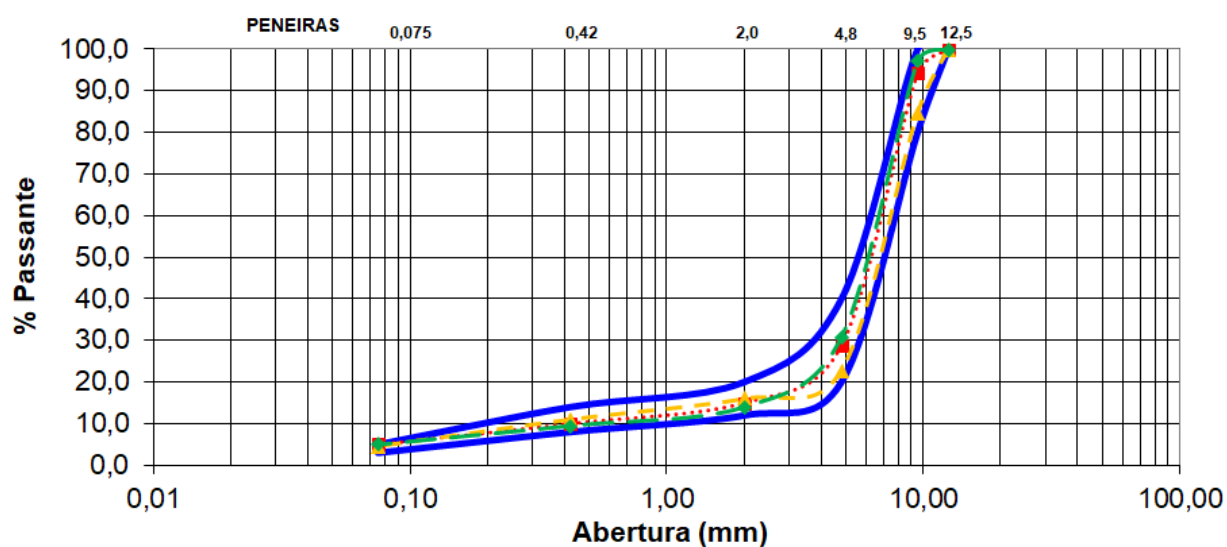
Gráfico 21 – Curva granulométrica da brita 0.



Fonte: Autor (2021).

A faixa granulométrica número I da DNER-ES 386 (1999), vide Gráfico 22, compreende as granulometrias utilizadas nos estudos dos autores Wei e Jing-jing (2012), Jiang *et al.* (2015) e Huang *et al.* (2020) de maneira mais precisa em relação às demais faixas granulométricas da norma; dessa forma, a faixa I foi a utilizada no presente trabalho com a finalidade de comparar os resultados obtidos com valores apresentados em estudos que utilizaram distribuições granulométricas semelhantes.

Gráfico 22 – Limites da Faixa I e distribuição granulométrica adotada por autores.



— Limites da Faixa I ···· Wei e Jing-Jing —▲— Huang et al. —◆— Jiang et al.

Fonte: Wei e Jing-jing (2012), Jiang *et al.* (2015), Huang *et al.* (2020) e DNER-ES 386 (1999).

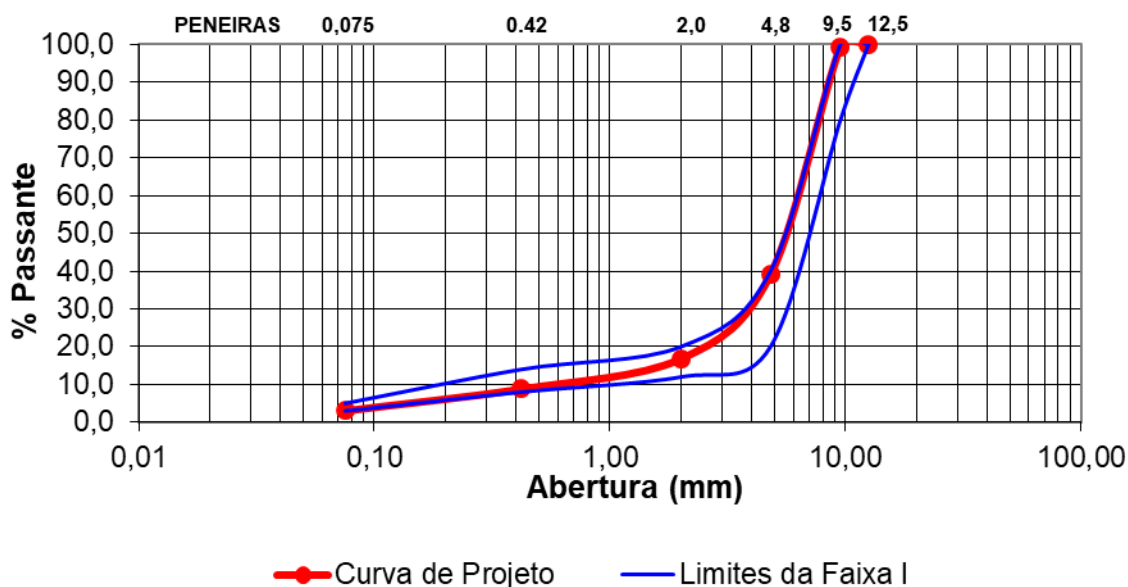
Com o auxílio de planilhas em Excel, utilizou-se o Método das Tentativas para determinar as porcentagens de pó de pedra e brita 0, de forma a enquadrar a mistura de agregados na faixa I da norma DNER-ES 386 (1999). O método consiste em realizar iterações de forma a obter a curva granulométrica mais adequada; o resultado apontou a utilização de percentuais de 20% de pó de pedra e de 80% de brita 0. A Tabela 10 e o Gráfico 23 apresentam a distribuição granulométrica e a curva granulométrica da mistura de agregados, respectivamente.

Tabela 10 – Granulometria utilizada no estudo.

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA	
Peneiras (mm)	% Passante
12,5	100,0
9,5	99,3
4,8	39,1
2,0	16,8
0,42	8,6
0,075	2,8
Fundo	0,0

Fonte: Autor (2021).

Gráfico 23 – Curva granulométrica da mistura de agregados utilizada.



Fonte: Autor (2021).

Na Figura 41, é possível observar a mistura de pó de pedra e brita 0 após ser seca em estufa a uma temperatura constante de 110°C. A Figura 42, por sua vez,

ilustra os agregados devidamente separados conforme retido em cada peneira, após aplicação da metodologia prescrita na norma DNER-ME 083/98.

Figura 41 – Agregados.



Fonte: Autor (2021).

Figura 42 – Agregados separados em faixas granulométricas distintas.



Fonte: Autor (2021).

6.2 LIGANTE ASFÁLTICO

Neste trabalho, utilizou-se o ligante asfáltico CAPFLEX 60/85 E, modificado por polímeros. As características do ligante são fornecidas pelo fabricante e encontram-se discriminadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Características do ligante asfáltico.

CARACTERÍSTICAS CAPFLEX 60/85 E				
ENSAIO	NORMA	UNIDADE	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO
Ponto de amolecimento	NBR 6560	°C	60 mín.	83,3
Penetração (100g, 25°C, 5s)	NBR 6576	0,1 mm	40 – 70	49
Ponto de fulgor	NBR 11341	°C	235 mín.	>235
Recuperação elástica, 25°C, 20 cm	NBR 15086	%	85 mín.	92,0
Densidade relativa	ASTM D70	NA	-	1,015
Viscosidade Brookfield, SP21, 135°C	NBR 15184	Cp	3000 máx.	1192
Viscosidade Brookfield, SP21, 150°C			2000 máx.	740
Viscosidade Brookfield, SP21, 177°C			1000 máx.	311

Fonte: Stratura Asfaltos (2021).

O material utilizado como ligante, na temperatura ambiente, possui o aspecto apresentado na Figura 43. Após ser aquecido até a temperatura de mistura, passa a apresentar outro comportamento, devido à redução da viscosidade, vide Figura 44.

Figura 43 – Ligante em temperatura ambiente.



Fonte: Autor (2021).

Figura 44 – Ligante aquecido até a temperatura de mistura.



Fonte: Autor (2021).

6.3 FIBRAS DE CELULOSE

De acordo com Lana Magalhães (2021), a celulose é um carboidrato comum na natureza e responde por cerca de 50% da composição do vegetal. Consiste em um polímero de monômeros de glicose com ligações de hidrogênio entre si e arranjo molecular na forma de feixes de fibras.

Neste trabalho utilizaram-se fibras de celulose da fabricante VIATOP. Com comprimento aproximado de 45 μm e espessura de 7,5 μm (segundo fabricante), o aspecto das mesmas pode ser observado na Figura 45.

Os teores empregados foram de 0%, 0,25%, 0,50% e 0,75% em relação ao peso da mistura de ligante com agregados, visto que na literatura os valores não ultrapassam a ordem de 1%, sendo a porcentagem de 0,30% a mais observada durante a etapa de revisão bibliográfica.

Figura 45 – Fibras de celulose.



Fonte: Autor (2021).

6.4 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE PROJETO DO LIGANTE

A característica analisada para definição do teor de ligante é a referente à porcentagem de vazios. Para isso, foi aplicado o procedimento Marshall para a dosagem desta mistura asfáltica, com enfoque no teor de vazios correspondente a cada teor de ligante testado.

Foram confeccionados 12 corpos-de-prova (CPs) com 1150 gramas de agregados cada nesta etapa, sendo três CPs para cada um dos teores apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Massa de ligante para cada teor.

Quantitativo de Ligante em Relação ao Total	
Teor de Ligante (%)	Massa de Ligante (g)
3,5	41,9
4,0	47,9
4,5	54,2
5,0	60,5

Fonte: Autor (2021).

Para a obtenção do teor de vazios é necessário conhecer os valores de massa específica real e de massa específica aparente da mistura asfáltica.

A massa específica real foi obtida de acordo com as prescrições da NBR 15619 (2012), norma que guia as diretrizes para o cálculo da densidade máxima

medida. O procedimento consiste em pesar a mistura asfáltica segregada (Figura 46), executar a imersão da amostra em um recipiente a ser completado com água, aplicar uma pressão de vácuo de 97,3 kPa por um período aproximado de 15 minutos (Figura 47) e, por fim, pesar o conjunto (Figura 48).

Figura 46 – Concreto asfáltico espalhado sobre bandeja metálica.



Fonte: Autor (2021).

Figura 47 – Aplicação de pressão de vácuo.



Fonte: Autor (2021).

Figura 48 – Pesagem do recipiente com concreto asfáltico e água.



Fonte: Autor (2021).

Para a obtenção da densidade máxima medida foi empregada a Equação 2.

$$G_{MM} = 0,9971 \cdot \frac{A}{A+B-C} \quad (2)$$

Em que:

G_{MM} é a densidade máxima medida, em g/cm^3 ;

A é a massa da amostra seca ao ar, em g;

B é a massa do recipiente de vidro completo de água, em g;

C é massa do recipiente com a amostra submersa em água, em g.

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos para os corpos-de-prova de quatro teores distintos de ligante asfáltico.

Tabela 13 – Valores de G_{MM} .

Teor de Ligante (%)	G_{MM} (g/cm ³)
3,5	2,569
4,0	2,551
4,5	2,533
5,0	2,515

Fonte: Autor (2021).

Para a obtenção da densidade aparente de cada corpo-de-prova, seguiram-se as prescrições do item 6.3 da NBR 15573 (2012). Essa seção regulamenta o cálculo da massa específica aparente para misturas asfálticas com percentual de vazios superior a 7%.

Foram feitas quatro medidas de diâmetro e quatro da altura do CP, obtendo-se a média aritmética para cada grandeza. A partir desses valores, calculou-se o volume do corpo-de-prova (Equação 3). Por meio da Equação 4, foi determinada a massa específica aparente.

$$V = H \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad (3)$$

Em que:

V é o volume do corpo-de-prova, em cm³;

H é a média aritmética de quatro medições da altura do corpo-de-prova, em cm;

d é a média aritmética de quatro medições do diâmetro do corpo-de-prova, em cm.

$$M_{ea} = \frac{A}{V} \quad (4)$$

Em que:

M_{ea} é a massa específica aparente do corpo-de-prova, expressa em g/cm³;

A é massa do corpo-de-prova seco ao ar, em g;

V é o volume do corpo-de-prova, em cm³.

Os valores de M_{ea} obtidos para cada teor de ligante empregado encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores de M_{ea} .

Teor de Ligante (%)	M_{ea} (g/cm ³)
3,5	2,052
4,0	2,098
4,5	2,088
5,0	2,114

Fonte: Autor (2021).

O cálculo do volume de vazios foi realizado por meio da Equação 5.

$$V_V = \frac{G_{MM} - M_{ea}}{G_{MM}} \cdot 100 \quad (5)$$

Em que:

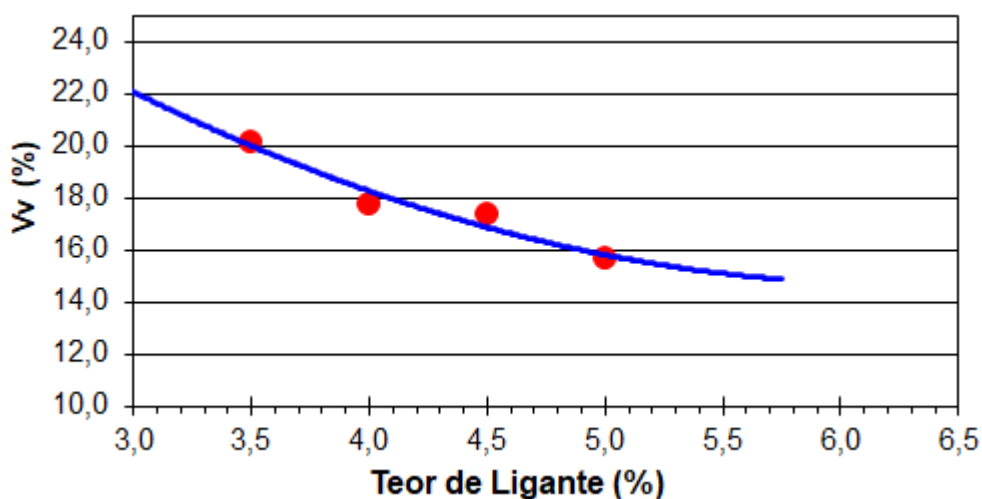
V_V é o percentual de vazios;

G_{MM} é a massa específica medida, em g/cm³;

M_{ea} é a massa específica aparente, em g/cm³.

O Gráfico 24 ilustra a correlação entre os percentuais de ligantes utilizados e a porcentagem de vazios de cada mistura.

Gráfico 24 – Porcentagens de Vazios e Teores de Ligante.



Fonte: Autor (2021).

Como a norma de Camada Porosa de Atrito DNER-ES 386 (1999) limita a porcentagem de vazios entre 18% e 25% e a norma francesa AFNOR NF P 98-134 (2000) define concreto asfáltico permeável como uma mistura com índice de vazios

próximo da ordem de 20%, a escolha do teor de projeto do ligante para a mistura foi feita de forma a atender as duas definições.

Ao analisar as misturas correspondentes a teores de ligante de 3,5% e 4% (vazios de 20% e 18,3%, respectivamente), observou-se que nas relacionadas à primeira porcentagem o ligante apresentava maior dificuldade em cobrir uniformemente a área superficial dos agregados. Esse comportamento tenderia a ser maximizado quando fossem acrescentadas fibras à mistura.

A fim de garantir um cobrimento satisfatório dos agregados pelo ligante asfáltico, optou-se pela padronização das misturas com utilização de uma quantidade de CAPFLEX 60/85 E referente a 4% da massa total da mistura, que conduz a uma mistura com porcentagem de V_v de 18,3%.

Como o peso das fibras é representado por frações inferiores a 1% da mistura (agregado e ligante) e o objetivo principal é analisar a influência dessa adição, será empregado o mesmo teor de 4% de ligante para todas as misturas asfálticas.

6.5 MISTURA E COMPACTAÇÃO

Inicialmente, montou-se a configuração de agregados referentes a um corpo-de-prova de 1100 gramas, vide a descrição na Tabela 15.

Tabela 15 – Pesos dos agregados para cada faixa granulométrica.

Composição Granulométrica dos Agregados - 1 CP				
Peneira	Abertura (mm)	% Retida	Peso (g)	Peso Acumulado (g)
3/8"	9,5	0,7	7,9	7,9
Nº 4	4,8	60,2	662,4	670,3
Nº 10	2	22,3	245,3	915,6
Nº 40	0,42	8,0	90,0	1005,5
Nº 200	0,075	5,8	64,1	1069,7
Fundo	-	3,0	30,3	1100,0

Fonte: Autor (2021).

De acordo com sugestões encontradas na revisão bibliográfica, os agregados passantes na peneira de número 10 foram separados daqueles com diâmetros maiores (Figuras 49 e 50) ao utilizar duas bacias no processo de pesagem do material.

Figura 49 – Material retido na peneira N° 10.



Fonte: Autor (2021).

Figura 50 – Material passante na peneira N° 10.



Fonte: Autor (2021).

Com os agregados preparados para a mistura, seguiu-se o procedimento de confecção dos corpos-de-prova do tipo Marshall, estabelecido na norma brasileira

DNER-043/95 (1995). Para iniciar o processo é necessário aquecer os agregados e o ligante a temperaturas específicas.

Uma vez que a utilização da curva “viscosidade x temperatura” para asfaltos polímeros conduz a valores muito elevados para as temperaturas de mistura/compactação quando consideradas as faixas de viscosidade de trabalho para asfaltos tradicionais, a definição das faixas de temperatura tanto para as operações de mistura quanto de compactação foi feita segundo recomendação do fabricante. Na Tabela 16 são apresentadas as temperaturas sugeridas.

Tabela 16 – Temperaturas de mistura e compactação do ligante CAPFLEX 60/85 E.

Especificações de Temperaturas (°C)	
Ligante	160-165
Agregados	170-175
Durante a compactação	145

Fonte: Stratura Asfaltos (2020).

Antes da mistura propriamente dita, os agregados foram colocados na estufa a uma temperatura de 175°C (Figura 51).

Figura 51 – Disposição dos agregados na estufa.



Fonte: Autor (2021).

Com o intuito de que o ligante cobrisse de forma mais eficaz a superfície dos agregados, primeiro realizou-se a homogeneização dos agregados graúdos, seguida de adição do ligante em teor de 4% (45,8 gramas a 165°C), dos agregados passantes na peneira de malha 2 mm e, por fim, das fibras (em temperatura ambiente), vide Figura 52. A ordem de adição dos componentes na mistura seguiu sugestões da literatura e a observação dos resultados obtidos para diferentes sequências durante a execução dos primeiros CPs.

Figura 52 – Mistura dos elementos componentes do concreto asfáltico permeável.



Fonte: Autor (2021).

Após a mistura concluída, ela foi armazenada em uma estufa a 145°C e, ao atingir essa temperatura, seguiu-se para a compactação em moldes cilíndricos de 10,16 cm de diâmetro devidamente limpos e lubrificados com óleo.

Para camadas porosas, a seção de compactação da DNER-043/95 (1995) especifica que deve ser aplicada a energia correspondente a 50 golpes em cada uma das duas faces do corpo-de-prova. Como a granulometria desse material é aberta, observa-se uma tendência de esmagamento dos agregados caso o número de golpes seja superior ao valor prescrito.

A Figura 53 apresenta os cilindros de compactação, a Figura 54 ilustra o compactador mecânico utilizado e a Figura 55 mostra os CPs logo após a compactação.

Figura 53 – Anéis de compactação.



Fonte: Autor (2021).

Figura 54 – Compactador Marshall.



Fonte: Autor (2021).

Figura 55 – CPs após compactação.



Fonte: Autor (2021).

Após a extração dos corpos-de-prova dos moldes (Figura 56), eles encontram-se aptos para a realização dos ensaios.

Figura 56 – Corpo-de-prova.



Fonte: Autor (2021).

6.6 ENSAIO DE PERDA AO CÂNTABRO

O ensaio é guiado pela norma DNER-ME 383/99 que apresenta a metodologia para medição do desgaste à abrasão de uma mistura asfáltica. O procedimento conta com a utilização da máquina de Abrasão Los Angeles, diferindo do ensaio tradicional em não utilizar as esferas metálicas durante as revoluções do equipamento.

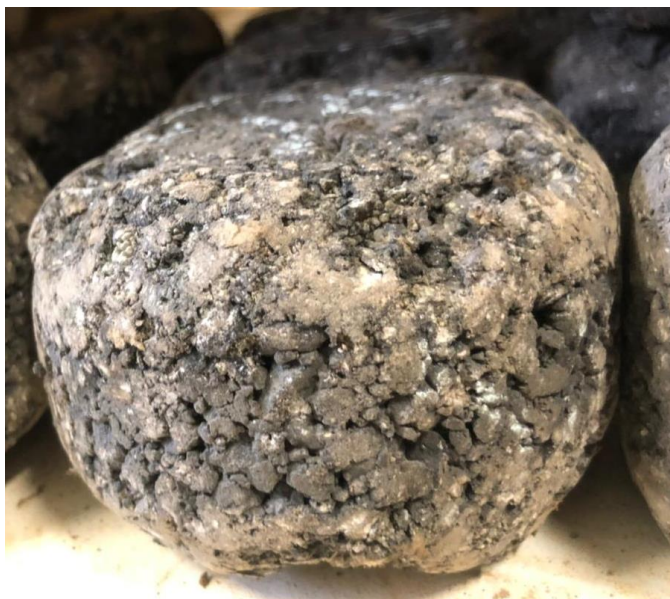
Inicialmente, procedeu-se a pesagem do corpo-de-prova. Depois, posicionou-se o CP no interior do tambor previamente limpo (Figura 57), fechando-o, em seguida. Então, iniciou-se o ensaio, de modo que o tambor realizasse 300 rotações a uma velocidade compreendida entre 30 e 33 rotações por minuto. Findado o ensaio, o corpo-de-prova, cujo aspecto é apresentado na Figura 58, foi pesado. A Figura 59 apresenta o CP após o ensaio ao lado de um exemplar intacto.

Figura 57 – CP posicionado dentro do tambor



Fonte: Autor (2021).

Figura 58 – CP após Ensaio do Cântabro.



Fonte: Autor (2021).

Figura 59 – Comparação de CP íntegro e após o ensaio.



Fonte: Autor (2021).

A perda ao cântabro é obtida a partir da utilização da Equação 6.

$$A = \frac{P - P'}{P} \cdot 100 \quad (6)$$

Em que:

A é o desgaste ao cântabro (%);

P é a massa inicial do CP, em g;

P' é a massa do CP após a realização do ensaio, em g.

Fixou-se como limite superior uma perda de 25%, o valor máximo permitido para esse material, de acordo com a norma brasileira DNER-ES 386/99.

6.7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

As especificações para a realização desse ensaio encontram-se na norma DNIT 136/2018 – ME. Cada corpo-de-prova foi posicionado na prensa, de modo a ter contato com os dois frisos metálicos ao longo de toda a sua altura (Figura 60). A uma temperatura próxima de 25°C, iniciou-se a aplicação da carga de forma progressiva até que ocorresse a ruptura do CP por separação das duas metades (Figura 61).

Figura 60 – CP posicionado para realização do ensaio.



Fonte: Autor (2021).

Figura 61 – CP após ruptura.



Fonte: Autor (2021).

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada utilizando-se a Equação 7.

$$\sigma_R = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (7)$$

Em que:

σ_R é a resistência à tração, em kgf/cm²;

F é a carga de ruptura, em kgf;

D é a média aritmética de três medições do diâmetro do CP, em cm;

H é a média aritmética de quatro medições da altura do CP, em cm.

6.8 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O módulo de resiliência de um material asfáltico evidencia a relação entre as tensões de tração aplicadas dinamicamente no compósito e as deformações que ele sofre. Para obter os valores experimentais desse parâmetro, executam-se ensaios com aplicações de cargas repetidas, de modo a gerar tensões indiretas de tração por compressão diametral nos corpos-de-prova Marshall.

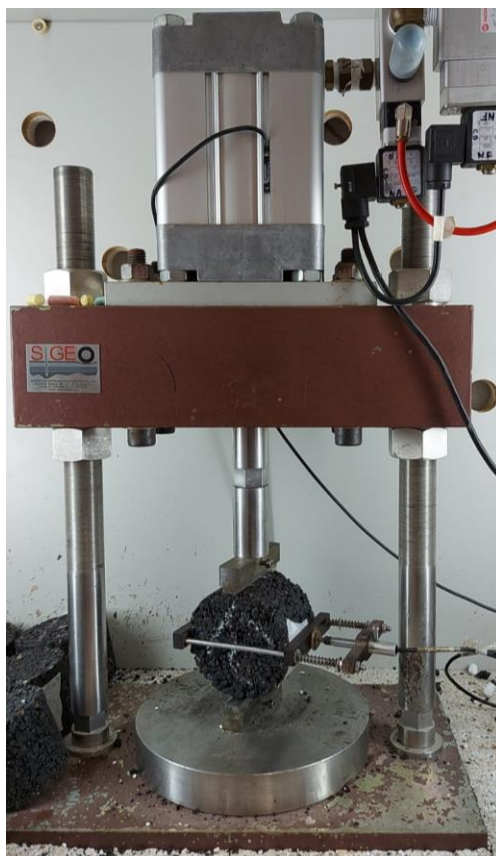
A metodologia aplicada no presente estudo seguiu as diretrizes da norma DNIT 135/2018-ME. Os equipamentos utilizados foram: uma prensa pneumática com quadro para fixação do corpo-de-prova, sensores de contato LVDT para medição

das deformações e sistema de aquisição de dados com conexão direta ao software empregado para controle do ensaio e obtenção dos resultados. O posicionamento do CP pode ser observado na Figura 62.

Para condicionar o CP, aplicaram-se 50 ciclos com carga inicial, correspondente a um valor compreendido entre 5% e 25% da resistência à tração por compressão diametral do material. Em seguida, executaram-se três ciclos com 15 aplicações de carga em cada e com um aumento gradual de 5% da carga aplicada.

O cálculo do módulo de resiliência é referente às cinco últimas aplicações de carga de cada ciclo, sendo o valor final a média dos três valores calculados pelo software.

Figura 62 – CP submetido a ensaio de Módulo de Resiliência.



Fonte: Autor (2021).

6.9 ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Na revisão de literatura foram apresentados exemplos de artifícios para a obtenção do coeficiente de permeabilidade do concreto asfáltico permeável, a saber: o permeâmetro de carga variável e o infiltrômetro.

No que diz respeito à prática laboratorial, é preciso saber a qual energia de compactação o material será submetido. Considerando-se a hipótese de trabalhar com um material na forma de placa (em que a espessura é a menor dentre as três medidas), faltaria um embasamento normativo que determinasse qual metodologia de compactação deveria ser aplicada para o material específico desta pesquisa.

Considerando-se que a prática mais utilizada no Laboratório de Pavimentação da UFJF é a compactação Marshall e que a norma de Camada Porosa de Atrito especifica uma quantidade de golpes do compactador Marshall para obtenção de corpos-de-prova cilíndricos, buscou-se uma metodologia de medição do coeficiente k na qual pudessem ser utilizados CPs do tipo Marshall (com diâmetro de 10,16 cm).

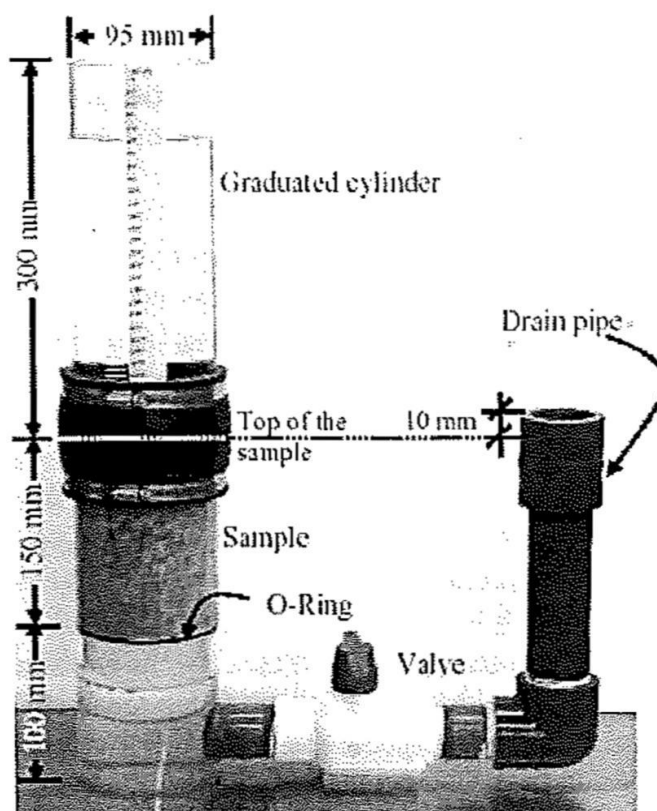
Ao analisar a adoção de um permeâmetro, encontra-se a problemática de que a coluna de água seria criada sobre um CP no qual teriam bolhas de ar aprisionado nos vazios e isso afetaria a precisão das medidas.

Seguindo-se o raciocínio e na falta de uma norma que regulamente o ensaio de permeabilidade neste CP, surge a possibilidade de adaptação da metodologia de ensaio prescrita para um material semelhante. Dessa maneira, pautou-se nas diretrizes da norma norte-americana do American Concrete Institute (ACI) 522R – 06 (2006), que esquematiza os procedimentos laboratoriais para obtenção da permeabilidade de concretos permeáveis de cimento Portland.

O ensaio tem por finalidade medir o tempo decorrido entre a passagem da lâmina d'água pelos níveis inicial e final, sendo o corpo-de-prova posicionado de forma a oferecer resistência ao fluxo do líquido.

É possível observar na Figura 63 o aparato proposto pela norma.

Figura 63 – Equipamento para Ensaio de Permeabilidade.



Fonte: American Concrete Institute (2006).

Para o desenvolvimento do aparelho foi necessário atentar-se ao fato de que para cada ensaio seria necessário desacoplar o duto de maior diâmetro, inserir o corpo-de-prova no conjunto e encaixar o elemento novamente. Caso o cano fosse de acrílico (material transparente e ideal para observar a movimentação da coluna d'água), essa operação, ao ser repetida inúmeras vezes, poderia comprometer a integridade do mesmo.

Além disso, ao realizar uma pesquisa de mercado, encontrou-se dificuldade na aquisição de um cilindro vazado de acrílico com dimensão nominal de 100 mm de diâmetro.

Desta forma, optou-se pela utilização do material de PVC, adquirindo-se peças comumente utilizadas em projetos hidráulicos, de modo a conseguir montar um conjunto cujo visual pode ser observado na Figura 64.

Figura 64 – Aparelho para o Ensaio de Permeabilidade.



Fonte: Autor (2021).

Para proporcionar uma acuidade visual na medição da lâmina d'água foram feitos dois cortes no cano de diâmetro nominal de 100 mm. A fim de assegurar a estanqueidade durante a realização do ensaio, encamisou-se o trecho próximo de cada abertura no cano com a parte cilíndrica de uma garrafa do tipo PET de 2 litros e, em seguida, vedou-se a junção com fita isolante (Figura 65).

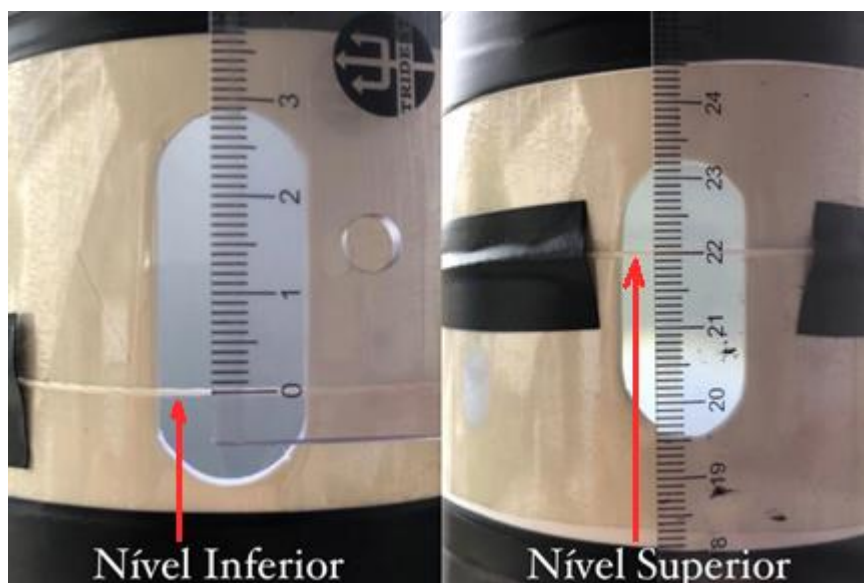
Figura 65 – Detalhe da abertura no cano.



Fonte: Autor (2021).

Utilizaram-se os mesmos valores de níveis da lâmina de água propostos pela norma americana. O nível superior encontra-se 29 cm acima do topo do CP, enquanto o inferior está a 7 cm. A demarcação foi feita com utilização de barbante e fita isolante (Figura 66).

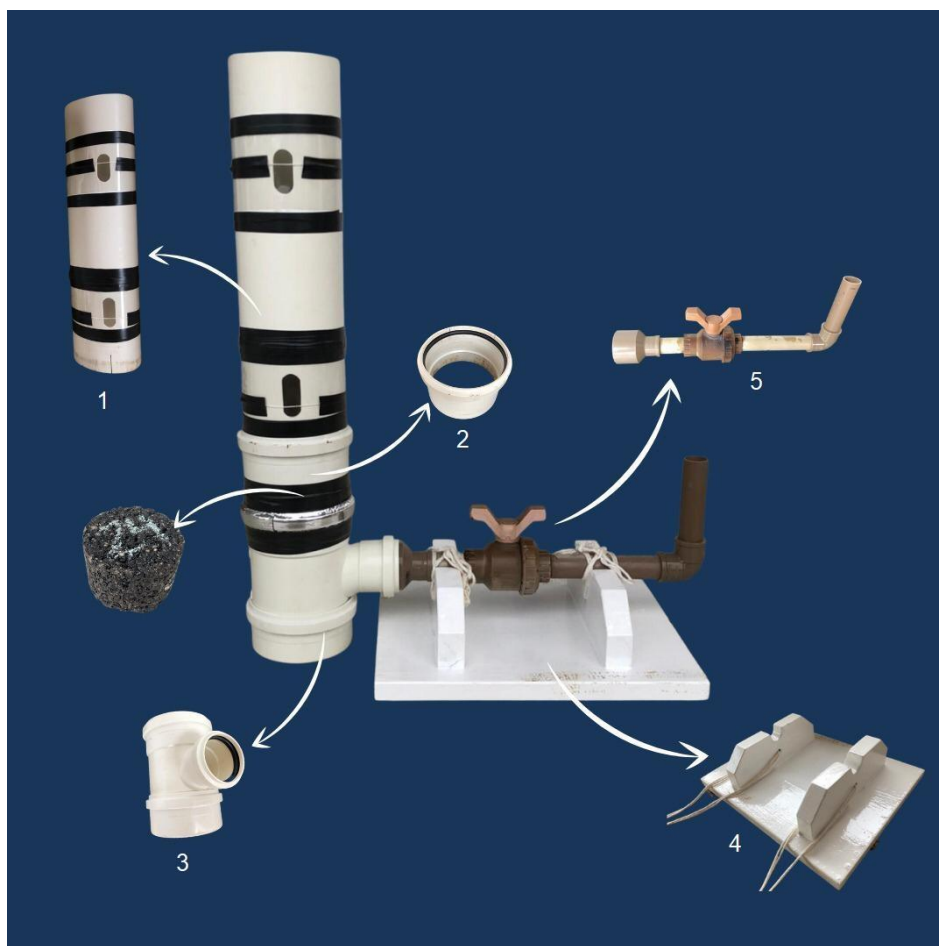
Figura 66 – Demarcação dos Níveis Superior e Inferior.



Fonte: Autor (2021).

Após a demarcação no cano de PVC (peça 1), ele está pronto para ser conectado na peça 2 (Figura 67).

Figura 67 – Peças do Aparelho para Ensaio de Permeabilidade.



Fonte: Autor (2021).

Conforme a vista explodida do permeâmetro é apresentada (Figura 67), é relevante identificar as peças do aparelho, a saber:

- a) tubo de PVC de 100 mm de diâmetro (1);
- b) luva de PVC de 100 mm com anel de borracha (2);
- c) tê de PVC de 100 mm com redução para 50 mm e Cap (na base do tê) de PVC de 100 mm (3);
- d) tábua de madeira para apoio do elemento 5, com possibilidade de amarração do mesmo (4);
- e) bucha de redução de 50 mm para 25 mm, tubo de PVC de 25 mm, registro de esfera e joelho de 90 graus conectado a outro tubo de PVC de 25 mm (5).

Ao simular o ensaio, observou-se que ocorreu vazamento de água na junção entre os elementos 2 e 3. Para impedir que o líquido extravasasse, procedeu-se uma impermeabilização envolvendo o encaixe com filme plástico de PVC, manta isolante e fita isolante (nessa ordem), vide Figura 68. Esse procedimento teve de ser executado sempre que um novo CP foi ensaiado, visto que para retirar o anterior de dentro do tubo, o lacre impermeável na junção das peças 2 e 3 precisa ser desfeito.

Figura 68 – Procedimento de selagem da junção entre os elementos 2 e 3.



Fonte: Autor (2021).

Tendo sido feitas as explicações acerca das circunstâncias e problemáticas que implicaram no desenvolvimento do equipamento para medição do coeficiente de permeabilidade, prossegue-se este item do trabalho com a apresentação da metodologia aplicada durante o ensaio propriamente dito.

Inicialmente, deve-se encaixar o corpo-de-prova na luva de 100 mm de forma que o topo do CP coincida com o friso de PVC (Figura 69); observou-se que o encaixe é extremamente justo, fato que limita a interferência da passagem de água pela lateral do CP nos resultados.

Figura 69 – Encaixe do CP na luva.



Fonte: Autor (2021).

Em seguida, a parte inferior do CP é inserida na extremidade livre do tê com redução de 100 mm para 50 mm (Figura 70) e procede-se a impermeabilização da conexão entre a luva e o tê, conforme ilustrado previamente na Figura 68.

Figura 70 – Encaixe do CP no tê.



Fonte: Autor (2021).

Com o CP posicionado e o registro de esfera aberto, verte-se água na extremidade livre do tubo de 25 mm (Figura 71), de forma que ela passe de baixo para cima pelos vazios do CP e se estabilize em um nível de 1 cm acima ao topo do corpo-de-prova (Figura 72). Essa pré-molhagem é importante pois evita que bolhas de ar e a absorção de água pelo material interfiram na precisão do ensaio.

Figura 71 – Água sendo vertida na extremidade do cano de 25 mm.



Fonte: Autor (2021).

Figura 72 – Filme de água sobre o corpo-de-prova.



Fonte: Autor (2021).

Em seguida, é acoplado o cano de 100 mm na luva vedada com anel de borracha, fecha-se o registro de esfera e verte-se a água pela extremidade livre do cano de 100 mm, de modo a constituir uma coluna d'água cujo nível ultrapasse a marcação superior. Para padronizar o nível inicial do ensaio, utilizou-se um fio azul para delimitar a lâmina do líquido (Figura 73).

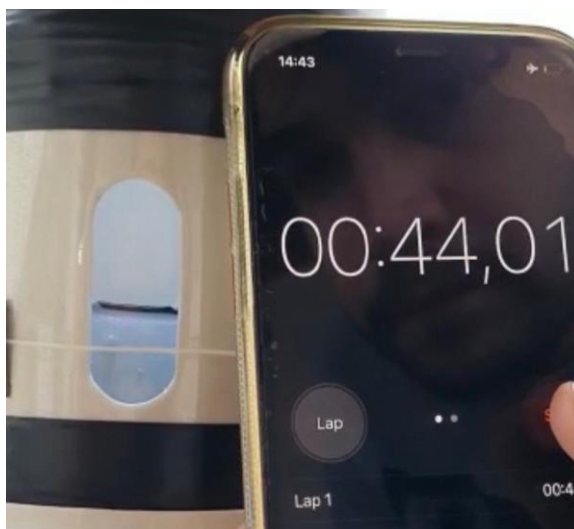
Figura 73 – Detalhe do preenchimento do tubo de 100 mm.



Fonte: Autor (2021).

A seguir, abre-se o registro de esfera e observa-se o movimento de descida do nível d'água, acionando-se o cronômetro quando o líquido atinge a marca do nível superior e encerrando-se a medição do tempo quando a lâmina coincide com o nível inferior. Na Figura 74 é possível observar a aproximação da água em relação à marcação inferior em barbante.

Figura 74 – Nível da água em relação à marca inferior.



Fonte: Autor (2021).

A partir do tempo medido, utiliza-se a Equação 8, correspondente à Lei de Darcy, para calcular o coeficiente de permeabilidade k . Para cada corpo-de-prova, foram realizadas três medições, sendo o resultado final a média das três.

$$k = \frac{2,3 \cdot A_1 \cdot L \cdot \log (h_i/h_f)}{A_2 \cdot t} \quad (8)$$

Em que:

k é o coeficiente de permeabilidade, em m/s;

A_1 é a área transversal do tubo, em m²;

A_2 é a área transversal do corpo-de-prova, em m²;

L é a média de quatro medidas de espessura do corpo-de-prova, em m;

t é o intervalo de tempo entre as leituras, em s;

h_i é igual à altura inicial de 29 cm;

h_f é igual à altura final de 7 cm.

6.10 TEOR DE VAZIOS COMUNICANTES

A norma francesa AFNOR-NF-P-98-254-2 (1993) determina as diretrizes para a obtenção do teor de vazios comunicantes ou eficazes em relação ao volume do corpo-de-prova. A importância desse parâmetro é justificada pelo fato de que são os vazios eficazes os responsáveis pela passagem da água pelo revestimento, ou seja,

quanto maior for esse percentual, melhor o comportamento drenante do concreto asfáltico permeável.

Durante a preparação do CP para o ensaio devem-se impermeabilizar as faces lateral e inferior do cilindro. Entretanto a norma deixa em aberto o método de impermeabilização, apenas sugerindo materiais a serem utilizados (como fita adesiva e parafina).

Foi necessário, então, desenvolver uma padronização específica para o procedimento. Para proporcionar a selagem final com parafina, concebeu-se que o corpo-de-prova seria banhado em um recipiente com parafina líquida.

Para permitir uma submersão precisa, executou-se uma amarração de fios na base do CP, sendo fixados nas laterais com fita crepe (Figura 75) e amarrados novamente acima do CP, de maneira a assemelhar o conjunto a um balanço.

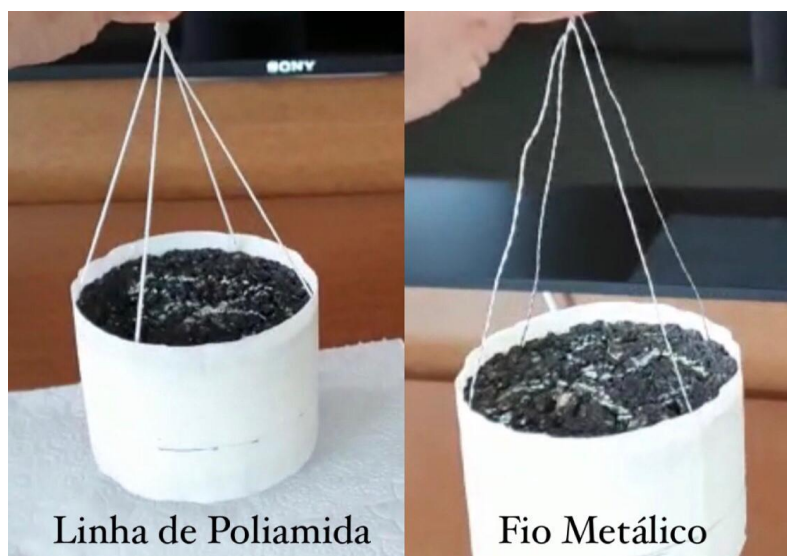
Figura 75 – Posicionamento das linhas de poliamida no CP.



Fonte: Autor (2021).

Foram realizados testes com dois tipos de fios: um metálico e uma linha de 100% poliamida encerada (comumente encontrada em lojas agropecuárias para amarração de sacas de café), vide Figura 76.

Figura 76 – Linha de poliamida encerada e fio metálico.

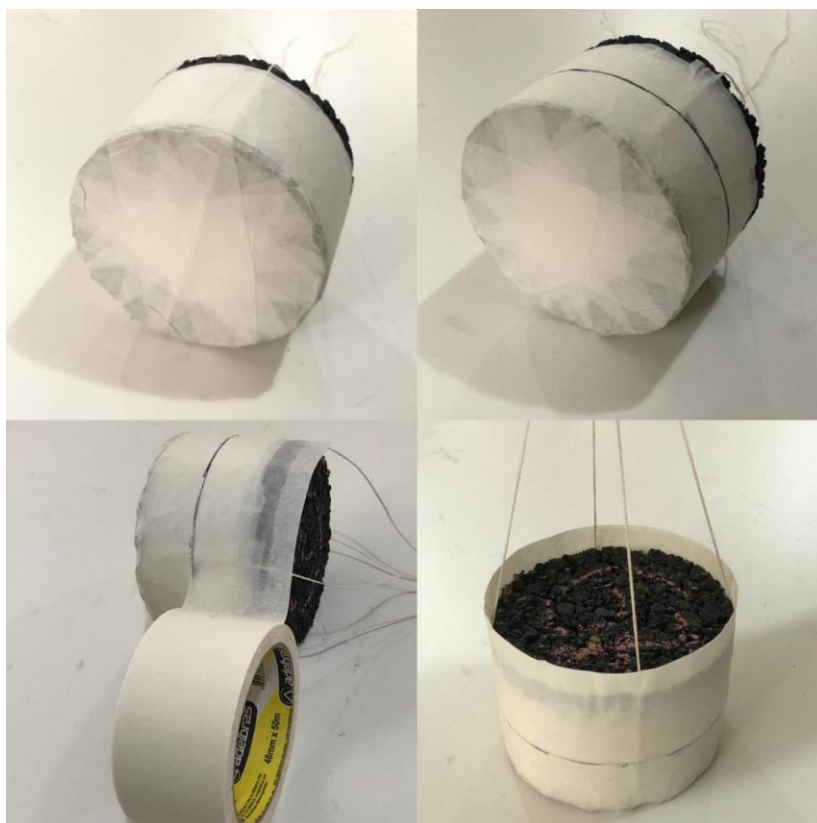


Fonte: Autor (2021).

A linha de poliamida mostrou-se mais fácil de manusear e mais maleável durante a movimentação do CP, oferecendo menores chances de romper a impermeabilização da camada de parafina em relação ao fio metálico durante o manuseio.

Após passar fita crepe no fundo e nas laterais, executou-se uma marcação em caneta na altura de 4 cm abaixo do topo do corpo-de-prova. Para evitar que a parafina líquida acidentalmente entrasse em contato com a superfície superior do CP, utilizou-se a marcação como base para aplicação da fita crepe na parte superior do CP; como ela possui 5 cm de largura, ao alinhar a base com o desenho em caneta, garante-se que o cilindro fique com uma altura de fita 1 cm superior ao seu topo (Figura 77).

Figura 77 – Procedimento utilizado para envolver o CP em fita crepe.



Fonte: Autor (2021).

Com o corpo-de-prova devidamente encapado com fita crepe, o passo seguinte consiste na preparação da parafina. Adquiriu-se a parafina em formato comercialmente chamado de “lentilha”, uma vez que é um material fácil de dosar as quantidades por ser granulado.

Para tornar a parafina líquida, utilizou-se o procedimento de aquecimento em banho-maria. O ponto de fusão da parafina é de 50 a 57°C. Mergulhou-se cada corpo-de-prova no líquido até o topo do cilindro por três vezes (Figura 78). A fim de aguardar a secagem, os CPs foram pendurados da maneira demonstrada na Figura 79.

Figura 78 – Fusão da parafina e imersão do CP.



Fonte: Autor (2021).

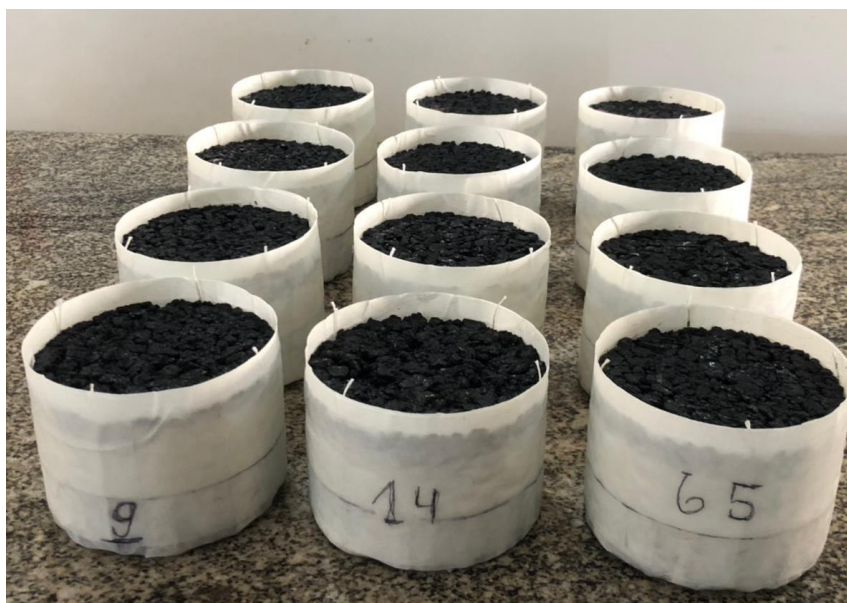
Figura 79 – Posicionamento dos CPs para aguardar a secagem.



Fonte: Autor (2021).

Devidamente impermeabilizados, os CPs tiveram as linhas de poliamida aparadas (Figura 80), foram pesados e encontravam-se prontos para a realização do ensaio propriamente dito.

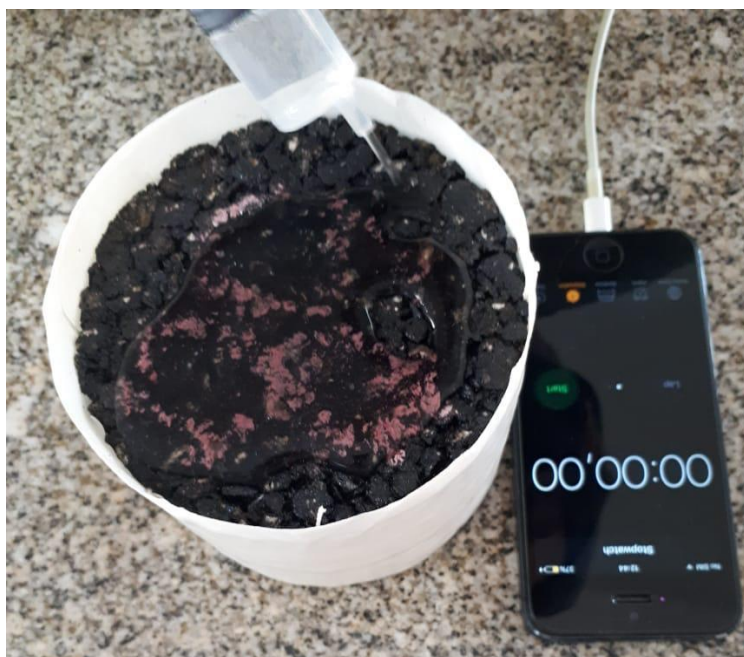
Figura 80 – Corpos-de-prova preparados para o ensaio.



Fonte: Autor (2021).

A norma AFNOR-NF-P-98-254-2 (1993) instrui que seja distribuída água de maneira lenta e uniforme sobre o topo do corpo-de-prova até que se forme uma película constante sobre o mesmo. Utilizou-se uma seringa para distribuir a água lentamente sobre a área (Figura 81).

Figura 81 – Distribuição de água sobre a superfície do CP.



Fonte: Autor (2021).

Com a formação do filme d'água sobre o corpo-de-prova (Figura 82), aciona-se um cronômetro e, após 5 minutos verifica-se qual o estado da superfície: caso ela não esteja mais submersa, coloca-se água de forma a formar o filme novamente; caso contrário, não é necessário proceder nenhuma ação. Após mais 5 minutos, seca-se a área com papel toalha e o CP é pesado novamente.

Figura 82 – Formação do filme de água sobre o corpo-de-prova.



Fonte: Autor (2021).

Após o ensaio, executam-se os cálculos conforme as Equações 11 e 12, obtendo-se inicialmente a altura reduzida do corpo-de-prova e, em seguida, o volume de vazios comunicantes.

$$h_{\text{reduzida}} = h_{\text{média}} - \frac{D_{\text{Máx}}}{20} \quad (11)$$

Em que:

$D_{\text{Máx}}$ é o diâmetro máximo entre os agregados utilizados, em mm (9,5);

$h_{\text{média}}$ é a média de três medidas de espessura do corpo-de-prova, em cm;

h_{reduzida} é a altura reduzida, em cm.

$$V_{\text{VC}} = \frac{P}{A_{\text{CP}} \cdot h_{\text{reduzida}}} \cdot 100 \quad (12)$$

Em que:

V_{VC} é a porcentagem de vazios comunicantes em relação ao volume do CP;

P é a diferença entre as massas do corpo-de-prova com água e seco, em g;

A_{CP} é a área da face superior do corpo-de-prova, em cm²;

h_{reduzida} é a espessura reduzida do corpo-de-prova, em cm.

6.11 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Utilizou-se o software GraphPad Prism para analisar os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais por meio da metodologia de estudo de variância chamada de ANOVA .

Inicialmente, executou-se um teste de normalidade para verificar se os valores assumiriam ou não um comportamento de distribuição de Gauss, ou seja, se ao serem plotados em um gráfico, podem ser visualizados em uma curva em formato de sino e simétrica em torno de seu ponto médio. Para essa análise, o programa recomenda a utilização do teste chamado de D'Agostino e Pearson (Figura 83).

Figura 83 – Configuração no GraphPad Prism para Teste de Normalidade.

Parameters: Column Statistics X

Subcolumns

- Compute the mean of the subcolumns for each row, and then calculate column statistics of those means
- Compute column statistics for each subcolumn separately

Descriptive Statistics

- Minimum and maximum
- Quartiles (Median, 25th and 75th percentile)
- Percentile: 90
- Mean, SD, SEM
- 95% CI of the mean
- Coefficient of variation
- Geometric mean with 95% CI
- Skewness and kurtosis

Test if the values come from a Gaussian distribution

- Kolmogorov-Smirnov test (with Dallal-Wilkinson-Lilliefors P value)
- D'Agostino and Pearson omnibus normality test (Recommended)
- Shapiro-Wilk normality test

Inferences

- One-sample t test. Are column means significantly different than a hypothetical value? Hypothetical value (often 0.0, 1.0 or 100): 0.0000
- Wilcoxon signed-rank test. Compare column medians to a hypothetical value?

Output options

Confidence Intervals: 95%

Show: 4 significant digits

Learn Cancel OK

Fonte: Autor (2021).

Caso positivo, empregou-se a ANOVA com medidas repetidas e o Teste de Tukey (Figura 84) para avaliar se as diferenças entre um grupo amostral e outro são significativas ou não.

Caso negativo ou se o número de valores “N” medidos fosse inferior ao mínimo necessário para verificar a normalidade, utilizou-se o Teste de Kruskal-Wallis (único disponível para distribuições não gaussianas) e o Teste de Comparação Múltipla de Dunns (Figura 85).

Figura 84 – Configuração no GraphPad Prism para ANOVA com medidas repetidas e Teste de Tukey.

Parameters: One-Way ANOVA (and Nonparametric) X

Choose test
 You may either choose a test by checking the two option boxes, or you may choose a test by name below.
 Repeated measures test. Values in each row represent matched observations.
 Nonparametric test. Don't assume Gaussian distributions.
 Test name: Repeated Measures ANOVA

Post test
 Test name: Tukey: Compare all pairs of columns.
 Significance level. Alpha = 0.05 (95% confidence intervals)
 Control column: B:0% Select...

Significant digits
 Show 4 significant digits

Output
 Create a table of descriptive statistics for each column

Learn Cancel OK

Fonte: Autor (2021).

Figura 85 – Configuração no GraphPad Prism para Teste de Kruskal-Wallis e Teste de Dunns.

Parameters: One-Way ANOVA (and Nonparametric) X

Choose test
 You may either choose a test by checking the two option boxes, or you may choose a test by name below.
 Repeated measures test. Values in each row represent matched observations.
 Nonparametric test. Don't assume Gaussian distributions.
 Test name: Kruskal-Wallis test

Post test
 Test name: Dunns: Compare all pairs of columns
 Significance level. Alpha = 0.05 (95% confidence intervals)
 Control column: B:0% Select...

Significant digits
 Show 4 significant digits

Output
 Create a table of descriptive statistics for each column

Learn Cancel OK

Fonte: Autor (2021).

7 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos a partir dos experimentos laboratoriais, bem como uma análise estatística dos valores. A fim de situar a pesquisa em relação a outras que abordam a mesma temática, foram expostas tabelas em que são mostrados os valores dos parâmetros encontrados por demais autores da literatura. Ainda, utilizando-se das análises do software GraphPad Prism, os quatro tipos de misturas estudadas foram comparadas entre si, no tocante a um determinado comportamento mecânico ou hidráulico.

7.1 PERDA AO CÂNTABRO

Os resultados dos ensaios de determinação da perda ao cântabro para 12 corpos-de-prova (sendo três de cada um dos quatro tipos de mistura asfáltica), assim como os valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação são exibidos na Tabela 17.

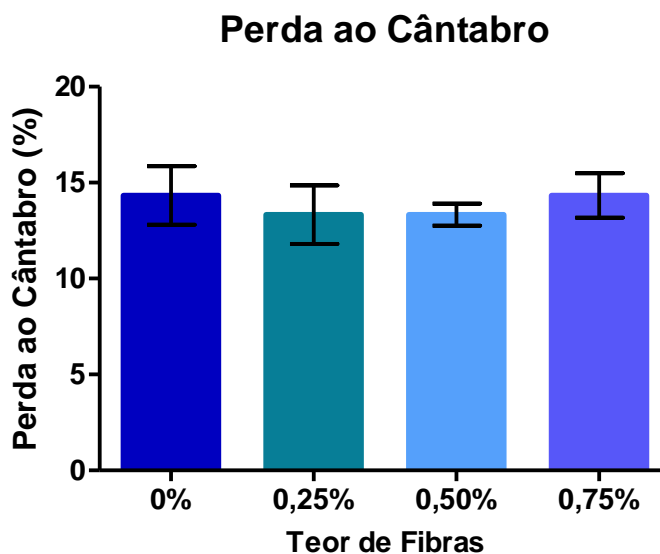
Tabela 17 – Resultados de perda ao cântabro.

Fibras de celulose	0,00%	0,25%	0,50%	0,75%
Perda ao Cântabro (%)	13	12	13	13
	14	13	13	15
	16	15	14	15
Média (%)	14	13	13	14
Desvio Padrão	1,53	1,53	0,58	1,15
Coeficiente de Variação	0,11	0,11	0,04	0,08

Fonte: Autor (2021).

O Gráfico 25 ilustra os valores médios de perda ao cântabro para as misturas utilizando 0%, 0,25%, 0,50% e 0,75% de fibras de celulose. Os símbolos em formato de I ilustram o desvio padrão dos valores em cada coluna.

Gráfico 25 – Perda ao Cântabro para misturas com diferentes teores de fibra.



Fonte: Autor (2021).

Ao realizar o teste de normalidade de D'Agostino e Pearson, o programa apontou que o número N de ensaios para cada grupo era igual a três e inferior ao mínimo necessário para verificar se os valores seguem uma distribuição gaussiana. Desta maneira, prosseguiu-se a análise com o Teste de Kruskal-Wallis e, em seguida, o Teste de Comparação Múltipla de Dunn. Para todas as comparações entre os quatro conjuntos de dados, obtiveram-se valores de P (parâmetro utilizado nos testes) superiores a 0,05. Quando P é superior a esse valor, o teste de Dunn permite afirmar que não há diferença significativa entre dois distintos universos amostrais.

Em valores percentuais, os valores de perda ao cântabro para os compósitos dos tipos 0% e 0,75% foram iguais entre si; comportamento observado também entre as misturas 0,25% e 0,50%. É possível afirmar, então, que a utilização de fibras em porcentagens de 0,25% e 0,50% implicou em materiais com desgaste ao cântabro 1% inferior àquelas sem adição de fibras ou com adição de 0,75%. Todavia, de acordo com a análise estatística e obtenção de valores de P superiores a 0,05, essa diferença mostrou-se insignificante.

A Tabela 18, por sua vez, apresenta uma listagem de resultados do ensaio em questão expostos por autores de diferentes trabalhos, especificando os tipos de ligantes utilizados e se houve adição de fibras.

Tabela 18 – Comparativo de perda ao cântabro entres trabalhos da literatura.

Trabalho	Ligante Asfáltico	Fibras de celulose	Perda ao Cântabro (%)
ZHOU <i>et al.</i> (2014)	Convencional	0,00%	19
CARVALHO (2015)	Convencional	0,00%	17
LUO <i>et al.</i> (2015)	Com Polímero	0,00%	16
CHEN <i>et al.</i> (2012)	Com Polímero	0,30%	13
CHEN <i>et al.</i> (2016)	Com Polímero	0,30%	13
Presente Estudo	Com Polímero	0,00%	14
Presente Estudo	Com Polímero	0,25%	13
Presente Estudo	Com Polímero	0,50%	13
Presente Estudo	Com Polímero	0,75%	14
Limite de acordo com DNER-ES 386/99			≤ 25

Fonte: Autor (2021).

A análise dessa tabela permite observar que misturas com ligante modificado por polímero apresentaram valores de desgaste ao cântabro inferiores àquelas com ligantes convencionais. Os concretos asfálticos permeáveis com ligantes modificados por polímero e com adição de fibras no teor de 0,30% estudados por Chen *et al.* (2012) e Chen *et al.* (2016) apresentaram resultados semelhantes aos obtidos nesta pesquisa para as misturas asfálticas com 0,25% e 0,50% de fibras de celulose.

Frente às prescrições normativas para concreto asfáltico poroso e seguindo a diretriz da norma DNER-ES 386/99, observou-se que todas as quatro misturas demonstraram comportamento positivo frente à abrasão. A perda ao cântabro máxima correspondeu a um valor 44% inferior ao limite máximo de 25% preconizado pela norma.

7.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

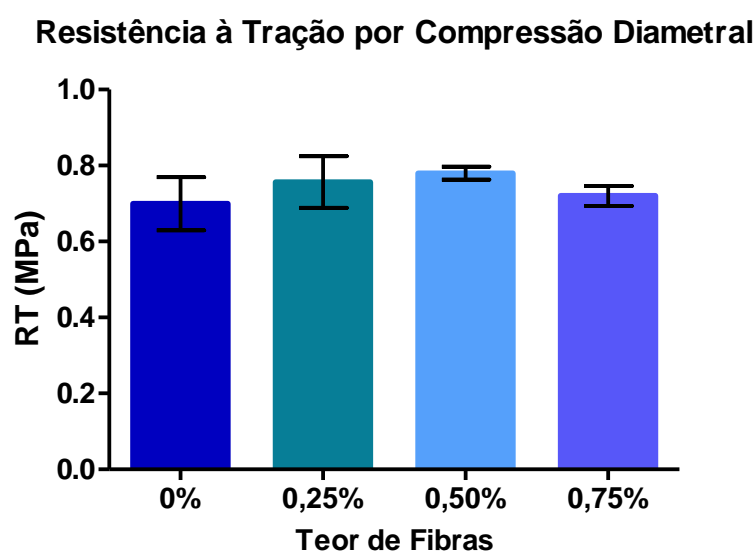
Na Tabela 19 são apresentados os valores de resistência à tração por compressão diametral (RT) para 12 corpos-de-prova (três de cada grupo), assim como os parâmetros estatísticos relacionados a cada espaço amostral. No Gráfico 26 encontram-se plotados os valores médios para cada mistura, bem como o desvio padrão em cada coluna.

Tabela 19 – Resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral.

Fibras de celulose	0,00%	0,25%	0,50%	0,75%
Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)	0,65	0,68	0,77	0,69
	0,67	0,78	0,77	0,73
	0,78	0,81	0,8	0,74
Média (MPa)	0,70	0,76	0,78	0,72
Desvio Padrão	0,07	0,07	0,02	0,03
Coeficiente de Variação	0,10	0,09	0,02	0,04

Fonte: Autor (2021).

Gráfico 26 – Resistência à Tração para misturas com diferentes teores de fibra.



Fonte: Autor (2021).

Através da análise do Gráfico 26, pode-se observar que a adição de fibras de celulose exerce influência sobre os valores de resistência à tração. O concreto asfáltico poroso com 0,50% de fibras é o que expressou o maior valor, no âmbito do parâmetro mecânico em questão.

A tendência inicial observada, analisando a média aritmética de cada conjunto de medidas, é de que o valor de RT apresente acréscimos conforme utiliza-se um maior teor de fibras. Esse comportamento sofreu alteração, todavia, quando se utilizou 0,75% de fibras de celulose; de forma a demonstrar que, a partir desse teor, a adição de fibras começa a influenciar negativamente na resistência à tração por compressão diametral.

Para avaliar se as diferenças entre os valores de RT são significativas, recorreu-se à análise estatística dos dados. Como mais uma vez no presente estudo

o número de amostras por grupo é inferior ao mínimo necessário para verificar a distribuição gaussiana dos valores, empregaram-se os testes de Kruskal-Wallis e o de Comparação Múltipla de Dunn.

Para nenhuma comparação entre dois grupos distintos obteve-se valor do parâmetro estatístico P inferior a 0,05, evidenciando que, de acordo com a metodologia seguida, os valores de resistência à tração por compressão diametral não são significativamente diferentes entre si.

A Tabela 20 apresenta um comparativo entre resultados de RT obtidos em outros estudos bem como os valores médios obtidos nesta dissertação.

Tabela 20 – Comparativo de RT entres trabalhos da literatura.

Trabalho	Ligante Asfáltico	Fibras de celulose	RT (MPa)
DUMKE (2005)	Com Polímero	0,00%	0,72
OLIVEIRA (2003)	Com Polímero	0,00%	0,75
CHEN <i>et al.</i> (2016)	Com Polímero	0,00%	0,85
CHEN <i>et al.</i> (2016)	Com Polímero	0,30%	0,95
Presente Estudo	Com Polímero	0,00%	0,70
Presente Estudo	Com Polímero	0,25%	0,76
Presente Estudo	Com Polímero	0,50%	0,78
Presente Estudo	Com Polímero	0,75%	0,72
Limite de acordo com DNER-ES 386/99			≥ 0,55

Fonte: Autor (2021).

Todos os estudos abordaram materiais com ligantes modificados por polímeros. Tanto nos trabalhos de Dumke (2005) quanto Oliveira (2003), os valores obtidos encontram-se inseridos na faixa de 0,70 a 0,78 MPa, indicando uma semelhança com os valores de RT desta pesquisa.

Ao analisar os resultados de Chen *et al.* (2016), todavia, vê-se que para um compósito sem fibras a resistência é maior em 0,15 MPa do que a do concreto asfáltico com 0% de fibras estudado no presente trabalho. Além disso, Chen *et al.* (2016) obtiveram um valor de resistência à tração indireta de 0,95 MPa, enquanto o máximo obtido nesta pesquisa foi de 0,78 MPa.

Uma explicação para a diferença explicitada pode ser tanto o teor de ligante empregado por Chen *et al.* (2016), quanto a distribuição granulométrica dos agregados utilizados. Enquanto os autores empregaram 5% de ligante asfáltico e a porcentagem de partículas retidas na peneira de malha 12,5 mm foi de 33%

(diâmetro máximo de 19 mm e distribuição fora das cinco faixas estabelecidas na DNER-ES 386/99), neste trabalho de mestrado empregou-se 4% de ligante e o diâmetro máximo foi de 9,5 mm.

Por fim, neste tópico, é importante ressaltar que os quatro compósitos produzidos apresentaram resistência à tração superior ao limite mínimo estabelecido pela norma DNER-ES 386/99 de 0,55 MPa, enquadrando-se dentro do preconizado para camadas porosas de atrito.

7.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

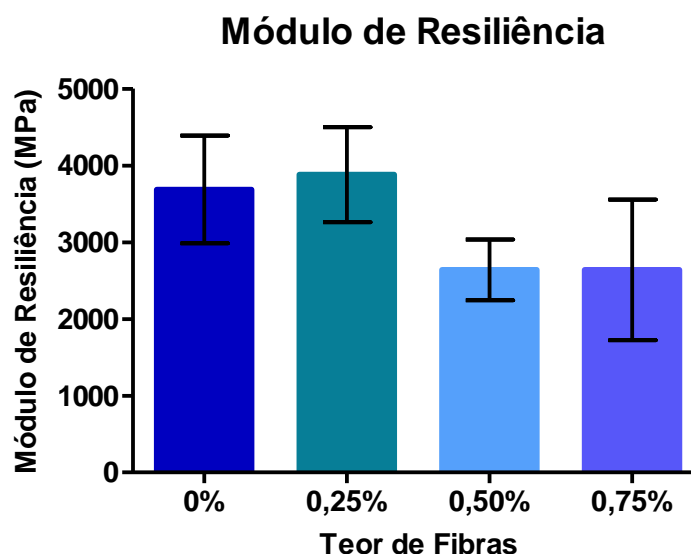
A Tabela 21 exibe os resultados de módulo de resiliência (MR) obtidos nos ensaios dos corpos-de-prova. Para um único CP foram realizadas três medições de MR. Como 3 CPs de cada grupo foram submetidos ao ensaio, o número N de amostras do espaço amostral é igual a 9. Os 36 resultados, devidamente separados em quatro grupos, foram tratados estatisticamente a fim de se obter a média aritmética e o desvio padrão de cada tipo; o Gráfico 27 ilustra o comportamento observado após análise.

Tabela 21 – Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência.

Fibras de celulose	0,00%	0,25%	0,50%	0,75%
Módulo de Resiliência (MPa)	3061	3777	1903	2619
	2917	3425	2374	2235
	3250	2772	2933	2376
	4609	4635	2216	1860
	2932	4039	2754	1647
	3475	3531	2821	1688
	4558	3755	2878	3515
	4027	4216	2733	3976
	4347	4767	3150	3836
Média (MPa)	3686	3880	2640	2639
Desvio Padrão	703	620	395	916
Coefficiente de Variação	0,19	0,16	0,15	0,35

Fonte: Autor (2021).

Gráfico 27 – Módulo de Resiliência para misturas com diferentes teores de fibra.



Fonte: Autor (2021).

Considerando-se os valores médios obtidos em cada um dos grupos, afirma-se que o concreto asfáltico permeável que possui adição de fibras de celulose na porcentagem de 0,25% é o que possui maior módulo de resiliência dentre todos. Isso significa que esse material, quando submetido a uma dada tensão, apresenta deformação inferior às obtidas pelos outros compósitos quando submetidos a uma tensão de mesmo valor.

Para valores relativos a 0,50%, observa-se que a adição de fibras provocou a diminuição no valor de MR da mistura. Este comportamento pode estar relacionado ao fato de o teor de asfalto utilizado (4%) começar a ser insuficiente para envolver todas as fibras disponíveis, deixando de interagir quimicamente.

Os módulos de resiliência observados para misturas com 0,50% e 0,75% de fibras são praticamente iguais entre si, observando-se que o conjunto representado no Gráfico 27 pela coluna 0,75% possui um desvio padrão maior que o de 0,50%; essa observação permite concluir que os dados de 0,50% possuíram uma convergência maior.

Para realizar um comparativo embasado e preciso utilizou-se do teste de normalidade de D'Agostino e Pearson, o qual verificou que os valores de todos os grupos passaram na verificação e, por isso representam uma distribuição gaussiana.

Com o teste de variância com medidas repetidas do tipo ANOVA e o critério de Tukey, obtiveram-se parâmetros que embasam as seguintes afirmações:

- a) o grupo com 0,25% de fibras de celulose não apresentou valores significativamente diferentes em relação ao grupo em que não foram empregadas fibras; todavia, as diferenças em relação aos grupos de 0,50% e 0,75% são significativas;
- b) o conjunto sem adição de fibras tem módulo de resiliência significativamente distinto dos obtidos nos grupos 0,50% e 0,75%;
- c) os grupos com 0,50% e 0,75% de fibras não apresentaram distinções relevantes entre si.

Na Tabela 22 é possível observar-se os valores de MR obtidos em outros trabalhos da literatura.

Tabela 22 – Comparativo de MR entres trabalhos da literatura.

Trabalho	Ligante Asfáltico	Fibras de celulose	MR (MPa)
AHMAD <i>et al.</i> (2018)	Convencional	0,00%	1000
CHEN <i>et al.</i> (2016)	Com Polímero	0,00%	1200
CHEN <i>et al.</i> (2016)	Com Polímero	0,30%	1450
OLIVEIRA (2003)	Com Polímero	0,00%	1880
HOMEM (2002)	Com Polímero	0,00%	2150
SCHNEIDER (2016)	Com Polímero	0,00%	3990
Presente Estudo	Com Polímero	0,00%	3686
Presente Estudo	Com Polímero	0,25%	3880
Presente Estudo	Com Polímero	0,50%	2640
Presente Estudo	Com Polímero	0,75%	2639

Fonte: Autor (2021).

Ao comparar os valores do presente trabalho com os apresentados por outros autores, observa-se que, para todos os quatro grupos ensaiados, os valores de módulo de resiliência foram superiores aos cinco primeiros valores expostos na Tabela 22. Quando comparado ao material com ligante convencional elaborado por Ahmad *et al.* (2018), o concreto asfáltico deste estudo sem a adição de fibras possui um MR 3,69 vezes superior àquele não modificado por polímeros.

O módulo de 3990 MPa, o maior observado na etapa de revisão bibliográfica, relacionado ao material confeccionado por Schneider (2016), é cerca de 8% superior ao obtido neste estudo para o CPA sem fibras e essa diferença diminui para 3% quando comparado ao CPA com adição de 0,25% de fibras de celulose.

7.4 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

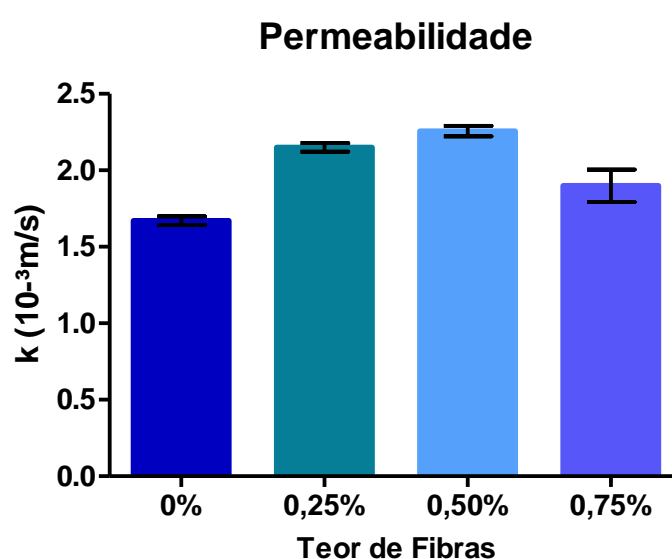
Como foram realizadas três leituras de tempo para cada corpo-de-prova e cada um dos quatro grupos contou com três amostras, na Tabela 23 são exibidos os 36 valores de coeficiente de permeabilidade obtidos. O Gráfico 28 ilustra o comportamento observado.

Tabela 23 – Resultados do ensaio de Permeabilidade.

Fibras de celulose	0,00%	0,25%	0,50%	0,75%
Coeficiente de Permeabilidade k (10^{-3} m/s)	1,66	2,13	2,25	2,01
	1,66	2,12	2,20	2,05
	1,63	2,13	2,22	2,01
	1,64	2,12	2,32	1,90
	1,67	2,14	2,28	1,89
	1,65	2,15	2,26	1,89
	1,69	2,17	2,25	1,80
	1,70	2,19	2,27	1,78
	1,72	2,19	2,25	1,77
Média (10^{-3} m/s)	1,67	2,15	2,26	1,90
Desvio Padrão	0,03	0,03	0,03	0,11
Coeficiente de Variação	0,02	0,01	0,02	0,06

Fonte: Autor (2021).

Gráfico 28 – Coeficiente de Permeabilidade para CPA com diferentes teores de fibra.



Fonte: Autor (2021).

Com a adição de fibras em todos os teores atingiram-se valores de k maiores do que o obtido para a mistura sem fibras de celulose. Ressalta-se também que, até o teor de 0,50%, observou-se uma relação proporcional entre a quantidade da adição e o incremento na permeabilidade. Ou seja, até essa porcentagem, quanto mais fibras, mais permeável o concreto asfáltico.

O grupo com 0,50% de fibras foi o que demonstrou maior valor de k (0,23 cm/s), enquanto a adição de 0,75% do material tendeu a abaixar o valor do parâmetro hidráulico para um valor inferior àquele apresentado pelo grupo do tipo 0,25%.

Com nove valores por grupo, o número N foi suficiente para realizar o teste de normalidade, o qual verificou que os quatro grupos apresentam valores com características de uma distribuição gaussiana.

O teste de medidas repetidas ANOVA e o critério do teste de Tukey possibilitaram afirmar que, para todos os comparativos entre os quatro tipos de concreto asfáltico permeável, os valores de P foram inferiores a 0,05. Desse modo conclui-se que, estatisticamente, nenhum grupo é semelhante a outro e os valores do coeficiente de permeabilidade são significativamente diferentes entre si.

A Tabela 24 ilustra o comparativo entre valores obtidos em outros estudos e os do presente.

Tabela 24 – Comparativo de Permeabilidade entres trabalhos da literatura.

Trabalho	Ligante Asfáltico	Fibras de celulose	k (10^{-3} m/s)
HOMEM (2002)	Com Polímero	0,00%	1,2
LUO <i>et al.</i> (2015)	Com Polímero	0,00%	1,3
SCHNEIDER (2016)	Com Polímero	0,00%	1,4
HSU <i>et al.</i> (2011)	Convencional	0,00%	1,6
CHEN <i>et al.</i> (2012)	Com polímero	0,30%	1,9
AHMAD <i>et al.</i> (2018)	Convencional	0,00%	2,0
CHEN <i>et al.</i> (2016)	Com polímero	0,30%	2,2
LIN <i>et al.</i> (2012)	Convencional	0,00%	2,3
CHEN <i>et al.</i> (2016)	Com polímero	0,00%	2,4
Presente Estudo	Com Polímero	0,00%	1,7
Presente Estudo	Com Polímero	0,25%	2,2
Presente Estudo	Com Polímero	0,50%	2,3
Presente Estudo	Com Polímero	0,75%	1,9
Limite de acordo com NBR 16416 (2015)			1,0

Fonte: Autor (2021).

A partir da análise dos dados, pode-se afirmar que os valores de k resultantes dos ensaios desta dissertação encontram-se devidamente enquadrados no intervalo de valores encontrados na análise de trabalhos prévios da literatura.

A comparação entre os resultados do CAP com adição de 0,30% de fibras de Chen *et al.* (2016) e o CAP com 0,25% de fibras deste estudo mostra que os valores de k são os mesmos, apesar de o primeiro material possuir uma porcentagem de vazios de 20% (1,7 pontos percentuais acima do determinado para o presente trabalho - 18,3%).

Além disso, em Chen *et al.* (2016) a adição de 0,30% de fibras celulósicas acarretou em uma redução de 21% no valor do coeficiente de permeabilidade em relação ao material sem fibras. Enquanto neste trabalho o uso de fibras em uma porcentagem semelhante (0,25%) demonstrou a melhoria de 45% no comportamento em relação à permeabilidade.

Cabe citar a obtenção de valores de permeabilidade superiores ao obtido por Hsu *et al.* (2011) para um concreto asfáltico permeável com ligante convencional, indicando que os tipos e as porcentagens dos componentes do CAP deste trabalho favoreceram a passagem de água no material em comparação ao material produzido por Hsu *et al.* (2011) com uma porcentagem de vazios de 20,3%.

Quanto ao limite mínimo para o valor de k , autores como Hsu *et al.* (2011) e Chen *et al.* (2016) afirmam que um coeficiente superior a 0,01 cm/s é suficiente para se considerar um material como revestimento asfáltico permeável.

Todavia, ao consultar a norma NBR 16416 (2015) para Revestimentos Permeáveis de Concreto, encontra-se uma prescrição que determina que o valor de k deve ser maior do que o apontado pelos autores supracitados. De forma a seguir um parâmetro mais restritivo, adotou-se o proposto pela norma da ABNT, a saber: maior que 1×10^{-3} m/s. Ao analisar os quatro módulos obtidos, afirma-se que todas as misturas podem ser devidamente classificadas como permeáveis, pois apresentaram valores maiores que o limite.

7.5 VAZIOS COMUNICANTES

Como apontado na etapa de revisão bibliográfica, o número de vazios comunicantes (V_{VC}) é diretamente proporcional à permeabilidade de um material. Dessa forma, esperava-se que o comportamento analisado nesse ensaio mostrasse uma tendência semelhante à observada no parâmetro de coeficiente de permeabilidade.

A Tabela 25 mostra os valores de vazios comunicantes em relação ao volume total do corpo-de-prova cilíndrico, os percentuais médios de vazios totais obtidos para cada teor de adição de fibras (inicialmente projetados para um valor de 18,3%) e a relação entre vazios comunicantes e o teor total de vazios (dividindo-se cada valor pelo percentual de vazios totais).

Tabela 25 – Resultados do ensaio de Vazios Comunicantes.

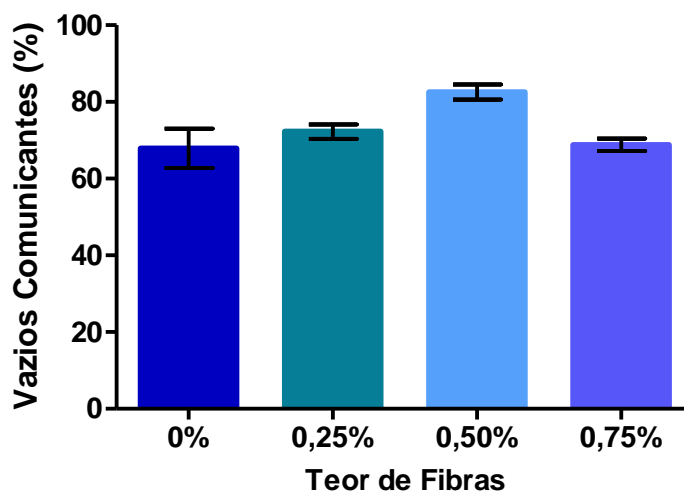
Fibras de celulose	0,00%	0,25%	0,50%	0,75%
Vazios Comunicantes (%) – V_{VC}	12,26	13,01	14,8	12,86
	11,74	13,68	15,3	12,41
	13,57	13,52	15,5	12,98
Média (%)	12,52	13,40	15,20	12,75
Desvio Padrão	0,94	0,35	0,36	0,30
Coeficiente de Variação	0,08	0,03	0,02	0,02
Vazios Totais (%)	18,44	18,55	18,41	18,53
Vazios Comunicantes em relação aos Vazios Totais (%)	67,90	72,24	82,56	68,81

Fonte: Autor (2021).

O Gráfico 29 demonstra um comportamento similar ao observado na análise de k ; a porcentagem de vazios comunicantes em relação aos vazios totais aumenta com a elevação do teor de fibras até a porcentagem de adição de 0,50%. Para o teor de 0,75% observa-se uma diminuição no valor desse parâmetro.

Gráfico 29 – Porcentagem de Vazios Comunicantes em relação aos Vazios Totais para CPA com diferentes teores de fibra.

Vazios Comunicantes em relação aos Vazios Totais



Fonte: Autor (2021).

Uma vez que N não é o suficiente para verificar se há distribuição gaussiana, fez-se a análise de variância pelo método de Kruskal-Wallis e a Comparação Múltipla de Dunn para possibilitar a realização de uma afirmação estatística sobre os valores de vazios comunicantes dos corpos-de-prova ensaiados.

Como os valores de P foram superiores a 0,05 para todas as comparações entre grupos realizadas, entende-se que os vazios comunicantes são semelhantes entre si e não há nenhum grupo cujo valor médio seja significativamente distinto de outro com diferente teor de fibras.

Esse comportamento é diferente daquele visto para índices de permeabilidade, em que todos os grupos apresentaram valores significativamente distintos. Isso vai de encontro à afirmação de Takakashi e Partl (2001) de que uma diferença pequena em termos de porosidade representa uma diferença significativa em termos de permeabilidade.

A Tabela 26, por sua vez, exhibe valores de vazios comunicantes em relação aos vazios totais encontrados em diferentes tipos de camada porosa de atrito por diferentes autores na literatura.

Tabela 26 – Comparativo de Vazios Comunicantes entre trabalhos da literatura.

Vazios comunicantes em relação ao total de vazios			
Trabalho	Ligante Asfáltico	Fibras de celulose	Vazios Comunicantes (%)
OLIVEIRA (2003)	Com Polímero	0,00%	70,86
HU <i>et al.</i> (2018)	Convencional	0,00%	71,69
ZHAO <i>et al.</i> (2019)	Convencional	0,00%	82,14
DUMKE (2005)	Com Polímero	0,00%	83,62
DUMKE (2005)	Convencional	0,30%	88,45
JIANG <i>et al.</i> (2012)	Convencional	0,00%	94,10
LIN <i>et al.</i> (2012)	Convencional	0,00%	94,57
Presente Estudo	Com Polímero	0,00%	67,90
Presente Estudo	Com Polímero	0,25%	72,24
Presente Estudo	Com Polímero	0,50%	82,56
Presente Estudo	Com Polímero	0,75%	68,81

Fonte: Autor (2021).

Dentre os valores de vazios comunicantes exibidos, os máximos são os referentes às pesquisas de Jiang *et al.* (2012) e Lin *et al.* (2012), nas quais os autores não utilizaram nem ligantes modificados por polímero nem fibras de celulose enquanto adições.

Nota-se uma proximidade entre dois valores obtidos (ambos para CPAs com polímeros e sem fibras): 70,86% para o compósito de Oliveira (2003) e 67,90% para a mistura asfáltica do atual trabalho.

O maior valor de conectividade dos poros para um compósito com polímeros foi de 83,62%, obtido por Dumke (2005). O concreto asfáltico permeável do presente estudo, quando acrescido de 0,50% de fibras celulósicas, se aproxima desse índice, atingindo uma relação de 82,56% entre os vazios comunicantes e os vazios totais.

A adição de fibras em 0,75% gera um compósito com apenas 0,91% de vazios comunicantes a mais do que aquele sem fibra alguma, sendo justificável a preferência da utilização desse frente àquele ao analisar a economia de material.

8 CONCLUSÕES

Este trabalho realizou um estudo sobre concreto asfáltico permeável, analisando parâmetros mecânicos e hidráulicos de quatro misturas distintas. Cada compósito apresentou uma porcentagem de adição de fibras de celulose, a saber: 0%, 0,25%, 0,50% e 0,75%. O teor de vazios projetado para o compósito foi de 18,3%, correspondente a uma mistura com 4% de ligante asfáltico.

Realizaram-se ensaios de perda ao cântabro (DNER – ME 383/99), resistência à tração por compressão diametral (DNIT 136/2018 – ME), módulo de resiliência (DNIT 135/2018 – ME) e vazios comunicantes (AFNOR-NF-P-98-254-2 – 1993).

Como a norma de camada porosa de atrito (DNER - ES 386/99) não orienta a medição das propriedades hidráulicas do material, foi feito um extenso estudo da literatura e optou-se por criar um aparelho seguindo certas diretrizes da norma ACI 522R-06. A criação do aparato demandou bastante planejamento e criatividade para elaboração de um conjunto capaz de envolver lateralmente o CP com diâmetro de 10,16 cm e permitir a passagem da água somente no sentido vertical.

Após uma série de experimentos e testes, elaborou-se, por fim, um equipamento com peças hidrossanitárias, constituindo um permeâmetro de carga variável. O aparelho, após os ajustes e melhorias, não demonstrou sinal algum de vazamento de água durante a execução do ensaio, ou seja, o fluxo do líquido ocorreu somente através do corpo-de-prova.

Em relação aos resultados de coeficiente de permeabilidade, a adição de fibras em todos os três percentuais resultou em concretos com valores de k maiores do que o obtido pelo sem adição ($1,7 \times 10^{-3}$ m/s).

O maior valor de k foi de $2,3 \times 10^{-3}$ m/s, obtido para o grupo com 0,50% de fibras. Até esse teor, o aumento na porcentagem de fibras corresponde a maior permeabilidade, ao passo que para a adição de 0,75% o valor de k diminuiu para $1,9 \times 10^{-3}$ m/s. A análise estatística indicou que os quatro valores de k são significativamente distintos entre si.

Os quatro materiais estudados apresentaram valores superiores ao valor mínimo de 1×10^{-3} m/s prescrito pela NBR 16416 (2015),

Quanto aos resultados no ensaio do cântabro, os valores percentuais de perda foram: 14% para o concreto sem fibras e para o com 0,75% de fibras de

celulose; 13% para os compósitos com 0,25% e 0,50% de fibras na sua composição. Observou-se, a partir de análise estatística, que os valores não são significativamente distintos entre si. Cabe explicitar que os valores de perda ao cântabro foram inferiores ao valor limite de 25% estabelecido na DNER-ES 386/99.

Analisando os valores de resistência à tração por compressão diametral (RT), afirma-se que os valores aumentaram conforme o acréscimo na quantidade de fibras até a adição de 0,50%. A partir desse teor, observou-se que o valor de RT tende a diminuir, aproximando-se do apresentado pelo compósito sem adição. Todos os valores foram superiores ao mínimo de 0,55 MPa preconizado pela DNER-ES 386/99.

A análise dos quatro valores de RT obtidos (0,70; 0,76; 0,78 e 0,72 MPa) forneceu embasamento para afirmar que, estatisticamente, os concretos são semelhantes entre si; ou seja, a adição de fibra não é responsável por alterações significativas em relação ao parâmetro estudado.

No tangente ao ensaio de módulo de resiliência (MR), o maior valor médio obtido foi de 3880 MPa, referente ao material com 0,25% de fibras de celulose. Estatisticamente, não foi averiguada diferença significativa desse material em relação ao grupo em que não foram empregadas fibras, cujo MR foi de 3686 MPa.

Todavia, as diferenças de valores do grupo de 0,25% em relação aos de 0,50% e 0,75% são significativas; ou seja, a utilização de fibras além do teor de 0,25% resultou na diminuição do módulo de elasticidade.

No tocante ao ensaio de vazios comunicantes, visualizou-se uma tendência similar a dos resultados de coeficiente de permeabilidade. O material com maior percentual de vazios comunicantes (15,20%) foi o mesmo que apresentou o maior valor de k ; houve um aumento no número de vazios comunicantes ao adicionar fibras até um teor de 0,50% e para 0,75% observou-se uma redução.

Os valores de vazios comunicantes em relação aos vazios totais do concreto para 0%, 0,25%, 0,50% e 0,75% de adições de fibras foram, respectivamente, de 68%, 72%, 83% e 69%. Esses valores, do ponto de vista estatístico, mostraram-se semelhantes, de modo que nenhum dos quatro grupos se destacou significativamente.

Essa análise permitiu concluir que diferenças sutis nos teores de vazios comunicantes em relação ao volume do concreto asfáltico implicaram em alterações significativas nos valores dos coeficientes de permeabilidade.

Como apanhado geral, pontua-se que as diferenças expressivas entre os quatro compósitos encontram-se no módulo de resiliência e no coeficiente de permeabilidade. A adição de fibras não mostrou influência relevante nos parâmetros de perda ao cântabro, resistência à tração por compressão diametral e vazios comunicantes.

A mistura que apresentou o maior módulo de resiliência e o segundo maior coeficiente de permeabilidade foi a que possuía 0,25% de fibras em sua composição. O ganho de 5% em permeabilidade é acompanhado de uma redução de 32% no módulo de resiliência ao aumentar a porcentagem de fibras de 0,25% para 0,50%.

Dessa forma e, observando ainda uma economia de material, o concreto asfáltico permeável modificado por polímeros e com adição de 0,25% de fibras de celulose demonstrou ser a mistura asfáltica com melhor desempenho dentre as estudadas neste trabalho. Esse valor vai de encontro às adições de 0,30%, observadas em outros trabalhos da literatura.

8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de projetos de pesquisa relacionados ao assunto estudado nesta dissertação, citam-se:

- a) avaliar, após um período de tempo, a influência do processo de oxidação do concreto asfáltico permeável utilizando os CPs submetidos a ensaios não destrutivos deste trabalho;
- b) executar uma pista experimental, definindo um método de compactação *in loco*, e analisar medidas de permeabilidade neste revestimento;
- c) analisar outros parâmetros de deformabilidade do material, como a vida de fadiga e os valores de deformação permanente, de forma a avaliar o desempenho do CPA a longo prazo;
- d) investigar a interferência do processo de colmatação dos vazios, simulando o preenchimento dos mesmos e analisando a perda na propriedade de condutividade hidráulica;
- e) realizar comparativos com materiais compactados seguindo a metodologia Superpave.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira De Normas Técnicas. **ABNT NBR 15573**: Misturas Asfálticas - Determinação da densidade aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados. Rio de Janeiro – RJ. ABNT. 2012.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. **ABNT NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro – RJ. ABNT. 2015.

American Concrete Institute. **ACI 522R-06**: Pervious Concrete. Michigan, Estados Unidos. ACI. 2006.

ACIOLI, Laura Albuquerque. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para controle de escoamento superficial na fonte**. 2005. 162p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2005.

ACQUA, G. D.; LUCA, M.; MAURO, R.; RUSSO, F. Freeway crashes in wet weather: the comparative influence of porous and conventional asphalt surfacing. **Social and Behavioral Sciences**, v. 54, p. 618-627. 2012.

Association Française de Normalisation. **NF-P-98-134**: Couches de roulement: Béton bitumineux drainant. França. AFNOR. 2000.

Association Française de Normalisation. **NF-P-98-254-2**: Mesure de propriétés liées à la perméabilité des matériaux des mélanges hydrocarbonés. França. AFNOR. 1993.

ÁGUAS PLUVIAIS: técnicas compensatórias para o controle de cheias urbanas: guia do profissional em treinamento: nível 2 e 3 / Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). – Belo Horizonte : ReCESA, 2007. 52 p.

AHMAD, K. A.; HASSAN, N. A.; ABDULLAH, M. E.; BILEMA, M. A. M.; USMAN, N.; AL ALLAM, A. A. M.; HAININ, M. R. B. Image processing procedure to quantify the internal structure of porous asphalt concrete. **Multidiscipline Modeling in Materials and Structures**, v. 2018, p. 1-22. 2018.

ALENCAR, Ana Ellen Valentim de. **Estudo das propriedades do cimento asfáltico de petróleo modificado por copolímero de etileno e acetato de vinila (EVA)**. 2005. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza – CE, 2005.

ALVES, Priscila Borges. **Concreto permeável para pavimentação urbana com uso de resíduos de construção e demolição produzidos na usina de reciclagem de São José do Rio Preto**. 2016. 90p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UNESP. Ilha Solteira – SP, 2016.

AMARAL, Simone da Costa. **Estudo de misturas asfálticas densas com agregados do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX B 65/60)**. 2000. 218p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo. São Carlos - SP, 2000.

Agência Nacional Do Petróleo. **Resolução ANP N° 19 de 11 de julho de 2005**. Rio de Janeiro – RJ. ANP. 2005.

ANUPAM, K.; SRIRANGAM, S. K.; VARVERI, A.; KASBERGEN, C.; SCARPAS, A. Microstructural analysis of porous asphalt concrete mix subjected to rolling truck tire loads. **Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board**, v. 2575, n. 12, p. 113-122. 2016.

ARAUJO, M. F. A. S.; LINS, V. F. C.; PASA, V. M. D.; FONSECA, C. G. Infrared spectroscopy study of photodegradation of polymer modified asphalt binder. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 125, n. 4, p. 3275-3281. 2012.

ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, p. 21-29. 2000.

ARQUER, G. A.; LORANCA, R. A. Estudio del ruido de rodadura em las mezclas porosas em Espana. In: CONGRESSO EUROPEU DE MEZCLAS DRENANTES, Madri, 1997, **Anais** [...]. Madri - Espanha. 1997. p. 747-755.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH, 266 p. 2005.

BARROS, Beatriz Sefair Leite de. **Estudo do potencial de aplicação de resíduos de concreto como agregado em concreto permeável para piso intertravado**. 2018. 82p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora – MG, 2018.

BARROS, B. L. S.; ÁVILA, C. T.; CARVALHO, G. A. Concreto reforçado com fibras. Juiz de Fora: UFJF, 2019. Notas de Aula.

BATEZINI, Rafael. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. 2013. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 2013.

BATEZINI, R.; BALBO, J. T. Estudo da condutividade hidráulica com carga constante e variável em concretos permeáveis. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo. 2015. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952015000300002> . Acesso em: 28 de jul. de 2021.

BEAN, E. Z.; HUNT, W. F.; BIDELESPACH, D. A. F. Field survey of permeable pavement surface infiltration rates. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, p. 247-255. 2007.

BECKER, N; PINHEIRO, I. G. Potencialidade dos pavimentos permeáveis na melhoria da qualidade da água do escoamento superficial: uma revisão. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 11, p. 1-11. 2019.

BERNADETE, L.; ARAÚJO, M.; MEIRELLES, M. JF registra, em 11 dias, todas as chuvas previstas para janeiro. **Tribuna de Minas**, Juiz de Fora, 11 de jan. de 2021. Disponível em: <https://tribunademinas.com.br/noticias/cidade/11-01-2021/jf-registra-em-11-dias-todas-as-chuvas-previstas-para-janeiro.html> . Acesso em: 27 de jul. de 2021.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros. 3ª Edição. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2008.

Betina. Conheça um pouco mais sobre zona de raízes [entupimento]. **PorQueNão**, 2016. Disponível em: <http://porquenao.org/blog/conheca-um-pouco-zona-raizes-entupimento/> . Acesso em: 27 de jul. de 2021.

BOCHOVE, G. G. VAN; GORKEN, F. VON. Two layered porous asphalt – a new concept civil technical properties and experience. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, Madri, 1997, **Anais** [...]. Madri - Espanha. 1997. p. 249-269.

BONNOT, J. L'expérience française des bétons bitumineux drainants. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, Madri, 1997, **Anais** [...]. Madri - Espanha. 1997. p. 1145-1171.

BROWN, R. A.; BORST, M. Evaluation of surface infiltration testing procedures in permeable pavement systems. **Journal of Environmental Engineering**, v. 140, n. 3, p. 1-12. 2014.

British Standard Institution. **BS EM 12697-19: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 19: Permeability of specimen**. Reino Unido. BSI. 2004.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CARDOSO, Francisco José. **Ambientes fluviais urbanos: novos paradigmas de projeto**. 2017. 367p. Tese (Doutorado em urbanismo) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Campinas – SP, 2017.

CARDOSO, S. H.; MARCON, A. F.; APS, M.; MARCELLO, J. R. Proposta para implantação de Centros de Análise e Controle de Acidentes (CACA) em órgãos rodoviários e vias urbanas. In: 29ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Cuiabá, 1995, **Anais** [...]. Cuiabá – MT. 1995. p. 285-302.

CARVALHO, Cátia Filipa Galinho. **Estudo de pavimentos permeáveis em zonas urbanas – avaliação da sua eficiência na redução do escoamento superficial**. 2015. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade da Beira Interior. Covilhã – Portugal, 2015.

CASTRO, L. R. Mezclas drenantes. In: 13º CONGRESSO IBERO-AMERICANO DEL ASFALTO, São José, 2005, **Anais** [...]. São José – Costa Rica. 2005.

CHEN, J.; LEE, C.; LIN, Y. Influence of engineering properties of porous asphalt concrete on long-term performance. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 04016246, p. 1-7. 2016.

CHEN, J.; SUN, Y.; LIAO, M.; HUANG, C. Effect of binder types on engineering properties and performance of porous asphalt concrete. **Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board**, v. 2293, p. 55-62. 2012.

CHEN, J. S.; WEI, S. H.; HO, H. C. Laboratory and field evaluation of porous asphalt mixes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE AND MATERIALS, Xi'an, 2016, **Anais** [...]. Xi'an – China. 2016. p. 273-280.

CHO, K.; MUN, S. Determining hydraulic conductivity parameters of porous asphalt concrete using bayesian parameter estimation. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 19, p. 1277-1281. 2015.

CLIMATE-DATA.ORG. Climate Juiz de Fora Disponível em: <https://www.google.com.br/amp/s/en.climate-data.org/south-america/brazil/minas-gerais/juiz-de-fora-5957/%3famp=true> . Acesso em: 27 de jul. de 2021.

COLNAGO, A. T. S.; OLIVEIRA, E. F.; MERLO, K. B. Produção de pisos intertravados tipo pavieess com utilização de resíduo de mármore e granito. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, n. 2, p. 96-106. 2018.

CONCRETO drenante. **Grupo Tecno**, 2021. Disponível em: <http://www.grupotecno.net.br/index.php/concreto-drenante> . Acesso em: 27 de jul. de 2021.

PAIVA COUTINHO, Artur. **Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife**. 2011. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife – PE, 2011.

DANTAS, Mateus Medeiros Vieira. **Estudo da resistência ao cisalhamento de misturas asfálticas a partir de ensaios com aplicação de cargas repetidas com o pórtico modular**. 2017. 62p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa – PB, 2017.

DELGADO, C.; ALBERTO, F. Após chuva, Juiz de Fora tem pontos de alagamento e desabamentos em diversas regiões da cidade. **G1 Zona da Mata**, Juiz de Fora, 03 de mar. de 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/google/amp/mg/zona-da-mata/noticia/2020/03/03/pontos-de-alagamentos-sao-registrados-em-varias-regioes-de-juiz-de-fora-durante-chuvas.ghtml> . Acesso em: 27 de jul. de 2021.

DE MARCO, Conrado Silva. **Elementos de acústica arquitetônica**, Livraria Nobel, São Paulo – SP, 1982.

DIBABA, W. T. A Review of sustainability of urban drainage system: traits and consequences. **Journal of Sedimentary Environments**, v. 3, n. 3, p. 131-137. 2018.

Departamento Nacional De Estradas De Rodagem. **DNER-ES 386/99 - Pavimentação – Pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito**. Rio de Janeiro – RJ. DNER. 1999.

Departamento Nacional De Estradas De Rodagem. **DNER-ME 043/95 - Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall**. Rio de Janeiro – RJ. DNER. 1995.

Departamento Nacional De Estradas De Rodagem. **DNER-ME 383/99: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro**. Rio de Janeiro – RJ. DNER. 1999.

Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. **DNIT 135/2018 – ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas. Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**. Rio de Janeiro – RJ. DNIT. 2018.

Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. **DNIT 136/2018 – ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. Rio de Janeiro – RJ. DNIT. 2018.

Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. **DNIT 411/2021 – ME: – Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio**. Brasília – DF. DNIT. 2021.

Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. **DNIT 413/2021 – ME: – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio**. Brasília – DF. DNIT. 2021.

DRAKE, J.; BRADFORD, A.; VAN SETERS, T. Stormwater quality of spring/summer-fall effluent from three partial-infiltration permeable pavement systems and conventional asphalt pavement. **Journal of Environmental Management**, v. 139, p. 69-79. 2014.

DUMKE, Marilan Pedro. **Concreto asfáltico drenante com fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto-borracha**. 2005. 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – SC, 2005.

ENCONTRE as melhores opções de rolo compactador na Degraus. **Loxam Degraus**, 2021. Disponível em: <https://www.degraus.com.br/encontre-as-melhores-opcoes-de-rolo-compactador-na-degraus/> . Acesso em: 27 de jul. de 2021.

Environmental Protection Agency. **Characterization of building related construction and demolition debris in the United States**. Office of Solid Waste, Estados Unidos. EPA. 2009. 100 p.

FASSMAN, E. A.; BLACKBOURN, S. Urban runoff mitigation by a permeable pavement system over impermeable soils. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 15, n. 6, p. 475-485. 2010.

FERGUNSON, Bruce K. **Porous pavements**. CRC Press, 2005, 577 p.

FLEK, C.M. Diagnóstico de patologias encontradas na BR-050 entre Araguari e Uberlândia. **Revista Constituinte**, v. 9, p. 48-61. 2017.

FONSECA, P. Misturas betuminosas drenantes – a experiência portuguesa. In: III ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, Belo Horizonte, 1998, **Anais [...]**. Belo Horizonte – MG. 1998.

FWA, T. F.; LIM, E.; TAN, K. H. Comparison of permeability and clogging characteristics of porous asphalt and pervious concrete pavement materials. **Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board**, v. 2511, p. 72-80. 2015.

GANGA, Y.; ARPINO, J.; FLEURY, M.; GOYON, V.; POIRER, J. C. Les nouvelles générations d'enrobés drainants – État de la Technique. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, Madri, 1997, **Anais [...]**. Madri – Espanha. 1997. p. 87-97.

GARCIA, E. S. H.; KOLODZIEJ, V. M.; THIVES, L. P.; TRICHÊS, G. Análise do desempenho de misturas asfálticas drenantes utilizando ligantes asfálticos modificados. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, Balneário Camboriú, 2019, **Anais [...]**. Balneário Camboriú – SC. 2019. p.1-10.

Groupe National “Caractéristiques de surface de chaussées”. **Note d’Information – Qualités d’usage des revêtements routiers em présence d’eau**. SETRA, Bagneux, França. GNCDS. 1996.

GONÇALVES, FJP. **Estudo do desempenho de misturas asfálticas convencionais e modificadas por polímeros**. 2000. 569p. Exame de Qualificação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2000.

GUNATILAKE, D.; MAMPEARACHCHI, W. K. Finite element modelling approach to determine optimum dimensions for interlocking concrete blocks used for road paving. **Road Materials and Pavement Design**, v. 2017, p. 1-17. 2017.

HENDERSON, V.; TIGHE, S. L.; NORRIS, J. Pervious concrete pavement. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2095, p. 13-21. 2009.

HOMEM, Tiago da Rosa. **Comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras**. 2002. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2002.

HSU, T.; CHEN, S.; HUNG, K. Performance evaluation of asphalt rubber in porous asphalt-concrete mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 3, p. 342-349. 2011.

HU, X.; DAI, K.; PAN, P. Investigation of engineering and filtration characteristics of porous asphalt concrete containing activated carbon. **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 1-27. 2018.

HUANG, J.; PEI, J.; LI, Y.; YANG, H.; LI, R.; ZHANG, J.; WEN, Y. Investigation on aggregate particles migration characteristics of porous asphalt concrete (PAC) during vibration compaction process. **Construction and Building Materials**, v. 243, p. 1-8. 2020.

HUANG, W.; CAI, X.; LI, X.; CUI, W.; WU, K. Influence of nominal maximum aggregate size and aggregate gradation on pore characteristics of porous asphalt concrete. **Materials**, v. 13, p. 1-16. 2020.

HUFFMAN, D. **Understanding pervious concrete**. The Construction Specifier, Alexandria – Estados Unidos, 2005, p. 41-49.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE Cidades**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/juiz-de-fora/panorama> . Acesso em: 27 de jul. de 2021.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE Educa**. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18313-populacao-rural-e-urbana.html> . Acesso em: 27 de jul. de 2021.

IDALGO, A. N.; CASTRO, J. A.; ALMEIDA, P. L.; SILVA, Y. C.; SILVA, M. J. M. Determinação do coeficiente de permeabilidade de elementos drenantes de concreto. **Revista Eletrônica Organizações e Sociedade**, v. 7, n. 8, p. 4-13. 2018.

JERJEN, I.; POULIKAKOS, L. D.; PLAMONDON, M.; SCHUETZ, P.; LUETHI, T.; FLISCH, A. Drying of porous asphalt concrete investigated by x-ray computed tomography. **Physics Procedia**, v. 69, p. 451-456. 2015.

JF registra um terço da chuva esperada para março em 36 horas. **Tribuna de Minas**, Juiz de Fora, 04 de mar. de 2020. Disponível em: <https://tribunademinas.com.br/noticias/cidade/04-03-2020/jf-tem-30-das-chuvas-de-marco-e-nivel-do-paraibuna-sobe-quase-2-metros.html> . Acesso em: 27 de jul. de 2021.

JIANG, W.; SHA, A.; XIAO, J. Experimental study on relationships among composition, microscopic void features, and performance of porous asphalt concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 04015028, p. 1-10. 2015.

JING, H.; ZHENDONG, Q.; PENGFEI, L.; DAWEI, W.; MARKUS, O. Investigation on the permeability of porous asphalt concrete based on microstructure analysis. **International Journal of Pavement Engineering**, p. 1-12. 2019.

KNIGHT, E. H. Practical considerations of pervious pavement design and construction in piedmont soils friday center park and ride lot. In: 2ND NATIONAL LOW IMPACT DEVELOPMENT CONFERENCE, Wilmington, 2007, **Anais [...]**. Wilmington – Estados Unidos. 2007. p. 307-315.

KOGBARA, R. B.; MASAD, E. A.; KASSEM, E.; SCARPAS, A. T.; ANUPAM, K. A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 602-617. 2016.

KUENNEN, T. A new era for permeable pavements. **Better Roads**, v. 73, n. 4. 2003.

LAL, S.; POULIKAKOS, L. D.; GILANI, S. M.; JERJEN, I.; VONTOBEL, P.; PARTL, M. N.; CARMELIET, J. C.; DEROME, D. Investigation of water uptake in porous asphalt concrete using neutron radiography. **Transport in Porous Media**, v. 105, n. 2, p. 431-450. 2014.

LAMB, Gisele Santoro. **Desenvolvimento e análise do desempenho de elementos de drenagem fabricados em concreto permeável**. 2014. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2014.

LEFEBVRE, G. **Porous asphalt**. PIARC Technical Committee on Flexible Roads, PIARC Technical Committee on Surface Characteristics, Permanent International Association of Road Congresses. Belgium. 1993.

LEITE, Leni Figueiredo Mathias. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. 1999. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, 1999.

LIMA, Vivia. JF está entre as cidades mineiras com alerta de chuva forte nesta sexta. **Tribuna de Minas**, Juiz de Fora, 23 de jan. de 2020. Disponível em: <https://tribunademinas.com.br/noticias/cidade/23-01-2020/jf-esta-entre-as-cidades-mineiras-com-alerta-de-chuva-forte-nesta-sexta.html> . Acesso em: 27 de jul. de 2021.

LIN, J. D.; HSU, C. Y.; CITRANINGRUM, A.; ADHITANA, P. The impact of different types of permeable pavement utilization on air temperature above the pavement. **Advanced Materials Research**, v. 723, p. 678-685. 2013.

LIN, J. D.; YEH, M. C.; SUNG, P. H.; SHIU, R. H. Preliminary study on x-ray computed tomography to evaluate voids in porous asphalt concrete. **Applied Mechanics and Materials**, v. 174, p. 345-353. 2012.

LIU, Q.; YU, W.; SCHLANGEN, E.; VAN BOCHOVE, G. Unravelling porous asphalt concrete with induction heating. **Construction and Building Materials**, v. 71, p.152-157. 2014.

LUGÃO, Wilson Gandini. **Análise da aderência entre pneu e pavimento com camada porosa de atrito no Aeroporto Internacional Tancredo Neves- MG.** 2008. 148p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG, 2008.

LUO, S.; LU, Q.; QIAN, Z. Performance evaluation of epoxy modified open-graded porous asphalt concrete. **Construction and Building Materials**, v. 76, p. 97-102. 2015.

LYONS, K. R.; PUTMAN, B. J. Laboratory evaluation of stabilizing methods for porous asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 772-780. 2013.

MACIEL, Emerson Rodrigues. **O emprego de borracha termoplástica tipo estireno-butadieno-estireno em cimentos asfálticos de petróleo.** 2010. 153p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas – SP, 2010.

Manejo de Águas Pluviais Urbanas. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro – RJ, MAPLU. 2009, 396 p.

MARQUES, G. L. O. Pavimentação. Juiz de Fora: UFJF, 2018. Notas de Aula.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória.** 2004. 490p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, 2004.

MAZZONETTO, C. Concreto permeável. **Infraestrutura urbana**, 2011. Disponível em: <http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/13/concreto-permeavel-alternativa-para-aumentar-a-permeabilidade-de-pavimentos-254481-1.aspx> . Acesso em: 28 de jul. de 2021.

MEURER FILHO, Edelino. **Estudo de granulometria para concretos asfálticos drenantes.** 2001. 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – SC, 2001.

MEVO BRASIL. Em 5 passos, como instalar pisograma. **Mevo Brasil**, 2018. Disponível em: <https://www.mevodobrasil.com/como-instalar-pisograma/> . Acesso em: 27 de jul. de 2021.

MICHAUT, J. P. Enrobé drainant à teneur en vide élevé: premier bilan. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, Madri, 1997, **Anais [...]**. Madri – Espanha. 1997. p. 133-147.

MO, L.; HUURMAN, M.; WU, S.; MOLNAAR, A. A. A. Mortar fatigue model for meso-mechanistic mixture design of ravelling resistant porous asphalt concrete. **Materials and Structure**, v. 47, p. 947-961. 2014.

MOMM, L. Pavimento drenante em concreto asfáltico. In: 7º ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, Vitória, 2002, **Anais** [...]. Vitória – ES. 2002. p. 27.

OLIVEIRA, Carlos Gustavo Macedo. **Estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto asfáltico drenante**. 2003. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília. Brasília – DF, 2003.

ORUE-ECHEVARRIA, A. B. Fabricación y puesta em obra. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, Madri, 1997, **Anais** [...]. Madri – Espanha. 1997. p. 459-475.

PARK, D. G.; SANDOVAL, N.; LIN, W.; KIM, H.; CHO, Y. H. A case study: evaluation of water storage capacity in permeable block pavement. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 18, n. 2, p. 514-520. 2014.

PAULA JUNIOR, Adilson Campos de. **Estudo do potencial de aplicação de resíduo de concreto em substituição ao agregado graúdo para concretos permeáveis**. 2019. 162p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora – MG, 2019.

PAVIMENTO intertravado: por que ele pode ser uma ótima solução para a sua construção? **Tecnosil**, 2021. Disponível em: <https://www.tecnosilbr.com.br/pavimento-intertravado-por-que-ele-pode-ser-uma-otima-solucao-para-a-sua-construcao/> . Acesso em: 27 de jul. de 2021.

PÉREZ-JIMENEZ, F.; MAJO, M.; ARMENGOL, F. S. C. Efecto de las mezclas porosas sobre el ruido de rodadura. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, Madri, 1997, **Anais** [...]. Madri – Espanha. 1997. p. 787-805.

PINTO, Liliane Lopes Costa Alves. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano**. 2011. 283p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 2011.

PORTO, H. G. **Pavimentos drenantes**, 1 ed., D&Z Computação Gráfica e Editora, São Paulo – SP, 1999.

POULIKAKOS, L. D.; GILANI, M. S.; DEROME, D.; JERJEN, I.; VONTOBEL, P. Time resolved analysis of water drainage in porous asphalt concrete using neutron radiography. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 77, p. 5-13. 2013.

POULIKAKOS, L. D.; PARTL, M. N. A multi-scale fundamental investigation of moisture induced deterioration of porous asphalt concrete. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 1025-1035. 2012.

QUANTAO, L.; SHAOPENG, W. Effects of steel wool distribution on properties of porous asphalt concrete. **Key Engineering Materials**, v. 599, p. 150-154. 2014.

RAZ, R. T. Conservación de la permeabilidad en las mezclas porosas. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, Madri, 1997, **Anais** [...]. Madri – Espanha. 1997. p. 661-677.

RODRIGUES FILHO, Oswaldo Sansone. **Características de aderência de revestimentos asfálticos aeroportuários. Estudo de caso do aeroporto Internacional de São Paulo / Congonhas**. 2006. 290p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo – Escola Politécnica. São Paulo – SP, 2006.

ROY, A. H.; WENGER, S. J.; FLETCHER, T. D.; WALSH, C. J.; LADSON, A. R.; SHUSTER, W. D.; THURSTON, H. W.; BROWN, R. R. Impediments and solutions to sustainable, watershed-scale urban stormwater management: Lessons from Australia and the United States. **Environmental Management**, v. 42, p. 344–359. 2008.

RUBIO, B.; COLÁS, M. del M. Mezclas drenantes a frío. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, Madri, 1997, **Anais** [...]. Madri – Espanha. 1997. p. 177-195.

RUÍDO. **Dicionário online do Dício**, 2020. Disponível em <https://www.dicio.com.br/ruído-2> . Acesso em 31 jul. 2020.

RUIZ, A. Caracterización en laboratorio. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, Madri, 1997, **Anais** [...]. Madri – Espanha. 1997. p. 287-307.

SANTOS, Edimar de Limas dos. **Análise histórica de atrito de medição das pistas do aeroporto Santos Dumont – RJ**. 2004. 123p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil - Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos – SP, 2004.

SAÑUDO-FONTANEDA, L. A.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, J.; CALZADA-PÉREZ, M. A.; CASTRO-FRESNO, D. Infiltration behaviour of polymer-modified porous concrete and porous asphalt surfaces used in suds techniques. **CLEAN- Soil, Air, Water**, v. 42, n. 2, p. 139-145. 2014.

SCARATI MARTINS, J. R. **Programa de capacitação em drenagem urbana e manejo sustentável de águas pluviais – gestão de drenagem urbana e inovações tecnológicas em micro drenagem**. Apostila de Curso, Volume II, 2006. FCTH – FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA.

SCHNEIDER, Daniel. **Determinação do teor de asfalto para enquadramento de uma mistura asfáltica aberta como camada porosa de atrito**. 2016. 78p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – UNIVATES. Lajeado – RS, 2016.

SCHUELLER, Thomas R. **Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs**. Metropolitan Washington Council of Government. Washington – Estados Unidos. 1987.

SCHVAICKARDT, C. M.; MATTOS, J. R. G. Proposta de traço para blocos de concreto de pavimento intertravado. **TECNO-LÓGICA**, v. 22, n. 2, p. 157-166. 2018.

SILLER, A. G. Factores a tener em cuenta em el estudio de mezclas drenantes. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, Madri, 1997, **Anais** [...]. Madri – Espanha. 1997. p. 351-363.

SILVA, F.B. Pavimentos de concreto permeável. **Revista Técnica**, São Paulo, v.190. 2012. Disponível em: <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/190/artigo288015-1.aspx> . Acesso em 28 de jul. de 2021.

SILVA, Gustavo Barbosa Lima da. **Avaliação experimental sobre a eficiência de superfícies permeáveis com vistas ao controle do escoamento superficial em áreas urbanas**. 2006. 180p. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília. Brasília – DF, 2006.

SILVA, João Paulo Souza. **Aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos aeroportuários**. 2008. 153p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília. Brasília – DF, 2008.

SIMIELE, Daniel. **Aproveitamento de resíduos de concreto na confecção de peças para pavimento intertravado de concreto**. 2010. 119p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista – Campus de Ilha Solteira. Ilha Solteira – SP, 2010.

SOTO, J. A. Estudio en laboratorio de mezclas drenantes. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, Madri, 1997, **Anais** [...]. Madri – Espanha. 1997. p. 425-439.

SOUZA, F. S. V.; NEVES, M. A.; BARROS, R. M. V. Avaliação da resistência à derrapagem nas rodovias do estado do Espírito Santo. In: 28ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Belo Horizonte, 1994, **Anais** [...]. Belo Horizonte – MG. 1994.

SOUZA, F. S. V.; NEVES, M. A.; LIMA E SILVA, P.; BARROS, R. M. V. Avaliação da resistência à derrapagem em pavimentos rodoviários. In: 27ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Teresina, 1993, **Anais** [...]. Teresina – PI. 1993.

SOUZA, Sérvulo A. de. **Avaliação da capacidade de escoamento da água em mistura asfáltica drenante: proposta de ensaio em laboratório**. 2008. 140p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, 2008.

SOUZA, U. E. L.; PALIARI, J. C.; AGOPYAN, V.; ANDRADE, A. C. Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de edifícios: uma abordagem progressiva. **Ambiente Construído**, v. 4, n. 4, p. 33-46. 2004.

SWART, J. H. Experience with porous asphalt in the Netherlands. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, Madri, 1997, **Anais** [...]. Madri – Espanha. 1997. p. 1019-1035.

TAKAKASHI, S.; PARTL, M. N. Improvement of Mix Design for Porous Asphalt. **Road Materials and Pavement Design**, v. 2, p. 283-296. 2001.

TANG, T.; ANUPAM, K.; KARBERGEM, C.; SCARPAS, A.; ERKENS, S. A finite element study of rain intensity on skid resistance for permeable asphalt concrete mixes. **Construction and Building Materials**, v. 220, p. 464-475. 2019.

TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. **Pervious concrete pavements**. EB302, Portland Cement Association, Illinois, 36p. 2004.

TERRA, D. L. R.; COSTA, T. F.; FARIA, L. P. P.; RAMOS, G. M. P. G. Estudo da aplicabilidade do concreto poroso asfáltico: uma revisão. **Revista Petra**, v. 3, n. 2, p. 179-201. 2017.

TUCCI, Carlos. **Gestão das águas pluviais urbanas: saneamento para todos**. Programa de Modernização do Setor de Saneamento, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades, Brasília – DF, 197p. 2006.

TUCCI, Carlos. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 7. Ed. Porto Alegre. Editora UFRGS/ABRH, 2009.

URBONAS, B.; STAHR, P. **Stormwater best management practices and detention**. Prentice Hall. New Jersey – Estados Unidos. 1993.

UYGUNOGLU, T. Comparison of properties of prefabricated interlocking pavement blocks cured at different conditions. **Revista de la Construcción**, v. 15, n. 2, p. 125-134. 2016.

VILLANUEVA, A.; TUCCI, C. E. M. Hidrologia urbana no IPH: pesquisa e aplicação. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE MANEJO DEL AGUA PLUVIAL URBANA, 1997, **Anais** [...]. 1997. p.154-162.

VIRGILIIS, Afonso Luís Corrêa de. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. 2009. 191p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 2009.

VOLUME de chuvas em JF já passa da metade do esperado para o mês. **Tribuna de Minas**, Juiz de Fora, 06 de jan. de 2020. Disponível em: <https://tribunademinas.com.br/noticias/cidade/06-01-2021/temporal-causa-alagamentos-em-juiz-de-fora.html> . Acesso em: 27 de jul. de 2021.

WANG, H.; DING, Y.; LIAO, G.; AI, C. Modeling and optimization of acoustic absorption for porous asphalt concrete. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 04016002, p. 1-9. 2016.

WEI, J.; JING-JING, X. Hamburg wheel tracking test for porous asphalt concrete. **Applied Mechanics and Materials**, v. 178, p. 1338-1343. 2012.

WOODSIDE, A. R.; WOODWARD, W. D. H.; ANDERSON, G. A. L. Noise measurement of porous asphalt. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, Madri, 1997, **Anais [...]**. Madri – Espanha. 1997. p. 821-843.

XU, J. H.; CHEN, S. L.; WANG, Y.; LI, G. Research on mixture design and mechanical performance of porous asphalt concrete in cold regions. **Advanced Materials Research**, v. 299-300, p. 770-773. 2011.

XU, S.; LIU, X.; TABAKOVIC´, A.; SCHLANGEN, E. Investigation of the potential use of calcium alginate capsules for self-healing in porous asphalt concrete. **Materials**, v. 12, n. 1, p. 1-13. 2019.

ZEGARRA, Jorge Rodolfo Escalante. **Avaliação de misturas produzidas com ligantes asfálticos peruanos convencional PEN 60/60 e modificados por polímero SBS tipo I 60/60 e PG 76-22**. 2007. 264p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo. São Carlos – SP, 2007.

ZHANG, Y.; VAN DE VEM, M. F. C.; MOLENAAR, A. A. A.; WU, S. P. Assessment of effectiveness of rejuvenator on artificially aged porous asphalt concrete. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 286-292. 2016.

ZHANG, Y.; VAN DE VEM, M.; MOLENAAR, A. A. A.; WU, S. P. Preventive maintenance of porous asphalt concrete using surface treatment technology. **Materials and Design**, p. 1-28. 2016.

ZHANG, Y.; VERWAAL, W.; VAN DE VEN, M. F. C.; MOLENAAR, A. A. A.; WU, S. P. Using high-resolution industrial CT scan to detect the distribution of rejuvenation products in porous asphalt concrete. **Construction and Building Materials**, v. 100, p. 1-10. 2015.

ZHAO, Y.; JIANG, J.; DAI, Y.; ZHOU, L.; NI, F. Thermal property evaluation of porous asphalt concrete based on heterogeneous meso-structure finite element simulation. **Applied Sciences**, v. 10, n. 5, p. 1-21. 2020.

ZHAO, Y.; WANG, X.; JIANG, J.; ZHOU, L. Characterization of interconnectivity, size distribution and uniformity of air voids in porous asphalt concrete using X-ray CT scanning images. **Construction and Building Materials**, v. 213, p. 182-193. 2019.

ZHOU, C.; LIU, S.; YUAN, Q. Experience of replacing basalt aggregate by limestone's in porous asphalt concrete. **Advanced Materials Research**, v. 1025-1026, p. 749-754. 2014.

ZHOU, Qianqian. **Urban drainage design and climate change adaptation decision making**. 2012. 73p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Technical University of Denmark. Dinamarca, 2012.

APÊNDICE A – Análise estatística de perda ao cântabro

GraphPad Prism - [Project2:Col. stats of Data 1]

File Edit View Insert Change Arrange Window Help

Prism File Sheet Undo Clipboard Analysis Interpret Change Draw Write Text Export Print Send Help

Col. stats

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Data Set-A	0%	0,25%	0,50%	0,75%	Title	Title	Title	Title	Title	Title
	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
1	Number of values	3	3	3	3						
2											
3	Minimum	13.00	12.00	13.00	13.00						
4	25% Percentile	13.00	12.00	13.00	13.00						
5	Median	14.00	13.00	13.00	15.00						
6	75% Percentile	16.00	15.00	14.00	15.00						
7	Maximum	16.00	15.00	14.00	15.00						
8											
9	Mean	14.33	13.33	13.33	14.33						
10	Std. Deviation	1.528	1.528	0.5774	1.155						
11	Std. Error	0.8819	0.8819	0.3333	0.6667						
12											
13	Lower 95% CI of mean	10.54	9.539	11.90	11.46						
14	Upper 95% CI of mean	18.13	17.13	14.77	17.20						
15											
16	D'Agostino & Pearson omnibus normality t										
17	K2		N too small	N too small	N too small	N too small					
18	P value										
19	Passed normality test (alpha=0.05)?										
20	P value summary										
21											
22	Sum	43.00	40.00	40.00	43.00						
23											
24											

Col. stats of Data 1

Column statistics

GraphPad Prism - [Project2:1way ANOVA of Data 1]

File Edit View Insert Change Arrange Window Help

Prism File Sheet Undo Clipboard Analysis Interpret Change Draw Write Text Export Print Send Help

Open Prism Help Enter search terms

Family

- Data Tables
 - Data 1
 - Info
 - Project info 1
 - Results
 - Col. stats of Data 1
 - 1way ANOVA of Data 1
 - 1way ANOVA of Data 1
 - 1way ANOVA of Data 1
 - Col. stats of Data 1
 - 1way ANOVA of Data 1
 - Col. stats of Data 1
 - 1way ANOVA of Data 1
 - Col. stats of Data 1
 - 1way ANOVA of Data 1
 - Col. stats of Data 1
 - 1way ANOVA of Data 1
 - Col. stats of Data 1
 - 1way ANOVA of Data 1
 - Graphs
 - Data 1
 - Layouts

1way ANOVA				
1	Table Analyzed	Data 1		
2				
3	Kruskal-Wallis test			
4	P value	0.5648		
5	Exact or approximate P value?	Gaussian Approximation		
6	P value summary	ns		
7	Do the medians vary signif. (P < 0.05)	No		
8	Number of groups	4		
9	Kruskal-Wallis statistic	2.037		
10				
11	Dunn's Multiple Comparison Test	Difference in rank sum	Significant? P < 0.05?	Summary
12	0% vs 0,25%	2.833	No	ns
13	0% vs 0,50%	2.667	No	ns
14	0% vs 0,75%	-0.1667	No	ns
15	0,25% vs 0,50%	-0.1667	No	ns
16	0,25% vs 0,75%	-3.000	No	ns
17	0,50% vs 0,75%	-2.833	No	ns
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				

1way ANOVA of Data 1 | Tabular results

APÊNDICE B – Análise estatística de resistência à tração por compressão diametral

GraphPad Prism - [Project2:Col. stats of Data 1]

File Edit View Insert Change Arrange Window Help

Prism File Sheet Undo Clipboard Analysis Interpret Change Draw Write Text Export Print Send Help

Open Prism Help
Enter search terms

Col. stats		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
		Data Set-A	0%	0,25%	0,50%	0,75%	Title	Title	Title	Title	Title	Title
		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
1	Number of values		3	3	3	3						
2												
3	Minimum		0.6500	0.6800	0.7700	0.6900						
4	25% Percentile		0.6500	0.6800	0.7700	0.6900						
5	Median		0.6700	0.7800	0.7700	0.7300						
6	75% Percentile		0.7800	0.8100	0.8000	0.7400						
7	Maximum		0.7800	0.8100	0.8000	0.7400						
8												
9	Mean		0.7000	0.7567	0.7800	0.7200						
10	Std. Deviation		0.07000	0.06807	0.01732	0.02646						
11	Std. Error		0.04041	0.03930	0.01000	0.01528						
12												
13	Lower 95% CI of mean		0.5261	0.5876	0.7370	0.6543						
14	Upper 95% CI of mean		0.8739	0.9258	0.8230	0.7857						
15												
16	D'Agostino & Pearson omnibus normality t											
17	K2		N too small	N too small	N too small	N too small						
18	P value											
19	Passed normality test (alpha=0.05)?											
20	P value summary											
21												
22	Sum		2.100	2.270	2.340	2.160						
23												
24												

Col. stats of Data 1 | Column statistics

GraphPad Prism - [Project:1way ANOVA of Data 1]

File Edit View Insert Change Arrange Window Help

Prism File Sheet Undo Clipboard Analysis Interpret Change Draw Write Text Export Print Send Help

Open Prism Help Enter search terms

Family

- Data Tables
 - Data 1
 - Info
 - Project info 1
 - Results
 - Col. stats of Data 1
 - 1way ANOVA of Data 1
 - 1way ANOVA of Data 1
 - 1way ANOVA of Data 1
 - Col. stats of Data 1
 - 1way ANOVA of Data 1
 - Col. stats of Data 1
 - 1way ANOVA of Data 1
 - Col. stats of Data 1
 - 1way ANOVA of Data 1
 - Col. stats of Data 1
 - 1way ANOVA of Data 1
 - Graphs
 - Data 1
 - Layouts

1way ANOVA				
1	Table Analyzed	Data 1		
2				
3	Kruskal-Wallis test			
4	P value	0.3176		
5	Exact or approximate P value?	Gaussian Approximation		
6	P value summary	ns		
7	Do the medians vary signif. (P < 0.05)	No		
8	Number of groups	4		
9	Kruskal-Wallis statistic	3.525		
10				
11	Dunn's Multiple Comparison Test	Difference in rank sum	Significant? P < 0.05?	Summary
12	0% vs 0,25%	-4.000	No	ns
13	0% vs 0,50%	-4.500	No	ns
14	0% vs 0,75%	-0.8333	No	ns
15	0,25% vs 0,50%	-0.5000	No	ns
16	0,25% vs 0,75%	3.167	No	ns
17	0,50% vs 0,75%	3.667	No	ns
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				

1way ANOVA of Data 1 Tabular results

APÊNDICE C – Análise estatística de módulo de resiliência

GraphPad Prism - [Project2:Col. stats of Data 1]

File Edit View Insert Change Arrange Window Help

Prism File Sheet Undo Clipboard Analysis Interpret Change Draw Write Text Export Print Send Help

Open Prism Help Enter search terms

Col. stats		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
		Data Set-A	0%	0,25%	0,50%	0,75%	Title	Title	Title	Title	Title	Title
		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
1	Number of values		9	9	9	9						
2												
3	Minimum		2.917	2.772	1.903	1.647						
4	25% Percentile		2.997	3.478	2.295	1.774						
5	Median		3.475	3.777	2.754	2.376						
6	75% Percentile		4.453	4.426	2.906	3.676						
7	Maximum		4.609	4.767	3.150	3.976						
8												
9	Mean		3.686	3.880	2.640	2.639						
10	Std. Deviation		0.7027	0.6203	0.3954	0.9162						
11	Std. Error		0.2342	0.2068	0.1318	0.3054						
12												
13	Lower 95% CI of mean		3.146	3.403	2.336	1.935						
14	Upper 95% CI of mean		4.226	4.356	2.944	3.343						
15												
16	D'Agostino & Pearson omnibus normality t											
17	K2		3.782	0.1330	1.381	2.168						
18	P value		0.1510	0.9357	0.5013	0.3382						
19	Passed normality test (alpha=0.05)?		Yes	Yes	Yes	Yes						
20	P value summary		ns	ns	ns	ns						
21												
22	Sum		33.18	34.92	23.76	23.75						
23												
24												

Col. stats of Data 1 Column statistics

APÊNDICE D – Análise estatística do coeficiente de permeabilidade

GraphPad Prism - [Project2:Col. stats of Data 1]

File Edit View Insert Change Arrange Window Help

Prism File Sheet Undo Clipboard Analysis Interpret Change Draw Write Text Export Print Send Help

Open Prism Help Enter search terms

Col. stats		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
		Data Set-A	0%	0,25%	0,50%	0,75%	Title	Title	Title	Title	Title	Title
		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
1	Number of values		9	9	9	9						
2												
3	Minimum		1.634	2.120	2.202	1.767						
4	25% Percentile		1.646	2.125	2.233	1.787						
5	Median		1.664	2.141	2.249	1.891						
6	75% Percentile		1.696	2.181	2.276	2.008						
7	Maximum		1.717	2.192	2.320	2.053						
8												
9	Mean		1.671	2.149	2.256	1.899						
10	Std. Deviation		0.02782	0.02806	0.03425	0.1060						
11	Std. Error		0.009274	0.009352	0.01142	0.03534						
12												
13	Lower 95% CI of mean		1.649	2.128	2.229	1.817						
14	Upper 95% CI of mean		1.692	2.171	2.282	1.980						
15												
16	D'Agostino & Pearson omnibus normality t											
17	K2		0.6840	2.064	0.6458	1.557						
18	P value		0.7104	0.3562	0.7240	0.4590						
19	Passed normality test (alpha=0.05)?		Yes	Yes	Yes	Yes						
20	P value summary		ns	ns	ns	ns						
21												
22	Sum		15.04	19.34	20.30	17.09						
23												
24												

Col. stats of Data 1 | Column statistics

GraphPad Prism - [Project2:1way ANOVA of Data 1]

File Edit View Insert Change Arrange Window Help

Prism File Sheet Undo Clipboard Analysis Interpret Change Draw Write Text Export Print Send Help

Open Prism Help
Enter search terms

GraphPad PRISM

Family
Data Tables
Data 1
Info
Project info 1
Results
Col. stats of Data 1
1way ANOVA of Data 1
1way ANOVA of Data 1
1way ANOVA of Data 1
Col. stats of Data 1
1way ANOVA of Data 1
Graphs
Data 1
Layouts

1way ANOVA				
1	Table Analyzed	Data 1		
2				
3	Repeated Measures ANOVA			
4	P value	P<0.0001		
5	P value summary	***		
6	Are means signif. different? (P < 0.05)	Yes		
7	Number of groups	4		
8	F	138.6		
9	R squared	0.9454		
10				
11	Was the pairing significantly effective?			
12	R squared	0.002429		
13	F	0.1338		
14	P value	0.9969		
15	P value summary	ns		
16	Is there significant matching? (P < 0.05)	No		
17				
18	ANOVA Table	SS	df	MS
19	Treatment (between columns)	1.854	3	0.6181
20	Individual (between rows)	0.004775	8	0.0005969
21	Residual (random)	0.1070	24	0.004460
22	Total	1.966	35	
23				
24	Tukey's Multiple Comparison Test	Mean Diff.	q	Significant? P < 0.05?
				Summary
				95% CI of diff

1way ANOVA of Data 1 | Tabular results

GraphPad Prism - [Project2:1way ANOVA of Data 1]

File Edit View Insert Change Arrange Window Help

Prism File Sheet Undo Clipboard Analysis Interpret Change Draw Write Text Export Print Send Help

Open Prism Help
Enter search terms

GraphPad PRISM

Family
Data Tables
Data 1
Info
Project info 1
Results
Col. stats of Data 1
1way ANOVA of Data 1
1way ANOVA of Data 1
1way ANOVA of Data 1
Col. stats of Data 1
1way ANOVA of Data 1
Graphs
Data 1
Layouts

1way ANOVA						
23						
24	Tukey's Multiple Comparison Test	Mean Diff.	q	Significant? P < 0.05?	Summary	95% CI of diff
25	0% vs 0,25%	-0.4784	21.49	Yes	***	-0.5653 to -0.3916
26	0% vs 0,50%	-0.5848	26.27	Yes	***	-0.6716 to -0.4979
27	0% vs 0,75%	-0.2281	10.25	Yes	***	-0.3149 to -0.1412
28	0,25% vs 0,50%	-0.1064	4.777	Yes	*	-0.1932 to -0.01951
29	0,25% vs 0,75%	0.2503	11.25	Yes	***	0.1635 to 0.3372
30	0,50% vs 0,75%	0.3567	16.02	Yes	***	0.2698 to 0.4435
31						
32						
33						
34						
35						
36						
37						
38						
39						
40						
41						
42						
43						
44						
45						
46						

1way ANOVA of Data 1 | Tabular results

APÊNDICE E – Análise estatística de vazios comunicantes

GraphPad Prism - [Project2:Col. stats of Data 1]

File Edit View Insert Change Arrange Window Help

Prism File Sheet Undo Clipboard Analysis Interpret Change Draw Write Text Export Print Send Help

Open Prism Help Enter search terms

Col. stats		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
		Data Set-A	0%	0,25%	0,50%	0,75%	Title	Title	Title	Title	Title	Title
		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
1	Number of values		3	3	3	3						
2												
3	Minimum		63.67	70.13	80.39	66.97						
4	25% Percentile		63.67	70.13	80.39	66.97						
5	Median		66.49	72.88	83.11	69.40						
6	75% Percentile		73.59	73.75	84.19	70.05						
7	Maximum		73.59	73.75	84.19	70.05						
8												
9	Mean		67.92	72.25	82.56	68.81						
10	Std. Deviation		5.112	1.890	1.958	1.623						
11	Std. Error		2.951	1.091	1.131	0.9373						
12												
13	Lower 95% CI of mean		55.22	67.56	77.70	64.77						
14	Upper 95% CI of mean		80.61	76.95	87.43	72.84						
15												
16	D'Agostino & Pearson omnibus normality t											
17	K2		N too small	N too small	N too small	N too small						
18	P value											
19	Passed normality test (alpha=0.05)?											
20	P value summary											
21												
22	Sum		203.8	216.8	247.7	206.4						
23												
24												

Col. stats of Data 1 Column statistics

APÊNDICE F – Porcentagens de vazios dos CPS

Teor de Fibras	0%														
Número do CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	14	15	65
Peso Seco (g)	1132,2	1125,6	1144,8	1119,0	1134,5	1132,6	1129,6	1126,8	1135,1	1080,2	1122,6	1127,7	1115,2	1132,4	1124,8
h1 (mm)	66,57	66,52	67,33	65,77	66,57	66,18	66,60	66,42	66,92	65,12	67,46	66,48	66,72	68,09	67,28
h2 (mm)	66,89	66,28	67,20	65,07	66,49	66,65	67,30	67,00	67,28	65,21	66,97	66,26	66,35	67,83	67,76
h3 (mm)	66,66	66,64	67,48	64,49	66,70	67,16	66,50	67,03	67,26	65,46	66,77	66,90	67,61	67,90	67,57
h4 (mm)	67,13	66,65	67,23	65,27	66,83	66,19	66,70	66,83	67,10	65,44	66,67	67,60	66,22	67,82	67,18
Espessura média (cm)	6,68	6,65	6,73	6,52	6,66	6,65	6,68	6,68	6,71	6,53	6,70	6,68	6,67	6,79	6,74
Diâmetro (cm)	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16
Vazios (%)	18,1	18,2	17,8	17,0	17,7	17,7	18,2	18,5	18,3	20,0	18,9	18,4	19,2	19,4	19,4
Média de Vazios (%)	18,4														

Teor de Fibras	0,25%														
Número do CP	16	17	18	19	20	25	26	27	28	29	30	61	62	63	64
Peso Seco (g)	1134,9	1136,6	1125,9	1127,6	1126,9	1134,5	1132,2	1132,0	1127,7	1131,9	1138,4	1132,7	1122,8	1126,0	1123,1
h1 (mm)	67,60	67,49	66,78	67,34	66,85	68,15	67,88	67,84	68,08	66,84	66,86	66,82	66,28	66,59	66,46
h2 (mm)	68,18	67,60	66,75	67,07	67,37	68,08	68,21	68,05	67,53	67,93	67,00	67,44	66,12	66,01	66,05
h3 (mm)	68,19	68,15	67,52	67,52	66,94	68,56	67,13	67,74	67,45	67,19	66,74	67,76	66,15	66,18	65,88
h4 (mm)	68,23	68,10	66,59	67,44	66,60	68,29	68,29	67,29	67,72	66,83	66,45	66,79	66,89	66,12	65,75
Espessura média (cm)	6,81	6,78	6,69	6,73	6,69	6,83	6,79	6,77	6,77	6,72	6,68	6,72	6,64	6,62	6,60
Diâmetro (cm)	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16
Vazios (%)	19,2	18,8	18,5	18,9	18,4	19,5	19,2	19,0	19,3	18,4	17,4	18,3	18,0	17,6	17,6
Média de Vazios (%)	18,5														

Teor de Fibras	0,50%														
Número do CP	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Peso Seco (g)	1138,5	1131,4	1135,6	1127,6	1133,1	1126,7	1133,8	1133,4	1140,2	1127,0	1139,4	1134,2	1133,9	1131,6	1136,5
h1 (mm)	67,52	67,90	66,66	67,51	67,99	66,85	67,19	66,84	67,50	68,00	67,65	68,74	66,40	67,92	66,55
h2 (mm)	67,13	68,00	67,51	66,76	68,36	66,32	67,71	66,90	67,33	68,03	67,41	68,32	66,08	67,93	67,28
h3 (mm)	67,59	67,88	67,21	66,66	68,17	66,70	67,57	66,55	68,04	67,99	67,28	68,15	66,64	67,84	67,60
h4 (mm)	67,86	67,75	67,11	67,10	67,87	66,96	67,37	67,00	67,88	67,91	67,45	68,10	66,95	67,74	67,77
Espessura média (cm)	6,75	6,79	6,71	6,70	6,81	6,67	6,75	6,68	6,77	6,80	6,74	6,83	6,65	6,79	6,73
Diâmetro (cm)	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16
Vazios (%)	18,1	19,1	17,9	18,3	19,2	18,0	18,4	17,7	18,2	19,5	18,0	19,4	17,2	19,0	18,0
Média de Vazios (%)	18,4														

Teor de Fibras	0,75%																	
Número do CP	46	47	48	50	51	52	53	55	56	57	58	59	60	66	67	68	69	70
Peso Seco (g)	1121,2	1140,5	1139,3	1137,1	1134,0	1133,0	1134,2	1118,7	1132,2	1138,0	1128,1	1131,8	1132,6	1136,7	1136,8	1136,7	1121,6	1134,6
h1 (mm)	67,20	68,00	67,46	67,36	67,64	68,60	67,00	66,15	67,76	67,70	66,97	67,70	67,25	68,51	68,04	67,53	68,51	67,66
h2 (mm)	67,65	68,14	67,50	67,04	67,64	68,10	67,43	66,85	67,81	68,30	66,80	67,10	67,88	68,22	67,84	67,48	67,93	67,99
h3 (mm)	67,59	68,63	66,91	67,44	68,04	67,50	67,36	66,83	67,91	67,50	66,80	67,70	67,81	68,20	67,48	67,17	68,45	67,57
h4 (mm)	67,34	68,91	67,70	67,24	66,50	68,30	67,61	66,63	67,99	68,60	66,70	67,80	67,35	67,93	68,21	67,19	68,13	67,68
Espessura média (cm)	6,74	6,84	6,74	6,73	6,75	6,81	6,74	6,66	6,79	6,80	6,68	6,76	6,76	6,82	6,79	6,73	6,83	6,77
Diâmetro (cm)	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16
Vazios (%)	19,1	18,9	17,8	17,8	18,2	19,1	18,1	18,3	18,9	18,6	17,9	18,5	18,5	18,9	18,6	17,9	20,1	18,5
Média de Vazios (%)	18,5																	