



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Susana Viana Bittencourt

**Estudo da Utilização de Resíduos de Pavimentos Asfálticos
na Confeção de Concretos Permeáveis**

Rio de Janeiro
2017

Susana Viana Bittencourt

Estudo da utilização de resíduos de pavimentos asfálticos na confecção de concretos permeáveis



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientadora: Prof. Dr^a. Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares

Orientadora: Prof. Dr^a. Margareth da Silva Magalhães

Rio de Janeiro

2017

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

B624 Bittencourt, Susana Viana.
Estudo da utilização de resíduos de pavimentos asfálticos na
confeção de concretos permeáveis / Susana Viana Bittencourt –
2017.
138f.

Orientadores: Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares e
Margareth da Silva Magalhães.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil. 2. Pavimentos de concreto asfáltico -
Dissertações. 3. Sustentabilidade - Dissertações. 4. Concreto -
Permeabilidade - Dissertações. I. Tavares, Maria Elizabeth da
Nóbrega. II. Magalhães, Margareth da Silva. III. Universidade do
Estado do Rio de Janeiro. IV. Título.

CDU 624.012.45

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Susana Viana Bittencourt

Estudo da utilização de resíduos de pavimentos asfálticos na confecção de concretos permeáveis

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovado em: 22 de março de 2017.

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Luiz Antonio Vieira Carneiro
Instituto Militar de Engenharia - IME

Prof^a. Dr^a. Elaine Garrido Vazquez
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro – Poli - UFRJ

Prof^a. Dr^a. Regina Helena Ferreira de Souza
Faculdade de Engenharia – UERJ

Rio de Janeiro

2017

DEDICATÓRIA

À Deus, pois sem o Seu sustento nada seria possível.

AGRADECIMENTOS

Às minhas orientadoras, Prof. Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares, que acreditou em mim e não me deixou desistir em momentos de adversidades pessoais, e Prof. Margareth da Silva Magalhães, por toda a ajuda e orientação nos momentos cruciais desta pesquisa.

Aos amigos e colegas de profissão, Rafael Rangel e Leonardo Cavalcanti, que me apoiaram e me incentivaram nessa jornada.

Aos alunos de iniciação científica, Beatriz Bravin e Renan Lima, ao aluno de doutorado, Paulo Barreto, e ao funcionário de serviços gerais, Alberto Albino, conhecido como “Beto”, por sua colaboração e pró-atividade. Sem eles os ensaios de laboratório seriam inexecutáveis.

À instituição de ensino, ao laboratório de engenharia civil e todo seu quadro técnico pela colaboração para a realização dessa conquista.

À prefeitura do Rio de Janeiro e as gerências envolvidas, que disponibilizaram o volume necessário de resíduo de pavimentos asfálticos, os dados estatísticos e o uso do laboratório de tecnologia e pavimentação no Caju.

Aos meus pais, amigos e familiares, que suportaram meus momentos de tensão e ansiedade e compreenderam minha ausência e cansaço durante o período de dedicação ao estudo.

A todos aqueles que, embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

Sei estar abatido, e sei também ter abundância; em toda a maneira,
e em todas as coisas estou instruído, tanto a ter fartura, como a ter fome;
tanto a ter abundância, como a padecer necessidade.

Posso todas as coisas naquele que me fortalece.

Paulo aos Filipenses - FP 4.12-13

RESUMO

BITTENCOURT, Susana V. *Estudo da utilização de resíduos de pavimentos asfálticos na confecção de concretos permeáveis*. 2017. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Em virtude da relevância da preservação do meio ambiente e dos impactos gerados pelo desenvolvimento, tanto pela extração dos recursos minerais como pela produção de resíduos e sua destinação final, estudos são frequentemente elaborados para alcançar o melhor desempenho de um concreto através do reaproveitamento de resíduos, da redução dos recursos naturais, da utilização de recursos sustentáveis, da substituição ou do acréscimo de materiais que apresentem alto desempenho e menores custos. Somados à essa questão, existe a preocupação nos centros urbanos com relação ao aumento do índice de impermeabilização do solo, devido ao calçamento e pavimentação inadequados das áreas habitadas. Uma das alternativas que vem sendo estudada para pavimentos com tráfego leve ou para pedestres é a implantação de pavimentos drenantes, pois o volume total ou parcial das águas pluviais infiltra no subleito retardando seu escoamento, conseqüentemente, minimizando o problema das enchentes e dos bolsões de calor, além de contribuir para o reabastecimento do lençol freático. Em decorrência do exposto acima, esse estudo tem como objetivo principal a elaboração de um concreto permeável com substituição de agregado natural pelo resíduo asfáltico. Foram estudadas 5 misturas variando os teores em 0, 10, 20, 50 e 100%. Para analisar a influência deste parâmetro nas características mecânicas e hidráulicas, foram realizados ensaios de compressão axial, módulo de elasticidade, tração na flexão, massa específica, porosidade total, capilaridade, permeabilidade e colmatação. Os resultados obtidos indicaram que é possível obter desempenho satisfatório para características de permeabilidade de concreto permeável com uso de agregados reciclados de pavimento asfáltico. Contudo, do ponto de vista das propriedades mecânicas, os resultados indicaram uma redução na resistência à compressão e tração por flexão. Vale ressaltar, que mesmo com essa redução, as diferentes misturas desenvolvidas obtiveram valores mínimos estabelecidos em norma para utilização como pavimentação para tráfego de pedestre.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Resíduo de pavimento asfáltico; Concreto permeável; Permeabilidade; Pavimentação.

ABSTRACT

BITTENCOURT, Susana V. *Study of using flexible pavements residue for producing pervious concrete*. 2017. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Due to the importance of preserving the environment and the impacts generated by the development, both by the extraction of mineral resources and by the production of waste and its final destination, studies are often designed to achieve the best performance of a concrete through the reuse of waste, the reduction of natural resources, the use of sustainable resources, the substitution or the addition of materials that present high performance and lower costs. Added to this question, there is concern in urban centers regarding the increase in soil waterproofing index, due to inadequate pavement and paving of the inhabited areas. One of the alternatives that have been studied for low traffic pavements and pedestrian circulation is the implantation of drainage pavements, since the total or partial volume of rainwater infiltrates the subgrade, thus minimizing the problem of floods and pockets of heat, besides contributing to the replenishment of the water table. As a result of the above, this study has as main objective the elaboration of a permeable concrete with substitution of natural aggregate for asphaltic residue. Five mixtures were studied varying the levels of replacement in 0, 10, 20, 50 and 100%. In order to analyze the influence of this parameter on the mechanical and hydraulic characteristics, axial compression, modulus of elasticity, flexural tensile strength, density, total porosity, capillarity, permeability and clogging were performed. The results indicated that it is possible to obtain satisfactory performance for permeability characteristics of permeable concrete with the use of recycled aggregates of asphalt pavement. However, from the standpoint of mechanical properties, the results indicated a reduction in compressive strength and flexural tensile strength. It is worth noting that even with this reduction, the different mixtures developed obtained minimum values established in standard for use as pavement for pedestrian traffic.

Keywords: Sustainable; Recycled asphalt pavement; Pervious concrete; Permeability; Pavement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Áreas urbanizadas no Brasil 2005 (IBGE, 2017).....	23
Figura 2 – Detalhe do Estado do Rio de Janeiro (IBGE, 2017).....	24
Figura 3 - Distribuição de tensões. (a) pavimento rígido; (b) pavimento flexível (ARAUJO <i>et al.</i> , 2016).....	32
Figura 4 - Seção transversal típica do pavimento flexível (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2006).	33
Figura 5 – Esquema típico de uma fresadora de pavimentos asfálticos (CRUZ, 2013)	36
Figura 6 - Fresagem a frio com carga direta	37
Figura 7 - Curva granulométrica do material fresado (BONFIM, 2010).....	37
Figura 8 - Tipos de fresagem quanto à rugosidade (BONFIM, 2010).....	39
Figura 9 - Disposição inadequada de 12 mil m ³ em São Joaquim – SC	40
Figura 10 – (a) Estocagem de RAP na usina; (b) Aspecto visual.....	41
Figura 11 – Usina de reciclagem no Caju. (a) Silo dos agregados e cabine de operação; (b) Cabine de operação, silo de estocagem e descarga da massa	42
Figura 12 - Reciclagem a quente "in situ" (WIRTGEN, 2008)	43
Figura 13 - Detalhe da reciclagem a frio com espuma de asfalto.....	44
Figura 14 - RAP em Estacionamento - Estádio Beira-Rio em Porto Alegre	45
Figura 15 – Resíduo de pavimentos asfálticos.....	51
Figura 16 – Redução da amostra (ABNT NBR NM27, 2001)	52
Figura 17 – Composição granulométrica: (a) # 31,7 mm; (b) # 12,7 mm	52
Figura 18 – Curva granulométrica do resíduo de pavimentos asfálticos com CAP ...	54
Figura 19 – (a) Peneirador mecânico; (b) Peneiramento do resíduo de pavimentos asfálticos	54
Figura 20 – Curva granulométrica do resíduo de pavimentos asfálticos peneirado ..	55
Figura 21 – Ensaio para determinação da massa específica do agregado miúdo de resíduo de pavimentos asfálticos (a) Teste para verificar a umidade superficial; (b) Frasco preenchido com água.....	56
Figura 22 – Ensaio para determinação da massa específica do agregado miúdo de resíduo de pavimentos asfálticos (a) Banho com temperatura controlada; (b) Remoção dos agregados para secagem à estufa.....	57

Figura 23 – Ensaio para determinação da massa específica dos agregados graúdos. (a) Massa imersa; (b) Remoção dos agregados para secagem à estufa.	60
Figura 24 – (a) Processo de extração do CAP; (b) Comparação entre amostras	64
Figura 25 – Curva granulométrica do resíduo de pavimentos asfálticos com e sem CAP	65
Figura 26 – Ensaio para determinação da massa específica máxima medida.....	66
Figura 27 – (a) Compactador Marshall; (b) Extrator do corpo de prova após compactação	67
Figura 28 – (a) Aferição das dimensões; (b) Pesagem do corpo de prova	67
Figura 29 – (a) Ensaio de tração por compressão diametral; (b) Corpo de prova rompido	68
Figura 30 – Curva granulométrica das britas.....	70
Figura 31 – Curva granulométrica da brita corrigida e do resíduo.....	71
Figura 32 – Concretagem. (a) Mistura dos agregados com a água; (b) Adição do cimento.....	75
Figura 33 – (a) Etapa final da concretagem; (b) Análise tátil visual do concreto	76
Figura 34 – Compactação manual dos corpos de prova cilíndricos	77
Figura 35 – Compactação manual dos prismas	78
Figura 36 – Compactação manual da placa.....	78
Figura 37 – Concreto 50% resíduo (a) Falhas na concretagem; (b) Detalhe.	79
Figura 38 – Deforma do concreto 100% resíduo (a) CP cilíndricos; (b) prismas.	80
Figura 39 – Identificação por cores. (a) concreto referência; (b) concreto com 10% resíduo.	81
Figura 40 – Identificação por cores e símbolos dos Corpos de prova cilíndricos	81
Figura 41 – Cura dos Corpos de prova cilíndricos e dos prismas. (a) Concreto com 10% resíduo; (b) Concreto com 20% resíduo.....	82
Figura 42 – (a) CP no molde; (b) Capeamento com enxofre.....	83
Figura 43 – Ensaio de massa específica no estado fresco. (a) Pesagem; (b) Detalhe.	85
Figura 44 – Ensaio de compressão axial do concreto de referência. (a) 7 dias; (b) 28 dias.....	86
Figura 45 – Concreto 100% resíduo. (a) Ensaio de módulo de deformação; (b) Detalhe do relógio comparador.	87

Figura 46 – Concreto 100% resíduo. (a) Ensaio de tração na flexão; (b) Prismas rompidos.....	88
Figura 47 – (a) Ensaio de tração por compressão diametral; (b) Detalhe da ruptura.	90
Figura 48 – Determinação da massa seca.....	91
Figura 49 – (a) Determinação da massa imersa; (b) Aferição da temperatura.....	92
Figura 50 – Ensaio de capilaridade. (a) Processo de imersão parcial; (b) Pesagem.....	93
Figura 51 – Ruptura diametral do CP.....	94
Figura 52 – Concreto 100% resíduo. (a) Pré-molhagem na posição central; (b) Detalhe.....	96
Figura 53 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em outras posições. (a) 1º quadrante; (b) 2º quadrante.	97
Figura 54 – Esquema usado para girar a placa.....	97
Figura 55 – (a) Camada de areia; (b) Ensaio de colmatação.....	99
Figura 56 – (a) Detalhe do efeito de confinamento; (b) Despejo circular e contínuo.....	99
Figura 57 – Curva comparativa do ensaio de compressão axial <i>versus</i> tempo de cura	103
Figura 58 – Resultado do ensaio de compressão axial aos 28 dias de idade	104
Figura 59 – Comparação entre resultados do ensaio de compressão axial.....	104
Figura 60 – Comparação entre resultados normalizados do ensaio de compressão axial.....	105
Figura 61 – Curva tensão <i>versus</i> deformação. (a) concreto referência; (b) concreto com 10% resíduo	106
Figura 62 – Curva tensão <i>versus</i> deformação. (a) concreto com 20% resíduo; (b) concreto com 50% resíduo.....	107
Figura 63 – Curva tensão <i>versus</i> deformação do concreto com 100% resíduo	107
Figura 64 – Comparação entre as curva tensão <i>versus</i> deformação	108
Figura 65 – Comparação de resultados do ensaio de tração na flexão	110
Figura 66 – Comparação de resultados normalizados do ensaio de tração na flexão	110
Figura 67 – (a) Curva massa específica <i>versus</i> teor de resíduo; (b) Curva porosidade <i>versus</i> teor de resíduo.....	112
Figura 68 – Aspecto visual da placa (a) concreto referência; (b) 10% resíduo	113
Figura 69 – Aspecto visual da placa (a) 20% resíduo; (b) 50% resíduo.....	114

Figura 70 – Aspecto visual da placa 100% resíduo.....	114
Figura 71 – Relação entre os valores de resistência à compressão <i>versus</i> massa específica	115
Figura 72 – Distribuição da água no interior dos corpos de prova referente ao concreto referência.....	116
Figura 73 – Distribuição da água no interior dos corpos de prova referente ao concreto com 10% de resíduo de pavimentos asfálticos.....	117
Figura 74 – Distribuição da água no interior dos corpos de prova referente ao concreto com 20% de resíduo de pavimentos asfálticos.....	117
Figura 75 – Distribuição da água no interior dos corpos de prova referente ao concreto com 50% de resíduo de pavimentos asfálticos.....	117
Figura 76 – Distribuição da água no interior dos corpos de prova referente ao concreto com 100% de resíduo de pavimentos asfálticos.....	118
Figura 77 – Tração por compressão diametral <i>versus</i> teor de resíduo	119
Figura 78 – Coeficiente de permeabilidade no topo das placas	121
Figura 79 – Coeficiente de permeabilidade na base das placas	121
Figura 80 – Comparação entre os coeficientes de permeabilidade do topo e da base. (a) concreto referência; (b) concreto com 10% resíduo	122
Figura 81 – Comparação entre os coeficientes de permeabilidade do topo e da base. (a) concreto com 20% resíduo; (b) concreto com 50% resíduo.....	122
Figura 82 – Comparação entre os coeficientes de permeabilidade do topo e da base do concreto com 100% resíduo.....	123
Figura 83 – Relação do ensaio de permeabilidade <i>versus</i> teor de resíduo.....	124
Figura 84 – Curva permeabilidade após colmatação no tempo	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Manejo de águas pluviais no Brasil (Adaptado de PNSB, 2008).....	25
Tabela 2 – Concreto permeável – Proporções utilizadas (BATEZINI, 2013).....	26
Tabela 3 – Classificação do concreto permeável (Adaptado DELLATE, 2009).....	27
Tabela 4 – Classificação de permeabilidade (ABNT NBR 16416, 2015).....	27
Tabela 5 – Classificação do pavimento no Brasil (%) (Adaptado de CNT, 2015).....	30
Tabela 6 – Classificação do pavimento no Rio de Janeiro (Adaptado de CNT, 2015)	30
Tabela 7 – Volume anual de fresagem asfáltica (SECONSERVA, 2017)	40
Tabela 8 – Resultados de ensaios de diversos autores	49
Tabela 9 – Dados dos ensaios experimentais para obtenção da curva granulométrica do resíduo de pavimentos asfálticos sem CAP	53
Tabela 10 – Dados dos ensaios experimentais para obtenção da curva granulométrica do resíduo de pavimentos asfálticos peneirado.....	55
Tabela 11 – Resultados experimentais da caracterização da parcela miúda do resíduo do pavimento asfáltico.....	59
Tabela 12 – Resultados experimentais da caracterização da parcela graúda do resíduo do pavimento asfáltico.....	62
Tabela 13 – Resultados experimentais da caracterização do resíduo do pavimento asfáltico	62
Tabela 14 – Dados dos ensaios experimentais para obtenção da curva granulométrica do resíduo de pavimentos asfálticos sem CAP.....	64
Tabela 15 – Resultados experimentais da mistura asfáltica compactada	68
Tabela 16 – Dados experimentais da granulometria das britas.....	69
Tabela 17 – Dados experimentais da granulometria das britas corrigidas	71
Tabela 18 – Resultados experimentais da caracterização da brita corrigida	72
Tabela 19 – Composição do CPIII-40-RS (CSN Instituição, 2017)	73
Tabela 20 – Características e propriedades físicas (CSN Instituição, 2017).....	73
Tabela 21 – Quantitativo em massa dos materiais utilizados no estudo	74
Tabela 22 – Quantidade de corpos de prova ensaiados por mistura	84
Tabela 23 – Massa específica no estado fresco	102
Tabela 24 – Valores do ensaio de resistência à compressão axial	102

Tabela 25 – Módulo de elasticidade secante e tangente	109
Tabela 26 – Resistência à tração na flexão.....	109
Tabela 27 – Massa específica no estado endurecido e Porosidade	112
Tabela 28 – Resultados do ensaio de capilaridade.....	116
Tabela 29 – Resistência à tração por compressão diametral.....	119
Tabela 30 – Coeficiente de permeabilidade	123
Tabela 31 – Coeficiente de permeabilidade após colmatação	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DER	Departamentos de Estradas de Rodagem
CNT	Confederação Nacional de Transporte
DERSA	Desenvolvimento Rodoviário S.A
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
SECONSERVA	Secretaria Municipal de Conservação e Serviços Públicos
RAP	<i>Recycled Asphalt Pavement</i>
GC	Gerência de Conservação
CP	Corpo de Prova
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas

LISTA DE SÍMBOLOS

A	massa seca do corpo de prova
A ₁	massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo específico
A _a	absorção de água
B	massa imersa do corpo de prova
B ₁	massa do corpo de prova seco, assim que este atingir a temperatura de (23 ± 2)°C
b	largura média do corpo de prova
C	absorção de água por capilaridade
D	diâmetro do corpo de prova
D _{int}	diâmetro interno do recipiente cilíndrico
E _{cs}	módulo de deformação secante
F	força máxima registrada na máquina do ensaio
f _c	resistência à compressão
f _{ct,f}	resistência à tração na flexão
f _{ct,sp}	resistência à tração por compressão diametral
h	altura média do corpo de prova
l	coeficiente de infiltração
K	constante de 1.273.240 para unidades no SI
K ₁	constante de 4.583.666.000 para unidades no SI
L	comprimento do corpo de prova
l _{vão}	dimensão do vão entre os apoios
M	massa total do conjunto, tara mais concreto
M _{água}	massa de água
m	massa da amostra seca em estufa
m ₁	massa do conjunto (frasco + agregado)
m ₂	massa total (frasco + agregado + água)
m _a	massa em água da amostra
m _s	massa da amostra na condição saturada superfície seca
m _t	massa da tara
S	área da seção transversal

t	tempo de infiltração
V	volume do frasco
V_a	volume de água adicionada ao frasco
V_t	volume da tara
ϵ_a	deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão básica
ϵ_n	deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão maior
μ	massa específica do agregado seco
μ_a	massa específica aparente do agregado
$\mu_{\text{água}}$	massa específica da água
μ_{CP}	massa específica corpo de prova
μ_{ef}	massa específica no estado fresco
μ_s	massa específica do agregado saturado superfície seca
ρ	densidade do agregado seco
ρ_a	densidade aparente do agregado seco
ρ_s	densidade do agregado saturado superfície seca
σ_a	tensão básica
σ_n	tensão maior

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	19
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
1.1 Drenagem urbana.....	22
1.2 Concreto permeável	25
1.3 Pavimento	28
1.3.1 Pavimentação no Brasil.....	29
1.3.2 Estrutura do pavimento	31
1.3.3 Restauração do pavimento.....	34
1.3.4 Processo de fresagem.....	35
1.3.5 Resíduo asfáltico fresado	39
1.3.6 Reutilização do RAP	41
1.4 Estudos anteriores.....	45
2 METODOLOGIA DE PESQUISA	50
2.1 Caracterização dos materiais	50
2.1.1 Resíduo de pavimentos asfálticos com CAP	50
2.1.2 Resíduo de pavimentos asfálticos sem CAP	63
2.1.3 Britas	69
2.1.4 Cimento	72
2.2 Processos da concretagem	74
2.2.1 Dosagem	74
2.2.2 Concretagem	75
2.2.3 Moldagem.....	76
2.2.4 Desforma, Identificação e Cura	79
2.2.5 Capeamento.....	82
3 ENSAIOS LABORATORIAIS	84
3.1 Massa específica no estado fresco	84
3.2 Compressão axial	86
3.3 Módulo de deformação secante	87
3.4 Tração na flexão	88
3.5 Tração por compressão diametral	89
3.6 Massa específica no estado endurecido e Porosidade total	90

3.7 Capilaridade.....	93
3.8 Permeabilidade.....	94
3.9 Colmatação.....	98
4 RESULTADOS E ANÁLISE.....	101
4.1 Massa específica no estado fresco.....	101
4.2 Compressão axial.....	102
4.3 Módulo de deformação secante.....	106
4.4 Tração na flexão.....	109
4.5 Massa específica no estado endurecido e Porosidade total.....	112
4.6 Capilaridade.....	115
4.7 Condutividade hidráulica.....	120
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	127
5.1 Conclusões.....	127
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	130
REFERÊNCIAS.....	131

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do país, além de outros fatores, está diretamente relacionado à sua infraestrutura. Em virtude da ampla utilização das redes rodoviárias brasileiras, com o objetivo de garantir a segurança e a qualidade de trafegabilidade adequadas, a manutenção do pavimento é constantemente realizada, gerando um volume expressivo de resíduo asfáltico. Os impactos gerados pelo desenvolvimento, a desenfreada extração dos recursos minerais, a produção de resíduos e sua destinação final tornam a sustentabilidade um assunto que deve ser tratado com responsabilidade.

Com a crescente preocupação e evolução das soluções sustentáveis que garantam as condições socioeconômicas, o concreto permeável está ganhando destaque na pavimentação de áreas para tráfego leve nos grandes centros urbanos, diminuindo assim os transtornos correlacionados com o aumento do índice de impermeabilização do solo, devido ao calçamento e à pavimentação das áreas habitadas.

O concreto permeável pode ser classificado, de acordo com suas características mecânicas e hidráulicas, como hidráulico, normal e estrutural, e em relação a seu sistema de infiltração, como total, parcial ou sem infiltração. Além do grau de permeabilidade que está diretamente relacionado à velocidade de infiltração da água, variando de permeabilidade alta à praticamente impermeável.

A utilização do concreto permeável como pavimentação, além do escoamento superficial, contribui para o reabastecimento do lençol freático e reduz a área das ilhas de calor. Suas principais limitações são, em relação à resistência mecânica, poluição do lençol freático, no caso de infiltrar água contaminada, e falta de conhecimento e controle tecnológico disponíveis no mercado. Por isso, a importância da realização de estudos e pesquisas laboratoriais, abrangendo o conhecimento sobre o concreto permeável como pavimento drenante.

Motivação

Na Prefeitura do Rio de Janeiro, em virtude da sustentabilidade, há a orientação para utilizar revestimento asfáltico com 15% de borracha granulada de pneus descartados na execução dos pavimento flexíveis das obras de pavimentação e urbanização. Compartilhando da mesma visão, desde 2011, por exercer a função de fiscal de obras na Prefeitura do Rio de Janeiro e conviver com as dificuldades de se implantar sistemas de drenagem, onde as condições reais da obra inviabilizavam a escavação para o assentamento dos tubos de concreto armado (comumente utilizado diâmetro interno mínimo de 400 mm), e observando que, muitas das vezes, durante obras de reparo e manutenção em vias pavimentadas, o resíduo asfáltico produzido que deveria ter uma destinação final adequada é descartado, surgiu a ideia de reaproveitar o resíduo asfáltico na elaboração de um concreto permeável, que pudesse ser utilizado como pavimento permeável.

Objetivos

Este trabalho tem como objetivo tratar assuntos referentes à utilização do material proveniente do processo de recuperação de pavimento asfáltico através da remoção da área danificada, aqui denominado de resíduo asfáltico, na confecção de concreto permeável. Vale ressaltar que o resíduo de pavimentos asfálticos diferencia-se do material fresado devido ao método de remoção e à presença de material granular proveniente da base. A influência deste material em substituição ao agregado natural será analisada mecânica e hidraulicamente. Para isto, foram adotados os percentuais variando de 0% a 100% para teor de substituição do resíduo asfáltico na elaboração do concreto permeável visando sua utilização em pavimentação com tráfego leve ou tráfego para pedestres.

Estrutura da dissertação

Na introdução, foi abordado um panorama geral em relação ao conteúdo do estudo, como também, a motivação que levou a elaboração do mesmo, o objetivo principal a ser alcançado e a descrição da estrutura da dissertação.

No capítulo 1 é apresentada a revisão bibliográfica, abordando assuntos pertinentes relacionados à drenagem urbana, ao concreto permeável, à pavimentação e aos resumos de alguns trabalhos elaborados anteriormente.

O capítulo 2 refere-se à metodologia de pesquisa adotada, caracterização dos materiais, destacando a relevância da correção granulométrica dos agregados utilizados e descrição dos processos de concretagem e suas respectivas considerações.

No capítulo 3 são descritos os ensaios laboratoriais, realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, e a apresentação dos respectivos cálculos de acordo com as normas vigentes, bem como limitações e dificuldades encontradas e suas respectivas soluções adotadas.

No capítulo 4 são apresentados os resultados, curvas e gráficos referentes aos ensaios laboratoriais e a análise da influência do teor de resíduo de pavimentos asfálticos nas propriedades mecânicas e hidráulicas dos concretos permeáveis, bem como a comparação dos valores obtidos com trabalhos anteriores.

O capítulo 5 refere-se às considerações finais obtidas durante a elaboração e desenvolvimento do estudo, bem como, apresenta sugestões para estudos futuros.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Drenagem urbana

Para compreender o sistema de drenagem urbana, faz-se necessário abordar assuntos referentes à urbanização, tendo em vista que o saneamento básico está diretamente ligado ao desenvolvimento físico, social e financeiro de uma região. Quanto maior o índice de urbanização, maiores deveriam ser os investimentos para planejar, executar e manter os sistemas que o compõem funcionando adequadamente.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, as áreas urbanizadas no Brasil são classificadas em: muito densa, densa e pouco densa, dependendo da caracterização da ocupação. Grande adensamento das construções, verticalização e predominância de solo impermeabilizado são características de áreas centrais urbanizadas classificadas como manchas muito densas. Já as manchas densas contemplam áreas contínuas de ocupação, caracterizadas por construções baixas com pouco espaço entre si, contendo solo não impermeabilizado. Por último, as manchas pouco densas são caracterizadas por áreas de ocupação esparsa, área limítrofe entre a urbana e a rural.

Inevitavelmente o crescimento urbano altera as condições hidrológicas locais, quanto maior a ocupação menor a infiltração no solo e maior o escoamento superficial das águas pluviais. Segundo MATA-LIMA *et al* (2007) nas áreas urbanas o percentual de infiltração varia de 0 a 10% e conseqüentemente o percentual de escoamento superficial varia de 90% a 100% das águas pluviais.

No mapa disponibilizado pelo IBGE, conforme Figura 1, são apresentadas as áreas urbanizadas das grandes aglomerações urbanas brasileiras, com população superior a 350 mil habitantes no ano de 2000. O mapeamento foi baseado nas imagens de satélite compreendidas entre os anos de 2005 e 2007.



Figura 1 – Áreas urbanizadas no Brasil 2005 (IBGE, 2017)
 (Disponível em <http://www.ibge.gov.br>, acessado em 14/02/2017)

Para melhor compreensão e análise dos dados, toma-se como estudo o Estado do Rio de Janeiro, em especial o Município do Rio de Janeiro, por se tratar de área muito densa e ter solo praticamente impermeável. Os 17 municípios do Rio de Janeiro possuem sistema de drenagem.

Percebe-se da Figura 2 que há uma grande concentração urbana no município do Rio de Janeiro. Devido a esse fator, a preocupação é crescente em relação à eficiência da rede de drenagem, à disposição apropriada dos resíduos sólidos, bem como à preservação do meio ambiente.

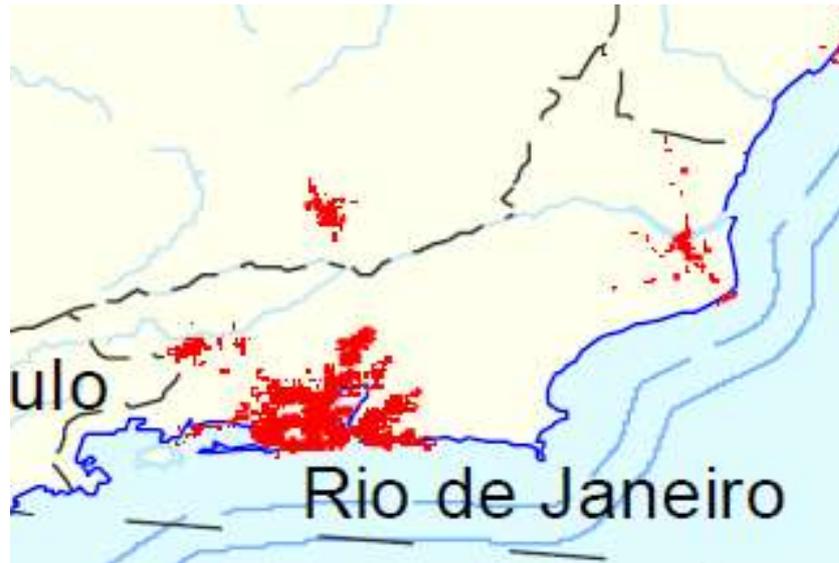


Figura 2 – Detalhe do Estado do Rio de Janeiro (IBGE, 2017)

O tema referente à drenagem urbana foi abordado pela primeira vez em âmbito nacional na pesquisa realizada em 2000, pela Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB. Esta apontou que 78,8% dos municípios do Brasil possuíam sistema de drenagem.

A partir de 2008, o termo utilizado para drenagem passou a ser denominado - manejo de águas pluviais. A PNSB em 2008 revelou um crescimento significativo na implantação de saneamento básico, que abrange o manejo de águas pluviais, o abastecimento de água, o esgotamento sanitário e o manejo de resíduos sólidos (limpeza urbana e coleta de lixo), em todo o país.

Segundo o IBGE, o manejo de águas pluviais existe em todos os municípios com mais de 300 mil habitantes. Estatisticamente, a probabilidade de um município disponibilizar de serviços de manejo de águas pluviais está diretamente relacionada ao número de seu habitantes.

Resumidamente, o sistema de manejo de águas pluviais pode ser classificado como subterrâneo ou superficial, rede única (água pluvial e esgoto no mesmo sistema) ou separada (ideal por ser ecologicamente correta), despejo em corpos receptores ou em reservatórios de acumulação. Os municípios que disponibilizam desse sistema foram considerados na pesquisa da PNSB em 2008. Os dados gerais desta pesquisa foram apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Manejo de águas pluviais no Brasil (Adaptado de PNSB, 2008)

Região	Total Geral de Municípios	Municípios com Manejo	Índice (%)
Norte	449	403	89,76
Nordeste	1793	1615	90,07
Sudeste	1668	1643	98,50
Sul	1188	1172	98,65
Centro-oeste	466	423	90,77
TOTAL	5564	5256	94,46

Vale ressaltar que essa pesquisa considera apenas sua existência, não abrange sua eficiência, que nos períodos de chuvas intensas é imprescindível para o rápido escoamento das águas pluviais evitando transtorno para a população, como alagamentos, inundações, além de todos os prejuízos materiais correlacionados e em situações extremas, casos com perda de vida humana.

O principal motivo para tais transtornos é a ocupação acentuada e desordenada nos grandes centros urbanos, devido à ausência de instrumentos regularizadores, assim como às legislações municipais, leis de uso e ocupação do solo, planos diretores e urbanísticos, ou à omissão dos órgãos fiscalizadores.

1.2 Concreto permeável

Com a crescente preocupação e evolução das soluções sustentáveis que garantam as condições socioeconômicas, o concreto permeável está ganhando destaque na pavimentação de áreas para tráfego leve e pedestres nos grandes centros urbanos, diminuindo assim os transtornos gerados pelo elevado grau de impermeabilização do solo devido à ocupação acentuada e desordenada que reflete negativamente em questões ambientais.

O concreto permeável tem por sua maior característica o elevado índice de vazios devido à sua composição granulométrica, com quantidade reduzida ou nula de agregados miúdos, facilitando assim a passagem de fluídos.

Conforme TENNIS *et al.* (2004), em relação à granulometria, as misturas podem utilizar agregados de um único diâmetro, contanto que este seja inferior a 19 mm, ou graduada variando de 19 mm a 4,8 mm, 9,5 mm a 2,4 mm e 9,5 mm a 1,2 mm. Também segundo os autores, a massa específica do concreto permeável varia entre 1.300 kg/m³ a 2.000 kg/m³.

Segundo o ACI 522 (2013) os fatores que mais influenciam as características mecânicas do concreto permeável são: a relação cimento/agregado, a compactação e o adensamento. Geralmente, os concretos permeáveis obedecem a um padrão para alcançar o melhor desempenho. Na Tabela 2 são apresentados os valores de consumo de materiais normalmente utilizados em concretos permeáveis.

Tabela 2 – Concreto permeável – Proporções utilizadas (BATEZINI, 2013)

Materiais	Consumo/proporção
Ligante hidráulico (kg/m ³)	270 a 415
Agregado graúdo (kg/m ³)	1.190 a 1700
Relação água/cimento (a/c) em massa	0,27 a 0,34
Relação cimento/agregado em massa	1:4 a 1:4,5
Relação agregado miúdo/gráudo em massa	0 a 1:1

A norma de concreto permeável considera o pavimento para tráfego de pedestre (não estrutural), aquele cujo o uso é exclusivo para pedestre. Já para tráfego leve permite a passagem de automóveis, caminhonete e camioneta, com volume diário médio de até 400, podendo ocasionalmente ser utilizado por ônibus e caminhões em número inferior a um volume diário médio de 20 por faixa de tráfego, contudo, a ABNT NBR 16416 (2015) não define o tráfego pesado.

Já segundo a CE-18:600.11 (2011), define que a caracterização do tipo de tráfego de veículos depende no número de solicitações do eixo padrão (80 kN) para o período de projeto de 20 anos, onde para tráfego leve o N típico de 10⁵ solicitações; médio de 5x10⁵; meio pesado de 2x10⁶; pesado de 2x10⁷ e para tráfego muito pesado o N típico de 5x10⁷ solicitações.

Basicamente existem três tipos de concreto permeável que se diferenciam pelas propriedades físicas e mecânicas e conseqüentemente sua apropriada utilização, conforme apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação do concreto permeável (Adaptado DELLATE, 2009)

Classificação	Resistência Mecânica	Permeabilidade	Aplicação
Hidráulico	Baixa	Elevada	Não estrutural
Normal	Intermediária	Intermediária	Tráfego leve
Estrutural	Elevada	Baixa	Tráfego pesado

A difusão do concreto permeável é recente no Brasil. Até a publicação da norma ABNT NBR 16416 (2015), pesquisadores apenas utilizavam normas estrangeiras. A norma brasileira descreve o pavimento permeável como “pavimento que atende simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento e cuja estrutura permite a percolação e/ou acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar dano à sua estrutura.”

Segundo a norma ABNT NBR 16416 (2015), a classificação dos pavimentos de concretos permeáveis varia de acordo com o grau de permeabilidade apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação de permeabilidade (ABNT NBR 16416, 2015)

Classificação do Pavimento		
Grau de permeabilidade	Coefficiente de permeab. k (m/s)	Coefficiente de permeab. k (mm/h)
Alta	$> 10^{-3}$	> 3600
Média	10^{-3} a 10^{-5}	3600 a 36
Baixa	10^{-5} a 10^{-7}	36 a 0,36
Muito Baixa	10^{-7} a 10^{-9}	0,36 a 0,0036
Praticamente Impermeável	$< 10^{-9}$	$< 0,0036$

Segundo essa norma brasileira, o pavimento de concreto permeável, moldado no local e recém executado, para ser considerado permeável, além de atingir a resistência mecânica mínima normatizada (resistência à tração na flexão de 1,0 MPa e 2,0 MPa, para tráfego de pedestre e para tráfego leve, respectivamente), sua massa específica de projeto deve ser no mínimo 1600 kg/m³ e deve possuir coeficiente de permeabilidade maior do que 10⁻³ m/s, como visto na Tabela 4. É de conhecimento que com o passar do tempo e utilização, o pavimento sofre o fenômeno da colmatação; logo, o mesmo deve ser submetido a processos de limpeza e de manutenção, através de varrição mecânica ou manual, jato de água e sucção do material suspenso.

O pavimento permeável difere-se também com relação ao sistema de infiltração. O pavimento pode ser dimensionado para infiltração:

- Total – quando a água precipitada infiltra no subleito em sua totalidade;
- Parcial – infiltração parcial e o restante de água fica acumulado para ser drenado;
- Sem infiltração – a água em sua totalidade fica acumulada e é drenada.

A utilização do concreto permeável como pavimentação, além do escoamento superficial, contribui para o reabastecimento do lençol freático e reduz a área das ilhas de calor. Suas principais limitações são em relação à resistência mecânica, à poluição do lençol freático, no caso de infiltrar água contaminada, e à falta de conhecimento e controle tecnológico disponíveis no mercado.

1.3 Pavimento

Para a melhor compreensão do trabalho, faz-se necessário abordar alguns assuntos sobre a história da pavimentação no Brasil, a evolução da rede rodoviária, os investimentos no setor, tipos de estruturas do pavimento, processo de restauração do pavimento através da fresagem, características do resíduo de pavimentos asfálticos e sua reutilização em soluções sustentáveis.

1.3.1 Pavimentação no Brasil

As rodovias federais são da responsabilidade do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. Cabe a este órgão as atividades de construção, manutenção, operação e administração da malha rodoviária. De maneira equivalente, as rodovias estaduais ficam a cargo dos Departamentos de Estradas de Rodagem – DER com atividades similares ao DNIT.

Segundo informações do Ministério dos Transportes, no ano de 2000, no Estado do Rio de Janeiro, menos de 25% das rodovias eram pavimentadas de um total de 22.229km. Esse percentual diminui quando se analisa somente as rodovias municipais, apenas 1.298km dos 15.868km eram pavimentadas, ou seja, cerca de 8,2%.

O baixo nível de investimentos fez com que em diversas rodovias não fossem realizados trabalhos de restauração e manutenção adequados, e que somados a um volume de tráfego elevado e uma frota de caminhões antiga, resultaram em um aumento no número de acidentes, no tempo de viagem e no custo operacional.

Como resultado, a malha rodoviária se encontrava em precárias condições de tráfego, com manutenção inadequada e elevado número de acidentes. No ano de 1999, o número de acidentes nas rodovias chegou a 115.429, sendo destes foram 32.294 e 5.140 com feridos e vítimas fatais, respectivamente.

A estratégia do governo, face às restrições de recursos, foi alocar a maioria dos investimentos nas rodovias que apresentavam condições ruim ou péssima. O resultado foi que as rodovias em estado regular ou superior a isso (bom, ótimo) pela quase total falta de manutenção se deterioraram ficando, na sua maioria, em condição regular. O fato é que diminuiu o percentual das rodovias intransitáveis, mas aumentou o percentual das rodovias em condições perigosas.

Segundo pesquisa realizada em 2015 pela Confederação Nacional de Transporte – CNT, considerando as condições de trafegabilidade do pavimento no estado geral, ou seja, analisando as condições do pavimento, sinalização e geometria da via, a situação das rodovias brasileiras são apresentadas na Tabela 5 de maneira resumida.

Tabela 5 – Classificação do pavimento no Brasil (%) (Adaptado de CNT, 2015)

País / Região	Total (km)	Ótimo	Bom	Regular	Ruim	Péssimo
Norte	11.661	9,4	11,3	45,5	10,4	23,4
Nordeste	27.555	3,2	7,1	35,2	6,0	48,5
Sudeste	28.461	0,7	10,3	28,9	10,5	49,6
Sul	17.829	3,3	13,6	34,3	15,0	33,8
Centro-oeste	15.257	2,1	10,1	41,0	9,1	37,7
TOTAL	100.763	3,1	10,1	35,4	9,8	41,6

Em um panorama geral das condições do pavimento brasileiro, a região sudeste, mais especificamente o Estado de São Paulo e o Estado do Rio de Janeiro apresentam os melhores índices do país. A seguir, na Tabela 6, são apresentados dados referentes ao Estado do Rio de Janeiro segundo a classificação do pavimento.

Tabela 6 – Classificação do pavimento no Rio de Janeiro (Adaptado de CNT, 2015)

Pavimento	Extensão Total	
	Km	%
Ótimo	552	22,0
Bom	1.004	39,9
Regular	530	21,1
Ruim	367	14,6
Péssimo	60	2,4
TOTAL	2.513	100,0

É preocupante saber que grande parte de nossas rodovias apresentam resultados entre regular e péssimo. Já se tornou rotina a convivência com pavimentos apresentando condições deploráveis de trafegabilidade como desgaste excessivo, trincas em malhas, remendos paliativos, afundamentos, ondulações, buracos e, em alguns casos, com a destruição total da superfície do pavimento.

A qualidade e quantidade de rodovias pavimentadas têm papel marcante na economia e no desenvolvimento nacional, além de estar diretamente relacionado à segurança e ao conforto dos usuários, como já mencionado. E geralmente, as obras de engenharia referentes aos empreendimentos rodoviários têm vida útil entre 10 e 20 anos, o que, inevitavelmente, leva a um processo de manutenção rotineiro, tanto corretiva quanto preventiva.

1.3.2 Estrutura do pavimento

Segundo o Manual de pavimentação asfáltica do DNIT (2006), o pavimento pode ser classificado de maneira geral, como:

- Flexível – é aquele que transmite tensões concentradas no ponto onde a força é aplicada (eixo dos veículos), onde todas as camadas que compõe a estrutura do pavimento sofrem deformação elástica e que não trabalham à tração. Geralmente é composto de revestimento asfáltico sobre camadas granulares;
- Rígido – é aquele onde as tensões se distribuem de forma quase uniforme, e possui revestimento com elevada rigidez, pouco deformável, que trabalha essencialmente à tração. Sua estrutura consiste basicamente em placas de concreto de cimento Portland apoiadas em uma camada de transição;
- Semi-rígido – Comporta-se por uma situação intermediária entre o pavimento flexível e o rígido. Normalmente é constituído por revestimento asfáltico sobre camadas estabilizadas quimicamente com cal ou cimento.

A Figura 3 apresenta a distribuição das tensões no solo dependendo do tipo de pavimento.

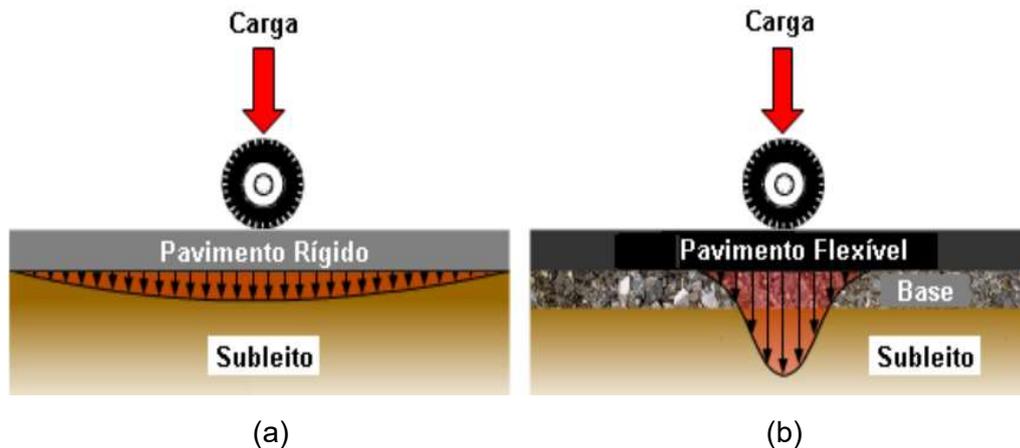


Figura 3 - Distribuição de tensões. (a) pavimento rígido; (b) pavimento flexível (ARAUJO *et al.*, 2016)

O dimensionamento do pavimento flexível é comandado pela resistência do sub-leito e do pavimento rígido pela resistência à tração do próprio pavimento, como também, a análise em relação à fadiga.

Os pavimentos flexíveis são dimensionados à compressão e à tração na flexão, e suas deformações admissíveis não levam a estrutura do pavimento à ruptura, segundo BERNUCCI *et al.* (2006).

A estrutura do pavimento flexível é constituída basicamente por camadas com diferentes finalidades e propriedades. A camada mais externa transmite os esforços para a camada imediatamente abaixo e assim por seguinte. São elas:

- Camada de rolamento – é o revestimento propriamente dito, composto por ligante asfáltico e agregados graúdos e miúdos. Sua finalidade é garantir a segurança e o conforto aos usuários da via;
- Camada de ligação ou *binder* – dependendo do projeto seu uso pode ser facultativo; na sua existência, faz-se necessário que a mesma receba um tratamento para promover aderência entre as camadas betuminosas, chamado pintura de ligação;
- Base – camada graduada de brita corrida; após sua compactação recebe uma camada de emulsão asfáltica, conhecida como imprimação; esta tem finalidade de aumentar a coesão superficial, impermeabilização e promover a aderência entre a base e o revestimento;
- Sub-base – camada de bloqueio, constituída de finos, pó-de-pedra;

- Reforço de subleito – pode ser necessário em trechos específicos, onde o subleito tem capacidade inferior ao estimado. O material utilizado depende do resultado de ensaios de campo; pode ser usado saibro, rachão, entre outros.

Na Figura 4 encontra-se ilustrada a estrutura do pavimento flexível para a melhor compreensão do exposto acima.

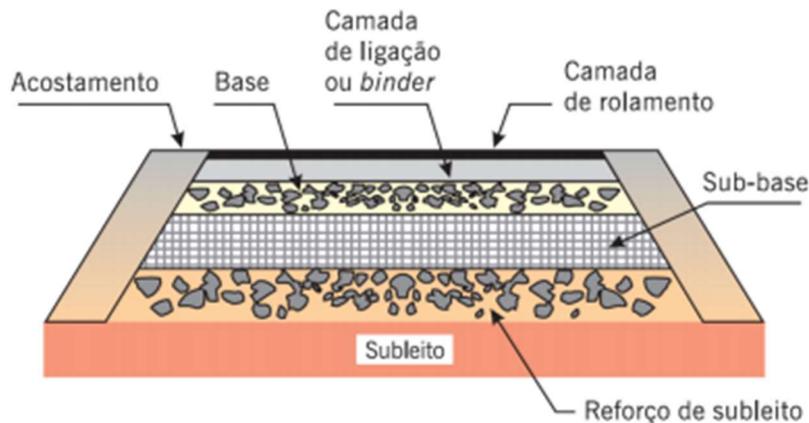


Figura 4 - Seção transversal típica do pavimento flexível (BERNUCCI *et al.*, 2006)

No contexto da pavimentação, novas técnicas têm surgido nos últimos anos de forma a reduzir os impactos ambientais causados tanto pela construção e manutenção quanto pela operação de rodovias. Alguns exemplos podem ser citados:

- Incorporação de resíduos em camadas de pavimentos, como escórias, resíduos de construção e demolição, borracha de pneu, resíduos industriais etc.;
- Reciclagem de pavimentos, de maneira a utilizar o mínimo de insumos virgens;
- Utilização de misturas mornas, reduzindo o consumo de energia e a emissão de gases;
- Adequação da infraestrutura de forma a atenuar o ruído (barreiras sonoras e pavimentos silenciosos);
- Incentivo ao uso de combustíveis renováveis (biodiesel, etanol, eletricidade) para propulsão de veículos;
- Limitação das taxas de emissões de poluentes, etc.

1.3.3 Restauração do pavimento

A ideia da reutilização do material extraído na restauração de vias danificadas foi uma solução encontrada devido à escassez de material asfáltico durante a crise do petróleo em 1970, resultando na recuperação das rodovias com condições satisfatória de trafegabilidade, solução esta com viabilidade técnica e financeira. O método e os equipamentos evoluíram ao longo dos anos possibilitando o desbaste do pavimento e a pré-determinação dessa profundidade.

Segundo BONFIM (2010), a primeira obra de restauração de pavimento no Brasil foi em 1980, na Via Anchieta em São Paulo, para o Desenvolvimento Rodoviário S.A. – DERSA com a utilização da fresadora americana Roto-Mill PR-525, da C.M.I.

O processo construtivo de reciclagem do material fresado consiste na desagregação de parte do pavimento flexível, sua correção granulométrica e adição de um aglomerante (cimento, cal, emulsão etc.), se necessário, espalhamento e compactação. Para esta restauração ser adequada, é essencial a análise do pavimento existente, e a verificação da condição superficial (avaliação funcional) quanto à condição do pavimento em suportar determinado carregamento (avaliação estrutural).

Segundo a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos – ABEDA (2006), “quando não existem problemas estruturais e a restauração é necessária para a correção de defeitos funcionais superficiais, são empregados geralmente tratamentos superficiais, microrrevestimento, lama asfáltica, entre outros, isoladamente ou combinados e antecedidos ou não por uma remoção de parte do revestimento antigo por fresagem”.

Em contra partida, conforme ABEDA (2006), “quando existe o comprometimento estrutural do pavimento ou perspectiva de aumento de tráfego, as alternativas de restauração ou reforço compreendem aquelas que restabelecem ou incrementam sua capacidade estrutural por meio da incorporação de novas camadas (recapeamento) à estrutura e/ou tratamento de camadas existentes (reciclagem, por exemplo)”.

Segundo o Manual de Reabilitação de Pavimentos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (DNER, 1998), alguns fatores devem ser

analisados antes da definição entre os diversos tipos de reciclagem, pois influenciam diretamente o seu desempenho, que são:

- Dados do projeto executivo;
- Limitações quanto à geometria da rodovia (horizontal e vertical);
- Histórico do desempenho do pavimento e das manutenções;
- Danos existente no pavimento, suas prováveis causas e consequências;
- Custos do reparo;
- Impactos ambientais;
- Intensidade do tráfego.

As principais vantagens da reciclagem são:

- Redução nos custos de construção;
- Conservação de agregados e ligantes;
- Preservação da geometria do pavimento existente;
- Manutenção da drenagem;
- Preservação do meio ambiente;
- Conservação de energia;
- Homogeneização e readequação estrutural;
- Rápida liberação da pista.

1.3.4 Processo de fresagem

Para a elaboração deste estudo, abordam-se questões referentes à técnica de restauração do pavimento através da remoção parcial do revestimento asfáltico, conhecida como fresagem. A Figura 5 apresenta o esquema típico de uma fresadora de pavimentos asfálticos.

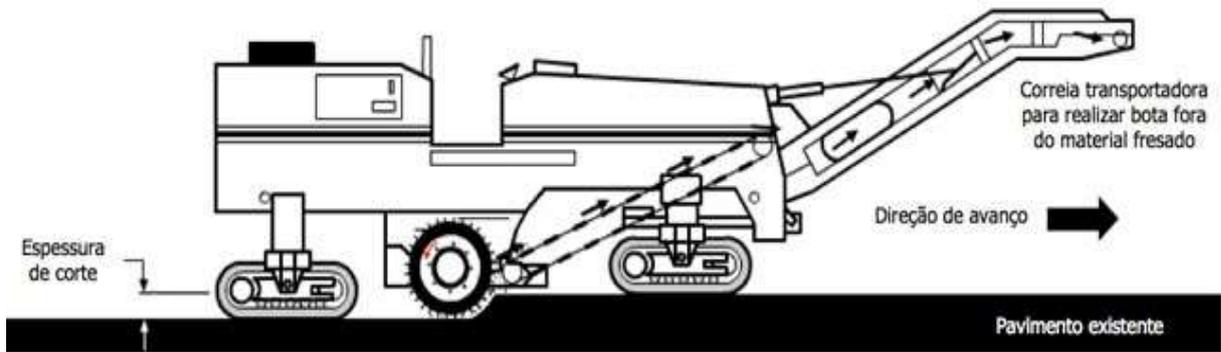


Figura 5 – Esquema típico de uma fresadora de pavimentos asfálticos (CRUZ, 2013)

O processo de fresagem pode se diferenciar quanto à temperatura de remoção, quente ou fria; quanto à profundidade, superficial, rasa ou profunda; e quanto à rugosidade, padrão, fina ou microfresagem. De uma maneira geral, são apresentadas essas diferenças.

Quanto à temperatura, no processo de fresagem a quente, o desbaste da camada é executado após o aquecimento do pavimento. Como o material é escarificado, não há o corte dos agregados, conseqüentemente, não há alteração relevante da curva granulométrica do revestimento. O material não é removido do local, o mesmo pode ser reciclado e associado ao material virgem para então ser compactado, ou pode ser compactado e posteriormente aplicada uma nova camada compactada de Concreto Betuminoso Usinado à Quente – CBUQ.

Já na fresagem a frio, o corte ou desbaste é executado em temperatura ambiente. Como parte do agregado é cortado, há a modificação da curva granulométrica do revestimento. O material produzido é elevado e lançado na caçamba do caminhão (carga direta), conforme mostra a Figura 6.



Figura 6 - Fresagem a frio com carga direta
(Local: Rua Santo Evaldo em Padre Miguel no Rio de Janeiro)

Como mencionado, a curva granulométrica sofre alteração devido à quebra/corte do agregado quando este é fresado em relação ao pavimento original. Vale ressaltar que o ligante betuminoso influencia o resultado da amostra. Com a permanência do Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP na amostra, esta apresentará aglutinação dos finos, conseqüentemente terá uma curva mais aberta, contudo, se o CAP, que é o ligante asfáltico da mistura, for extraído do material a curva apresenta um maior teor de finos. O gráfico apresentado na Figura 7 mostra essa influência.

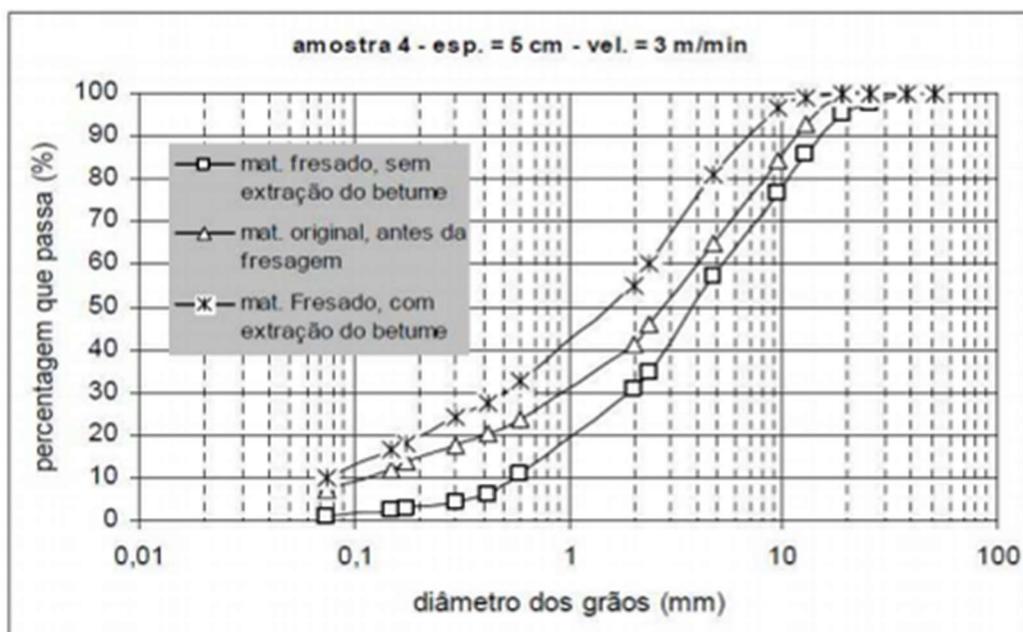


Figura 7 - Curva granulométrica do material fresado (BONFIM, 2010)

As propriedades físicas e reológicas do CAP são influenciadas pelo passar do tempo (tráfego, temperatura ambiente, ar incorporado nos vazios, radiação, intempéries), que refletem na consistência do asfalto e na rigidez da camada betuminosa. Sabendo-se desses efeitos, deve ser considerado que todo material fresado possui um teor de ligante asfáltico envelhecido, que pode ser recuperado adicionando aditivo químico (agente rejuvenescedor), conferindo propriedades semelhantes às de um ligante novo.

Quanto à profundidade, a fresagem superficial é recomendada para regularizar o pavimento e corrigir defeitos de exsudação e de deformação plástica. Por se tratar de um tratamento superficial, o recapeamento é dispensável. Além disso, vale ressaltar que essa rugosidade melhora a segurança, aumenta a aderência entre o pneu e o CBUQ, reduz o índice de derrapagem na pista, otimizando as condições do tráfego. Já a fresagem rasa é recomendada para sanar defeitos funcionais e em remendos superficiais, normalmente aplicada nas vias urbanas. A profundidade média de corte é de 50 mm, podendo ou não atingir a camada de ligação. E a fresagem profunda é recomendada para sanar problemas estruturais que surgem no pavimento, eliminação da área danificada (depressões, buracos), ou no aspecto funcional, para aumentar a segurança e restabelecimento do greide original das vias, nivelando os dispositivos da rede de drenagem pluvial. Por se tratar de uma fresagem profunda, pode atingir, além da camada de ligação, a base e até a sub-base.

Quanto à rugosidade, a fresagem padrão apresenta a distância lateral entre os dentes de corte de aproximadamente 15 mm, e é recomendada quando no projeto de recuperação se prevê a aplicação de uma nova camada de CBUQ. Já a fresagem fina, esta distância é de 8 mm e é recomendada na regularização de vias, dispensa o recapeamento, logo, melhora as condições de trafegabilidade e de segurança. E a microfresagem é recomendada na adequação dos perfis longitudinais, ou remoção da sinalização horizontal existente; dispensa o recapeamento; e a distância é de 2 mm a 3 mm. A Figura 8 ilustra a diferença entre os três tipos de rugosidade, que é visualmente perceptível.

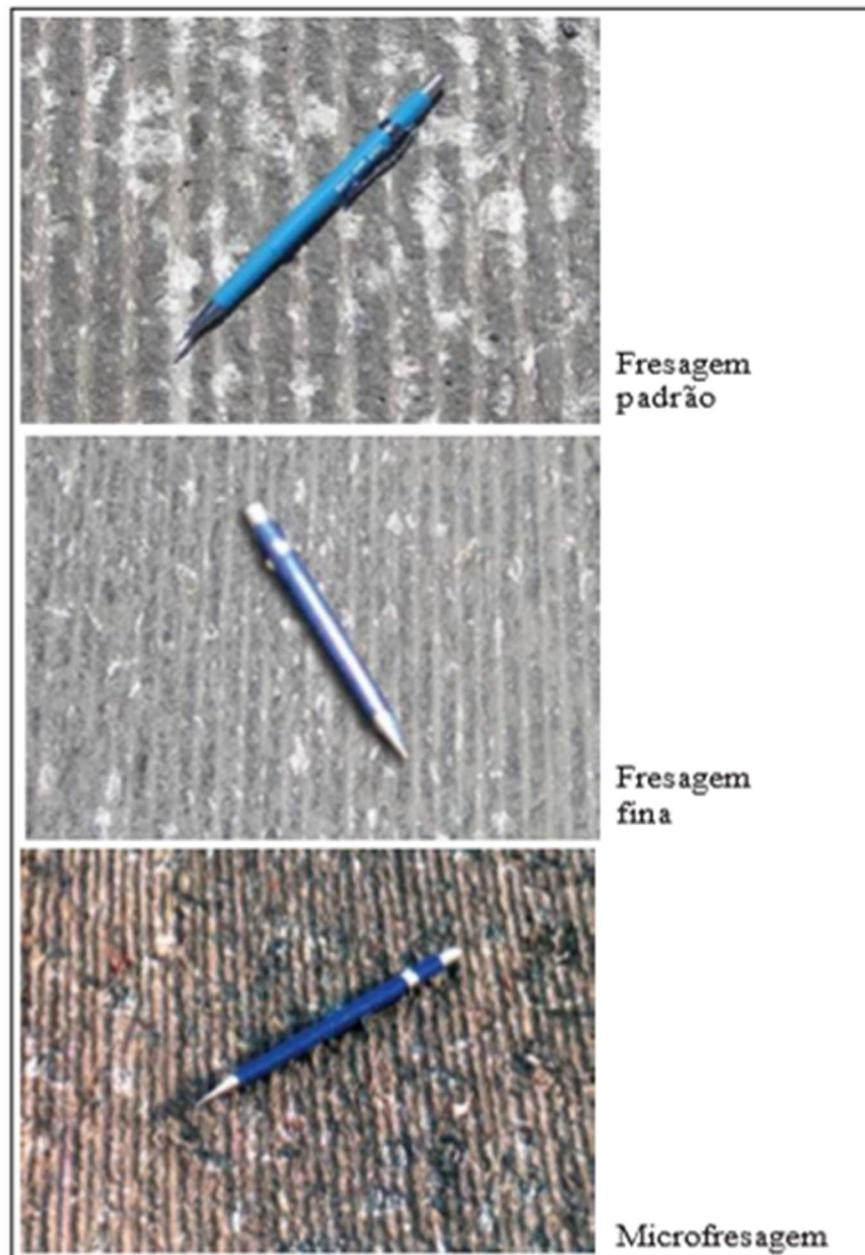


Figura 8 - Tipos de fresagem quanto à rugosidade (BONFIM, 2010)

1.3.5 Resíduo asfáltico fresado

O volume produzido de resíduos pela fresagem do pavimento é significativo, tornando sua reutilização essencial, pois a disposição inadequada desse resíduo gera impactos negativos à natureza e caracteriza-se como crime ambiental, conforme ilustrado na Figura 9, além de ser um grande desperdício financeiro.



Figura 9 - Disposição inadequada de 12 mil m³ em São Joaquim – SC
(Disponível em <http://saojoaquimonline.com.br> acessado em 9/12/2016)

Segundos dados da Secretaria Municipal de Conservação e Serviços Públicos – SECONSERVA, da prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, são realizados serviços de fresagem asfáltica produzindo o volume anual apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Volume anual de fresagem asfáltica (SECONSERVA, 2017)

Serviço de fresagem asfáltica			
Ano	Volume (m ³)	Ano	Volume (m ³)
2007	6.102	2012	35.556
2008	15.832	2013	36.785
2009	6.574	2014	26.660
2010	14.353	2015	32.083
2011	17.156	2016	106.821

Quando o resíduo fresado asfáltico (*Recycled Asphalt Pavement* – RAP) é reutilizado para revestimento, o ligante asfáltico é recuperado através da incorporação de agentes rejuvenescedores, e a granulometria pode ser corrigida pela adição de novos materiais. Já no reaproveitamento do fresado, para base e/ou sub-base rodoviária, corrige-se a granulometria e pode-se adicionar cimento, cal, betume e entre outros.

Os silos de fresagem existentes no depósito da usina de asfalto no Caju/RJ contêm material de várias regiões da cidade, com diversas características em relação ao tipo de massa, à granulometria dos agregados, à rugosidade da fresagem, ao tipo de ligante asfáltico e ao teor utilizado. Os silos de estocagem e o aspecto visual do material fresado encontram-se apresentados na Figura 10(a) e (b), respectivamente.



Figura 10 – (a) Estocagem de RAP na usina; (b) Aspecto visual

A correção granulométrica do material fresado (estabilização granulométrica) torna-se importante, pois, aliada à compactação (estabilização mecânica), maximiza a resistência ao cisalhamento do material e eleva sua rigidez; ambos os incrementos são interessantes do ponto de vista estrutural e têm reflexos no seu desempenho.

A seguir serão apresentados os tipos de reciclagem e algumas aplicações viáveis para a reutilização do material fresado, umas já implantadas e outras em fase de pesquisa.

1.3.6 Reutilização do RAP

Uma das aplicações mais comum do RAP é reutilizá-lo no próprio revestimento do pavimento. Esta reciclagem pode ser à quente ou à frio, como é abordado a seguir.

A reciclagem a quente em usina estacionária é um tipo de processo pelo qual parte ou toda a estrutura do revestimento é removida e reduzida, geralmente mediante fresagem a frio, e posteriormente transportada para ser misturada à quente e recuperada em usina de asfalto.

A prefeitura da cidade do Rio de Janeiro possui quatro usinas de asfalto, duas gravimétricas localizadas uma no Caju e a outra em Jacarepaguá, uma volumétrica em Campo Grande e uma usina PMF (mistura por emulsão à frio) em Santa Cruz. Contudo, a única usina de reciclagem de mistura asfáltica é a Usina Antônio Ramos, situada no Caju, conforme apresentado na Figura 11. A porcentagem de fresado utilizado pode ser de até 50% da composição da massa a ser reciclada.



Figura 11 – Usina de reciclagem no Caju. (a) Silo dos agregados e cabine de operação; (b) Cabine de operação, silo de estocagem e descarga da massa

A reciclagem a quente "in situ" ou no local é um processo onde se remove uma espessura de 2,5cm a 5,0cm do pavimento por meio fresagem. Neste processo, o pavimento é reduzido a dimensões apropriadas e depois é misturado a quente no próprio local, podendo incorporar na mistura adição de novos agregados, cimento asfáltico e agente rejuvenescedor. Na Figura 12, está apresentado um esquema visual desse processo de reciclagem.

Esta técnica é indicada apenas para correção de defeitos superficiais como: desagregação, trincas, perda de atrito, exsudação, corrugação superficial, trilha de roda e oxidação excessiva.

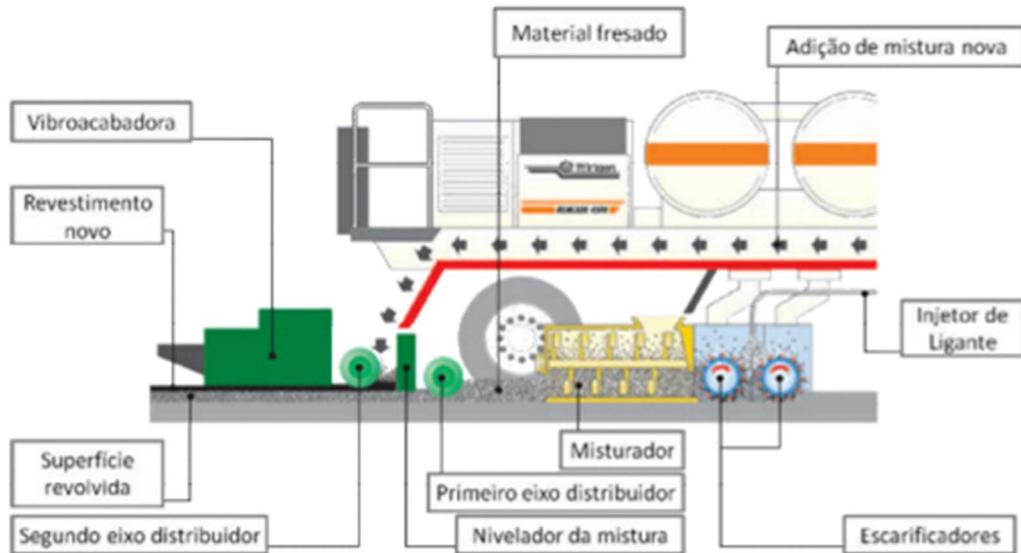


Figura 12 - Reciclagem a quente "in situ" (WIRTGEN, 2008)

Na reciclagem a frio (*Cold planning*), deve ser usada emulsão asfáltica, agentes rejuvenescedores ou estabilizantes químicos. O composto final deve ser empregado como camada de binder, ou seja, necessita da aplicação da camada de rolamento. Esta técnica é indicada apenas em pavimentos trincados, com recapeamentos sucessivos, com problemas de drenagem entre as camadas originais e de reforço, com desagregação do revestimento e quando o agregado na região é escasso.

As principais vantagens dessa técnica é o aproveitamento total dos materiais, sem produção de resíduos; conseqüentemente, não há custos com carga e descarga e transporte dos mesmos; preserva o meio ambiente, pois não há extração de materiais naturais; agilidade no processo e redução dos custos gerais de restauração.

A Figura 13 ilustra o processo de reciclagem a frio com espuma de asfalto. Neste processo não há desperdício de material, contudo o nível da camada reciclada pode diferir da camada deteriorada influenciando os dispositivos da rede de drenagem existente no local, tornando-se um limitador. Devido a esse fator, sua utilização é mais indicada para rodovias e vias de grande fluxo, onde geralmente os dispositivos de drenagem situam-se fora do eixo da pista.



Figura 13 - Detalhe da reciclagem a frio com espuma de asfalto
(Disponível em <http://asfaltodequalidade.blogspot.com.br> acessado em 14/02/2017)

Em regiões rurais ou de menor fluxo, bem como, em regiões onde não há usinas de reciclagem de mistura asfáltica (como exemplo: Distrito Federal), uma solução adotada, e muitas das vezes política, é o reaproveitamento do RAP como revestimento, permitindo o acesso de veículos e melhorando a qualidade de vida dos moradores locais. Dependendo da relevância e da utilização da via, esse processo pode ser feito das seguintes maneiras:

- Revestimento (solo + fresado) - Aplicação do fresado sobre a base de solo + camada de fresado imprimada. O material é espalhado, tratado com emulsão asfáltica e compactado;
- Revestimento Primário (anti-pó) – Consiste no espalhamento do fresado sobre o subleito, sem adições de ligante asfáltico ou compactação;

Outro exemplo de solução provisória foi adotado em Porto Alegre/RS. Consistiu no espalhamento do fresado sobre base compactada, formada por entulhos da demolição do Estádio Beira-Rio, conforme ilustrado na Figura 14, aumentando a capacidade do estacionamento de 500 para 1.400 vagas.



Figura 14 - RAP em Estacionamento - Estádio Beira-Rio em Porto Alegre
(Disponível em: <http://zh.clicrbs.com.br> acessado em 23/11/2015)

Vale ressaltar que o material fresado é caracterizado como material nobre. Por isto, deve-se utilizado de maneira racional e adequada evitando o desperdício do mesmo.

1.4 Estudos anteriores

Há alguns estudos científicos que aprofundam o assunto referente à utilização do RAP na construção da base e/ou sub-base após a correção granulométrica, e outros na construção do próprio pavimento, com diversas linhas de pesquisas e abordagem diferenciadas.

Uma abordagem foi apresentada por ANDRADE (2007) comparou três estruturas de pavimento diferenciadas, sendo uma de referência (convencional), uma com material reciclado e uma com material reciclado com adição de cimento. Os parâmetros variados foram a composição e a espessura das camadas.

A pesquisa mostrou que a camada reciclada não influenciou o ganho de rigidez, mantendo a deflexão do pavimento elevada. Já a camada reciclada com adição de cimento o efeito foi inverso. Houve ganho na rigidez e redução de deflexão, porém apresentou fissuras de retração, como esperado. Ao se adicionar cimento, a camada apresentou melhoria nas suas características assemelhando-se a um pavimento rígido.

Segundo ANDRADE (2007), existem limitações dessa alternativa em comparação a um simples recapeamento, pois apresenta menor homogeneidade, possível fissuração longitudinal e processo mais lento, devido à necessidade de pulverização.

Outra abordagem sobre esse tema foi elaborada por SILVA (2011), que realizou e avaliou ensaios com amostras de RAP após extração do ligante de agregado natural, com o objetivo de determinar a densidade real para a fração gráuda e miúda, abrasão Los Angeles, adesividade e índice de forma.

Analisando os valores encontrados no estudo, observou-se que os resultados de densidade para os agregados obtidos pelo RAP apresentaram valores inferiores aos dos agregados naturais, devido à presença residual de ligante em seus vazios, mesmo após extração do mesmo, o que conseqüentemente influencia a sua capacidade de absorção. Entretanto, conclui-se que no geral as propriedades do material fresado apresentam similaridade às do material natural, atendendo aos valores de referência e possibilitando sua utilização.

Já os estudos realizados por RIBEIRO *et al.* (2015) e JACINTHO *et al.* (2015) abordaram as alterações das propriedades mecânicas no reaproveitamento do RAP na composição de concreto convencional, armado ou não, utilizado na construção civil. Ensaio foram elaborados para analisar a influência da substituição do material natural pelo alternativo na resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral e na flexão, ao arrancamento (ensaio APULOT), além da capilaridade e do módulo de elasticidade.

Para tal, os pesquisadores consideraram 4 amostras com a mesma relação água/cimento (a/c) de 0,41, sendo uma amostra de referência e as demais variando em 10%, 30% e 50% o percentual de substituição do agregado natural pelo fresado, limitando o diâmetro máximo do agregado em 19 mm.

A pesquisa e os ensaios laboratoriais elaborados apresentaram resultados de acordo com o esperado. Percebeu-se que, ao aumentar o percentual de material reciclado, a resistência mecânica do concreto reduziu significativamente. A resistência a compressão axial obteve a maior redução (43,6%) referente ao concreto com teor de 50% em comparação com o concreto de referência.

Outro estudo que aborda o assunto foi desenvolvido por QUADRELLI *et al.* (2015). Referiu-se à utilização do RAP em substituição dos agregados para a

composição de concreto permeável, minimizando o impacto ambiental, tanto pela utilização de resíduos como também contribuir para o manejo de águas pluviais.

Em continuação ao estudo, QUADRELLI *et al.* (2016) analisaram o pavimento permeável elaborado com resíduos de fresado asfálticos sobre diferentes tipos de sub-base e sua influência na condutibilidade hidráulica.

O estudo consistiu na análise de 6 amostras, com o objetivo de determinar as alterações nas propriedades físicas e mecânicas do concreto com fresado. Para melhor compreensão da influência da relação a/c, bem como a substituição do agregado, a pesquisa foi dividida em duas fases.

Na primeira fase, foram ensaiadas 4 misturas com relação a/c igual a 0,3, sendo uma de referência e 3 composições com substituição parcial do agregado natural pelo fresado, com os teores de 10%, 20% e 40%, respectivamente, sendo esses agregados referente ao material retido entre as peneiras 9,5 mm a 4,8 mm.

E na segunda fase, foram utilizadas 2 misturas com relação a/c igual a 0,5: uma de concreto de referência e outra com substituição parcial de 10% de resíduo, sendo os agregados utilizados referente ao material passante na peneira 9,5 mm.

Na primeira fase do estudo, os resultados obtidos mostraram que o concreto com substituição de 10% obteve maior desempenho comparado com os demais, e para porcentagens maiores que 10% houve uma redução na resistência quando comparado com o concreto de referência. Os autores sugeriram que outros estudos devem ser elaborados para a melhor compreensão dessa limitação e suas prováveis causas.

Na segunda fase do estudo, comparou-se o valor da resistência à compressão nos pares de amostras com relações a/c distintas, ou seja, no concreto referência e no concreto com 10% de substituição com relação a/c de 0,3 e de 0,5. Observou-se a influência da relação a/c; quanto maior esta relação, maior o ganho de resistência à compressão, devido à redução do índice de vazios (matriz mais compacta). Observou-se também que há uma perda em relação à condutividade hidráulica quando se eleva-se a relação a/c; mesmo assim, segundo os autores, os valores encontram-se dentro da faixa de condutibilidade hidráulica.

Concluiu-se que a substituição do agregado natural pelo RAP no concreto permeável é considerada viável, apresentando melhores resultados a amostra com 10% de substituição. Observou-se também, que a relação a/c influencia diretamente os resultados; quanto maior esta relação, maior é a resistência à compressão axial,

em contrapartida, há uma diminuição na permeabilidade hidráulica. Desta forma, deve-se determinar a dosagem ideal do concreto permeável usando RAP levando em consideração sua principal finalidade, de maneira a alcançar seu melhor desempenho, seja pela resistência ou pela permeabilidade.

SANTOS *et al.* (2016) elaboraram três dosagens de concreto permeável para a aplicação em pavimentos, variando a relação a/c em 0,25, 0,30 e 0,35. O estudo mostrou que o concreto permeável confeccionado com a maior relação a/c apresenta melhor desempenho em relação à resistência mecânica quando comparado com as demais dosagens, tendo alcançado os valores máximos de 9,4 MPa, 1,41 MPa e 2,39 MPa, referentes à resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral e à tração na flexão, respectivamente.

E por fim, KERTIS *et al.* (2016) avaliaram experimentalmente a permeabilidade e a qualidade da água infiltrada no concreto permeável. As placas quadradas de concreto de 60cm foram confeccionadas, sendo uma mistura de referência com 100% de agregado natural, e outra com substituição de 10% pelo RAP. As mesmas foram assentadas em 3 diferentes tipos de bases (combinação entre brita 1, brita 0 e solo), totalizando 6 placas ensaiadas.

Os parâmetros analisados foram a influência do emprego do RAP na qualidade da água e a influência da base na permeabilidade e colmatação do solo após 7 meses de uso a partir do dia da concretagem.

A conclusão do estudo para a grande redução da condutibilidade hidráulica deveu-se à carga elevada da prensa hidráulica utilizada para a compactação das placas, em contrapartida da baixa resistência dos agregados reciclados e conseqüentemente diminuição do índice de vazios e permeabilidade. E em relação à colmatação, não se observou relação direta com a substituição do RAP, nem com os diferentes tipos de base.

A apesar dos resultados dos estudos, o conhecimento técnico e científico do comportamento mecânico do concreto permeável com fresado asfáltico não está bem estabelecido, necessitando de abordagem mais profunda sobre o assunto.

Na Tabela 8 estão apresentadas algumas propriedades, mais relevantes para o estudo, encontradas na literatura referentes à concretos permeáveis e à convencional usando RAP.

Tabela 8 – Resultados de ensaios de diversos autores

Tipo do Concreto	Autor(es)	Teor de RFA (%)	Fator a/c	Índices de Vazios (%)	Compressão Axial (MPa)	Tração na Flexão (MPa)	Tração por Compres. Diametral (MPa)	Coefficiente de Infiltração (10^{-3} m/s)
Convencional com RAP	ERDEM <i>et al.</i> (2014)	100	0,74		14,00	3,02		
	SETTARI <i>et al.</i> (2015)	0		18,4	13,00		2,10	
		100		9,2	7,00		1,50	
	RIBEIRO <i>et al.</i> (2015)	0	0,41		49,92	1,62	5,17	
		10	0,41		40,46	1,36	4,94	
		30	0,41		35,26	1,25	4,45	
	50	0,41		28,15	1,22	3,62		
Permeável com RAP	QUADRELLI <i>et al.</i> (2015)	0	0,30	22	10,50	2,10	1,60	1,25
		10	0,30	21	12,50	1,90	1,70	1,20
		20	0,30	27	7,50	2,20	1,10	1,22
		40	0,30	26	7,50	1,20	0,90	1,24
	QUADRELLI <i>et al.</i> (2016)	0	0,50	8	21,21	3,32	3,0	1,09
		10	0,50	11	16,85	3,35	2,4	1,05
	KERTIS <i>et al.</i> (2016)	0	0,50					1,34
		10	0,50					5,23
	MELO <i>et al.</i> (2016)	0	0,33		10,83	2,54	1,51	17,65
		15	0,33		11,70	2,82	2,27	23,14
Permeável	BATEZINI (2013)	0	0,30	25	7,51	2,22	1,39	1,40
	SANTOS <i>et al.</i> (2016)	0	0,25	34	4,70	1,27	0,69	
		0	0,30	31	6,90	2,05	1,05	
		0	0,35	29	9,40	2,39	1,41	

2 METODOLOGIA DE PESQUISA

2.1 Caracterização dos materiais

Considerando que o material residual de correções em pavimentos asfálticos, objeto desse estudo não é caracterizado como um material fresado devido ao método de remoção e à presença de material granular proveniente da base e/ou sub-base do pavimento, pois, provem de áreas pavimentadas severamente danificadas, de diversas regiões da cidade, tornando a amostra não homogênea e um tanto que desconhecida quanto à origem e ao tipo de massa asfáltica original, foi necessário a caracterização dos materiais utilizados e a realização de alguns ensaios típicos possibilitando o conhecimento das propriedades mecânicas, bem como, a compatibilização granulométrica entre os agregados.

De posse de tais informações, foram definidas as misturas a serem estudadas e a variação do teor de substituição do resíduo de pavimentos asfálticos bem como, o proporcionamento dos materiais na dosagem do concreto permeável.

2.1.1 Resíduo de pavimentos asfálticos com CAP

O material em análise consistiu no resíduo proveniente da recuperação de áreas pavimentadas severamente danificadas. Muitas das vezes, sua extração é feita através de corte mecânico e sua remoção com auxílio de retroescavadeira. Por esta razão, há presença de placas de asfalto bem como material granular proveniente da base do pavimento, como notoriamente percebe-se na Figura 15.



Figura 15 – Resíduo de pavimentos asfálticos

Segundo dados da 20ª Gerência de Conservação – GC da cidade do Rio de Janeiro localizada na zona oeste, em Bangu, no ano de 2016 foram executados serviços de recuperação de pavimento da ordem de 2.500 m² em áreas severamente danificadas na jurisdição da gerência. Sendo a espessura média do revestimento asfáltico estimada em 8 cm (devido ao constante recapeamento esta espessura é superior à espessura projetada original) e considerando a massa específica do asfalto em média de 2.300 kg/m³ (valor utilizado pela prefeitura), tem-se uma produção de 460 toneladas.

A prefeitura da cidade do Rio de Janeiro possui 23 GC distribuídas em pontos estratégicos em toda a cidade, sendo a primeira no centro da cidade e a última em Santa Cruz. Tomando estes dados, pode-se estimar que a produção total da cidade gera em torno de 10,5 mil toneladas por ano de resíduo de pavimentos asfálticos. Esse material muitas das vezes é descartado, uma vez que sua reutilização na confecção do concreto betuminoso (asfalto) não é atrativa devido à sua condição *in natura*, diferente do material fresado (produção anual conforme Tabela 7) que é caracterizado como material nobre para a reciclagem do asfalto.

Visando o aspecto de soluções sustentáveis e da reutilização do resíduo, neste trabalho, analisou-se a substituição do agregado natural pelo resíduo sem a extração do ligante asfáltico.

O primeiro procedimento realizado foi a redução da amostra de campo pelo método B da norma ABNT NBR NM27 (2001), que consiste no quarteamento da pilha e eliminação de duas partes diagonais, conforme apresentado na Figura 16. Esta operação foi repetida até que a amostra tivesse a quantidade suficiente e desejada. Para essa análise foram retiradas duas amostras de cerca de 18,0kg para a determinação da composição granulométrica.



Figura 16 – Redução da amostra (ABNT NBR NM27, 2001)

O segundo procedimento realizado foi a determinação da composição granulométrica preliminar do material *in natura* pela norma ABNT NBR NM248 (2003). Utilizaram-se as peneiras das séries normal e intermediária para melhor caracterização da curva por se tratar de um material desconhecido. A Figura 17 mostra o resíduo de pavimentos asfálticos sendo peneirado manualmente.



(a)

(b)

Figura 17 – Composição granulométrica: (a) # 31,7 mm; (b) # 12,7 mm

Os valores utilizados para o traçado da curva são apresentados na Tabela 9 e a curva granulométrica, na Figura 18.

Tabela 9 – Dados dos ensaios experimentais para obtenção da curva granulométrica do resíduo de pavimentos asfálticos sem CAP

Peneira ϕ (mm)	Amostra 1				Amostra 2			
	Massa (kg)	Retido % Parc	% Acum	Passante % Acum	Massa (kg)	Retido % Parc	% Acum	Passante % Acum
75	-	-	-	100,00	-	-	-	100,00
50	-	-	-	100,00	674,08	3,76	3,76	96,24
37,5	655,29	3,65	3,65	96,35	533,59	2,97	6,73	93,27
31,7	270,55	1,51	5,16	94,84	679,21	3,78	10,51	89,49
25	752,42	4,19	9,36	90,64	936,61	5,22	15,73	84,27
19	742,23	4,14	13,49	86,51	920,71	5,13	20,86	79,14
12,7	1.516,52	8,45	21,95	78,05	1.750,79	9,75	30,61	69,39
9,52	1.215,58	6,78	28,73	71,27	1.520,65	8,47	39,09	60,91
6,3	2.132,53	11,89	40,62	59,38	2.211,78	12,32	51,41	48,59
4,75	1.428,05	7,96	48,58	51,42	1.547,22	8,62	60,03	39,97
2,36	2.927,61	16,32	64,90	35,10	2.433,85	13,56	73,59	26,41
1,18	2.058,77	11,48	76,38	23,62	1.680,87	9,36	82,95	17,05
0,59	1.668,96	9,30	85,68	14,32	1.262,97	7,04	89,99	10,01
0,3	1.499,56	8,36	94,04	5,96	991,78	5,53	95,51	4,49
0,15	643,27	3,59	97,63	2,37	463,32	2,58	98,10	1,90
Fundo	425,65	2,37	100,00	0,00	341,86	1,90	100,00	0,00
Total	17.936,99	100,0	-	-	17.949,29	100,0	-	-

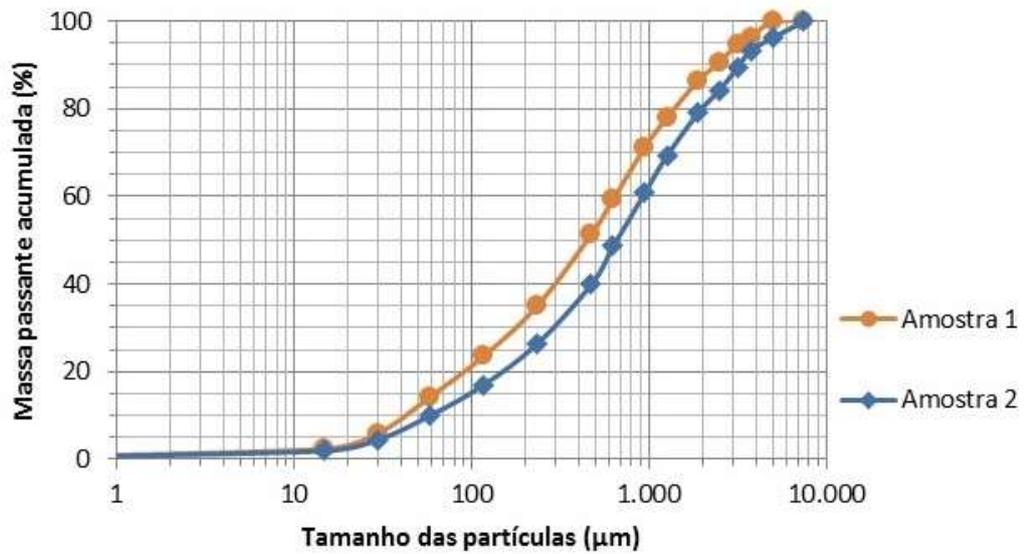


Figura 18 – Curva granulométrica do resíduo de pavimentos asfálticos com CAP

Analisando os resultados da Tabela 9 e da Figura 18 percebeu-se que as curvas das amostras se equivalem e que o material apresentou um percentual acima do desejado de agregados graúdos (grãos superiores a 4,75 mm) e de miúdos (grãos inferiores a 4,75 mm) em relação ao que a literatura recomenda para concreto permeável. Para tal adequação foi necessário peneirar mecanicamente todo o material e utilizar somente o retido entre as peneiras 19,0 mm e 2,36 mm, conforme ilustrado na Figura 19.



Figura 19 – (a) Peneirador mecânico; (b) Peneiramento do resíduo de pavimentos asfálticos

Após a separação do material, foi retirada uma amostra de 6,0 kg para a nova determinação da composição granulométrica. Todo o procedimento foi refeito e obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 10 e a partir dos resultados, foi traçada a curva granulométrica ilustrada na Figura 20.

Tabela 10 – Dados dos ensaios experimentais para obtenção da curva granulométrica do resíduo de pavimentos asfálticos peneirado

Amostra 1 _ Resíduo peneirado				
Peneira Φ (mm)	Massa (g)	Retido		Passante
		% Parc	% Acum	% Acum
25	-	0,00	0,00	100,00
19	128,57	2,15	2,15	97,85
12,7	1.381,86	23,06	25,20	74,80
9,52	1.095,36	18,28	43,48	56,52
6,3	1.409,44	23,52	67,00	33,00
4,75	860,77	14,36	81,36	18,64
2,36	1.053,92	17,59	98,95	1,05
1,18	22,04	0,37	99,32	0,68
Fundo	40,86	0,68	100,00	0,00
Total	5.992,82	100,00	-	-

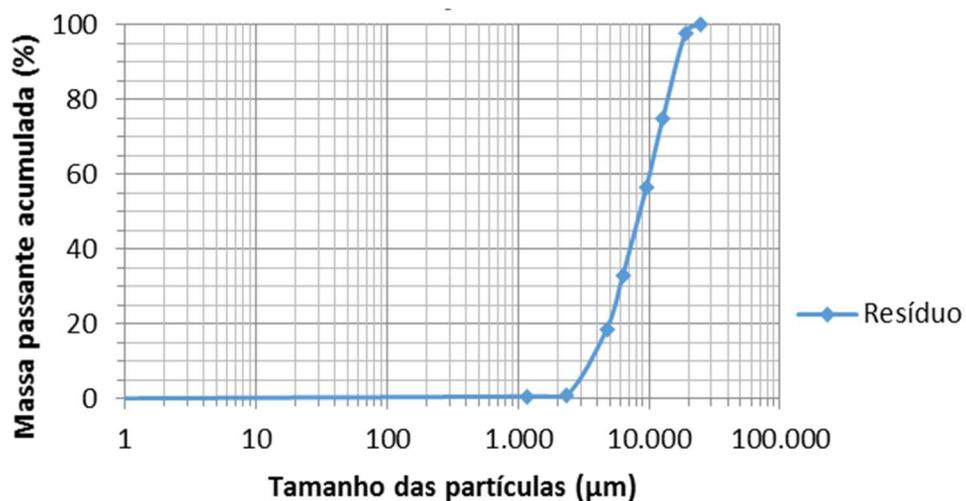


Figura 20 – Curva granulométrica do resíduo de pavimentos asfálticos peneirado

Nota-se que o peneiramento mecânico obteve resultado satisfatório, a curva granulométrica do resíduo de pavimentos asfálticos apresentou melhora significativa em relação às características necessárias para a elaboração do concreto permeável.

Em seguida, o material foi ensaiado para a determinação da massa específica. Como as normas fazem distinção entre os agregados e seus métodos de ensaio, o material foi ensaiado separadamente conforme as normas ABNT NBR NM52 (2009) e ABNT NBR NM53 (2009), referente a agregados miúdos (entre 4,75 mm e 75 μ m) e grãos (maiores que 4,75 mm), respectivamente, possibilitando o cálculo da massa específica da amostra como um todo por proporcionalidade.

Para a determinação da massa específica do agregado miúdo, colocou-se uma amostra de 1 kg de material dentro de um recipiente com água durante 24 h. Após esse período, o material foi submetido a uma secagem ao ar uniformemente. Em seguida, o material foi colocado no molde onde foram aplicados 25 golpes, conforme Figura 21(a). Quando o cone foi retirado verticalmente, observou-se que houve desmoronamento dos agregados. Assim, pode-se garantir que o mesmo encontra-se na condição saturado superfície seca, ou seja, sem umidade superficial. Então, 0,5 kg do material foi colocado no frasco e adicionada água até o indicador conforme ilustrado na Figura 21(b).

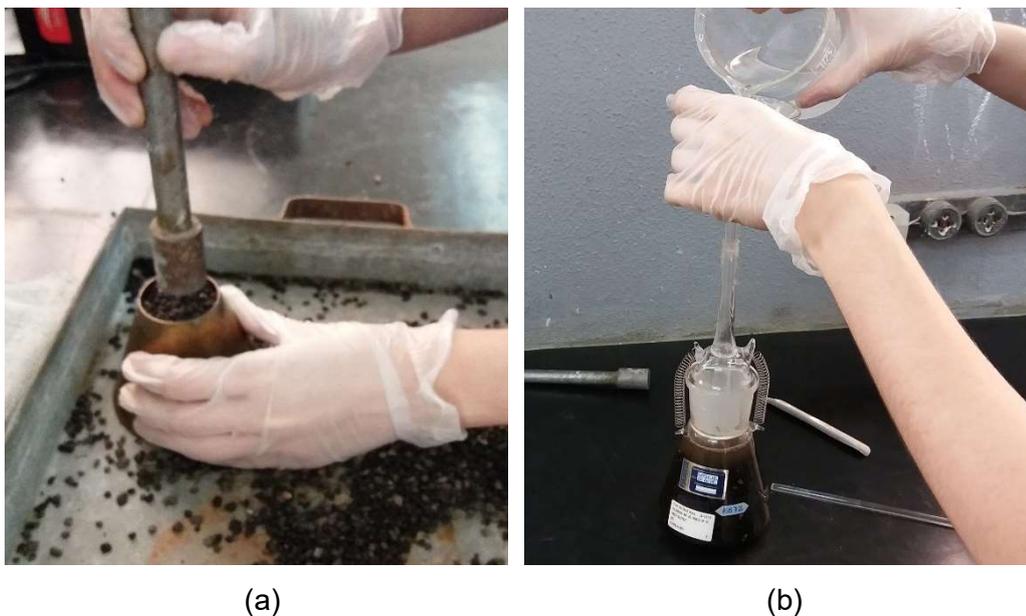


Figura 21 – Ensaio para determinação da massa específica do agregado miúdo de resíduo de pavimentos asfálticos (a) Teste para verificar a umidade superficial; (b) Frasco preenchido com água.

Retirado todo o ar dentro do frasco, o mesmo foi submetido a um banho com temperatura constante de 25°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) durante uma hora. Então, a água foi completada até o indicador e o conjunto foi pesado. O material do frasco foi retirado em sua totalidade e levado para estufa a 105°C ($\pm 5^\circ\text{C}$) até atingir sua massa seca. Estes procedimentos foram apresentados na Figura 22(a) e (b), respectivamente.

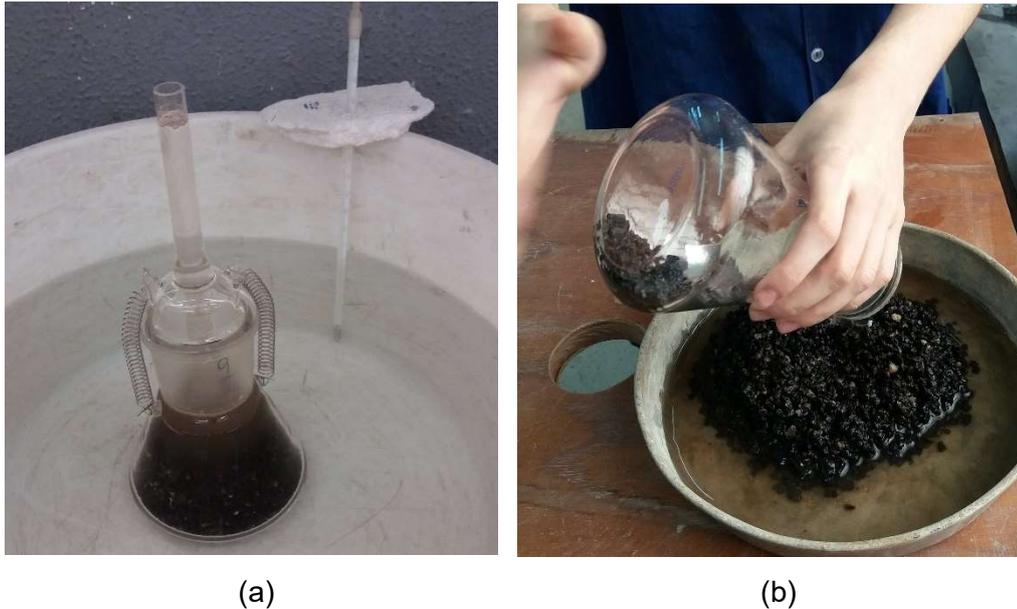


Figura 22 – Ensaio para determinação da massa específica do agregado miúdo de resíduo de pavimentos asfálticos (a) Banho com temperatura controlada; (b) Remoção dos agregados para secagem à estufa.

Pode-se calcular a massa específica aparente do agregado seco através da equação (1).

$$\mu_a = \frac{m}{V - V_a} \quad (1)$$

onde:

μ_a é a massa específica aparente do agregado (g/cm^3);

m é a massa da amostra seca em estufa (g);

V é o volume do frasco (cm^3);

V_a é o volume de água adicionada ao frasco (cm^3), conforme a equação (2).

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (2)$$

onde:

m_1 é a massa do conjunto (frasco + agregado) (g);

m_2 é a massa total (frasco + agregado + água) (g);

ρ_a é a massa específica da água (g/cm³).

E a massa específica do agregado saturado superfície seca é calculada através da equação (3).

$$\mu_s = \frac{m_s}{V - V_a} \quad (3)$$

onde:

μ_s é a massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm³);

m_s é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

V é o volume do frasco (cm³);

V_a é o volume de água adicionada ao frasco, de acordo com a fórmula (2), (cm³).

Semelhantemente a massa específica do agregado é calculada através da equação (4).

$$\mu = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\mu_{\text{água}}}} \quad (4)$$

onde:

μ é a massa específica do agregado seco (g/cm³);

m é a massa da amostra seca em estufa (g);

V é o volume do frasco (cm³);

V_a é o volume de água adicionada ao frasco, conforme (2) (cm^3);
 m_s é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, (g);
 $\mu_{\text{água}}$ é a massa específica da água (g/cm^3).

A absorção de água foi calculada, conforme estabelecida na norma ABNT NBR NM 30 (2001), utilizando a equação (5).

$$A_a = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (5)$$

onde:

A_a é a absorção de água (%);
 m_s é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);
 m é a massa da amostra seca em estufa (g).

Os valores experimentais da massa específica aparente seca, na condição saturada superfície seca, e da absorção de água são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados experimentais da caracterização da parcela miúda do resíduo do pavimento asfáltico

Propriedade	Valor
Massa específica aparente seco (g/cm^3)	2,29
Massa específica saturada superfície seca (g/cm^3)	2,31
Massa específica (g/cm^3)	2,34
Absorção de água (%)	1,04

Semelhantemente, para a determinação da massa específica do agregado graúdo, colocou-se uma amostra de 3,2 kg de material dentro de um recipiente com água durante 24 h (± 4 h). Após esse período, o material foi submetido a uma secagem ao ar uniformemente, atingindo a condição saturado superfície seca, foi pesado e colocado na cesta para ser verificado sua massa na água a $23\text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$), ou seja, massa imersa. O material foi colocado na estufa a $105\text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$) até atingir

constância de massa. Após resfriamento, o mesmo foi pesado. Alguns destes procedimentos são apresentados na Figura 23.



Figura 23 – Ensaio para determinação da massa específica dos agregados graúdos. (a) Massa imersa; (b) Remoção dos agregados para secagem à estufa.

Pode-se calcular a densidade aparente do agregado graúdo seco através da equação (6):

$$\rho_a = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (6)$$

onde:

ρ_a é a densidade aparente do agregado seco;

m é a massa da amostra seca em estufa (g);

m_s é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

m_a é a massa em água da amostra (g).

E a densidade do agregado graúdo na condição saturado superfície seca é calculada através da equação (7):

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (7)$$

onde:

ρ_s é a densidade do agregado saturado superfície seca;

m_s é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

m_a é a massa em água da amostra (g).

O cálculo da densidade do agregado graúdo utiliza-se a equação (8):

$$\rho = \frac{m}{m - m_a} \quad (8)$$

onde:

ρ é a densidade do agregado seco;

m é a massa da amostra seca em estufa (g);

m_a é a massa em água da amostra (g).

A absorção de água foi calculada, conforme estabelecida na norma ABNT NBR NM 53 (2009), utilizando a equação (9):

$$A_a = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (9)$$

onde:

A_a é a absorção de água (%);

m_s é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

m é a massa da amostra seca em estufa (g).

Os valores experimentais da massa específica aparente seca, na condição saturada superfície seca e absorção de água são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados experimentais da caracterização da parcela graúda do resíduo do pavimento asfáltico

Propriedade	Valor
Massa específica aparente seco (g/cm^3)	2,27
Massa específica saturada superfície seca (g/cm^3)	2,31
Massa específica (g/cm^3)	2,36
Absorção de água (%)	1,64

Para o cálculo da massa específica do resíduo de pavimentos asfálticos peneirado, foi considerada a proporcionalidade das massas específicas, ou seja, através da distribuição dos agregados graúdos e miúdos na amostra como um todo e suas respectivas massas específicas obtidas através do ensaios. Conforme apresentado anteriormente, os agregados graúdos correspondem a 81,36% da amostra com massa específica de $2,36 \text{ g/cm}^3$ e para os miúdos, 18,64% com $2,34 \text{ g/cm}^3$. Calculando a proporcionalidade, obtém-se a massa específica do resíduo de $2,36 \text{ g/cm}^3$. Analogamente, usando a proporcionalidade obtém-se a absorção de água do resíduo de pavimentos asfálticos de 1,53%. Os valores referentes ao ensaios estão apresentados Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados experimentais da caracterização do resíduo do pavimento asfáltico

Propriedade	Valor
Massa específica aparente seco (g/cm^3)	2,27
Massa específica saturada superfície seca (g/cm^3)	2,31
Massa específica (g/cm^3)	2,36
Absorção de água (%)	1,53

Foi realizado também o ensaio para determinação de massa específica dos agregados graúdos da amostra do resíduo como um todo, com o objetivo de comparar os valores obtidos através da proporcionalidade e pelo método, analisando a influência dos agregados miúdos no ensaio. Para isso, foi necessário envolver a amostra com um pano evitando que os agregados miúdos passassem pela abertura

da malha do cesto. O ensaio procedeu conforme orientações da norma ABNT NBR NM53 (2009). O cuidado adicional foi desconsiderar o valor, referente ao pano, ao pesar a amostra e certificar que todo o material foi removido do pano para seguir para estufa. O cálculo foi feito através da equação (8), obtendo-se o valor de $2,37 \text{ g/cm}^3$, cujo valor mostra que as massas específicas se equivaleram. Contudo, referente à absorção de água dos agregados, a diferença foi de 30,45%. Logo estes resultados não foram considerados.

A análise das massas específicas e da absorção de água da brita corrigida e do resíduo de pavimentos asfálticos é imprescindível para a comparação dos resultados referentes aos ensaios laboratoriais.

2.1.2 Resíduo de pavimentos asfálticos sem CAP

Com a finalidade de saber o teor e a influência do ligante asfáltico (CAP) na granulometria do resíduo, após a adequação da faixa granulométrica através do peneiramento mecânico, uma amostra de 1,2 kg foi analisada no laboratório da Subgerência de Controle e Qualidade da SECONSERVA, situado no Caju, devido à sua infraestrutura, sua aparelhagem e seus equipamentos adequados.

Um dos procedimentos foi a extração do ligante asfáltico. A amostra em questão foi submetida, durante 30 minutos, à temperatura da ordem de 550°C , conforme Figura 24(a). O percentual de betume extraído foi de 5,32%, correspondendo à 63,8 g.

Decorrido o período de extração, o material foi retirado da estufa para determinação da composição granulométrica adquirida. Visivelmente o material residual apresentou granulometria diferenciada, conforme pode-se observar na Figura 24(b).



Figura 24 – (a) Processo de extração do CAP; (b) Comparação entre amostras

Para a determinação da curva granulométrica, utilizaram-se as peneiras das séries normal e intermediária, da mesma forma que a da amostra com ligante asfáltico. Os resultados para a elaboração das curvas foram apresentados na Tabela 14, e através da Figura 25, pode-se comparar as curvas das duas amostras evidenciando a influência do ligante asfáltico.

Tabela 14 – Dados dos ensaios experimentais para obtenção da curva granulométrica do resíduo de pavimentos asfálticos sem CAP

Peneira ϕ (mm)	Amostra		Resíduo sem CAP	
	Massa (g)	Retido % Parc	% Acum	Passante % Acum
25	-	0,00	0,00	100,00
19	-	0,00	0,00	100,00
12,7	53,30	4,69	4,69	95,31
9,52	29,00	2,55	7,24	92,76
6,3	196,70	17,31	24,56	75,44
4,75	146,30	12,88	37,43	62,57
2,36	182,10	16,03	53,46	46,54
1,18	122,90	10,82	64,28	35,72
Fundo	405,90	35,72	100,00	0,00
Total	1.136,20	100,00	-	-

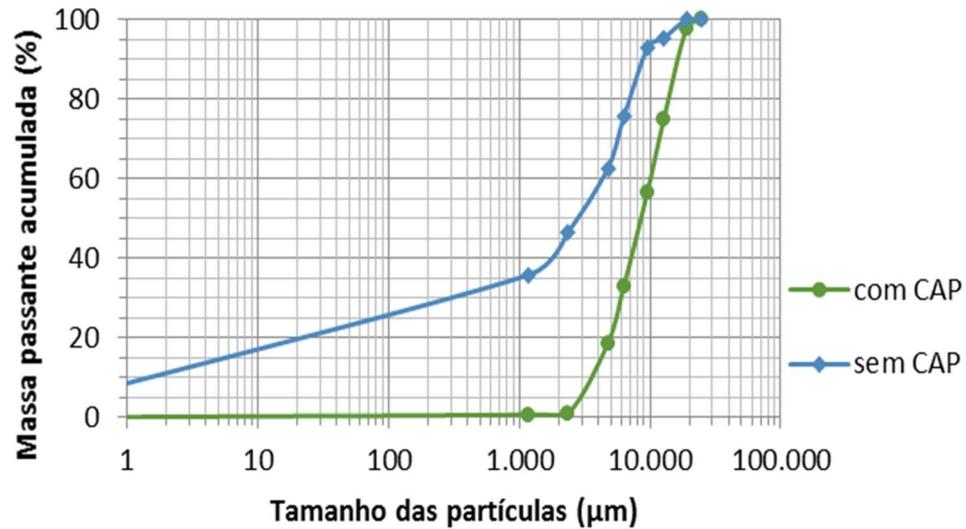


Figura 25 – Curva granulométrica do resíduo de pavimentos asfálticos com e sem CAP

Analisando os resultados, pode-se perceber uma grande presença de finos, que somados correspondem a quase 50% da amostra. As peneiras 6,3 mm, 4,75 mm e 2,36 mm apresentaram percentuais similares entre as duas amostras, contudo o percentual referente a 19 mm foi nulo, ou seja, os agregados com este diâmetro são aglomerados de partículas com diâmetros inferiores a 19 mm, mais a influência do ligante com os finos.

Com o objetivo de estimar as características da suposta mistura asfáltica original do resíduo de pavimentos asfálticos, outros ensaios foram realizados para determinar algumas propriedades. Contudo, vale ressaltar que os resultados devem ser influenciados pela possível existência de materiais provenientes da base e sub-base, bem como, possuir características de duas ou mais massas asfálticas na amostra estudada.

O método utilizado na determinação da massa específica máxima medida, conhecida como densidade Rice, foi o procedimento descrito na norma ASTM 2040 (2014). Para a realização do ensaio, uma determinada amostra granular foi imersa em água a 25 °C, submetida ao agitador e depois ao vácuo durante 15 minutos para a expulsão do ar aprisionado entre os grumos de agregado e ligante asfáltico. Decorrido o tempo, foi estabelecida a pressão ambiente no recipiente e então completada a água. Então, o recipiente foi levado ao banho térmico até atingir o equilíbrio, e posteriormente o conjunto foi pesado. A aparelhagem para a realização do ensaio encontra-se apresentada na Figura 26.



Figura 26 – Ensaio para determinação da massa específica máxima medida

Foi executado o ensaio para determinação da massa específica da mistura, utilizando a norma rodoviária do DNER ME 043 (1995), com o objetivo de relacionar esse valor à massa específica máxima medida e obter o volume de vazios na amostra asfáltica compactada.

A amostra foi aquecida, posta em um molde metálico e compactada por meio do compactador Marshall para a execução do corpo de prova. A amostra foi aquecida a 80 °C para adquirir trabalhabilidade e grau de compactação adequado. A quantidade de golpes depende do tipo de massa asfáltica. A compactação foi feita aplicando-se 75 golpes em cada face do corpo de prova – CP, considerando alto volume tráfego, conforme apresentadas na Figura 27(a).



(a)

(b)

Figura 27 – (a) Compactador Marshall; (b) Extrator do corpo de prova após compactação

Após a compactação do CP, pode-se observá-lo na Figura 27(b). Também foram verificadas as dimensões, com o auxílio de um paquímetro digital, e as leituras das massa seca e imersa, com balança digital com precisão de 0,1 g. A Figura 28 mostra esses procedimentos.



(a)

(b)

Figura 28 – (a) Aferição das dimensões; (b) Pesagem do corpo de prova

As informações obtidas no ensaio foram lançadas no programa de cálculo do laboratório da SECONSERVA e os resultados experimentais da massa asfáltica compactada foram reunidos na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados experimentais da mistura asfáltica compactada

Propriedade	Valor
Massa específica máxima medida (g/cm^3)	2,50
Massa específica máxima teórica (g/cm^3) - DMT	2,53
Massa específica aparente (g/cm^3) - Gmb	2,26
Volume de vazios - Vv	10,90
Volume de betume - VCB	10,20
% de vazios do agregado mineral - VAM	21,09
Relação betume/vazios - RBV	48,0

De acordo com a Tabela 15, os valores de massa específica medida e teórica se equivaleram e o valor de massa específica aparente foi coerente ao adotado pela prefeitura de $2,30 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Para a determinação da resistência à tração por compressão diametral, o corpo de prova foi ensaiado segundo a norma rodoviária do DNIT 136 (2010). O valor obtido foi de 1,32 MPa. O ensaio executado e o detalhe do corpo de prova rompido são apresentados na Figura 29(a) e (b), respectivamente.



(a)



(b)

Figura 29 – (a) Ensaio de tração por compressão diametral; (b) Corpo de prova rompido

2.1.3 Britas

Para obter uma análise comparativa válida entre o material residual e os agregados, normalmente utilizados na confecção do concreto, se faz necessária a compatibilização entre suas composições granulométricas.

Como a composição do material residual apresenta agregados graúdos e miúdos, compreendidos entre as peneiras 19,0 mm e 2,36 mm, foram analisados dois tipos de brita comercializados no mercado: a brita 0 e a brita 1. Os resultados para a elaboração das curvas estão apresentados na Tabela 16, e através da Figura 30, pode-se comparar as curvas dos dois agregados.

Tabela 16 – Dados experimentais da granulometria das britas

Peneira ϕ (mm)	Amostra 2 Brita 0				Amostra 3 Brita 1			
	Massa (g)	Retido % Parc	% Acum	Passante % Acum	Massa (g)	Retido % Parc	% Acum	Passante % Acum
25	-	0,00	0,00	100,00	360,09	7,20	7,20	92,80
19	-	0,00	0,00	100,00	4.218,77	84,33	91,53	8,47
12,7	24,85	0,99	0,99	99,01	423,46	8,46	99,99	0,01
9,52	733,98	29,37	30,36	69,64	-	0,00	99,99	0,01
6,3	1.199,59	48,00	78,36	21,64	-	0,00	99,99	0,01
4,75	353,52	14,14	92,50	7,50	-	0,00	99,99	0,01
2,36	166,37	6,66	99,16	0,84	-	0,00	99,99	0,01
1,18	5,85	0,23	99,39	0,61	-	0,00	99,99	0,01
Fundo	15,22	0,61	100,00	0,00	0,41	0,01	100,00	0,00
Total	2.499,38	100,0	-	-	5.002,73	100,0	-	-

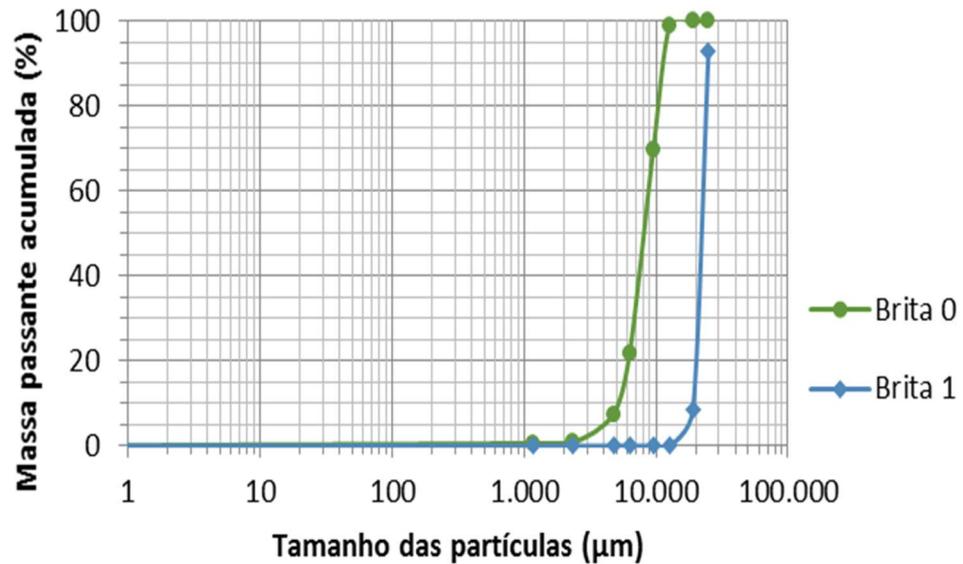


Figura 30 – Curva granulométrica das britas

Após a determinação da composição granulométrica das britas, observou-se a necessidade de uma correção para aproximar a curva do material residual com as das britas. Essa correção consistiu na mistura proporcional de brita 0 e material retido nas peneiras 12,7 mm, 4,75 mm e 2,36 mm. Foram analisadas duas amostras de 5,0 kg. Seus resultados encontram-se apresentados na Tabela 17, e suas respectivas curvas em comparação com a do resíduo de pavimentos asfálticos são apresentadas na Figura 31.

Tabela 17 – Dados experimentais da granulometria das britas corrigidas

Peneira ϕ (mm)	Amostra 1 Brita corrigida				Amostra 2 Brita corrigida			
	Massa (g)	Retido % Parc	% Acum	Passante % Acum	Massa (g)	Retido % Parc	% Acum	Passante % Acum
25	-	0,00	0,00	100,00	-	0,00	0,00	100,00
19	-	0,00	0,00	100,00	-	0,00	0,00	100,00
12,7	1.065,00	21,33	21,33	78,67	1.094,19	21,91	21,91	78,09
9,52	732,17	14,67	36,00	64,00	571,70	11,45	33,36	66,64
6,3	1.683,41	33,72	69,72	30,28	1.597,21	31,98	65,34	34,66
4,75	842,89	16,88	86,60	13,40	769,51	15,41	80,75	19,25
2,36	450,79	9,03	95,63	4,37	511,20	10,24	90,99	9,01
1,18	54,21	1,09	96,72	3,28	84,81	1,70	92,69	7,31
Fundo	163,76	3,28	100,00	0,00	365,15	7,31	100,00	0,00
Total	4.992,23	100,0	-	-	4.993,77	100,0	-	-

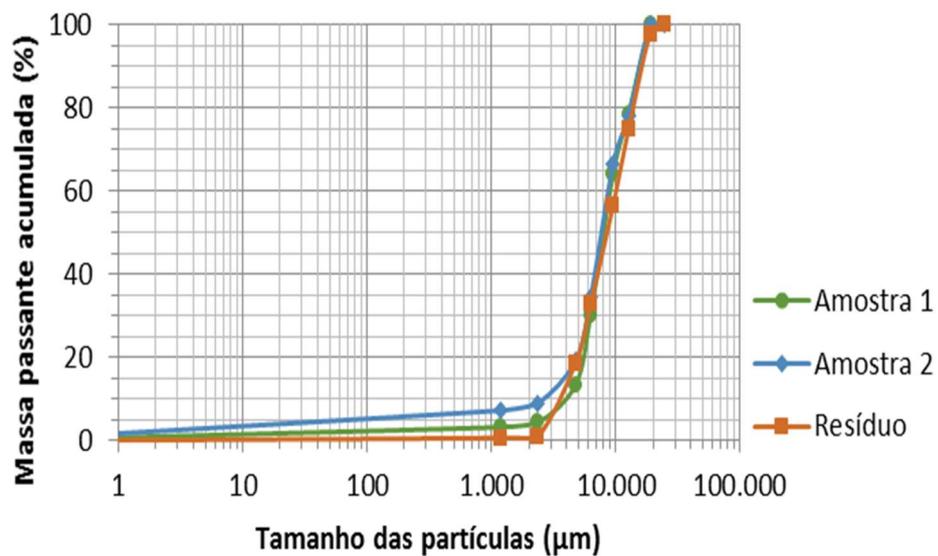


Figura 31 – Curva granulométrica da brita corrigida e do resíduo

Ao analisar graficamente as curvas da brita corrigida e do material residual, observa-se que as curvas se equiparam, ou seja, a finalidade da correção granulométrica foi alcançada.

Os valores experimentais da massa específica aparente seca, na condição saturada superfície seca, e de absorção de água da brita corrigida foram calculados conforme item 2.1.1, usando as equações de (6) a (9) referentes aos agregados graúdos. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados experimentais da caracterização da brita corrigida

Propriedade	Valor
Massa específica aparente seco (g/cm ³)	2,64
Massa específica saturada superfície seca (g/cm ³)	2,67
Massa específica (g/cm ³)	2,72
Absorção de água (%)	1,11

2.1.4 Cimento

No estudo foi utilizado o cimento Portland CPIII-40-RS produzido pela Companhia Siderúrgica Nacional – CSN. A produção desse tipo de cimento é feita através da moagem do clínquer e escória granulada de alto-forno (LHS - Ligante Hidráulico Siderúrgico). Sua resistência à compressão aos 28 dias atinge mais de 40 MPa, superando os valores mínimos de resistência estabelecidos pela norma ABNT NBR 5735 (1991).

Esse cimento é indicado para ambientes agressivos, como galerias de água, esgoto e obras próximo ao mar, pois sua resistência a sulfatos e sua impermeabilidade protegem o concreto contra a ação marítima e a umidade, proporcionando maior durabilidade à construção, normatizado pela norma ABNT NBR 5737 (1992).

As informações contidas nas Tabelas 19 e 20 foram retiradas do site institucional da CSN. Vale ressaltar que para este trabalho adotou-se esse tipo de cimento não por sua alta resistência à compressão, mas por sua resistência à sulfatos, característica essa imprescindível ao concreto permeável.

Tabela 19 – Composição do CPIII-40-RS (CSN Instituição, 2017)

Composição do CPIII-40-RS	
Componente	Proporção
Clínquer e Gesso	25% – 65%
Escória de alto-forno	35% – 70%
Material carbonático	0% – 5%

Tabela 20 – Características e propriedades físicas (CSN Instituição, 2017)

CPIII-40-RS		
Características / Propriedades	Unidade	Valor
Resistência à Compressão – 3 dias	MPa	≥ 12
Resistência à Compressão – 7 dias	MPa	≥ 23
Resistência à Compressão – 28 dias	MPa	≥ 40
Resistência à Compressão – 91 dias	MPa	≥ 48
Finura (Resíduo na Peneira 75 µm)	%	≤ 8,0
Tempo de Pega - Início	h	≥ 1
Tempo de Pega - Fim	h	≤ 12
Expansibilidade (a frio e a quente)	mm	≤ 5
Massa Específica Aparente	g/cm ³	1,2
Densidade Real	-	2,99
Solubilidade em ácido clorídrico	%l	99
Solubilidade em água	g/l	1,5

2.2 Processos da concretagem

2.2.1 Dosagem

Para determinar quais os teores em massa de resíduo de pavimentos asfálticos seriam analisados, foram considerados os estudos apresentados na revisão bibliográfica. Os tipos de misturas com seus respectivos teores em massa definidos para esse estudo, são:

- Concreto de Referência = 100% brita e 0% resíduo;
- Concreto com 10% Resíduo = 90% brita e 10% resíduo;
- Concreto com 20% Resíduo = 80% brita e 20% resíduo;
- Concreto com 50% Resíduo = 50% brita e 50% resíduo;
- Concreto com 100% Resíduo = 0% brita e 100% resíduo.

A dosagem adotada, para a confecção do concreto permeável, considerou as recomendações obtidas da revisão bibliográfica, conforme item 1.2. Assim, foram utilizados os valores apresentados na Tabela 21 para a confecção das diferentes misturas definidas no programa experimental. Vale ressaltar que tais quantitativos não consideram a diferença entre as massas específicas dos agregados.

Tabela 21 – Quantitativo em massa dos materiais utilizados no estudo

Materiais	Consumo/proporção				
	Refer.	10%	20%	50%	100%
Cimento (kg/m ³)	350	350	350	350	350
Agregado natural (kg/m ³)	1.400	1260	1120	700	0
Agregado reciclado (kg/m ³)	0	140	280	700	1400
Água (kg/m ³)	130	130	130	130	130
Relação água/cimento (a/c)	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Relação cimento/agregado total	1:4	1:4	1:4	1:4	1:4

Para o cálculo da massa total necessária dos matérias, alguns fatores foram considerados, como: a quantidade de misturas e seus teores de resíduo de pavimentos asfálticos os ensaios a serem executados e a quantidade ideal de Corpos de prova para a realização dos mesmos.

2.2.2 Concretagem

No processo de concretagem foi utilizada a betoneira da CSM com capacidade para 400 litros. A norma ABNT NBR 7212 (2012) estabelece requisitos gerais para a execução de concreto. Contudo, por se tratar de um concreto peculiar, a ordem e o procedimento adotados foram os seguintes: com os materiais necessários já separados e pesados, misturou-se na betoneira os agregados, percentual desejado para cada mistura de brita e de resíduo, com metade da água calculada, conforme apresentado na Figura 32(a), durante 2 minutos aproximadamente. Após atingir homogeneidade, acrescentou-se o cimento em sua totalidade, conforme apresentado na Figura 32(b). À medida que os materiais foram misturados, acrescentou-se o restante da água gradativamente.



(a)

(b)

Figura 32 – Concretagem. (a) Mistura dos agregados com a água; (b) Adição do cimento

Durante o processo de mistura, observou-se a existência de acúmulo de pasta (aglomerante e água) no fundo da betoneira, o que foi removido manualmente

com auxílio de espátula, após o que a betoneira era religada, conforme apresenta a Figura 33(a). O tempo utilizado durante todo o processo de mistura foi de aproximadamente 5 minutos. Limitou-se o tempo máximo para o preparo do concreto e a concretagem dos corpos de prova em 60 minutos, conforme orientação do ACI 522 (2013).

O controle durante a produção foi feito através da análise táctil visual do concreto permeável, observando se os agregados estavam envoltos pela argamassa de maneira homogênea, se havia um aspecto brilhoso na mistura e se ao ser comprimida manualmente havia a aglomeração das partículas, conforme apresenta a Figura 33(b).



Figura 33 – (a) Etapa final da concretagem; (b) Análise táctil visual do concreto

2.2.3 Moldagem

A norma ABNT NBR 5738 (2016), que refere-se à moldagem e cura de CP cilíndricos ou prismáticos de concreto, sugere que os corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro, com adensamento manual, sejam preenchidos com 2 camadas aplicando-se 12 golpes em cada uma. Porém, um estudo experimental referente à energia de compactação, elaborado por SULEIMAN *et al.* (2006), defendeu que, para concretos permeáveis, o melhor resultado em relação às propriedades mecânicas do concreto é obtido através do preenchimento do CP cilíndrico em 3

camadas e aplicando 15 golpes em cada uma delas, sendo as demais considerações idênticas à norma para concretos convencionais. A Figura 34 mostra a compactação do corpo de prova cilíndrico.



Figura 34 – Compactação manual dos corpos de prova cilíndricos

Na compactação dos prismas com seção quadrada de 150 mm e comprimento de 500 mm, essa norma brasileira preconiza o preenchimento com 2 camadas, aplicando-se 75 golpes em cada. Conforme o exposto anteriormente, o estudo obteve melhor desempenho quando o prisma com 100 mm x 100 mm x 400 mm de dimensões foi preenchido com 2 camadas, aplicando-se 25 golpes em cada uma delas. Analogamente, neste estudo, o preenchimento do prisma 150 mm x 150 mm x 500 mm de dimensões foi realizado com 3 camadas, aplicando-se 25 golpes em cada camada, tomando-se o cuidado no preenchimento da região das arestas para evitar vazios excessivos que prejudicam a resistência do concreto. O acabamento superficial foi executado com o auxílio de uma desempenadeira de madeira. A Figura 35 mostra a compactação do prisma.



Figura 35 – Compactação manual dos prismas

Da mesma maneira, a placa 600 mm x 600 mm x 100 mm de dimensões foi preenchida com 2 camadas e aplicando-se 45 golpes em cada uma, conforme ilustra a Figura 36. Em relação às arestas e ao acabamento superficial as considerações, foram idênticas as etapas realizadas na moldagem do prisma.



Figura 36 – Compactação manual da placa

Como a vibração mecânica das placas era inexequível devido à capacidade do equipamento disponível no laboratório não ser suficiente para tais cargas (o conjunto da forma mais o concreto é da ordem de 130 kg), optou-se por não executar a vibração nos demais corpos de prova cilíndricos e prismáticos, mantendo os mesmos critérios de adensamento para melhor comparação e análise dos resultados.

Após a moldagem, todos os corpos de prova foram mantidos no ambiente do laboratório até atingir a idade para a desforma.

Mesmo levando todas as considerações citadas durante o processo de concretagem e moldagem, observou-se que em alguns corpos de prova tiveram falhas visíveis, conforme ilustra a Figura 37, gerando áreas com nichos de concretagem, o que levam à diminuição da resistência do concreto.

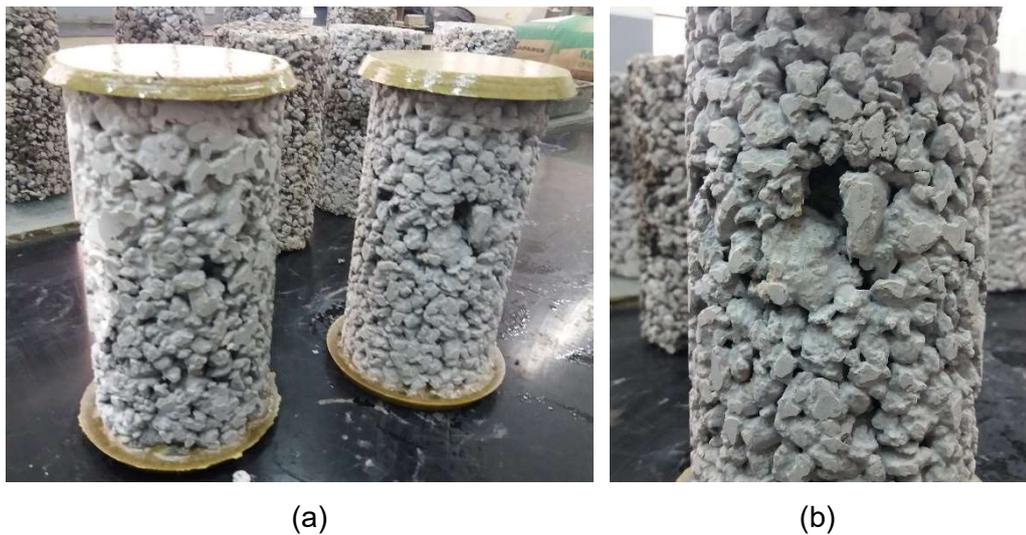


Figura 37 – Concreto 50% resíduo (a) Falhas na concretagem; (b) Detalhe.

2.2.4 Desforma, Identificação e Cura

A norma ABNT NBR 5738 (2016) estabelece os tempos de 24 h e 48 h após a concretagem para desforma dos Corpos de prova cilíndricos e prismáticos, respectivamente. Contudo, por se tratar de um concreto peculiar, estudos mostraram que o concreto permeável necessita de um período maior para adquirir estabilidade nas primeiras idades. Apesar de BATEZINI (2013) ter adotado 7 dias para o concreto

adquirir a estabilidade, no presente estudo o tempo adotado para a desforma do concreto foi de 3 dias após a concretagem, que foi suficiente tanto para os corpos de prova cilíndricos quanto para os prismáticos, conforme apresentados nas Figura 38(a) e Figura 38(b).

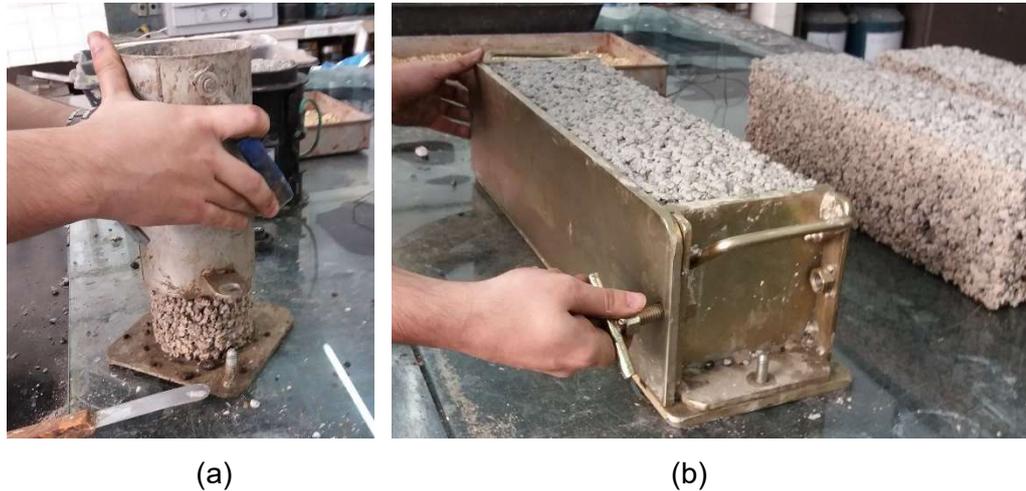


Figura 38 – Desforma do concreto 100% resíduo (a) CP cilíndricos; (b) prismas.

Devido à irregularidade e porosidade excessiva na superfície dos corpos de prova, tornou-se inexequível sua identificação da maneira usual. A solução encontrada foi fazer marcações, no topo e nas laterais dos elementos, com cores distintas para cada tipo de mistura, como ilustra a Figura 39. A relação definida foi:

- Concreto de Referência = BRANCO;
- Concreto com 10% Resíduo = AMARELO;
- Concreto com 20% Resíduo = VERMELHO;
- Concreto com 50% Resíduo = LARANJA;
- Concreto com 100% Resíduo = SEM COR.



Figura 39 – Identificação por cores. (a) concreto referência; (b) concreto com 10% resíduo.

Quando houve a necessidade de identificação dos corpos de prova de uma mesma mistura com um determinado teor de resíduo de pavimentos asfálticos em virtude dos ensaios de porosidade e capilaridade que compararam a massa de um mesmo elemento, optou-se por fazer marcações com símbolos diferenciando-os entre si, além das cores pré-estabelecidas, como apresenta a Figura 40, evitando equívocos nas leituras.



Figura 40 – Identificação por cores e símbolos dos Corpos de prova cilíndricos

A cura dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos foi feita através de imersão em água saturada de cal; enquanto as placas, devido às suas dimensões não serem compatíveis com os tanques disponíveis, foram mantidas dentro da câmara úmida conforme a norma ABNT NBR 9479 (2006) envoltas por panos

úmidos. A cura dos Corpos de prova cilíndricos e prismáticos foram executados conforme mostra a Figura 41.

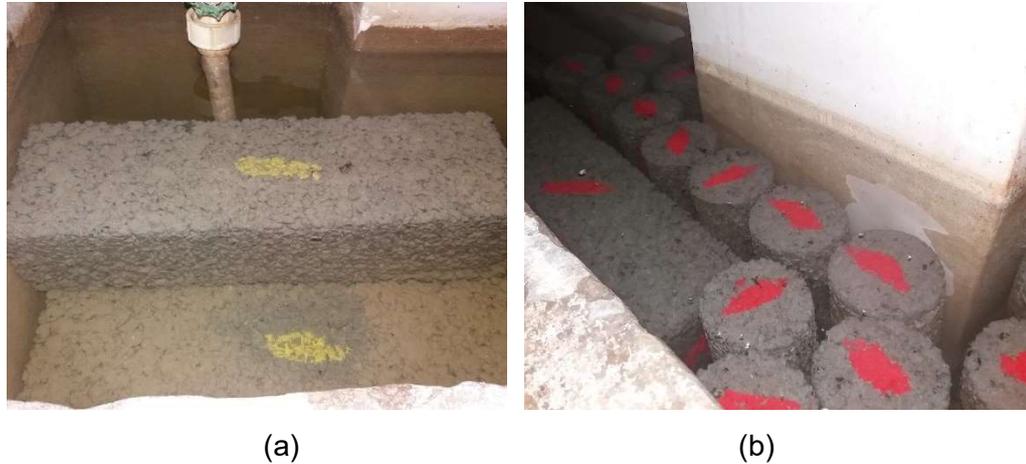


Figura 41 – Cura dos Corpos de prova cilíndricos e dos prismas. (a) Concreto com 10% resíduo; (b) Concreto com 20% resíduo.

2.2.5 Capeamento

Apesar de atualmente o capeamento utilizando enxofre ser obsoleto, neste caso foi a solução adotada, pois as técnicas usuais não se aplicavam. A utilização de pasta de cimento devido ao concreto ser permeável e a retificação por abrasão devido à fragmentação do resíduo de pavimentos asfálticos (presença de finos aglomerados pelo ligante asfáltico possuem baixa resistência) poderiam alterar as características mecânicas e hidráulicas dos mesmos comprometendo os resultados. Foram seguidas as recomendações da norma ABNT NBR 5738 (2016). A Figura 42 mostra o CP no molde antes e após o capeamento com o enxofre líquido até a secagem, garantindo a ortogonalidade das faces.



(a)

(b)

Figura 42 – (a) CP no molde; (b) Capeamento com enxofre.

3 ENSAIOS LABORATORIAIS

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UERJ. O manuseio dos equipamentos foi feito por técnicos do próprio laboratório, acompanhados pela autora deste estudo bem como alunos de iniciação científica.

Todos os ensaios foram executados seguindo as diretrizes normativas vigentes, que são citadas em cada ensaio respectivo. Para realização dos ensaios, foi utilizada a prensa mecânica alemã (Losenhausen Maschinenbau AG – LOS) com capacidade de 0 kN a 196kN e precisão de 1 kN aproximadamente, que possui escala de força adequada devido ao intervalo da força de ruptura dos corpos de prova.

As quantidades de corpos de prova utilizadas para a realização dos ensaios laboratoriais encontram-se apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 – Quantidade de corpos de prova ensaiados por mistura

Ensaio	Quantidade	Dimensão do CP
Compressão axial	12 un*	cilindro 100 mm x 200 mm
Módulo de deformação secante	5 un	cilindro 100 mm x 200 mm
Tração na flexão	3 un	viga 150 mm x 150 mm x 500 mm
Tração por compr. diametral	3 un**	cilindro 100 mm x 200 mm
Massa específica e Porosidade	3 un	cilindro 100 mm x 200 mm
Capilaridade	3 un**	cilindro 100 mm x 200 mm
Permeabilidade in loco	1 un	placa 100 mm x 600 mm x 600 mm

* Com exceção do concreto com 100% resíduo;

** Os corpos de prova foram os mesmo utilizados no ensaio de porosidade.

3.1 Massa específica no estado fresco

Durante o processo de concretagem, foram avaliadas as massas específicas aparentes no estado fresco do concreto permeável. Segundo a norma ABNT NBR

9833 (2009), o ensaio consiste no adensamento manual do concreto fresco em um recipiente de 8,0 litros em 3 camadas aplicando 25 golpes em cada uma delas. Após arrasamento, o conjunto foi pesado, conforme apresentado na Figura 43.

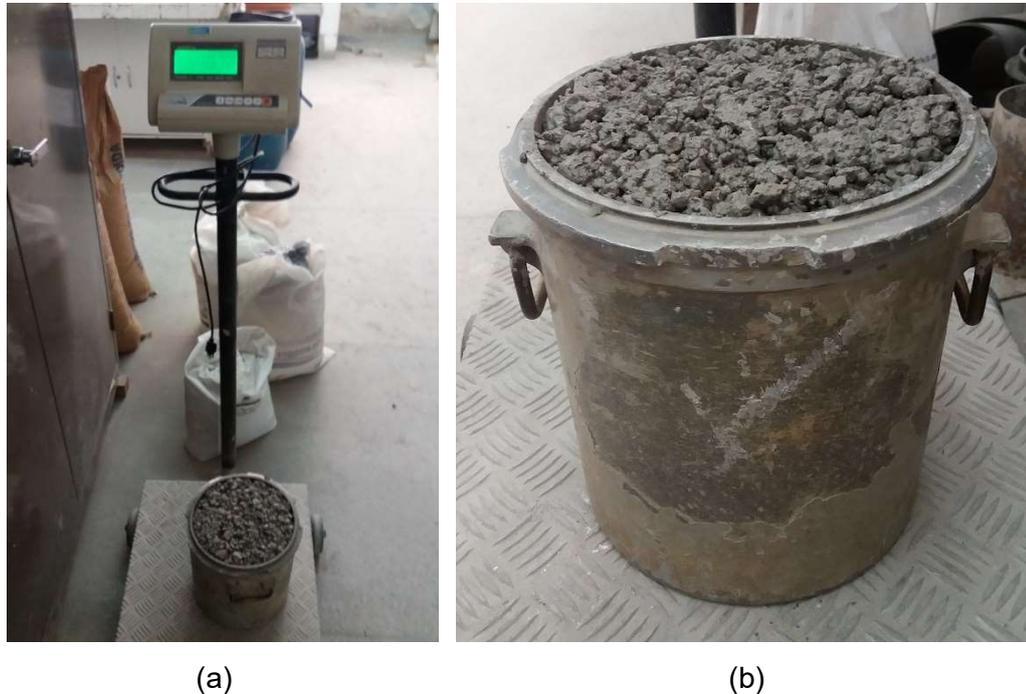


Figura 43 – Ensaio de massa específica no estado fresco. (a) Pesagem; (b) Detalhe.

A massa específica foi calculada segundo a equação (10).

$$\mu_{ef} = \frac{M - m_t}{V_t} \quad (10)$$

onde:

μ_{ef} é a massa específica no estado fresco (kg/m^3);

M é a massa total do conjunto, tara mais concreto (kg);

m_t é a massa da tara (kg);

V_t é o volume da tara (m^3).

3.2 Compressão axial

O ensaio de compressão axial foi executado de acordo com as orientações estabelecidas pela norma ABNT NBR 5739 (2007). A máquina foi operada pelo técnico do laboratório com a velocidade do carregamento de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s. Os corpos de prova foram capeados conforme descrito anteriormente. Na Figura 44 é apresentado o ensaio com corpos de prova do concreto de referência.

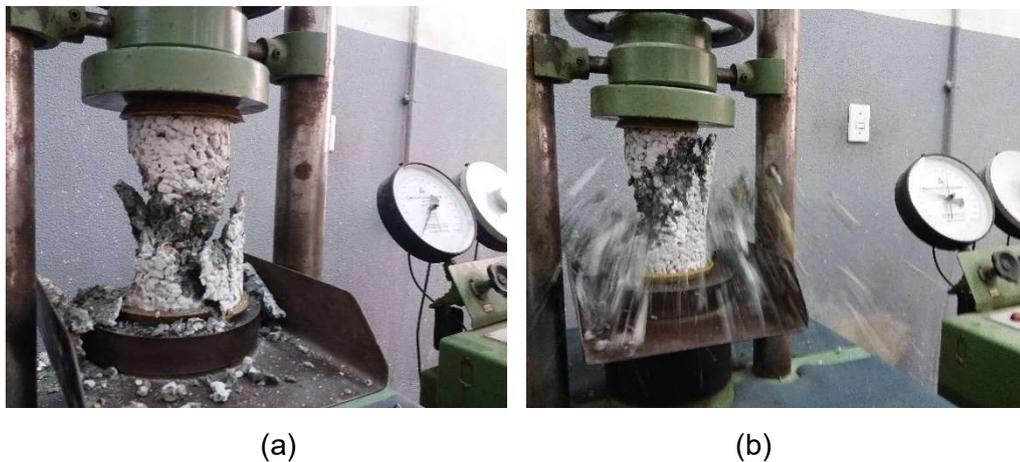


Figura 44 – Ensaio de compressão axial do concreto de referência. (a) 7 dias; (b) 28 dias.

A resistência foi calculada segundo a equação (11).

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (11)$$

onde:

f_c é a resistência à compressão, em megapascals (MPa);

F é a força máxima registrada na máquina de ensaio, em newtons (N);

D é o diâmetro do corpo de prova, em milímetros (mm).

3.3 Módulo de deformação secante

O ensaio para determinar o módulo estático de elasticidade seguiu as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 8522 (2008).

Para este ensaio, foi utilizado compressômetro com bases independentes e dois relógios comparadores fixados diametralmente opostos. Sua fixação no corpo de prova foi motivo de cautela e morosidade no ensaio, devido à grande presença de vazios e a fragmentação do resíduo de pavimentos asfálticos quando aplicava-se o aperto dos pinos. Na ocorrência de tais efeitos, iniciava-se o processo de fixação até ser garantida a estabilidade e perpendicularidade do conjunto. A Figura 45 apresenta a aparelhagem utilizada no ensaio de módulo de deformação.



Figura 45 – Concreto 100% resíduo. (a) Ensaio de módulo de deformação; (b) Detalhe do relógio comparador.

O módulo de deformação secante foi obtido através da equação (12).

$$E_{cs} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_n - \sigma_a}{\varepsilon_n - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (12)$$

onde:

E_{cs} é o módulo de deformação secante, expresso em gigapascals (GPa);

σ_n é a tensão maior, expressa em megapascals (MPa);

σ_a é a tensão básica, expressa em megapascals ($\sigma_a = 0,5 \text{ MPa}$);

ϵ_n é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão maior;

ϵ_a é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão básica.

3.4 Tração na flexão

O ensaio para determinar a resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos seguiu as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 12142 (2010). A mesma emprega o princípio da viga simplesmente apoiada com duas forças concentradas nos terços do vão.

Trata-se de um ensaio simples, mas vale ressaltar algumas observações, tais como: a face de arrasamento deve ficar posicionada para a lateral; certificar que o posicionamento da viga em relação ao apoio estava equidistante; verificar a ortogonalidade entre os eixos da máquina e do corpo de prova; observar a disposição dos elementos de apoio articulados; fazer as leituras das larguras e alturas médias obtidas através de três valores (superior, mediano e inferior) da seção de ruptura. Na Figura 46 ilustra a realização do ensaio e as rupturas dos prismas.



Figura 46 – Concreto 100% resíduo. (a) Ensaio de tração na flexão; (b) Prismas rompidos.

A resistência à tração foi obtida através da equação (13), para o caso da seção de ruptura ocorrer na região entre as duas forças concentradas.

$$f_{ct,f} = \frac{F \times l_{vão}}{b \times h^2} \quad (13)$$

onde:

$f_{ct,f}$ é a resistência à tração na flexão, expressa em megapascals (MPa);

F é a força máxima registrada na máquina de ensaio, expressa em newtons (N);

$l_{vão}$ é a dimensão do vão entre os apoios, expressa em milímetros (mm);

b é a largura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

h é a altura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

3.5 Tração por compressão diametral

A norma ABNT NBR 7222 (2011) estabelece os critérios para determinação da resistência à tração por compressão diametral de CP cilíndrico e foi baseada nela que esse ensaio foi realizado. O procedimento para execução do ensaio é simples, porém devem ser verificadas algumas particularidades. A norma recomenda que placas de aço usinado sejam utilizadas para a distribuição uniforme as cargas sobre o CP, quando o mesmo tiver dimensão maior do que o prato da prensa mecânica, bem como, a utilização de tiras de madeira isentas de defeitos para cada determinação. O CP deve ser colocado de tal maneira que o eixo de aplicação da carga coincida com o plano axial do mesmo. Na Figura 47 são apresentados o ensaio sendo executado e o detalhe do CP rompido diametralmente.



Figura 47 – (a) Ensaio de tração por compressão diametral; (b) Detalhe da ruptura.

Três corpos de prova foram rompidos para cada mistura com teor de resíduo de pavimentos asfálticos diferenciado. A resistência à tração foi calculada através da equação (14).

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi \times D \times L} \quad (14)$$

onde:

$f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral, expressa com três algarismos significativos, em megapascals (MPa);

F é a força máxima registrada na máquina de ensaio, expressa em newtons (N);

D é o diâmetro do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

L é comprimento do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

3.6 Massa específica no estado endurecido e Porosidade total

Devido à peculiaridade do concreto permeável em relação à porosidade e ao processo de secagem em relação ao concreto convencional, o ensaio foi executado conforme a norma americana ASTM C1754 (2012), que consiste basicamente na verificação da massa seca, da massa imersa e a relação entre elas.

O primeiro procedimento foi a secagem dos corpos de prova, pelo método B da norma, no qual submetem-se os elementos à uma temperatura de $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ durante $24\text{ h} \pm 1\text{ h}$. Após este período, os corpos de prova são retirados para serem resfriados naturalmente (1 h a 3 h), após o que são pesados, retornam para a estufa por mais 2 h e repete-se a pesagem dos corpos após resfriados. Se a diferença entre duas massas subsequentes for menor do que 0,5% admite-se que o corpo de prova atingiu a constância de massa, ou seja, a massa seca, caso contrário repete-se o processo.

Atingido a massa seca, os corpos de prova são resfriados em temperatura ambiente para serem então pesados em balança com precisão de 0,01 g, conforme apresentado na Figura 48.



Figura 48 – Determinação da massa seca

Após anotado a massa seca, os corpos de prova ficam submersos durante $30\text{ min} \pm 5\text{ min}$. Para a verificação da massa imersa, colocou-se o CP dentro do cesto mantendo-o dentro d'água. Foi aconselhado, pela norma ASTM C1754 (2012), bater 10 vezes em sua lateral com um martelo de borracha em torno de sua circunferência fazendo com que o ar aprisionado saia do CP. A massa imersa foi anotada e a temperatura da água verificada, conforme mostra a Figura 49(a) e (b).

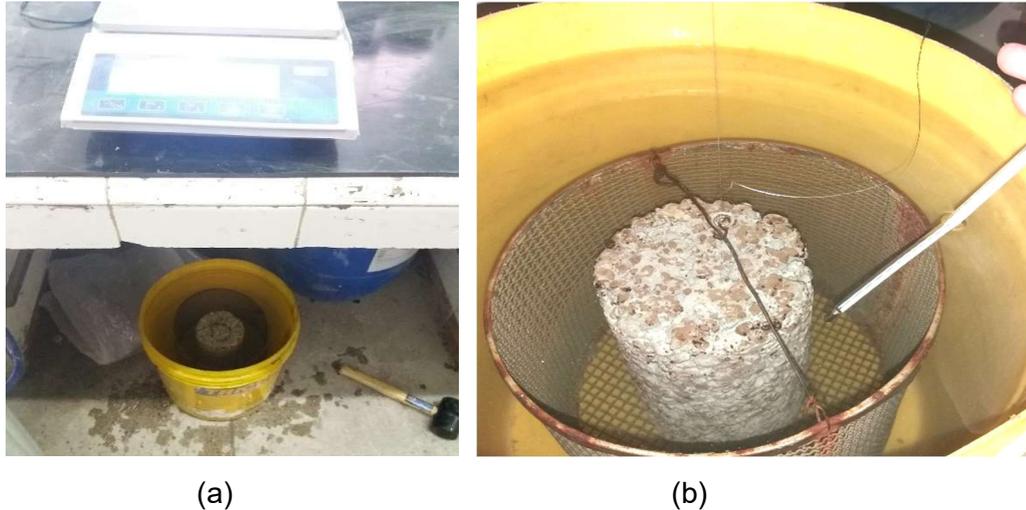


Figura 49 – (a) Determinação da massa imersa; (b) Aferição da temperatura.

Com os dados anotados, calculou-se a massa específica e o índice de vazios (porosidade) do corpo de prova pelas equações (15) e (16), respectivamente.

$$\mu_{CP} = \frac{K \times A}{D^2 \times L} \quad (15)$$

onde:

μ_{CP} é a massa específica do corpo de prova, em g/mm^3 ;

A é o massa seca do corpo de prova, em g;

D é o diâmetro do corpo de prova, em mm;

L é o comprimento do corpo de prova, em mm;

K é uma constante de 1.273.240 para unidades no SI.

$$\text{IndiceVazios} = \left[1 - \left(\frac{K \times (A - B)}{\mu_{\text{água}} \times D^2 \times L} \right) \right] \times 100 \quad (16)$$

onde:

B é a massa imersa do corpo de prova, em g;

$\mu_{\text{água}}$ é a massa específica da água na temperatura da água do banho, em g/mm^3 .

3.7 Capilaridade

O ensaio foi baseado na norma ABNT NBR 9779 (2012) referente à determinação da absorção de água por capilaridade em argamassas e concreto endurecido.

Os corpos de prova, na condição de massa seca e resfriados, foram colocados em um recipiente com água de tal maneira que os mesmos ficaram parcialmente imersos com o nível constante de $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ acima da sua face inferior.

A leitura da massa foi realizada nos tempos indicados pela norma de 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h. Na hora determinada para as leituras, os corpos de prova foram superficialmente enxutos com pano úmido, pesados e imediatamente recolocados no recipiente, conforme se vê na Figura 50.



Figura 50 – Ensaio de capilaridade. (a) Processo de imersão parcial; (b) Pesagem.

Após decorridas 72 h parcialmente imersos, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral, conforme a norma ABNT NBR 7222 (2011), possibilitando a observação da distribuição da água no interior do elemento, como pode ser observado na Figura 51.



Figura 51 – Ruptura diametral do CP

De posse dos dados, pôde-se calcular a absorção de água por capilaridade pela equação (17).

$$C = \frac{A_1 - B_1}{S} \quad (17)$$

onde:

C é a absorção de água por capilaridade, em g/cm²;

A₁ é a massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo específico, em g;

B₁ é a massa do corpo de prova seco, assim que este atingir a temperatura de (23 ± 2)°C, em g;

S é a área da seção transversal, em cm².

3.8 Permeabilidade

O ensaio foi baseado na norma ABNT NBR 16416 (2015), que consiste basicamente na velocidade que determinada massa de água que infiltra no

pavimento de concreto. A permeabilidade do pavimento recém-construído deve ser analisada no campo após sua execução, utilizando o método de ensaio descrito no anexo A da referida norma, cujo o coeficiente de permeabilidade deve ser maior que 10^{-3} m/s para o pavimento ser considerado permeável. O ensaio descrito na norma ASTM C1701 (2009) é idêntico ao estabelecido na norma brasileira, contudo, o coeficiente mínimo para classificar um pavimento como sendo permeável é de $1,4 \times 10^{-3}$ m/s.

A norma ABNT NBR 16416 (2015) permite uma avaliação prévia do coeficiente de permeabilidade no laboratório, através de dois métodos de ensaio, segundo a norma ABNT NBR 13292 (1995) ou conforme o anexo A da referida norma, para um segmento de pavimento com área mínima de $0,5 \text{ m}^2$. Optou-se pelo segundo método com a finalidade de posteriormente reaproveitar o segmento de pavimento na execução de ensaio de permeabilidade na condição de colmatação.

Para o ensaio, foram utilizadas placas com dimensões de 600 mm x 600 mm x 10 mm (área de $0,36 \text{ m}^2$), apesar de não obedecer a área mínima estipulada devido à alguns fatores como: o ensaio ser realizado no laboratório, a forma metálica disponível, o peso do conjunto (forma metálica mais concreto) ser em torno de 130 kg, dificultando o transporte da mesma.

Além do exposto acima, é de conhecimento da literatura técnica, quanto menores são as dimensões da amostra, maior a resistência mecânica do concreto, devido a uma tendência de redução da porosidade do mesmo que consequentemente tende a reduzir a permeabilidade da amostra. Logo, quando adota-se uma placa com área menor do que a estipulada por norma, obtêm-se valores menores de coeficiente de permeabilidade. Se para a placa com dimensões menores o ensaio leva a coeficientes satisfatórios, isso significa que a mesma encontra-se numa situação favorável à estabelecida.

Para a preparação do ensaio, a norma ABNT NBR 16416 (2015) recomenda a utilização de massa para vedação da borda inferior do recipiente cilíndrico, com diâmetro de 300 mm e com altura mínima de 50 mm. Contudo, como não era garantida a remoção integral dessa massa entre os poros, essa técnica não foi empregada considerando sua influência nos resultados dos ensaios de outras posições no topo e na base da placa, estes com a finalidade de analisar a interligação dos poros, além da realização posterior do ensaio de colmatação.

A solução encontrada foi a fixação de uma tira de espuma, com aproximadamente 20 mm de espessura, na borda do recipiente cilíndrico, otimizando sua colocação e retirada nas demais posições ensaiadas, além de não deixar resíduos. Definida a posição do ensaio (central ou nos quatro quadrantes), o recipiente foi fixado na placa através de cordas elásticas tensionadas.

O procedimento se iniciou com a pré-molhagem da placa, despejando-se 3,6 litros de água, cuja vazão da água foi tal que a lâmina fosse constante. Para facilitar esse controle, marcou-se o recipiente internamente com uma faixa limitando a altura da lâmina d'água de 10 mm a 15 mm da superfície da placa, conforme indicado na norma. Vale ressaltar que foi considerado o espaçamento referente à tira de espuma comprimida. A contagem do tempo se iniciou quando a água atingiu a superfície da placa e finalizou quando a camada de água não foi mais vista na superfície. Sendo este tempo superior a 30 segundos, a etapa de pré-molhagem foi executada com 3,6 litros de água, caso contrário, utilizou-se 18 litros. A pré-molhagem para definir quantos litros seriam utilizados no ensaio foi feita conforme ilustra a Figura 52.



Figura 52 – Concreto 100% resíduo. (a) Pré-molhagem na posição central; (b) Detalhe.

O tempo da pré molhagem da primeira placa ensaiada, referente ao concreto com teor de 100% resíduo de pavimentos asfálticos, foi inferior a 30 segundos. Adotou-se a massa de 18 kg de água para todas as placas nas diversas posições, com o objetivo de utilizar o mesmo critério de ensaio em todas as misturas, conforme apresentado na Figura 53.



(a)

(b)

Figura 53 – Determinação do coeficiente de permeabilidade em outras posições. (a) 1º quadrante; (b) 2º quadrante.

O ensaio foi executado duas vezes em cada posição, central e nos quatro quadrantes, tanto no topo quanto na base da placa, totalizando dez posições em cada mistura. As posições referentes aos quadrantes foram observadas ao girar a placa em relação ao eixo adotado, para não ocorrer equívocos durante as leituras, conforme ilustrado na Figura 54. O procedimento foi executado em todas as 5 placas de concreto permeável.

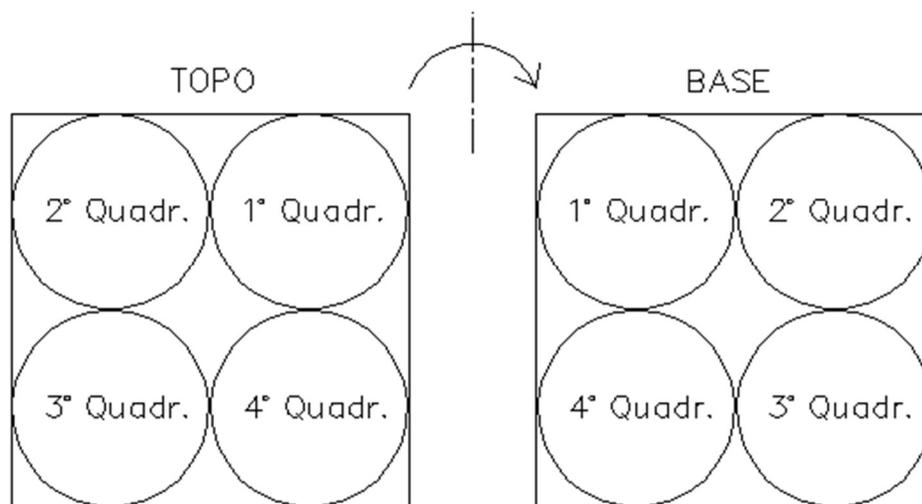


Figura 54 – Esquema usado para girar a placa.

Após o registro dos tempos, considerou-se a média para o cálculo do coeficiente de infiltração através da equação (18).

$$I = \frac{K_1 \times M_{\text{água}}}{D_{\text{int}}^2 \times t} \quad (18)$$

onde:

I é o coeficiente de infiltração, em mm/h;

M_{água} é a massa de água, em kg;

D_{int} é o diâmetro interno do recipiente cilíndrico, em mm;

t é o tempo de infiltração, em s;

K₁ é uma constante de 4.583.666.000 para unidades no SI.

3.9 Colmatação

O procedimento do ensaio de colmatação foi semelhante ao de permeabilidade. A diferença foi a adição de material fino para simular a colmatação durante a utilização na vida útil do pavimento permeável.

No ensaio, foram utilizados 500 g de areia com dimensão máxima de 2,36 mm – areia grossa (Série de Taylor). Com o recipiente cilíndrico posicionado e fixado no centro da placa, despejou-se a areia para formar uma camada de espessura homogênea e registrou-se o tempo para que os 18 litros de água infiltrasse na placa. Na Figura 55 são apresentados a camada de areia e o ensaio de colmatação.

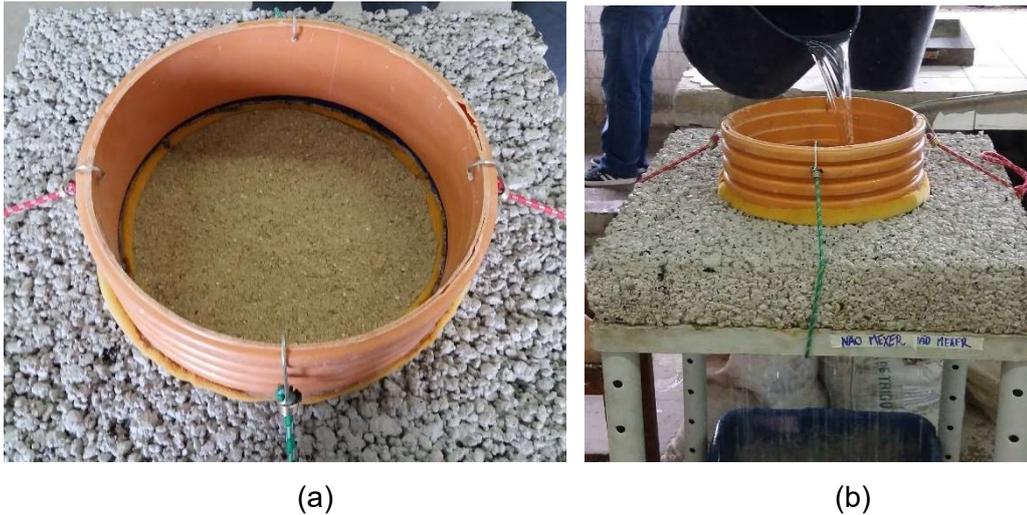


Figura 55 – (a) Camada de areia; (b) Ensaio de colmatção.

Durante o ensaio, foi observado que, na área de contato da água com a placa, a areia foi direcionada e aprisionada nas laterais, conforme Figura 56(a), devido ao confinamento causado pelo recipiente cilíndrico do ensaio. De maneira a minimizar este efeito, o despejo da água foi executado em movimentos circulares e contínuos, conforme ilustrado na Figura 56(b), mantendo a lâmina d'água na altura indicada pela norma, entre 10 mm e 15 mm.



Figura 56 – (a) Detalhe do efeito de confinamento; (b) Despejo circular e contínuo.

Considerando que o processo de colmatção se trata de um processo contínuo de sedimentação dos finos transportados através das águas pluviais, o

ensaio foi repetido, na posição central das placas de concreto permeável com diferentes teores de resíduo de pavimentos asfálticos. Para cada uma delas, o ensaio foi feito em diferentes dias não consecutivos com a finalidade da secagem dos finos no interior da placa. O coeficiente de permeabilidade foi calculado da mesma forma apresentada no ensaio de permeabilidade, através da equação (18). Comparando os coeficientes obtidos nos dois ensaios, pôde-se analisar a influência da colmatação.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios, através de tabelas e gráficos contendo os valores médios e os desvios padrão (entre parênteses), exceto onde indicado, de cada ensaio.

São analisadas as relações paramétricas encontradas e as curvas de tendências observadas. É feita uma análise comparativa, quando houver relevância, entre os resultados obtidos nos ensaios e os resultados apresentados em outros estudos. Esta comparação é feita através dos resultados normalizados de cada autor, ou seja, os valores obtidos nos ensaios referentes ao concreto permeável com diferentes teores de substituição são divididos pelo valor correspondente ao concreto referência obtido no ensaio em questão de cada estudo, mesmo sabendo que existem diferenças entre os materiais utilizados, dosagem e procedimentos adotados pelos autores. Desta maneira, esta análise permite uma visão abrangente dos ensaios.

4.1 Massa específica no estado fresco

Os valores obtidos no ensaio referente à massa específica no estado fresco encontram-se na Tabela 23. Nos concretos referentes ao teores de 0% e 10% não foram executados os ensaios. Vale observar que existe uma constância nos resultados, independentemente da alteração nos teores de resíduo de pavimentos asfálticos.

Tabela 23 – Massa específica no estado fresco

Mistura	Massa específica no estado fresco (kg/m ³)
Concr. Refer.	-
10% Resíduo	-
20% Resíduo	1.893,75
50% Resíduo	1.881,25
100% Resíduo	1.756,25

4.2 Compressão axial

A resistência à compressão axial aos 28 dias de concretos permeáveis varia muito, pois depende de diversos fatores conforme exposto anteriormente na revisão bibliográfica. O maior valor obtido em estudo foi de 55,8 MPa, segundo DELLATE *et al.* (2009).

Os valores médios de resistência obtidos nos ensaios e seus respectivos desvios padrão (valores entre parênteses) encontram-se apresentados na Tabela 24. Os valores apresentados são referentes a média de três amostras por ensaio.

Tabela 24 – Valores do ensaio de resistência à compressão axial

Mistura	f _c (MPa)									
	3 dias		7 dias		14 dias		28 dias		42 dias	
Concr. Refer.	8,30	(1,05)	12,02	(2,19)	12,59	(1,28)	12,78	(2,32)	13,36	(1,41)
10% Resíduo	6,24	(0,31)	7,39	(0,13)	8,99	(0,43)	9,78	(1,12)	9,43	(0,09)
20% Resíduo	8,20	(1,00)	8,74	(0,70)	10,57	(0,38)	11,03	(0,47)	11,24	(0,53)
50% Resíduo	4,08	(0,19)	5,04	(0,52)	6,49	(0,25)	5,45	(0,26)	5,99	(0,53)
100% Resíduo	2,60	(0,28)	3,38	(0,34)	3,56	(0,29)	3,62	(-)	3,68	(0,09)

Vale ressaltar que foram feitas leituras nas idades de 3, 7, 14, 28 e 42 dias para cada mistura, esta última concomitante com o ensaio de módulo de elasticidade. Porém, para a mistura com o teor de 100% resíduo de pavimentos asfálticos, a leitura dos 28 dias não foi executada (o valor apresentado na tabela e no gráfico foi estimado através da curva de tendência).

Na Figura 57 são apresentadas as curvas da resistência à compressão em função da idade (tempo de cura) de todas as misturas, facilitando a análise do ensaio.

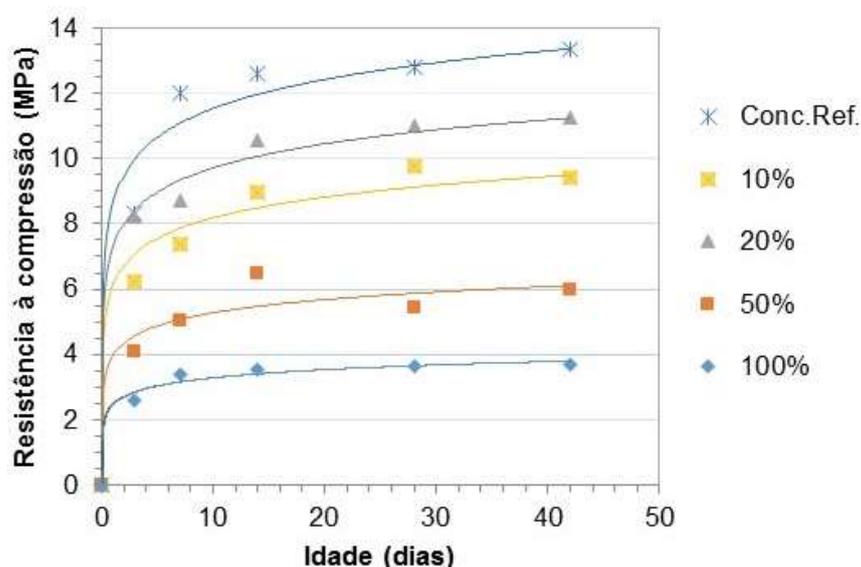


Figura 57 – Curva comparativa do ensaio de compressão axial *versus* tempo de cura

Como era de se esperar, a curva do concreto permeável com o teor 100% de resíduo de pavimentos asfálticos obteve os menores valores de resistência entre os demais, ao contrário do concreto de referência, que possui os maiores valores.

Na Figura 58, é feita uma correlação dos valores de resistências características aos 28 dias com os respectivos teores de substituição do agregado natural por resíduo de pavimentos asfálticos, de forma a analisar a influência do teor de substituição na resistência à compressão axial.

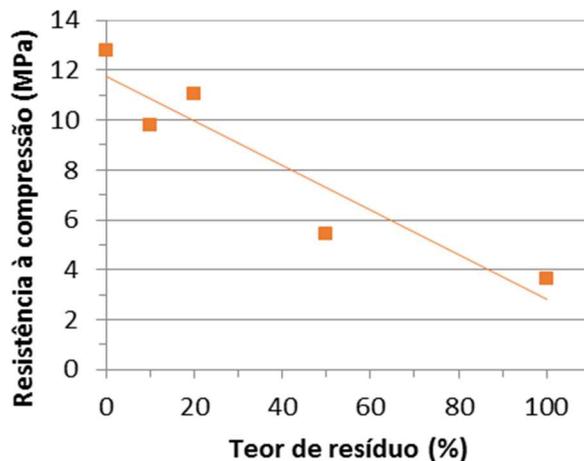


Figura 58 – Resultado do ensaio de compressão axial aos 28 dias de idade

Como observado na Figura 58, há um leve aumento (aproximadamente 12,8%) na resistência à compressão para o concreto permeável com teor de 20% em relação ao de 10%; contudo, podemos perceber que a tendência da curva é de redução da resistência com o aumento do teor de resíduo de pavimentos asfálticos. Essa redução também foi observada nos trabalhos de QUADRELLI *et al.* (2015) e RIBEIRO *et al.* (2015). Nas Figuras 59 e 60 estão representados os valores, reais e normalizados, respectivamente, obtidos nos ensaios por RIBEIRO *et al.* (2015) e por QUADRELLI *et al.* (2015). Pode-se observar a similaridade entre os resultados deste estudo e os apresentados por QUADRELLI *et al.* (2015).

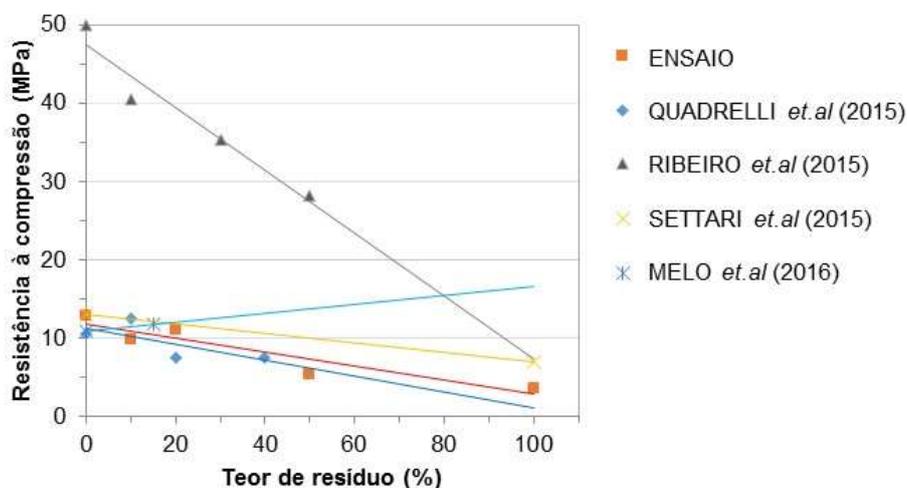


Figura 59 – Comparação entre resultados do ensaio de compressão axial

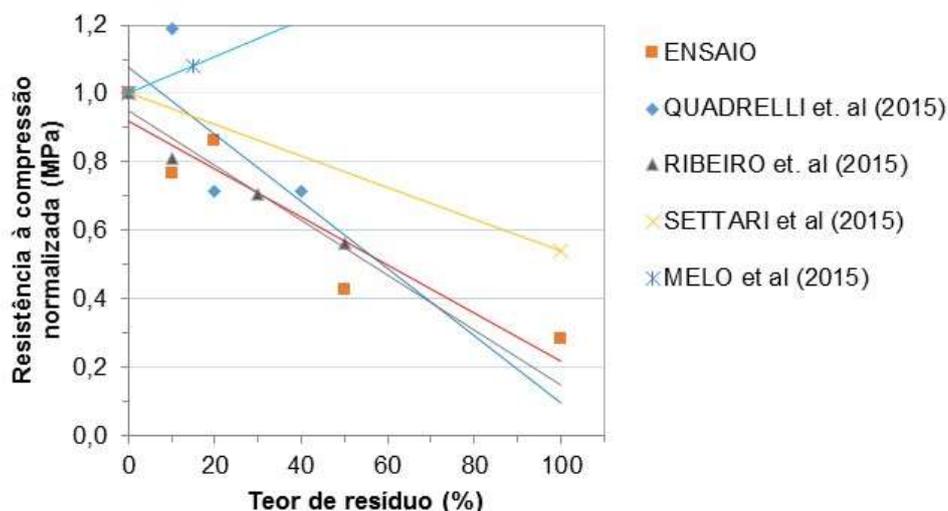


Figura 60 – Comparação entre resultados normalizados do ensaio de compressão axial

Encontraram-se estudos com valores mais elevados de resistência à compressão axial em concretos permeáveis que os deste estudo.

QUADRELLI *et al.* (2015) em sua pesquisa alteraram a relação a/c de 0,3 para 0,5 e obtiveram um ganho na resistência de mais de 100% em relação ao concreto de referência e de quase 35% no concreto com teor de 10% resíduo de pavimentos asfálticos o que é controverso segundo a lei de Abrams. Contudo, este efeito pode ser explicado devido à reduzida relação a/c (0,30) utilizada pelo autor. Relações a/c reduzidas e ausência de superplastificante na mistura prejudicam a trabalhabilidade e, por consequência, comprometem a resistência do concreto.

SANTOS *et al.* (2016) ensaiaram 3 misturas de concreto permeável com diferentes relações a/c (0,25, 0,30 e 0,35). Também obtiveram resultados maiores de resistência à compressão para a maior relação a/c . Segundo estes autores, esse efeito pode ser devido à falta de aderência entre as partículas por conta do reduzido teor de água, e com o aumento da relação a/c de 0,25 para 0,35, aumentou-se a trabalhabilidade da mistura; consequentemente os agregados foram melhor lubrificados pela pasta e se acomodaram melhor contribuindo para o ganho de resistência à compressão. Porém, como o objetivo principal deste estudo era obter concretos com maior permeabilidade com o uso de resíduo de pavimentos asfálticos, não houve uma preocupação com a resistência à compressão. Ressalta-se que

outras pesquisas devem ser elaboradas afim de elevar à resistência à compressão sem comprometimento da permeabilidade do concreto.

Outra questão para ser analisada mais detalhadamente é o fato da curva referente ao teor de 20% se aproximar mais à do concreto referência (teor 0%) do que à do concreto de 10%. Como os materiais utilizados neste estudo durante a concretagem, as curvas granulométricas dos agregados, a metodologia e os equipamentos utilizados nos ensaios foram idênticos em todas as misturas, a explicação pode estar na influência da interação entre a distribuição dos poros. Deve ser interessante analisar futuramente variações percentuais menores próximas dessa faixa para que se possa compreender a influência do teor de resíduo na resistência mecânica do concreto permeável.

4.3 Módulo de deformação secante

Nas Figuras 61 a 63, estão apresentadas as curvas obtidas no ensaio referente aos 3 Corpos de prova de cada mistura.

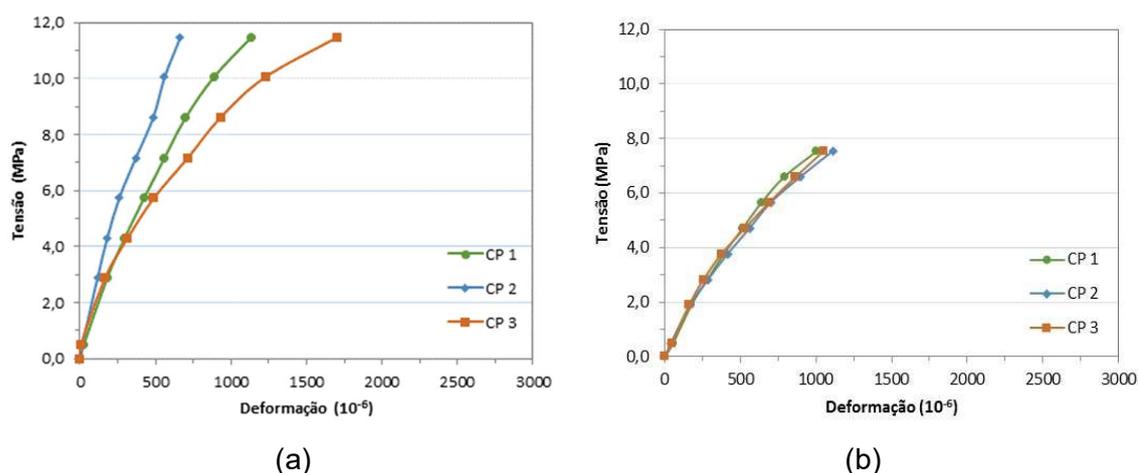


Figura 61 – Curva tensão *versus* deformação. (a) concreto referência; (b) concreto com 10% resíduo

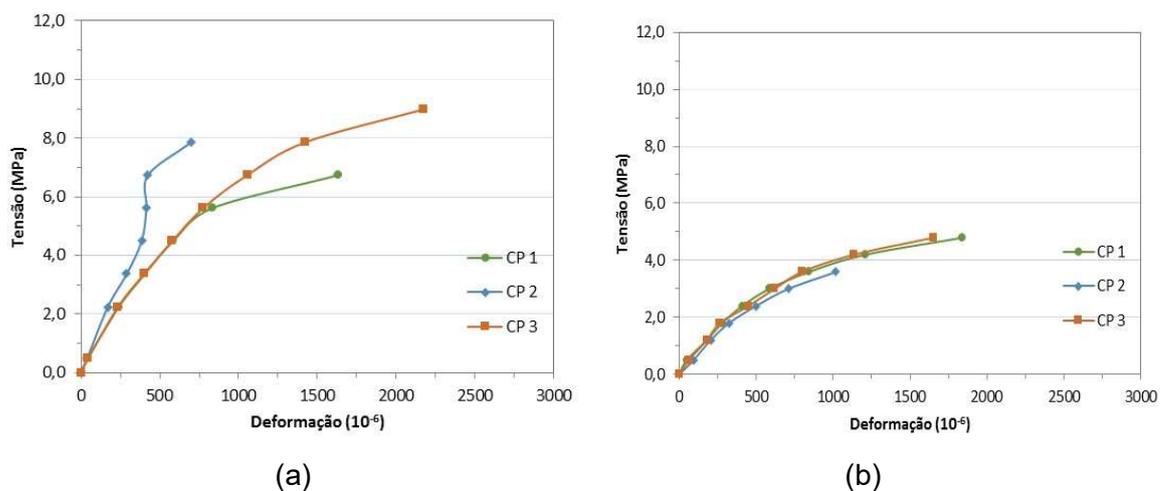


Figura 62 – Curva tensão *versus* deformação. (a) concreto com 20% resíduo; (b) concreto com 50% resíduo

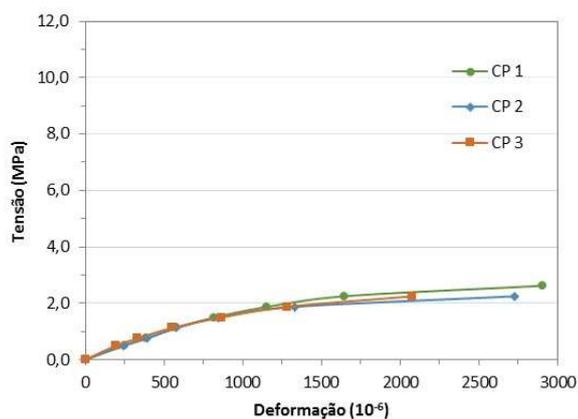


Figura 63 – Curva tensão *versus* deformação do concreto com 100% resíduo

A norma ABNT NBR 8522 (2008) estabelece que os resultados estejam dentro de uma faixa de tolerância para validar o ensaio, que corresponde a $\pm 20\%$ do valor da carga de ruptura média dos dois corpos de prova iniciais. Após essa análise, as curvas características foram obtidas através da média entre os valores das leituras dos três Corpos de prova e estão apresentadas na Figura 64.

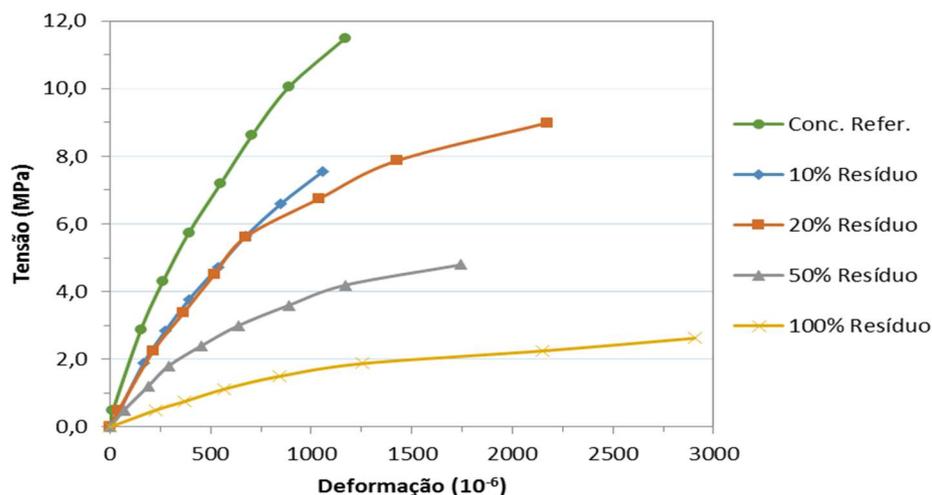


Figura 64 – Comparação entre as curva tensão *versus* deformação

Analisando o gráfico, pôde-se perceber que as deformações do concreto permeável, para um mesmo nível de tensão, tendem a aumentar em função ao acréscimo do teor de resíduo de pavimentos asfálticos na mistura. As curvas referentes ao concreto de 10% e 20% foram bem próximas, indicando que não houve alteração no módulo de deformação e somente na tensão de ruptura.

De acordo com a norma ABNT NBR 8522 (2008), para o nível de tensão $0,4f_c$, foram calculados os valores médios do módulo de elasticidade secante e os respectivos valores de desvio padrão referente a cada mistura, conforme apresentados na Tabela 25. E com base nas curvas apresentadas na Figura 64, foi ajustada uma reta à curva nos pontos referentes à tensão inicial de 0,5 MPa e 30% da tensão atingida, ou seja, a inclinação da reta equivale ao módulo de elasticidade tangente. A média obtida entre os valores referentes aos 3 corpos de prova de cada mistura e seu respectivos valores de desvio padrão (valores entre parênteses) encontram-se na Tabela 25.

Tabela 25 – Módulo de elasticidade secante e tangente

Mistura	Módulo de Elasticidade Secante (GPa)		Módulo de Elasticidade Tangente (GPa)	
Concr. Refer.	15,8	(4,53)	16,0	(4,86)
10% Resíduo	9,6	(0,40)	10,3	(0,80)
20% Resíduo	9,0	(1,87)	9,2	(1,99)
50% Resíduo	5,3	(0,43)	5,9	(0,52)
100% Resíduo	1,8	(0,04)	1,8	(0,06)

Analisando os resultados foi identificada a relação que quanto maior o teor de resíduo de pavimentos asfálticos menor foi o módulo obtido no ensaio. Como as misturas possuem os mesmos fatores, com exceção do tipo de agregado, este comportamento possivelmente se deve à baixa resistência do resíduo de pavimentos asfálticos em comparação ao agregado natural.

4.4 Tração na flexão

Em todos os ensaios as seções de rupturas ocorreram no terço médio do vão, caracterizando-as ruptura por flexão pura. Os valores médios dos três corpos de prova obtidos no ensaio para determinar a resistência à tração na flexão e seus respectivos desvios padrão (valores entre parênteses), encontram-se apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Resistência à tração na flexão

Mistura	$f_{ct, fm}$ (MPa)	
Concr. Refer.	2,28	(0,09)
10% Resíduo	1,96	(0,17)
20% Resíduo	2,12	(0,02)
50% Resíduo	1,89	(0,08)
100% Resíduo	1,22	(0,30)

Comparando os resultados obtidos neste estudo com valores da revisão bibliográfica, valores reais e normalizados conforme as Figuras 65 e 66, respectivamente, percebe-se uma similaridade na tendência dos resultados. Contudo, comparado com os resultados obtidos por QUADRELLI *et al.* (2015), a taxa de redução da resistência à flexão foi reduzida com o aumento do teor de resíduo, o que não ocorreu quando comparado com os resultados de RIBEIRO *et al.* (2015).

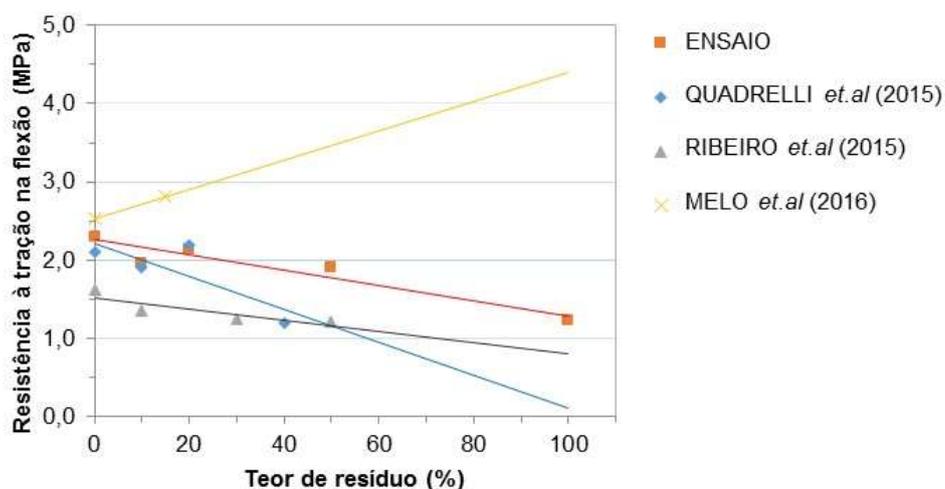


Figura 65 – Comparação de resultados do ensaio de tração na flexão

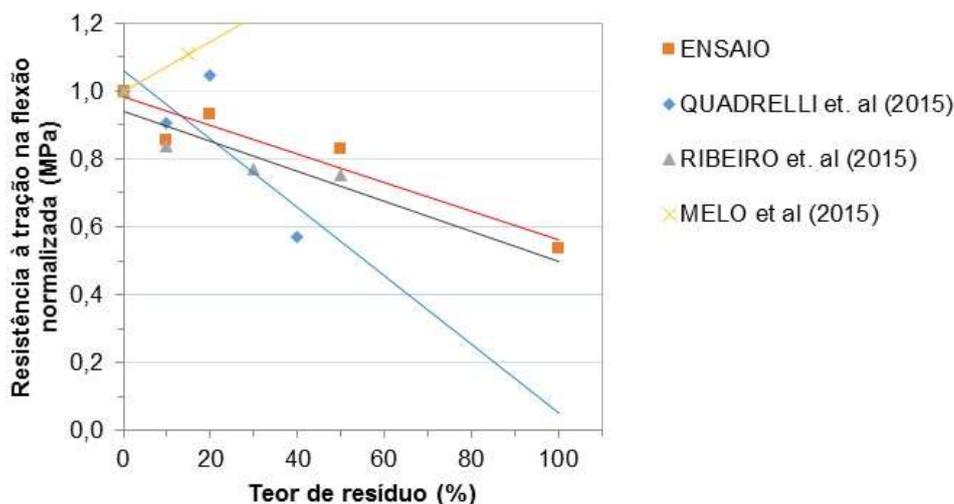


Figura 66 – Comparação de resultados normalizados do ensaio de tração na flexão

A norma ABNT NBR 16416 (2015) estabelece valores mínimos de resistência considerando o ensaio com prismas de dimensões 100 mm x 100 mm x 400 mm. Uma vez que os ensaios realizados foram com prismas de 150 mm x 150 mm x 500 mm, faz-se necessário o uso de um coeficiente a fim de comparar esses resultados.

Um estudo elaborado por KUNIEDA *et al.* (2004) aborda o efeito escala em ensaios de flexão em concreto poroso. Os autores estudaram a influência da altura e do comprimento dos prismas, de 100 mm, 200 mm e 300 mm e de 400 mm, 800 mm e 1.600 mm, respectivamente.

Tanto a teoria de Bazant quanto os autores citam que quanto menores as dimensões da amostra, maior é a resistência mecânica (tanto na flexão quanto na compressão), devido ao efeito parede das formas e da menor possibilidade de vazios e defeitos de concretagem na amostra.

Neste estudo obteve-se uma diferença de 1,85% entre as alturas de 100 mm e 200 mm. Admitindo a proporcionalidade para a altura de 150 mm, admitiu-se uma diferença entre as resistências de 0,925%. Já em relação ao comprimento, os autores não obtiveram diferença significativa entre 400 mm e 800 mm; neste caso, considerou-se que a diferença, de 400 mm para 500 mm, foi desprezível.

Para fins de comparação com a norma, os valores da Tabela 26 devem ser majorados no fator escala de 1,01%.

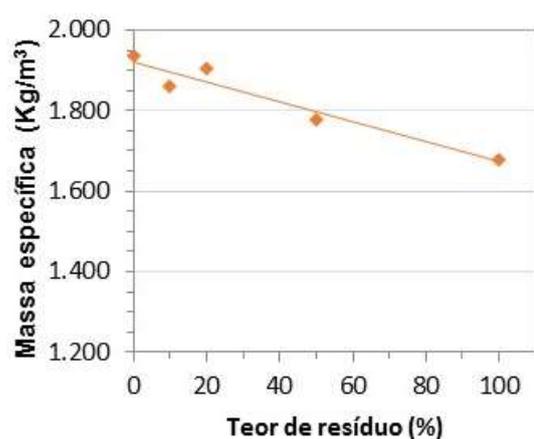
De acordo com a norma de pavimentos permeáveis moldados no local, os valores mínimos para resistência a tração na flexão é de 1,0 MPa, para tráfego de pedestres, e de 2,0 MPa, para tráfego leve, ou seja todos os concretos permeáveis do estudo satisfizeram as condições para utilização de tráfego de pedestre, porém, além do concreto de referência, o concreto permeável de 20% de resíduo de pavimentos asfálticos satisfaz a condição para ser utilizado como pavimento de tráfego leve. Observa-se que os valores referentes aos teores de 10% e 50% encontraram-se próximos do mínimo estabelecido por norma para tráfego leve. Contudo, é possível que, com melhorias adotadas durante o processo de moldagem estes valores podem ser otimizados, possibilitando sua utilização como pavimento para tráfego leve.

4.5 Massa específica no estado endurecido e Porosidade total

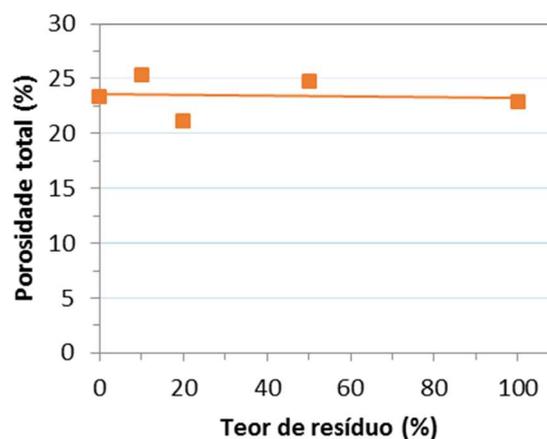
Os resultados obtidos nos ensaios de massa específica e de porosidade, bem como, seus respectivos valores de desvio padrão (valores entre parênteses) estão apresentados na Tabela 27 e na Figura 67 são apresentadas a relação entre estas propriedades do concreto permeável em função do teor de resíduo de pavimentos asfálticos.

Tabela 27 – Massa específica no estado endurecido e Porosidade

Mistura	Massa específica (kg/m ³)	Porosidade total (%)
Concr. Refer.	1.934,58 (46,99)	23,31 (1,76)
10% Resíduo	1.859,89 (10,35)	25,31 (0,11)
20% Resíduo	1.903,07 (29,64)	21,12 (1,39)
50% Resíduo	1.778,08 (4,81)	24,80 (0,34)
100% Resíduo	1.678,77 (42,70)	22,94 (2,13)



(a)



(b)

Figura 67 – (a) Curva massa específica *versus* teor de resíduo; (b) Curva porosidade *versus* teor de resíduo

Em relação à massa específica, os valores obtidos encontram-se dentro da faixa esperada de 1.300 kg/m^3 a 2.000 kg/m^3 , conforme apresentado por TENNIS *et al.* (2004). Ao analisar os resultados de massa específica no estado fresco em comparação com os do estado endurecido, os concretos não se comportaram semelhantemente. Pode-se atribuir a influência nos resultados às energias de compactação utilizadas nos ensaios serem baseadas por procedimentos distintos, uma pela norma brasileira e a outra por estudo internacional, como também, às características peculiares do material residual.

Em relação à porosidade de concretos permeáveis, os valores segundo TENNIS *et al.* (2004) variam entre 15% e 25%. Assim, os valores obtidos neste trabalho estão dentro desta faixa. As Figuras 68, 69 e 70 mostram o aspecto visual referente ao índice de vazios do concreto permeável de acordo com o teor de substituição.



Figura 68 – Aspecto visual da placa (a) concreto referência; (b) 10% resíduo

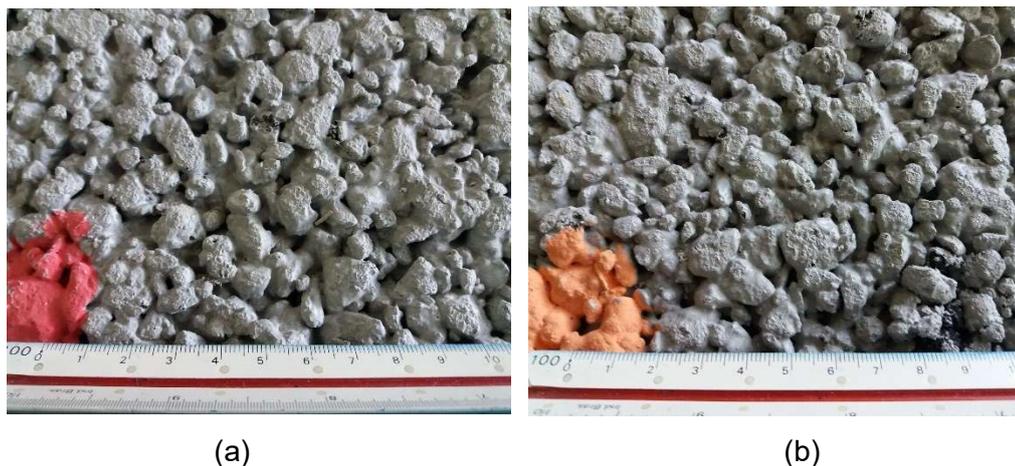


Figura 69 – Aspecto visual da placa (a) 20% resíduo; (b) 50% resíduo



Figura 70 – Aspecto visual da placa 100% resíduo

Analisando o aspecto visual das misturas, percebeu-se que todas apresentam similaridade em relação ao índice de vazios, ratificando os resultados obtidos no ensaio, conforme Figura 67 (b). Essa constância provavelmente se deve ao fato de que no presente estudo os agregados foram compatibilizados para possuírem curvas granulométricas semelhantes, influenciando a distribuição e o arranjo dos vazios.

Quando correlacionamos graficamente a resistência à compressão com a massa específica dos concretos permeáveis de diferentes teores de substituição de resíduo de pavimentos asfálticos, percebe-se que a curva tem característica exponencial e é decrescente à medida que se aumenta o teor de resíduo. O concreto de referência apresenta maior resistência à compressão e maior massa

específica, enquanto o concreto permeável com 100% resíduo, os menores valores, conforme ilustrado na Figura 71.

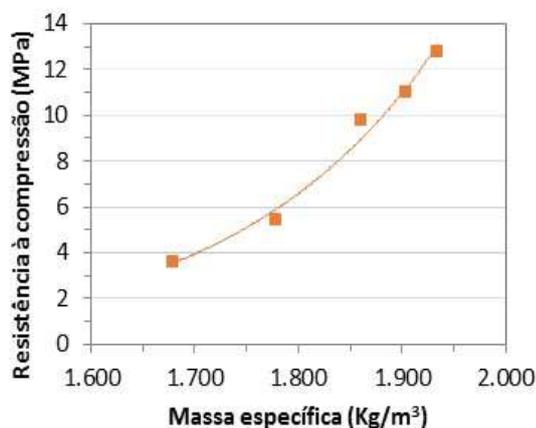


Figura 71 – Relação entre os valores de resistência à compressão *versus* massa específica

Com o manuseio dos corpos de prova durante a execução dos ensaios foi observado que alguns fragmentos se desagregavam principalmente nas áreas de contato e de fragilidade (arestas e bordas). Este fator possibilitou variações nos resultados, porém para este estudo considerou-se essa dispersão desprezível.

Sendo este ensaio não destrutivo, os mesmos corpos de prova foram reutilizados para o ensaio de capilaridade, o método de secagem, norma ASTM 1754 (2012), foi refeito atingindo a constância de massa, ou seja, a massa seca.

4.6 Capilaridade

Estão apresentados na Tabela 28 os valores médios obtidos no ensaio de capilaridade até 72 h de teste e seus respectivos valores de desvio padrão (valores entre parênteses).

Tabela 28 – Resultados do ensaio de capilaridade

Mistura	Capilaridade (g/cm ²)	
Concr. Refer.	0,85	(0,08)
10% Resíduo	0,71	(0,07)
20% Resíduo	0,71	(0,01)
50% Resíduo	0,65	(0,38)
100% Resíduo	0,63	(0,03)

Considerando os resultados apresentados, notou-se que houve uma pequena variação na capilaridade entre os concretos permeáveis com diferentes teores de resíduo de pavimentos asfálticos, variando de 0,63 g/cm³ a 0,85 g/cm³. Através dos resultados, percebe-se a relação que quanto maior o teor de resíduo menor foi a capilaridade do concreto permeável. Contudo, a relação entre os valores obtidos e o teor de resíduo de pavimentos asfálticos identificada no presente estudo não ocorreu no estudo elaborado por RIBEIRO *et al.* (2015).

Com o objetivo de compreender o efeito de capilaridade nos concretos permeáveis, considerando a variação do teor de resíduo de pavimentos asfálticos, os corpos de prova referentes a cada mistura foram rompidos através do ensaio de compressão diametral, permitindo a análise da distribuição de água no interior dos mesmos. Nas Figuras 72 a 76 encontram-se representadas as distribuições para cada mistura.

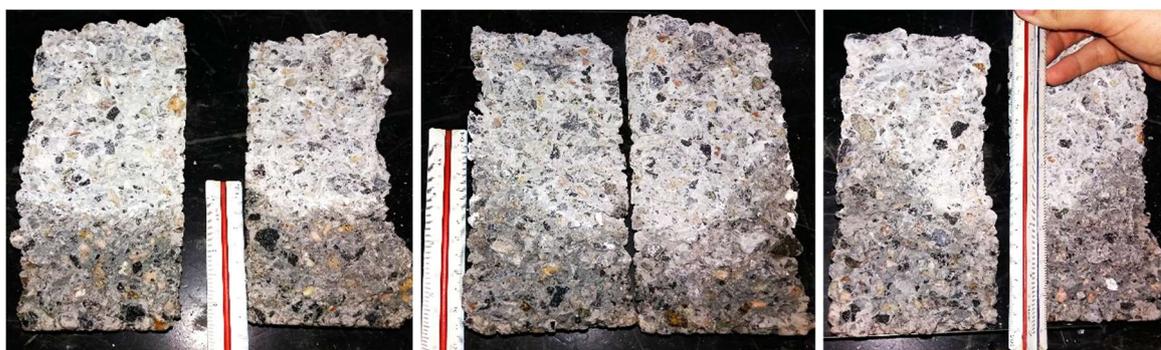


Figura 72 – Distribuição da água no interior dos corpos de prova referente ao concreto referência



Figura 73 – Distribuição da água no interior dos corpos de prova referente ao concreto com 10% de resíduo de pavimentos asfálticos

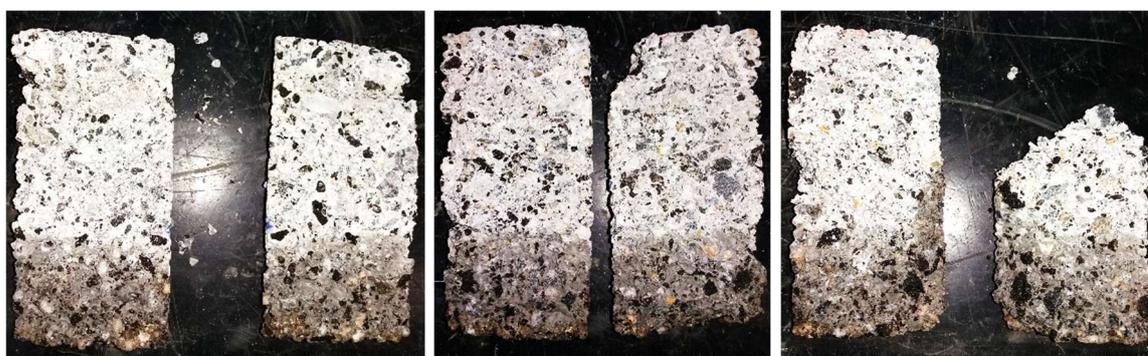


Figura 74 – Distribuição da água no interior dos corpos de prova referente ao concreto com 20% de resíduo de pavimentos asfálticos

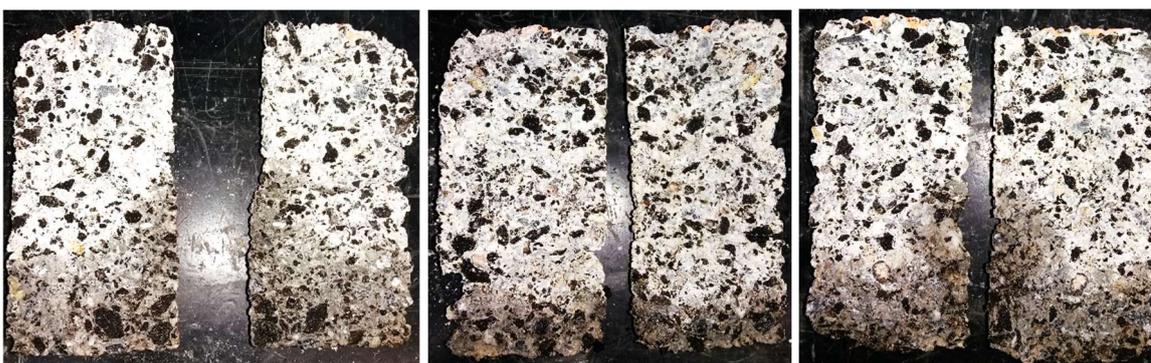


Figura 75 – Distribuição da água no interior dos corpos de prova referente ao concreto com 50% de resíduo de pavimentos asfálticos



Figura 76 – Distribuição da água no interior dos corpos de prova referente ao concreto com 100% de resíduo de pavimentos asfálticos

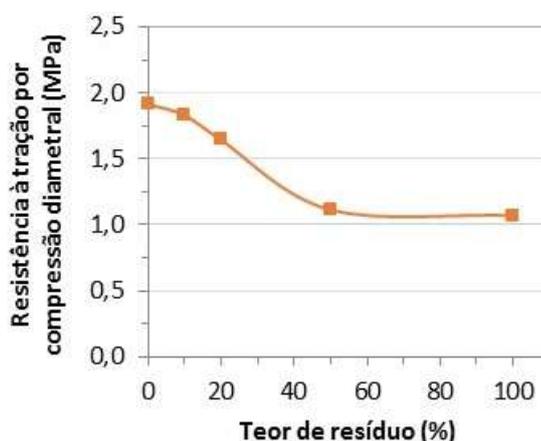
Analisando a capilaridade no interior dos corpos de prova, constatou-se que as amostras tiveram sua distribuição retilínea em sua grande maioria, e notoriamente há uma relação entre a altura média de capilaridade e o teor de resíduo de pavimentos asfálticos na mistura, concluindo-se que quanto maior é o teor, menor é essa altura. A distribuição da água no interior dos Corpos de prova referente ao concreto com 100% resíduo de pavimentos asfálticos se concentrou apenas nas paredes externas, chegando a altura de 100 mm, e na base com altura média de 20 mm. Esse efeito provavelmente se deve ao fato que o agregado reciclado de resíduo de pavimentos asfálticos tem características impermeáveis, dificultando o processo de capilaridade, ratificando os resultados obtidos no ensaio.

Devido à restrição da quantidade de insumos, não foram concretados Corpos de prova específicos para a realização do ensaio de compressão diametral. Os resultados e os respectivos valores de desvio padrão (valores entre parênteses) são apresentados na Tabela 29, que foram obtidos através da ruptura dos corpos de prova no ensaio de capilaridade.

Tabela 29 – Resistência à tração por compressão diametral

Mistura	Tração/Comp. Diametral (MPa)	
Concr. Refer.	1,91	(0,05)
10% Resíduo	1,83	(0,31)
20% Resíduo	1,64	(0,23)
50% Resíduo	1,11	(0,15)
100% Resíduo	1,07	(0,06)

Na Figura 77 está apresentada a relação da resistência em função do teor de resíduo.

Figura 77 – Tração por compressão diametral *versus* teor de resíduo

Mesmo sendo de conhecimento que o CP, após o processo de secagem na estufa, provavelmente teve sua microestrutura alterada e conseqüentemente suas propriedades, principalmente mecânicas, e ainda, admitindo-se que a seção imersa em água não afetará significativamente os resultados, tomaram-se os valores de resistência para analisar o comportamento entre as misturas de uma forma abrangente.

Analisando os resultados foi identificada a relação que quanto maior o teor de resíduo de pavimentos asfálticos menor foi a resistência a tração diametral obtida no ensaio. Este efeito foi coerente com a baixa resistência do resíduo de pavimentos asfálticos em comparação com o agregado natural.

Em comparação com valores da revisão bibliográfica, os valores obtidos neste estudo encontraram-se dentro da faixa estudada. A resistência referente ao teor de 20% obteve resultado superior à do obtido por QUADRELLI *et al.* (2015), que foi de 1,1 MPa, ganho de aproximadamente 50%. Os valores obtidos pelos autores, considerando a mesma relação a/c, variam de 1,6 MPa a 0,9 MPa, referente ao concreto referência e ao teor 40%, respectivamente, este menor do que os valores obtidos neste estudo referentes aos teores de 50% e 100%.

4.7 Condutividade hidráulica

Os ensaios foram executados nas 5 posições pré-definidas, central e nos quatro quadrantes, nas duas faces das placas de concreto permeável, conforme Figura 54 apresentada no item 3.8.

A norma ACI 522R (2013) estabelece como valor mínimo para o concreto permeável um coeficiente de infiltração superior a $1,40 \times 10^{-3}$ m/s. Logo, todas as misturas deste estudo satisfizeram esta condição. A norma brasileira ABNT NBR 16416 (2015) estabelece que para coeficientes de permeabilidades maiores que 10^{-3} m/s, o grau de permeabilidade é alto, ou seja, todas as placas deste estudo se enquadraram neste grau.

Analisando o gráfico, é possível observar que mesmo obtendo resultados satisfatórios, há uma diferença expressiva nesses coeficientes de permeabilidade de uma mistura para outra, o que indica uma melhora na permeabilidade pelo uso de altos teores do resíduo de pavimentos asfálticos. Com o objetivo de analisar melhor esse efeito, foi elaborada a comparação gráfica entre todas as misturas com relação ao coeficiente de permeabilidade do topo e da base, respectivamente, conforme apresentadas nas Figuras 78 e 79.

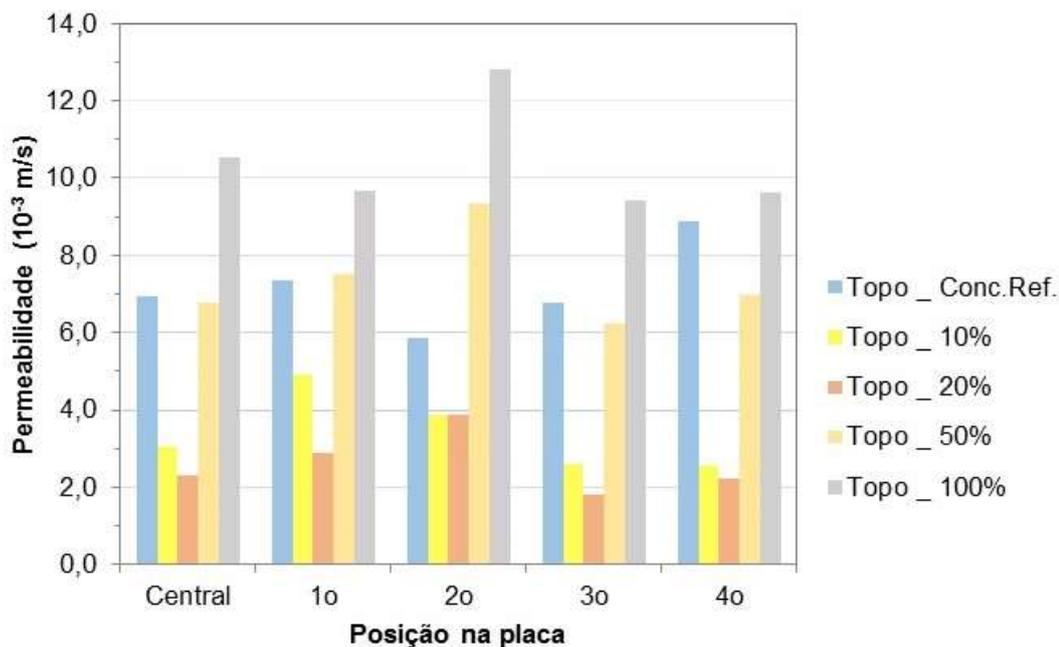


Figura 78 – Coeficiente de permeabilidade no topo das placas

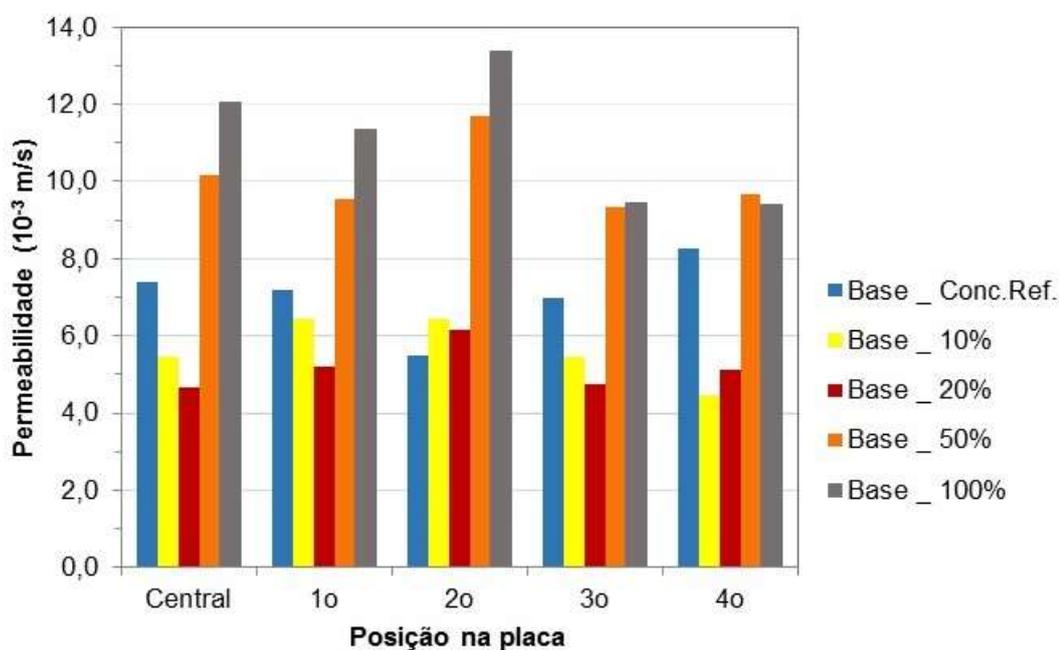


Figura 79 – Coeficiente de permeabilidade na base das placas

Analisando os gráficos apresentados acima, percebeu-se que, em todas as posições e independente da face ensaiada, os maiores coeficientes de permeabilidade são referentes ao concreto permeável com teor de 100% resíduo, e

que algumas misturas tiveram diferenças significativas entre o coeficiente do topo e da base. As comparações entre o coeficiente de permeabilidade no topo e na base de cada mistura estão apresentadas nas Figuras 80 a 82, para melhor compreensão e visualização.

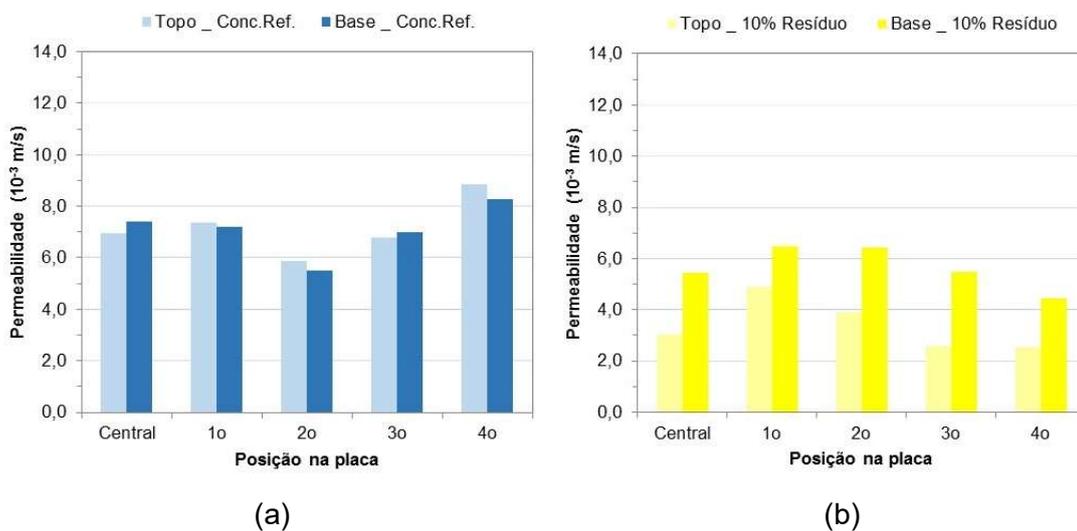


Figura 80 – Comparação entre os coeficientes de permeabilidade do topo e da base. (a) concreto referência; (b) concreto com 10% resíduo

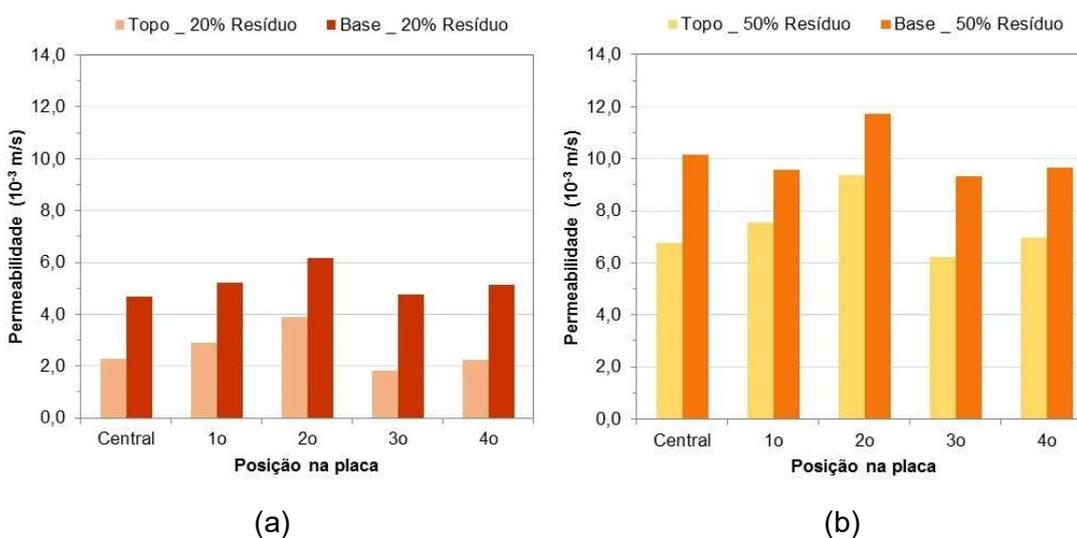


Figura 81 – Comparação entre os coeficientes de permeabilidade do topo e da base. (a) concreto com 20% resíduo; (b) concreto com 50% resíduo

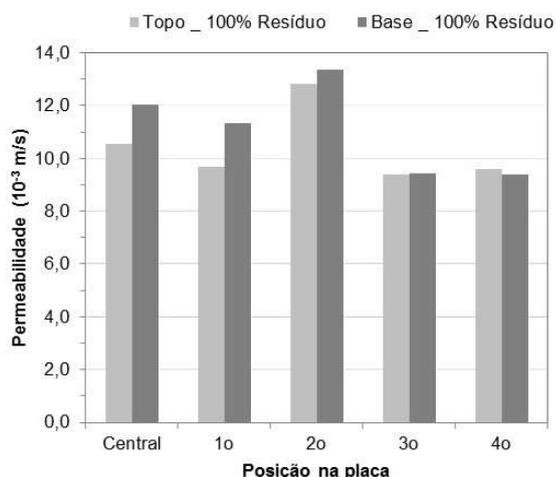


Figura 82 – Comparação entre os coeficientes de permeabilidade do topo e da base do concreto com 100% resíduo

O coeficiente de permeabilidade de cada placa foi determinado pela média entre os valores obtidos nas 10 posições. O coeficiente de permeabilidade de cada mistura e o desvio padrão (valores entre parênteses) estão apresentados na Tabela 30, e a curva referente à relação entre o coeficiente de permeabilidade e o teor de resíduo de cada mistura é apresentada na Figura 83.

Tabela 30 – Coeficiente de permeabilidade

Mistura	Permeabilidade (10 ⁻³ m/s)	
Concr. Refer.	6,99	(0,99)
10% Resíduo	4,05	(1,47)
20% Resíduo	3,32	(1,51)
50% Resíduo	8,40	(1,76)
100% Resíduo	10,58	(1,53)

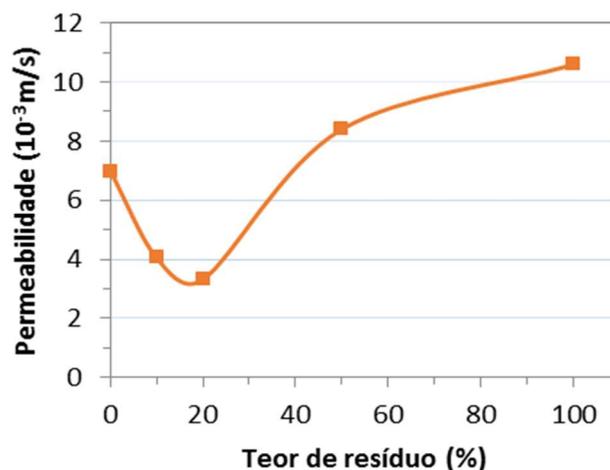


Figura 83 – Relação do ensaio de permeabilidade *versus* teor de resíduo

Analisando individualmente os coeficientes das placas, é notório que principalmente os concretos referentes aos teores de 10% e 20% de resíduo possuem algum fator que influenciou na quantidade de vazios e seu arranjo na placa. Uma hipótese que poderia explicar esse efeito seria a compactação, o arrasamento e o acabamento superficial executados de forma inadequada, uma vez que foram manuais e elaborados por diferentes pessoas.

Mesma tendência foi refletida nos ensaios de colmatação. As misturas com teores de 10% e 20% apresentaram as curvas com menores coeficientes de permeabilidade antes e após a execução do ensaio. Os resultados e o desenvolvimento da curva no decorrer do tempo obtidos no ensaio de permeabilidade após colmatação encontram-se apresentados na Tabela 31 e na Figura 84, respectivamente.

Tabela 31 – Coeficiente de permeabilidade após colmatação

Mistura	Colmatação			
	Coeficiente de permeabilidade (10 ⁻³ m/s)			
	Inicial	3º dia	7º dia	10º dia
Concr. Refer.	2,03	1,90	1,59	1,35
10% Resíduo	1,29	0,86	0,64	0,50
20% Resíduo	0,81	0,65	0,55	0,47
50% Resíduo	1,96	1,67	1,58	1,70
100% Resíduo	2,98	2,10	1,83	1,96

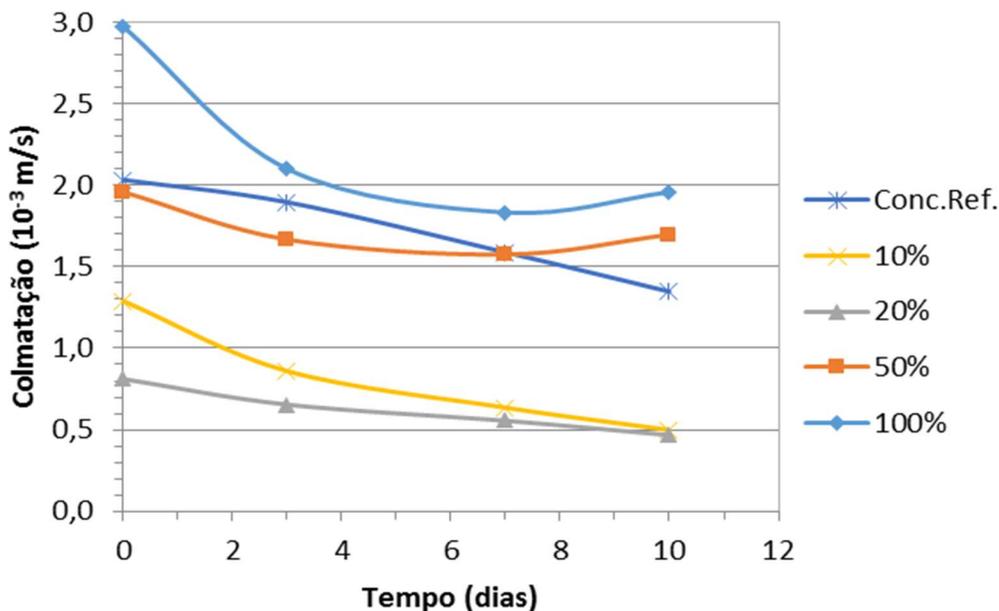


Figura 84 – Curva permeabilidade após colmatação no tempo

Pode-se observar que os coeficientes de permeabilidade diminuem ao longo do tempo, caracterizado pela colmatação dos poros. De acordo com a norma citada anteriormente, após 10 dias de teste, somente as misturas com teores de 50% e 100% de resíduo de pavimentos asfálticos, além da referência, podem ser considerados concretos permeáveis.

Nota-se também que as curvas das misturas com 50% e 100% tiveram uma leve ascensão, indicando uma possível autolimpeza dos vazios. Vale ressaltar que os testes foram feitos pontualmente, nas datas escolhidas, e em um intervalo de tempo pequeno, não representando um efeito contínuo, como por exemplo períodos contínuos ou maiores de chuvas. Além disso, cabe observar e pontuar o efeito de confinamento da areia causado pelo aparelho utilizado no ensaio, uma vez que o material utilizado no ensaio foi colocado somente na parte interna do tubo e não distribuído pela placa. Este efeito deve ser melhor estudado em futuros estudos.

BROWN *et al.* (2012) elaboraram um estudo sobre o desenvolvimento, implantação e uso da norma ASTM C1701 referente ao coeficiente de permeabilidade do concreto permeável. O estudo apresentou a utilização do concreto permeável como pavimentos drenantes em grandes áreas (estacionamento) e abordaram técnicas para limpeza dessas áreas colmatadas,

recomendando a manutenção preditiva, que tais áreas sejam varridas e aspiradas anualmente.

A norma brasileira referente ao concreto permeável também aconselha manutenção e limpeza periódica nos pavimentos permeáveis, e posterior ensaio de permeabilidade para determinação do grau de permeabilidade e aprovação do pavimento. Nesse estudo não foram ensaiados os possíveis métodos de limpeza das placas de concreto permeável, e não foi realizada a verificação do grau de permeabilidade após o processo de limpeza. Contudo, sugere-se que os métodos de limpeza, bem como, sua eficiência sejam abordados em estudos futuros.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No contexto de redução da disponibilidade de materiais naturais, aliado às novas exigências/limitações das obras de engenharia, é imperativo que se busquem alternativas técnicas, econômicas e ambientalmente adequadas para atender às demandas de manutenção e recuperação das rodovias nacionais, possibilitando assim o bem estar e segurança do usuário e suporte para um desenvolvimento sustentável e duradouro.

As técnicas de reciclagem de pavimentos e as pesquisas apresentadas, aliadas à necessidade de incorporar aspectos ambientais e econômicos aos projetos de engenharia civil, incentiva e motiva iniciativas de utilização do material fresado asfáltico como um material de construção nobre e capaz de substituir os materiais tradicionais em diversas alternativas.

Outro aspecto relevante é a utilização de pavimentos drenantes com o objetivo de minimizar os transtornos causados pela excessiva impermeabilização do solo nos centros urbanos.

Considerando esses fatores, esse estudo teve a finalidade primordial de analisar as propriedades físicas, mecânicas e de condutibilidade hidráulica do concreto permeável com substituição de agregado natural pelo resíduo de pavimentos asfálticos.

Limitações e desafios foram superados durante todo o processo de confecção do presente trabalho por ser o primeiro trabalho executado totalmente em laboratório, em dois sentidos, no que se refere à elaboração de um concreto permeável e na reutilização do resíduo de pavimentos asfálticos.

5.1 Conclusões

A análise ampla dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais propostos permitiu algumas conclusões relevantes conforme descrito a seguir:

- A compatibilização entre as curvas granulométricas foram de suma importância para comparação fidedigna dos resultados, bem como a

caracterização do resíduo de pavimentos asfálticos com extração do ligante, proporcionando uma melhor análise nos resultados, uma vez que as dimensões máximas possivelmente eram formadas por aglomerados de agregados menores, finos e ligante asfáltico, que possuem resistências inferiores à do agregado natural;

- Os processos de compactação e de acabamento durante a concretagem do concreto permeável, em relação aos ensaios deste trabalho, influenciam diretamente a permeabilidade do mesmo, indicando a necessidade de mais estudos sobre os procedimentos para moldagem e cura do concreto permeável, com a finalidade da inclusão na norma ABNT NBR 16416 (2015);
- O teor de resíduo de pavimentos asfálticos influencia as propriedades mecânicas do concreto permeável; de uma maneira geral, quanto maior esse percentual, menores são as resistências obtidas nos ensaios;
- Houve fragmentação com perda de agregados durante o manuseio dos corpos de prova no estado endurecido; para a análise dos resultados, a mesma foi desprezada;
- Em relação à massa específica no estado endurecido, os valores obtidos variaram entre 1.678,77 kg/m³ e 1.934,58 kg/m³, referente ao teor de 100% e ao concreto referência, respectivamente. A relação percebida, de maneira geral, foi que quanto maior o teor de resíduo de pavimentos asfálticos menor foi a massa específica do concreto, pois houve diferença entre as massas específicas do resíduo de pavimentos asfálticos e do agregado natural, abordada no item 2.1. E em relação à porosidade obtida nos ensaios, foi identificada uma similaridade entre as misturas independente dos teores de resíduo de pavimentos asfálticos, com valores variando entre 21% e 25%. Os resultados ficaram dentro da faixa esperada, tanto de massa específica quanto de porosidade, referente a concreto permeável;
- Os valores de resistência à compressão do concreto permeável foram baixos, na faixa de 4 MPa a 13 MPa, apesar desta propriedade não ser requisito para a aprovação do pavimento, segundo a norma ABNT NBR 16416 (2015); sugere-se a elaboração de novos estudos para aumentar a resistência à compressão do concreto permeável a fim de alcançar o melhor desempenho na vida útil do pavimento;

- Os resultados referentes ao ensaio para determinar a resistência à tração na flexão foram satisfatórios; todas as 5 misturas satisfizeram a condição da norma de concreto permeável para utilização como pavimentação com tráfego de pedestre; somente a mistura com 20% de resíduos apresentou os valores mínimos superiores para tráfego leve, mas vale ressaltar que o concreto com 10% e 50% de resíduos apresentaram valores bem próximos ao mínimo;
- Como não houve influência da relação água/cimento, devido ser o mesmo para as 5 misturas, percebeu-se que o módulo de elasticidade se comportou de maneira totalmente dependente do tipo de agregado; quanto maior o teor de resíduo, menor o módulo obtido;
- Em relação à capilaridade, de acordo com os resultados obtidos e comprovados pela distribuição de água no interior dos corpos de prova, foi estabelecida a relação que quanto maior o teor de resíduo menor a capilaridade, devido à impermeabilização dos grumos formados de agregado graúdo, finos e CAP proveniente do resíduo de pavimentos asfálticos;
- Foi identificada a perda de resistência à tração por compressão diametral nos concretos permeáveis com o aumento do teor de resíduo de pavimentos asfálticos, devido à baixa resistência dos grumos presentes no mesmo. Mesmo com a influência dos processos para a realização do ensaio de capilaridade, conforme exposto no item 4.6, os valores obtidos foram compatíveis com os apresentados em outros estudos, variando de 1,07 MPa a 1,91 MPa;
- A condutividade hidráulica das placas concretadas referente às 5 misturas foram classificadas com grau de permeabilidade alto. E como esperado, após o ensaio de colmatação, os coeficientes de permeabilidade reduziram significativamente, porém as misturas continuaram com mesmo grau de permeabilidade, exceto os concretos com 10% e 20% de resíduos, que foram classificados como médio. Neste trabalho, não foram estudados processos de manutenção e limpeza do concreto para avaliar a eficiência e a permeabilidade do pavimento após os mesmos;
- A utilização do resíduo de pavimentos asfálticos é viável tecnicamente, tendo-se observado que o melhor teor de substituição foi o de 20% em relação às características mecânicas e condições hidráulicas obtido neste estudo;

- Apesar dos resultados de propriedade mecânicas e de condutibilidade hidráulica satisfatórios, o aprimoramento do processo de britagem e reciclagem em larga escala é essencial para alcançar um melhor desempenho com viabilidade financeira visando a inclusão desse concreto no mercado.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como os ensaios foram executados no laboratório analisando somente as propriedades mecânicas e hidráulicas do revestimento de concreto permeável, sem considerar a estrutura do pavimento e as cargas provenientes de sua utilização, faz-se necessário a continuação do estudo.

Novas pesquisas, ensaios laboratoriais e dados experimentais carecem de ampliação para melhorar o conhecimento em relação ao pavimento permeável. Desenvolvimento requer investimento. Seguem algumas sugestões:

- Análise da eficiência hidráulica do pavimento permeável em base e sub-base com materiais diferenciados, bem como, aprimorar o estudo entre a faixa de 10 e 20% de substituição do agregado buscando a dosagem ideal a fim de aumentar a resistência mecânica sem prejuízo da condutibilidade hidráulica;
- Análise mecânica e hidráulica do pavimento permeável com resíduo de pavimentos asfálticos moldado no local após ação das intempéries e de carregamentos reais; bem como ao desgaste e abrasão principalmente no trilho das rodas; avaliando a necessidade de manutenção e de limpeza do pavimento permeável, e sua eficiência;
- Estudo da eficiência do pavimento permeável com resíduo de pavimentos asfálticos de acordo com o sistema de infiltração, total, parcial ou sem infiltração, em relação aos projetos de drenagem em conformidade com as redes existentes, sistema de captação e compatibilização entre eles; analisando as limitações, vantagens e desvantagens da implantação e da utilização do pavimento permeável em áreas habitadas, bem como sua viabilidade financeira.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR NM 27, Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório, Rio de Janeiro, 2001.

ABNT NBR NM 30, Agregado miúdo – Determinação da absorção de água, Rio de Janeiro, 2001.

ABNT NBR NM 52, Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro, 2009.

ABNT NBR NM 53, Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, Rio de Janeiro, 2009.

ABNT NBR NM 248, Agregados – Determinação de composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003.

ABNT NBR 5735, Cimento Portland de alto-forno, Rio de Janeiro, 1991.

ABNT NBR 5737, Cimentos Portland resistentes a sulfatos, Rio de Janeiro, 1992.

ABNT NBR 5738, Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova, Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NBR 5739, Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Métodos de ensaio, Rio de Janeiro, 2007.

ABNT NBR 7212, Execução de concreto dosado em central — Procedimento, Rio de Janeiro, 2012.

ABNT NBR 7222, Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2011.

ABNT NBR 8522, Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão, Rio de Janeiro, 2008.

ABNT NBR 9479 – Argamassa e concreto – Câmaras úmidas para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT NBR 9778, Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água – Índices de Vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2005. (Versão corrigida: 2009).

ABNT NBR 9779, Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade, Rio de Janeiro, 2012.

ABNT NBR 9833, Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico, Rio de Janeiro, 2008 (Versão corrigida: 2009).

ABNT NBR 12142, Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos, Rio de Janeiro, 2010.

ABNT NBR 13292, Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 1995.

ABNT NBR 15573, Misturas asfálticas — Determinação da densidade aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados, Rio de Janeiro, 2008.

ABNT NBR 16416, Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos, Rio de Janeiro, 2015.

ACI 522.1-13, “Specification for Pervious Concrete”, American Concrete institute, Detroit, MI, 2013.

ANDRADE, M.H.F. Reciclagem a frio com adição de cimento. 4^o Encontro Técnico. DER-PR. 2007. 54 p.

ARAÚJO, M.A.; *et al.* Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto). Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento, ANO 1. VOL. 10, Pp. 187-196, 2016.

ASTM C1701-09, “Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete”, Annual Book of ASTM Sandards, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.

ASTM C1754-12, “Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete”, Annual Book of ASTM Sandards, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

BATEZINI, R. Estudo preliminar de concreto permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2013. 133 p.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros 3. Ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006. 504 f.

BONFIM, V. Fresagem de pavimentos asfálticos. 3. edi. rev. e atual. São Paulo: Fazendo Arte, 2010. 128 p. 2010

BROWN, H.J.; SPARKMAN, A. The Development, Implementation, and Use of ASTM C1701 Field Infiltration of In Place Pervious Concrete. pp. 69-79, 2012.

CE-18:600.11, Comissão de Estudos de Piso Intertravado. 2011 Disponível em <http://www.sinaprocim.org.br/Normas/PISO_INTERTRAVADO/ATAS/2011/4pisointertravado.pdf>. Acessado em 01/04/2017.

CRUZ, J. Patologias em revestimento asfáltico e possíveis soluções. Universidade Vale do Rio Doce, Curso de Engenharia Civil, Trabalho de conclusão de curso. MG, 2013.

DELLATE, N.; MRKAJIC, A.; MILLER, D.I Field and Laboratory Evaluation of Pervious Concrete Pavements. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. p.132-139, 2009

DELLATE, N.P.E. Developing a structural design method for pervious concrete pavement. Cleveland State University. Fenn College of Engineering. Disponível em: <http://www.rmcfoundation.org/images/PCRC%20Files/Structural%20Design%20&%20Properties/Developing%20a%20Structural%20Design%20Method%20for%20Pervious%20Concrete%20Pavement.pdf>. Acessado em 9/12/2016

DNIT 2006, Manual de pavimentação asfáltica – 3.ed. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT 031/2006, Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço, Rio de Janeiro, 2006.

DNIT 117/1994, Mistura betuminosa – Determinação da densidade aparente – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 1994.

DNIT 136/2010, Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2010.

HENDERSON, V. Evaluation of the Performance of Pervious Concrete Pavement in the Canadian Climate. A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering. Waterloo, Ontario, Canada. 2012.

JACINTHO, A.E.P.G.A.; CHAMOUTON, M.S.; RUIZ, A.N.; PIMENTEL, L.L.; BARBOSA, M.P.; FORTI, N.C.S. Tensão de aderência no concreto permeável com fresado asfáltico: uso do ensaio APULOT. Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2015. Bonito, MS, 2015.

KERTIS, T.B.; OLIVEIRA, L.C.B.; QUADRELLI, A.C.; BARBOSA, M.P.; JACINTHO, A.E.P.G.A.; GEBARA, D. Concreto permeável elaborado com resíduos de fresado asfáltico: avaliação experimental da permeabilidade e da qualidade da água infiltrada. 2º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2016.

KEVERN, J.T. Evaluating Permeability and Infiltration Requirements for Previous Concrete. Journal of Testing and Evaluation, Vol. 43, No.3, pp. 544-553, 2015.

KUNIEDA M.; OTONO T.; YOSHIDA T.; KAMADA T. AND ROKUGO K. Size effect on flexural strength of porous concrete, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-5 pp.1091-1096, 2004.04, International Conference (Proceedings)

MATA-LIMA, H.; VARGAS, H.; CARVALHO, J.; GONÇALVES, M.; CAETANO, H.; MARQUES, A.; RAMINHOS, C. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. Revista Escola Minas, vol.60,nº.3 Ouro Preto, 2007.

Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672007000300014#fig01. Acessado em 01/04/2017.

MELO, W.W.; PORTE, C.S.; SANTOS, J.R.; CERVO, T.C.; KIRCHOFF, L.D. Estudo da viabilidade do uso de concreto drenante para emprego como pavimento de vias de tráfego leve. Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2015. Belo Horizonte, MG, 2016.

QUADRELLI, A.C.; BARBOSA, M.P.; JACINTHO, A.E.A.P. Desenvolvimento de composição de concreto permeável com agregados oriundos de fresados asfálticos. Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2015. Bonito, MS, 2015.

QUADRELLI, A.C.; OLIVEIRA, L.C.B.; KERTIS, T.B.; BARBOSA, M.P.; JACINTHO, A.E.A.P.; CAMARINI, G. Avaliação “in loco” de pisos de concreto permeável de resíduos de fresado asfáltico sobre diferentes sub-bases. Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2015. Belo Horizonte, MG, 2016.

RIBEIRO, A.L.R.A.; JACINTHO, A.E.P.G.A.; RUIZ, A.N.; PIMENTEL, L.L.; FONTANINI, P. Concreto com fresado asfáltico: propriedades mecânicas. Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2015. Bonito, MS, 2015.

SANTANA, S.S.; FERNANDES, F.F. Uso de RCD na produção de artefatos de concreto para a pavimentação. Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2015. Bonito, MS, 2015.

SANTOS, M.A.; SILVA, A.S.R. Estudo de dosagens de concretos permeáveis para a aplicação em pavimentos. Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2015. Belo Horizonte, MG, 2016.

SILVA, J.P.S. Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas. Tese de doutorado, Publicação: G.TD – 067/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 145 p. 2011.

SULEIMAN, M.T.; KEVERN, J.; SCHAEFER, V.R.; WANG, K. Effect of Compaction Energy on Pervious Concrete Properties, Proceedings of Concrete Technology Forum: Focus on Pervious Concrete, Nashville, TN. 2006. Disponível em: <http://www.rmc-foundation.org/images/PCRC%20Files/Construction%20Techniques/Effect%20of%20Compaction%20Energy%20on%20Pervious%20Concrete%20Properties.pdf>. Acessado em 15/01/2016

TEIXEIRA, A.R.; NÓBREGA, É.S.; OLIVEIRA, J.A.C.; COSTA, L.A.; JÚNIOR, L.V.D.; LINS, L.N. Estudo do concreto permeável de acordo com as exigências da nova norma 16416:2015. Universidade Católica de Brasília – UCB, Brasil. Publicado no II Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis.

TENNIS, P.D.; LEMING, M.L.; AKERS, D.J. Pervious Concrete Pavements. Special Publication by the Portland Cement Association and the National Ready Mixed Concrete Association. 2004. Disponível em: <http://www.cement.org/docs/default-source/sustainability2/pervious-concrete-mixtures-and-properties-ct043.pdf?sfvrsn=6>. Acessado em 15/01/2016

WIRTGEN. Manual de reciclagem a frio. 2ª ed. 2008. Wirtgen GmbH. Alemanha.

ABEDA – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos. Disponível em: <http://www.abeda.org.br/>. Acessado em 01/12/2015.

Agência de Notícias – São Joaquim Online. Disponível em: <http://saojoaquimonline.com.br/2015/03/23/demorou-mas-enfim-asfalto-comeca-a-ser-revitalizado-entre-sao-joaquim-a-painel/>. Acessado em 9/12/2016.

Blog asfalto de qualidade, escrito em 28 de janeiro de 2016. Disponível em: http://asfaltodequalidade.blogspot.com.br/2016_01_01_archive.html
Acessado em 14/02/2017.

CNT – Conferência Nacional de Transporte – Pesquisa CNT de rodovias 2015: relatório gerencial. – Brasília : CNT : SEST : SENAT, 2015. Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br> Acessado em 9/12/2016.

CSN 2016 Institucional - Companhia Siderúrgica Nacional - Cimentos. Disponível em: http://www.csn.com.br/conteudo_pti.asp?idioma=0&conta=45&tipo=59832
Acessado em 9/12/2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/geografia_urbana/areas_urbanizadas/mapas.shtm. Acessado em 14/02/2017.

NRMCA – National Ready Mixed Concrete Association – Pervious Concrete Pavement Maintenance and Operations Guide – Disponível em: http://www.perviouspavement.org/downloads/pervious_maintenance_operations_guide.pdf Acessado em 9/12/2016

SISAET - Sistema de Informações do Anuário Estatístico dos Transportes - Disponível em: <http://www.geipot.gov.br/NovaWeb/IndexAnuario.htm>. Acessado em 07/12/2015.

ZH - Jornal on line do RS. Disponível em: <http://zh.clicrbs.com.br/rs/esportes/copa-2014/noticia/2014/06/entulho-compactado-vira-estacionamento-para-900-veiculos-4519885.html>. Acessado em 23/11/2015