



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EMMANUELLE STEFÂNIA HOLDEFER GARCIA

**ANÁLISE DA REDUÇÃO DA PERMEABILIDADE DE  
MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES EM FUNÇÃO DA  
REDUÇÃO DO VOLUME DE VAZIOS**

Florianópolis  
2017



EMMANUELLE STEFÂNIA HOLDEFER GARCIA

**ANÁLISE DA REDUÇÃO DA PERMEABILIDADE DE  
MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES EM FUNÇÃO DA  
REDUÇÃO DO VOLUME DE VAZIOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Liseane Padilha Thives.

Florianópolis  
2017

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do  
Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.**

Garcia, Emmanuelle Stefânia Holdefer

Análise da redução da permeabilidade de misturas  
asfálticas drenantes em função da redução do volume  
de vazios / Emmanuelle Stefânia Holdefer Garcia;  
orientadora, Liseane Padilha Thives - Florianópolis,  
SC, 2017.

171 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

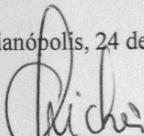
1. Engenharia Civil. 2. Permeabilidade. 3. Mistura  
Asfáltica Drenante. 4. Permeâmetro de Carga  
Constante. I. Liseane Padilha Thives. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de  
Pós Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Emmanuelle Stefânia Holdefer Garcia

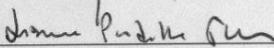
**ANÁLISE DA REDUÇÃO DA PERMEABILIDADE DE  
MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES EM FUNÇÃO DA  
REDUÇÃO DO VOLUME DE VAZIOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 24 de maio de 2017.

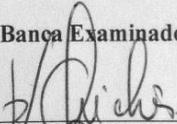


Prof. Glicério Trichês, Dr.  
Coordenador do Curso

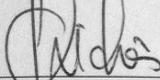


Prof. Liseane Padilha Thives, Dra. (Orientadora)  
Universidade Federal de Santa Catarina

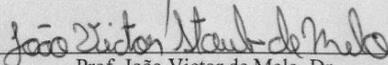
**Banca Examinadora**



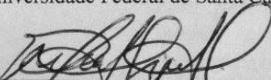
Prof. Luciano Pivoto Specht, Dr.  
Universidade Federal de Santa Maria (Videoconferência)



Prof. Glicério Trichês, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. João Victor de Melo, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



***Dedicatória:***  
*Esta pesquisa está dedicada às  
minhas avós Elsa e Hilda (in  
memoriam) por todo seu amor e por  
continuarem inspirando minha  
vida.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter guiado meus passos até aqui e em nenhum momento ter me deixado fraquejar!

Aos meus pais Marta e Goamar, meu irmão Irwyng, que sempre estiveram ao meu lado e por vezes abriram mão dos seus sonhos para realizar os meus. Todo meu amor a vocês, esta conquista é nossa!

À minha orientadora Professora Liseane Padilha Thives pela disponibilidade, apoio e incentivo para realização deste trabalho. Muito obrigada por todo tempo dedicado e por me ajudar a encontrar a solução para todos os obstáculos que apareceram ao longo deste trabalho.

A todos meus amigos, que estando perto ou longe compartilharam comigo todas as vitórias e aflições deste mestrado. Muito obrigada por cada palavra de incentivo e por me ajudarem a seguir em frente mesmo quando os ensaios não ocorriam da melhor forma. Muito obrigada por compartilharem comigo momentos de muita felicidade e por fazerem do mestrado uma fase inesquecível em minha vida.

Agradeço aos amigos do Grupo Rodovias Verdes por todo apoio na realização dos ensaios e pelos momentos de descontração que fizeram do laboratório, nossa segunda casa por muito tempo.

Ao Professor Glicério Trichês pela disponibilidade e conselhos para solução dos obstáculos que foram surgindo ao longo do trabalho.

Ao Professor Marciano Maccarini, pela disponibilidade do espaço do Laboratório de Solos para realização de alguns ensaios. Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil e funcionários, pela disponibilidade do espaço e equipamentos para a realização de ensaios.

Aos professores Glicério Trichês, Luciano Specht, João Victor de Melo e Rafael Higashi, membros da banca examinadora pela disponibilidade e orientações que contribuíram para melhoria deste trabalho.

A CBB Asfaltos, que por meio do Eng. Luiz Henrique Teixeira disponibilizaram o ligante utilizado no trabalho. A Empresa SETEP Construções S/A pela disponibilização dos agregados utilizados.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina, professores e funcionários por todo conhecimento e apoio durante o mestrado. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos. A Rede Temática de Tecnologia do Asfalto, da Petrobrás, pelos investimentos feitos no Laboratório de Pavimentação da UFSC.

Muito obrigada!



## RESUMO

As misturas asfálticas drenantes caracterizam-se por apresentar uma granulometria aberta com pequena quantidade de finos e elevada porcentagem de volume de vazios e de vazios comunicantes. Com a passagem do tráfego associada à sujidade da via carreada pela água de *runoff*, ao longo do tempo, os vazios das misturas drenantes são reduzidos e colmatam. Este trabalho trata da avaliação da redução do volume de vazios e da permeabilidade de misturas asfálticas drenantes ao longo do tempo e da colmatção para definição do momento de intervenção no revestimento. Para redução do volume de vazios, foram produzidos corpos de prova no Compactador Giratório SUPERPAVE® (CGS), com aumento do esforço de compactação, pelo aumento do número de giros (50 – referência, 75, 100, 150, 200). Após a compactação das placas na mesa compactadora francesa, para avaliação da redução do volume de vazios, as placas foram submetidas a diferentes ciclos (0 – referência, 1.000, 3.000, 5.000, 10.000, 20.000, 30.000) no simulador de tráfego, na temperatura de 60 °C. A partir das placas deformadas a diferentes ciclos, foram extraídos corpos de prova cilíndricos. A permeabilidade de todos os corpos de prova foi avaliada por meio do permeâmetro de carga variável e um permeâmetro de carga constante, desenvolvido para a pesquisa em laboratório. De modo a simular a colmatção dos vazios, foi produzida água de *runoff* a partir de material coletado em uma via pavimentada. Como resultado, para os corpos de prova compactados no CGS foi observado aumento da redução do volume de vazios e volume de vazios comunicantes, sendo que, em média, a redução percentual, dos 50 giros aos 200 giros, para o volume de vazios foi de 3,94% e para o volume de vazios comunicantes de 3,50%. Para os corpos de prova extraídos das placas, o percentual de redução dos vazios do ciclo zero aos 30.000 ciclos foi de 3,13% para o volume de vazios e 4,32% para o volume de vazios comunicantes. A partir de seis simulações de eventos de chuva (255 mm) com o permeâmetro de carga constante, os corpos de prova compactados no CGS obtiveram coeficiente de permeabilidade  $k$  mínimo entre 1,53 – 0,22 mm/seg e os extraídos das placas  $k$  de 0,74 – 0,60 mm/seg. Considerando a colmatção atingida quando o volume de vazios comunicantes atingirem 12%, a intervenção ocorrerá anualmente (volume de vazios médio de 24,55%) e em sete meses (volume de vazios médio de 20,62%).

**Palavras-chave:** mistura asfáltica drenante; redução da permeabilidade; deformação permanente; permeâmetro de carga constante.



## ABSTRACT

The porous asphalt mixtures are characterized by presenting an open granulometry with small quantity of thin and high percentage of volume of voids and interconnected voids. With the traffic passage associated to the road dirtiness carried by the runoff water, over time, the draining mixtures voids are reduced and clog. This paper is about the evaluation of the reduction of the volume of voids and permeability of the porous asphalt mixtures over time and of the fill for definition of the moment of the intervention in the clogging. For reduction of the volume of voids, specimens were produced in the SUPERPAVE® Gyrotory Compactor (CGS), increasing the compaction strain by increasing the number of spins (50 – reference, 75, 100, 150, 200). After compaction of the slabs in the table of compaction French, for evaluation of the volume of voids reduction, the slabs were submitted to different cycles (0 – reference, 1.000, 3.000, 5.000, 10.000, 20.000, and 30.000) in the traffic simulator, at the temperature of 60 °C. From the deformed slabs at different cycles, cylindrical specimens were extracted. The permeability of all the specimens were evaluated through the falling head permeameter and a constant head permeameter, developed for the laboratory research. In order to simulate the clogging the voids, runoff water were produced from the material collected in a paved road. As result, for the specimens compacted in the CGS was observed that the increase of reduction of the volume of voids and volume of interconnected voids, being that, in average, the percentage reduction, of the 50 spins to the 200 spins, for the volume of voids was 3,94% and for the volume of interconnected voids was 3,50%. For the specimens extracted from the slabs, the percentage reduction of the zero cycle voids at 30.000 cycles was 3,13% for the volume of voids and 4,32% for the volume of interconnected voids. From six raining events simulations (255 mm) with the constant head permeameter, the specimens compacted in the CGS obtained minimum permeability coefficient  $k$  between 1,53 – 0,22 mm/sec and those extracted from the slabs,  $k$  was between 0,74 – 0,60 mm/sec. Considering the reached filling when the volume of interconnected void reach 12%, the intervention will occur annually (average volume of voids of 24,55%) and in seven months (average volume of voids of 20,62%).

**Keywords:** porous asphalt mixture; permeability reduction; CGS compactor; permanent deformation; constant head permeability.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição dos vazios em misturas drenantes .....	38
Figura 2. Definição do volume de vazios comunicantes (%).....	39
Figura 3. Dano acarretado pela água em misturas drenantes .....	40
Figura 4. Imagens de tomografia computadorizada - Compactação Marshall.....	42
Figura 5. Imagens de tomografia computadorizada - Compactador giratório CGS .....	43
Figura 6. Distribuição estimada de vazios <i>in situ</i> de misturas drenantes .....	44
Figura 7. Vazios a 20 mm de altura da superfície através de tomografia digital .....	44
Figura 8. Vazios a 40 mm de altura da superfície através de tomografia digital .....	45
Figura 9. Influência do Vv no pico de absorção sonora .....	46
Figura 10. Escoamento sobre revestimentos ao longo dos anos.....	51
Figura 11. Permeâmetro de carga variável LCS.....	54
Figura 12. Permeâmetro de carga constante.....	55
Figura 13. Modelo de simulador de chuva .....	56
Figura 14. Esquematização do permeâmetro da pesquisa .....	57
Figura 15. Detalhamento do simulador desenvolvido .....	59
Figura 16. Seções transversais obtidas com tomografia computacional – Mistura de concreto permeável .....	61
Figura 17. Fluxograma do programa experimental .....	64
Figura 18. Curva granulométrica.....	66
Figura 19. Preparação dos corpos de prova para determinação de Vv..	69
Figura 20. Determinação de Vvc nos corpos de prova dosados .....	70
Figura 21. Fases que compreendem a Etapa 3 .....	72
Figura 22. Curva de compactação típica obtida no CGS.....	73
Figura 23. Montagem do ensaio com o permeâmetro LCS sobre CP ...	75

Figura 24. Fases compreendidas pela Etapa 4 .....	76
Figura 25. Extração dos corpos de prova das placas após DP .....	79
Figura 26. Corpos de prova após extração com sonda rotativa.....	79
Figura 27. Permeâmetro de carga constante .....	81
Figura 28. Permeâmetro desenvolvido em laboratório .....	82
Figura 29. Fases que compreender a Etapa 6.....	83
Figura 30. Confeção do molde em garrafa PET .....	85
Figura 31. Corpo de prova impermeabilizada no interior do molde .....	86
Figura 32. Vista superior do corpo de prova com vedação de cola epóxi no diâmetro .....	86
Figura 33. Determinação da altura de lâmina da água .....	87
Figura 34. Ducha para controle de fluxo.....	88
Figura 35. Granulometria do material colmatador .....	90
Figura 36. Motor de agitação de partículas.....	91
Figura 37. Permeâmetro utilizando água limpa .....	92
Figura 38. Permeâmetro durante simulação de chuva.....	93
Figura 39. Material acumulado sobre o CP.....	94
Figura 40. Material retido na superfície do corpo de prova .....	94
Figura 41. Variação do $V_v$ versus teor de ligante .....	101
Figura 42. Variação do $V_{vc}$ versus teor de ligante .....	102
Figura 43. Desgaste versus teor de ligante.....	102
Figura 44. $V_v$ em função do aumento de giros .....	104
Figura 45. $V_{vc}$ em função do aumento de giros .....	105
Figura 46. Permeabilidade LCS e $V_v$ (%) dos corpos de prova.....	106
Figura 47. Permeabilidade LCS e $V_{vc}$ (%) dos corpos de prova.....	107
Figura 48. Valores máximos de afundamentos em função de deformação permanente.....	110
Figura 49. Volume de vazios antes e depois da DP .....	111
Figura 50. Variação de $V_v$ em corpos de prova extraídos .....	113

Figura 51. Variação de $V_{vc}$ nos corpos de prova extraídos .....	113
Figura 52. Permeabilidade placas <i>versus</i> corpos de prova extraídos ..	115
Figura 53. Redução de $k$ em função do número de chuvas - Permeâmetro experimental .....	117
Figura 54. Redução de $k$ pelo número de ciclos de deformação permanente – Permeâmetro experimental .....	119
Figura 55. Permeâmetros LCS <i>versus</i> desenvolvido em laboratório – corpos de prova CGS.....	121
Figura 56. Permeâmetros LCS <i>versus</i> desenvolvido em laboratório – corpos de prova extraídos das placas .....	122
Figura 57. Variação de $V_v$ (%) - 50 giros .....	126
Figura 58. Variação de $V_{vc}$ (%) - 50 giros .....	126
Figura 59. Variação de $V_v$ (%) - 75 giros .....	127
Figura 60. Variação de $V_{vc}$ (%) - 75 giros .....	127
Figura 61. Variação de $V_v$ (%) - 100 Giros .....	128
Figura 62. Variação de $V_{vc}$ (%) - 100 giros .....	129
Figura 63. Variação de $V_v$ (%) - 150 giros .....	129
Figura 64. Variação de $V_{vc}$ (%) - 150 giros .....	130
Figura 65. Variação de $V_v$ (%) - 200 giros .....	131
Figura 66. Variações de $V_{vc}$ (%) - 200 giros.....	131
Figura 67. Variação de $V_v$ (%) - 0 ciclos.....	132
Figura 68. Variação de $V_{vc}$ (%) - 0 ciclos .....	132
Figura 69. Variação de $V_v$ (%) - 1.000 ciclos.....	133
Figura 70. Variabilidade de $V_{vc}$ (%) - 1.000 ciclos.....	134
Figura 71. Variabilidade de $V_v$ (%) - 3.000 ciclos.....	134
Figura 72. Variabilidade de $V_{vc}$ (%) - 3.000 ciclos.....	135
Figura 73. Variabilidade de $V_v$ (%) - 5.000 ciclos.....	136
Figura 74. Variabilidade de $V_{vc}$ (%) - 5.000 ciclos.....	136
Figura 75. Variabilidade de $V_v$ (%) - 10.000 ciclos.....	137
Figura 76. Variabilidade de $V_{vc}$ (%) - 10.000 ciclos.....	137

Figura 77. Variabilidade de $V_v$ (%) - 20.000 ciclos .....	138
Figura 78. Variabilidade de $V_{vc}$ (%) - 20.000 ciclos.....	138
Figura 79. Variabilidade de $V_v$ (%) - 30.000 ciclos .....	139
Figura 80. Variabilidade de $V_{vc}$ (%) - 30.000 ciclos.....	139
Figura 81. Desempenho à deformação permanente - 1.000 ciclos.....	159
Figura 82. Desempenho à deformação permanente - 3.000 ciclos.....	160
Figura 83. Desempenho à deformação permanente - 5.000 ciclos.....	160
Figura 84. Desempenho à deformação permanente - 10.000 ciclos...	161
Figura 85. Desempenho à deformação permanente - 20.000 ciclos....	161
Figura 86. Desempenho à deformação permanente - 30.000 ciclos....	162
Figura 87. Corpos de prova com 50 giros - Redução de $K$ (mm/seg) .	163
Figura 88. Corpos de prova com 75 giros - Redução de $K$ (mm/seg) .	164
Figura 89. Corpos de prova com 100 giros - Redução de $K$ (mm/seg)	164
Figura 90. Corpos de prova 150 giros - Redução de $K$ (mm/seg).....	165
Figura 91. Corpos de prova com 200 giros - Redução de $K$ (mm/seg)	166
Figura 92. Corpos de prova com 0 ciclos - Redução de $K$ (mm/seg)..	167
Figura 93. Corpos de prova com 1.000 ciclos - Redução de $K$ (mm/seg) .....	168
Figura 94. Corpos de prova com 3.000 ciclos - Redução de $K$ (mm/seg) .....	168
Figura 95. Corpos de prova com 5.000 ciclos - Redução de $K$ (mm/seg) .....	169
Figura 96. CPs 10.000 ciclos - Redução de $K$ (mm/seg) .....	169
Figura 97. Corpos de prova com 20.000 ciclos - Redução de $K$ (mm/seg) .....	170
Figura 98. Corpos de prova com 30.000 ciclos - Redução de $K$ (mm/seg) .....	171

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados de caracterização do agregado .....	65
Tabela 2. Composição granulométrica .....	66
Tabela 3. Ensaio de caracterização do TYREFLEX AB8.....	67
Tabela 4. Número de giros especificados na dosagem SUPERPAVE®73	
Tabela 5. Classificação dos solos segundo grau de permeabilidade .....	98
Tabela 6. Resultados de dosagem por corpo de prova .....	103
Tabela 7. Valores de $k$ (mm/seg) pelo aumento no esforço de compactação.....	108
Tabela 8. $V_v$ e $V_{vc}$ das placas drenantes .....	109
Tabela 9. Permeabilidade LCS (mm/seg) após DP .....	112
Tabela 10. Dados médios dos corpos de prova extraídos das placas...	114
Tabela 11. Classificação de $k$ (mm/seg) ao longo do número de giros	118
Tabela 12. Classificação de $k$ (mm/seg) ao longo do número de ciclos de DP.....	120
Tabela 13. Valores de $k$ (mm/seg) para misturas abertas .....	120
Tabela 14. Coeficientes de redução de permeabilidade .....	124
Tabela 15. Valores para intervenção no revestimento.....	140

## LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CC	Carga constante
CGS	Compactador Giratório SUPERPAVE®
CPs	Corpos de prova
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DP	Deformação permanente
ES	Especificação de serviço
IFSTTAR	<i>Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux</i>
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LCS	<i>Laboratorio Escuela de Caminos de Santander</i>
MAD	Mistura asfáltica drenante
ME	Método de ensaio
N°	Número, quantidade
NBR	Norma Brasileira
NCAT	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SUPERPAVE	<i>Superior Performing Asphalt Pavement</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
V <sub>v</sub>	Volume de vazios
V <sub>vc</sub>	Volume de vazios comunicantes
CPA	Camada Porosa de Atrito
rpm	Rotações por minuto
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
d-BA	Decibéis

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
1.1 OBJETIVOS .....	26
1.1.1 Objetivo Geral.....	26
1.1.2 Objetivos Específicos.....	26
1.1.3 Delimitações da pesquisa .....	26
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	27
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>28</b>
2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES.....	28
2.1.1 Histórico e aplicações .....	28
2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTRAS ASFÁLTICAS DRENANTES.....	31
2.2.1 Agregados em misturas drenantes.....	32
2.2.2 Ligantes utilizados em misturas drenantes.....	33
2.2.3 Normatização .....	33
2.2.4 Ensaios .....	35
2.2.5 Distribuição interna dos vazios .....	41
2.3 FUNCIONALIDADES .....	45
2.3.1 Absorção sonora.....	45
2.3.2 Segurança.....	46
2.3.3 Durabilidade.....	47
2.3.4 Desvantagens de misturas drenantes.....	48
2.4 ESCOAMENTO SUPERFICIAL .....	48
2.4.1 Qualidade da água de <i>runoff</i> .....	49
2.5 COLMATAÇÃO DOS VAZIOS .....	49
2.6 MENSURAÇÃO DA PERMEABILIDADE .....	51
2.6.1 Lei de Darcy.....	52
2.7 ESTUDOS REALIZADOS COM MISTURAS DRENANTES.....	56
<b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>63</b>
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	63
3.2 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	64
3.2.1 Caracterização dos agregados .....	64
3.2.2 Caracterização do Ligante.....	67
3.3 ETAPA 2: DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA .....	68
3.3.1 Determinação do volume de vazios .....	68
3.3.2 Determinação do volume de vazios comunicantes.....	69

3.3.3	Determinação do dano por umidade .....	70
3.3.4	Determinação da perda de massa por desgaste .....	70
3.3.5	Teor de ligante de projeto .....	71
3.4	ETAPA 3: AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DE VAZIOS PELO AUMENTO DO ESFORÇO DE COMPACTAÇÃO NO CGS.....	71
3.4.1	Aumento nos níveis de compactação.....	72
3.4.2	Determinação de volume de vazios e volume de vazios comunicantes .....	74
3.4.3	Determinação da permeabilidade LCS .....	74
3.5	ETAPA 4: PRODUÇÃO DE PLACAS DRENANTES .....	75
3.5.1	Desempenho das placas drenantes à deformação permanente .....	76
3.5.2	Determinação do volume de vazios e vazios comunicantes das placas após deformação permanente.....	77
3.5.3	Determinação do coeficiente de permeabilidade das placas após deformação permanente .....	77
3.6	ETAPA 5: EXTRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DAS PLACAS DRENANTES .....	78
3.7	ETAPA 6: AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE-PERMEÂMETRO EXPERIMENTAL.....	79
3.7.1	Molde.....	84
3.7.2	Controle de fluxo .....	87
3.7.3	Volume drenado.....	88
3.7.4	Água de <i>runoff</i> .....	89
3.7.5	Ensaio de permeabilidade com o permeômetro experimental	91
3.7.6	Procedimentos para repetição das simulações de eventos de chuva.....	93
3.8	ETAPA 7: DETERMINAÇÃO DAS PERMEABILIDADES .....	94
3.8.1	Comparação de permeabilidades .....	98
3.9	ETAPA 8: MOMENTO DE INTERVENÇÃO NO REVESTIMENTO.....	99

**CAPÍTULO 4 - RESULTADOS ..... 101**

4.1	ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS....	101
4.2	ETAPA 2: DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA .....	101
4.2.1	Teor de ligante de projeto .....	101
4.3	ETAPA 3: AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DE VAZIOS PELO AUMENTO DO ESFORÇO DE COMPACTAÇÃO NO CGS .....	104

4.3.1	Determinação do volume de vazios e de vazios comunicantes .....	104
4.3.2	Determinação da permeabilidade LCS.....	106
4.4	ETAPA 4: PRODUÇÃO DAS PLACAS DRENANTES ...	108
4.4.1	Desempenho das placas drenantes à deformação permanente .....	109
4.4.2	Determinação do volume de vazios e vazios comunicantes das placas após ciclos de deformação permanente.....	110
4.4.3	Determinação do coeficiente de permeabilidade das placas após ciclos de deformação permanente .....	111
4.5	ETAPA 5: EXTRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DAS PLACAS DRENANTES.....	112
4.6	ETAPA 6: DETERMINAÇÃO DAS PERMEABILIDADES .....	114
4.6.1	Permeabilidades com permeâmetro LCS .....	115
4.6.2	Permeabilidades pelo esforço de compactação no CGS .....	116
4.6.3	Permeabilidades pelos ciclos de deformação permanente... ..	118
4.6.4	Comparação das permeabilidades pelo esforço compactação no CGS.....	121
4.6.5	Comparação das permeabilidades o corpos de prova extraídos das placas .....	122
4.6.6	Conclusões sobre as permeabilidades .....	123
4.7	ETAPA 7: MOMENTO DE INTERVENÇÃO NO REVESTIMENTO .....	124
4.7.1	Corpos de prova pelo esforço de compactação no CGS .....	125
4.7.2	Diferentes ciclos de deformação permanente.....	131
<b>CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>		<b>143</b>
5.1	SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	146
<b>REFERÊNCIAS .....</b>		<b>149</b>
APÊNDICE A – DESEMPENHO MECÂNICO A CICLOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE .....		159
APÊNDICE B – REDUÇÃO DA PERMEABILIDADE DOS CORPOS DE PROVA COMPACTADOS NO CGS .....		163
APÊNDICE C – REDUÇÃO DA PERMEABILIDADE DOS CORPOS DE PROVA EXPOSTOS A CICLOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE.....		167



## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas de vias urbanizadas é a formação de poças de água sobre os revestimentos em dias de chuva. A água acumulada sobre a superfície contribui para diminuição do atrito entre pneu e pavimento o que acarreta no aumento no número de acidentes. Uma das alternativas para redução do acúmulo de água é a utilização de revestimentos drenantes. Estes revestimentos são responsáveis pela condução da água através de seus vazios até os elementos de drenagem superficial (sarjetas), para reservatórios ou promoção da infiltração ao lençol freático. Este tipo de mistura, classificada como aberta, além de proporcionar maior segurança ao usuário pela melhoria na aderência também proporciona absorção sonora.

Revestimentos com misturas drenantes é uma solução viável para rodovias brasileiras. Entretanto, pelo elevado volume de vazios interno, diferente de misturas asfálticas convencionais densas, a mistura acaba apresentando maior fragilidade. Para que os revestimentos satisfaçam as exigências normativas, ligantes modificados e agregados de boa qualidade devem ser utilizados.

O volume de vazios destes revestimentos necessita de manutenção constante, para que suas propriedades drenantes sejam mantidas. Devido à ação do tráfego, a sujeira acumulada no interior dos vazios acarreta o fenômeno de colmatção, quando há o entupimento dos vazios e o revestimento não mais seja capaz de drenar a água. Para realização da manutenção desta permeabilidade, máquinas de limpeza são utilizadas além do acompanhamento no decréscimo no coeficiente de permeabilidade da via. Para este monitoramento, ensaios utilizando permeômetros são realizados, m campo e em laboratório.

Esta dissertação trata da avaliação da redução da permeabilidade de revestimentos compostos por misturas asfálticas drenantes, em relação ao tempo. A redução do volume de vazios foi simulada por meio do aumento do esforço de compactação e pelo aumento de deformação nos corpos de prova. O estudo da redução da capacidade drenante pela redução dos vazios e a avaliação do tempo de vida útil e da evolução da colmatção dos vazios das misturas drenantes são importantes para o entendimento do comportamento destas misturas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a redução do volume de vazios com o aumento do esforço de compactação de misturas asfálticas drenantes para determinação da permeabilidade e colmatção em função do tempo.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

De modo a atingir o objetivo proposto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar as características de compactação e relação entre volume de vazios e volume de vazios comunicantes de uma mistura asfáltica drenante;
- Avaliar a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas drenantes;
- Desenvolver uma metodologia de medida da permeabilidade em corpos de prova em laboratório;
- Medir a permeabilidade de misturas asfálticas drenantes em função da progressiva colmatção em relação a diferentes níveis de esforços de compactação e de deformação;
- Propor uma metodologia de análise de redução da permeabilidade das misturas em função do tempo.

### 1.1.3 Delimitações da pesquisa

Nesta dissertação foram produzidas em laboratório misturas asfálticas drenantes dosadas a partir da mesma curva granulométrica e mesmo tipo de ligante (modificado com borracha). Foram tomados cuidados relativos à produção das misturas, parâmetros volumétricos, temperaturas, compactação. As normas relativas aos ensaios foram seguidas. No entanto, as misturas não apresentaram comportamento idêntico, apresentando volume de vazios, vazios comunicantes e permeabilidades diferentes. Cada mistura, quando submetida aos ensaios de permeabilidade no permeâmetro desenvolvido em laboratório, apresentou comportamento exclusivo. Este estudo não englobou a estrutura interna dos corpos de prova de modo a avaliar o caminho percorrido pela água pelos vazios comunicantes das misturas. Ainda, para avaliação da permeabilidade foi medida por meio de um permeâmetro de

carga constante especialmente desenvolvido para este estudo assim, não há dados de outros autores para comparativos utilizando o mesmo equipamento.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em cinco capítulos, discriminados da seguinte forma:

- **Capítulo 1 – Introdução**

O primeiro capítulo apresenta uma introdução à temática das misturas asfálticas drenantes, sendo apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos e as limitações do estudo.

- **Capítulo 2 – Revisão de literatura**

Neste capítulo é apresentada a revisão de literatura sobre misturas drenantes. O foco do estudo foram as misturas asfálticas drenantes, abrangendo conceitos relativos à sua constituição interna, critérios quanto ao volume de vazios e volume de vazios comunicantes, funcionalidades, permeabilidade (tipos de mensuração) e colmatagem, e dosagem.

- **Capítulo 3 – Materiais e método**

No terceiro capítulo são apresentados os materiais utilizados na composição das misturas asfálticas drenantes, o método proposto bem como as etapas constituintes para atingir os objetivos elencados. O permeâmetro desenvolvido em laboratório, desenvolvido neste estudo é detalhado neste capítulo.

- **Capítulo 4 – Resultados**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos de caracterização dos materiais e nas etapas do método. O Capítulo 4 mostra a discussão dos resultados das análises realizadas.

- **Capítulo 5 – Considerações finais e recomendações**

No Capítulo 5, são feitas as considerações finais sobre o trabalho e apresentadas as recomendações para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as **Referências** utilizadas para realização desta dissertação, e fundamentação da metodologia, bem como Apêndice.

## CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo trata de misturas asfálticas drenantes. O histórico da aplicação e a evolução deste tipo de mistura a partir da granulometria aberta (drenante e porosa) até as primeiras utilizações brasileiras, foram referenciadas. A constituição interna destas misturas foi detalhada considerando ser esta determinante para o entendimento do seu comportamento, funcionalidade e benefícios ou problemas atribuídos à sua implantação.

Misturas abertas são assim definidas devido à descontinuidade de sua curva granulométrica. Podem ser divididas entre porosas e drenantes, em função da presença ou não de vazios comunicantes (ALESSI, KOKOT e GOMES, 2006).

O pavimento drenante (ou permeável) é por definição, capaz de drenar. Assim, toda sua estrutura, desde o revestimento até a base e sub-base, devem atender o número mínimo de permeabilidade de  $1 \times 10^{-3}$  m/s. Revestimentos drenantes (ou permeáveis) são aqueles em que o revestimento é capaz de drenar, mas está aplicado sobre camadas pouco e ou nada permeáveis (NBR 16416, 2015).

Neste trabalho, para os revestimentos drenantes, foi adotada a nomenclatura de mistura asfáltica drenante (MAD).

### 2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES

#### 2.1.1 Histórico e aplicações

Por ser uma alternativa de minimizar ou eliminar a água acumulada sobre a superfície dos pavimentos após eventos de chuvas, as misturas com granulometria aberta, chamadas porosas e drenantes, passaram a ser estudadas a partir da década de 1930 nos Estados Unidos da América. A partir da década de 1950, foi introduzido o revestimento denominado de Camada Asfáltica de Atrito de Graduação Aberta (*Open Graded Asphalt Friction Courses*), que difere de outros revestimentos por apresentar granulometria aberta podendo ser aplicado em espessuras reduzidas, entretanto com menor durabilidade, quando comparado às misturas densas convencionais (FAGHRI, 2002).

Um dos primeiros projetos com uso de mistura asfáltica aberta foi desenvolvido pelo *Federal Highway Administration* (FHWA) e aplicado em 1974. O projeto foi modificado em 1980 e em 1990. As especificações correspondiam à utilização de materiais, graduação da mistura, teor de ligante, temperatura e resistência aos efeitos da água (PUTMAN, 2012).

Devido a problemas de durabilidade, as misturas abertas não foram largamente utilizadas até a década de 1980. No entanto, a partir desta década e, devido aos resultados satisfatórios no controle do escoamento superficial da via, outros países difundiram seus estudos em misturas de granulometria aberta (ALESSI, KOKOT e GOMES, 2006).

Alguns dos Estados Norte Americanos, como Geórgia, Texas e Oregon, aprimoraram o estudo de misturas abertas de forma a dar seqüência à sua utilização. As mudanças no projeto das misturas incluíam: a utilização de ligantes modificados com aditivos e fibras a fim de estabilizar a mistura, utilização de agregados mais duráveis para poder aumentar o volume de vazios. O uso de ligantes modificados produzia sobre os agregados uma película mais espessa, o que diminuía a oxidação e o desgaste (FITTS, 2002).

A França foi um dos primeiros países europeus a utilizar misturas asfálticas drenantes, no ano de 1977. O revestimento foi aplicado em trechos experimentais, com porcentagem de vazios iniciais em cerca de 20% e espessura média de 4,0 cm (TAKAHASHI E PARTL, 1999). Este tipo de mistura foi amplamente difundido a partir de 1978 cujos estudos foram divididos em duas gerações. Segundo Valeri (2006), na primeira geração a mistura era assim especificada: (i) volume de vazios de 20%, (ii) teor de ligante entre 4,4% e 5,5%, (iii) curva granulométrica descontínua; (iv) diâmetro máximo do agregado de 10 mm. Na segunda geração as características eram as seguintes: (i) volume de vazios entre 20% e 30%, (ii) curva granulométrica descontínua mas com a incorporação de material fino, (iii) uso de ligantes modificados que garantissem a integridade da mistura; (iv) elevada drenagem superficial.

Entre os anos de 1979 e 1980, na Espanha, foram construídos trechos experimentais utilizando misturas abertas em rodovias de tráfego pesado, com monitoramento da drenagem constante (OLIVEIRA, 2003).

A Bélgica teve sua primeira experiência com pavimentação drenante em 1979, com a execução de um trecho de 2.700 m<sup>2</sup>. Uma rodovia de pista dupla com volume de tráfego médio de 700 veículos/dia em cada pista (TAKAHASHI E PARTL, 1999).

No Japão este tipo de mistura tem sido utilizado como alternativa ao controle de inundações e como técnicas de infiltração de grandes cidades a partir de 1994. Neste país, locais como quadras de esporte, estacionamentos e algumas praças, foram construídas com misturas abertas por serem lugares de possível aplicação e passíveis de inundação (WATANABE, 1995).

No Brasil, os estudos de misturas de granulometria aberta tiveram início na década de 1960 pela Diretoria de Engenharia da Aeronáutica

(DIRENG). Os estudos tinham como objetivo o aumento da segurança em procedimentos de pouso e decolagem em aeroportos. A denominação usual no país passou a ser Camada Porosa de Atrito (CPA) (BOTELHO *et al.* 2004).

A partir de 1980 os estudos e aplicações foram aprimorados no Brasil, com sua principal aplicação inicial, em aeroportos. Em 1993 no aeroporto de Confins, em Belo Horizonte – MG, uma camada de revestimento drenante foi aplicada utilizando ligante asfáltico convencional. Em 1987, a aplicação deste revestimento foi no Aeroporto Santos Dumont – RJ, com a utilização de ligante asfáltico modificado por polímeros (OLIVEIRA, 2003).

Em 1992, um trecho experimental utilizando CPA foi realizado na Rodovia dos Bandeirantes – SP com espessura entre 2,0 e 2,5 centímetros. O trecho experimental foi aplicado sobre uma camada de *binder* de graduação aberta (PORTO, 1999).

Outro trecho experimental foi executado em São Paulo, no ano de 1997. Com 2,0 km de extensão e situado na marginal da Rodovia Presidente Dutra (BR – 116), espessura de 4,0 cm e porcentagem de volume de vazios de 18% (OLIVEIRA, 2003).

No Aeroporto Santos Dumont no Rio de Janeiro, no ano de 1999. O revestimento foi aplicado sobre pavimento superposto na parte central da pista principal. Em 2003 a camada de CPA foi renovada nas áreas de maior solicitação e devido à colmatação de algumas áreas na pista (BERNUCCI *et al.* 2008).

Rodovia dos Imigrantes, no ano de 1998 fazendo a ligação de São Paulo a Santos, foi realizada fresagem seguida de recapeamento, com espessura de 5 cm. Ainda no ano de 1998, na Rodovia Presidente Dutra, localizada próxima a São Paulo, realização de fresagem do revestimento existente e aplicação de 2 cm de microrrevestimento asfáltico a frio. Sobre este, executada camada de 4 cm em CPA (BERNUCCI *et al.* 2008).

A primeira aplicação de revestimento em mistura aberta na região nordeste do país foi realizada na Bahia, no ano de 2000. O trecho fez parte da duplicação da Rodovia BA – 09 (Estrada do Coco), com extensão de 33,5 km e ligante asfáltico CAP – 20 modificado com 4% de polímeros do tipo SBS (PORTO, 1999).

Ainda no ano de 2000, um trecho experimental com 600 metros na Rodovia BR -101, situada em Santa Catarina – SC, foi construída com espessura de 3,0 cm. Esta foi aplicada sobre uma camada densa de pré – misturado a quente, e apresentava porcentagem de vazios inicial de 18,34%. Ainda na BR – 101, sentido Joinville – Garuva, outro trecho de 600 metros de extensão e 3,0 cm de espessura foi executado em

revestimento tipo CPA (GUIMARÃES, 2012).

No estado de Santa Catarina, a BR – 282, entre os municípios de Lages, São José do Cerrito e Campos Novos foram executados em CPA no ano de 2008. O trecho corresponde a cerca de 80 km e foi aplicado sobre uma camada restaurada de concreto asfáltico convencional. No ano de 2011, um novo trecho de 53 km foi executado entre São José do Cerrito e Vargem Grande, também na BR – 282 (KNABBEN, 2012).

Trechos experimentais, com 5 cm de espessura foram realizados em diversos trechos da BR-285, entre os municípios de Entre - Ijuí e São Borja. Alguns dos trechos da BR-285 foram aplicados há 8 anos e ainda estão em serviço, outros no entanto foram substituídos por microrrevestimento. Não se tem informações sobre os procedimentos ou realização de limpeza nestes pavimentos (ZAGONEL, 2013).

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTRAS ASFÁLTICAS DRENANTES

As principais características das misturas asfálticas drenantes são a alta porcentagem de volume de vazios e a presença de vazios comunicantes. Diversas especificações no mundo apresentam variações da consideração dos limites da porcentagem do volume de vazios e porcentagem do volume de vazios comunicantes, agregados e ligante a ser utilizado.

De acordo com Henderson (2010) as misturas asfálticas drenantes apresentam, porcentagem do volume de vazios variando entre 20% a 30% e limitação da quantidade de agregado fino. A limitação da quantidade de finos, a partir da segunda geração de misturas asfálticas drenantes desenvolvida na França, proporcionou melhorias em propriedades de ensaios com o congelamento e degelo de amostras, sem alteração da sua resistência. Estudos realizados por Schaefer, *et al.* (2006), comprovam a necessidade mínima de agregados finos nas misturas asfálticas drenantes, pois quando sua retirada é total, resulta do aumento na fragilidade desta.

Misturas de granulometria aberta aplicadas em revestimentos conferem algumas vantagens relativas à segurança de uma a rodovia. A elevada porcentagem do volume de vazios e de vazios interconectados confere permeabilidade ao revestimento. Segundo Kandhal (2002) a água de eventos de chuva infiltra pelos vazios interconectados e pode ser removida da superfície imediatamente. Desta forma, o *spray* formado pela água sobre a pista é reduzido, além da hidroplanagem de veículos e aumento da visibilidade do condutor.

Mesmo durante eventos de chuva de maior intensidade, que faz

com que a superfície permeável permaneça com uma determinada altura lâmina de água, a pressão exercida pelos pneus é dissipada através dos vazios e a interação pneu pavimento ocorre (KANDHAL, 2002).

Um estudo conduzido no Reino Unido mostrou que uma superfície drenante pode reduzir o *spray* em até 95% ao transitar aproximadamente 3,05 m atrás de um caminhão (NICHOLLS, 1997).

A definição da elevada porcentagem do volume de vazios e existência de vazios comunicantes, por vezes dificulta a distinção entre misturas porosas (CPA) e misturas drenantes, Young *et al.* (2013) conceituaram os termos e suas características, apresentados resumidamente a seguir:

- Misturas drenantes: misturas de granulometria aberta capazes de permitir a passagem de líquidos através de sua estrutura. Estas misturas apresentam vazios interconectados que permitem a percolação da água através da superfície;
- Misturas porosas: apresentam significado semelhante, mas ligeiramente diferente. Estas misturas apresentam vazios que permitem a entrada da água, mas estes não estão conectados. Desta forma, os fluidos penetram na estrutura, que funciona como camada de retenção e são eliminados apenas por evaporação.

Os revestimentos drenantes são facilmente adaptados ao ambiente urbano existente, desta forma são capazes, além de amenizar a condutividade hidráulica, são capazes de capturar, em sua estrutura, poluentes oriundos da rodovia, diminuindo assim a contaminação do solo do local (YOUNG, *et al.* 2013).

Diversos países americanos têm adotado o controle do escoamento superficial como solução de problemas de drenagem urbana, utilizando revestimentos com granulometria aberta. Com o passar do tempo os poros sofrem o processo de colmatação, ou seja, entupimento e o revestimento já não mais desempenha sua função (BERNUCCI *et al.* 2008).

A vida útil de um revestimento drenante é definida em função dos anos que está em serviço, até que seu desempenho hidráulico reduza ao nível onde não ocorra drenagem do “evento de chuva de projeto”, tornando-se um evento incontrolável onde trabalhos corretivos sejam necessários (WONG, 2006).

### **2.2.1 Agregados em misturas drenantes**

Os agregados empregados em misturas drenantes, segundo Nascimento (2012), devem apresentar boa resistência à fragmentação e ao desgaste produzido pelo tráfego. Para que estas características sejam

mantidas os agregados devem ser homogêneos e não conter matéria orgânica ou outro tipo de mistura que possa modificar a mistura. Estes agregados devem apresentar boa forma (preferencialmente cúbica), serem resistentes à ruptura e a desagregação produzida pela abrasão.

Uma mistura asfáltica convencional pode apresentar, de acordo com Castro (2005) entre 30 e 50% de agregados de tamanho inferior a 2,5 mm. Em misturas asfálticas com alta capacidade drenante, a porcentagem dos agregados finos é baixa, em torno de 6% a 12%.

Misturas que apresentam entre 65% e 85% de material retido na peneira com abertura de 4,8 mm possuem um esqueleto formado por agregados graúdos chamado de “embricamento”, quando se tem contato pedra a pedra que permite a percolação da água dentro da mistura (BROWN e MALLICK, 1994 apud MERIGHI e FORTES, 2005).

Para melhor desempenho da mistura drenante e como garantia de elevado índice de vazios comunicantes, a mistura deve apresentar granulometria grossa e descontínua. Esta descontinuidade garante maior número de vazios em seu interior e desta forma, melhor condução da água entre a mistura.

### **2.2.2 Ligantes utilizados em misturas drenantes**

Por se tratar de uma camada de desgaste, o revestimento drenante é mais solicitado tanto quanto à cargas, quanto à ações climáticas. Para que as características funcionais das misturas sejam mantidas, Menezes (2008) recomenda a utilização de ligantes modificados. Estes tipos de ligantes contribuem para a melhoria da aderência, regularidade do pavimento, resistência ao envelhecimento por ações de agentes atmosféricos e também quanto o ruído produzido ao rolamento.

A utilização de ligantes modificados é atribuída por conferirem à mistura drenante maior resistência à oxidação e boa adesividade entre os agregados, mesmo com elevada porcentagem do volume de vazios (PORTO, 1999).

### **2.2.3 Normatização**

Misturas abertas são especificadas, de acordo com normas próprias do país em que foram desenvolvidas. Estas terminologias abrangem misturas asfálticas drenantes e porosas, dependendo de suas especificações para a porcentagem do volume de vazios e vazios comunicantes.

No Brasil, a Camada Porosa de Atrito (CPA) é normatizada de acordo com a DNER-ES 386 (1999). Segundo as especificações, a

mistura deve ser preparada em usina a quente, composta de agregados, filler e ligante modificado e alguns índices a serem considerados:

- Desgaste Los Angeles máximo de 25,0%;
- Durabilidade, perda máxima de 12,0%;
- Compactação Ensaio Marshall (DNER-ME 043 / 1995);
- Porcentagem de ligante entre 4,0 – 6,0%, para ligantes modificados por SBS;
- Porcentagem do volume de vazios entre 18,0 – 25,0 %;
- Perda por abrasão Cantabro máxima de 25%;
- Resistência à tração por compressão diametral mínimo de 5,5 kgf/cm<sup>2</sup>.
- Compactação em campo, rolo metálico liso tipo tandem, até atingir a densidade requerida.

Para execução de misturas de granulometria aberta, a norma europeia BS EN 13108-7 (2006), apresenta como especificações:

- Compactação Ensaio Marshall, 100 golpes por face;
- Compactação no compactador giratório CGS com 40 giros;
- Porcentagem de ligante entre 3,0 – 7,0%;
- Porcentagem do volume de vazios entre 14,0 – 30,0 %;
- Perda por abrasão Cantabro entre 10,0 – 50,0%;
- Susceptibilidade à água (BS EN 12697 - 2012), entre 50,0 – 100,0%.

Segundo a ASTM D 7064 (2013), misturas de granulometria aberta são utilizadas para reduzir a hidroplanagem e permitir drenagem livre, onde a água da superfície migre lateralmente para as bordas do pavimento. A especificação americana apresenta as seguintes recomendações:

- Dimensões para dosagem: molde com diâmetro de 100 mm e altura de 63,5 mm;
- Compactação no compactador giratório SUPERPAVE® (CGS) com 50 giros;
- Porcentagem de ligante entre 6,0 – 6,5%, para ligantes sem aditivos;
- Volume de vazios mínimo de 18%;
- Perda por abrasão Cantabro máxima de 20%;
- Susceptibilidade à água, também conhecido por dano por umidade induzida é normatizada pela norma AASHTO T 283 (2011), mínima de 80%.

Em função das especificações de cada normativa, um destes procedimentos é adotado durante dosagem da mistura asfáltica.

#### 2.2.4 Ensaios

Os ensaios laboratoriais de maior relevância para misturas asfálticas drenantes, executados conforme as normativas adotadas são:

- Desgaste por abrasão Cantabro;
- Dano por umidade induzida;
- Ensaio de deformação permanente;
- Verificação do volume de vazios;
- Verificação do volume de vazios comunicantes;
- Verificações de permeabilidade.

Este tipo de mistura não passa necessariamente por ensaios de resistência, pois apresenta baixa resistência à flexão. Assim, comentários relacionados aos ensaios, são apresentados a seguir.

- Desgaste por abrasão – Cantabro  
Como finalidade de analisar a perda de desgaste da camada de rolamento da rodovia por desagregação, é utilizado o ensaio Cantabro, de acordo com a norma DNER-ME 383 (1999). O ensaio é realizado na máquina Los Angeles, exposto a 300 revoluções a velocidade de 30 – 33 rpm, a temperatura de 25 °C. Através da relação percentual entre o peso da amostra antes e depois das 300 revoluções, é determinada a perda por abrasão dos corpos de prova (DNER-ME 383, 1999). A norma ASTM D7064 (2013) determina como perda máxima por desgaste para misturas drenantes, 20%. Este ensaio é tipicamente realizado em misturas drenantes devido a sua suscetibilidade à ação da água, evidenciando perda por problemas de adesividade (BERNUCCI *et al.* 2008).

- Ensaio de deformação permanente  
Os mais severos defeitos que ocorrem na pavimentação asfáltica se refletem na camada de revestimento. É possível identificar dois modos distintos de solitação mecânica: flexão repetida, responsável pela fadiga do material (associada ao trincamento do revestimento ou de camadas cimentadas) e a compressão simples, que conduz ao acúmulo de deformações permanentes (PINTO, 1991).

A deformação permanente em revestimentos pode ser definida como depressões longitudinais que aumentam com as cargas repetidas impostas pelo tráfego de veículos. Quando estas deformações ocorrem

somente no revestimento, existem diversos ensaios de laboratórios que buscam reduzir as chances de seu desenvolvimento. É considerado ainda que as condições de campo sejam difíceis de reprodução em laboratório. Os ensaios realizados em laboratório servem para comparar misturas, não realizando propriamente à previsão de deformação com o tempo ou número de ciclos associados ao tráfego (BORGES, 2014).

Um dos ensaios utilizados para determinar a trilha de roda em revestimentos asfálticos é o ensaio uniaxial de carga repetida, conhecido no Brasil como *creep* dinâmico. Onde se obtém o parâmetro denominado *flow number* (FN), que é o número de ciclos em que a taxa de deformação plástica é mínima e a partir do qual, o corpo de prova atinge a ruptura (NASCIMENTO, 2012). Segundo Borges (2014), o ensaio de *creep* dinâmico também é utilizado para selecionar materiais, visto que é capaz de fornecer o parâmetro de ruptura na camada asfáltica através do *flow number*, entretanto, não fornece parâmetro para a modelagem quanto à deformação permanente em camadas asfálticas.

Outra forma de avaliação da deformação permanente em revestimentos asfálticos é através do uso de simuladores de tráfego. Estes são capazes de associar mais proximamente a situação de campo por terem aplicação de cargas cíclicas sobre as misturas, em geral por meio de pneumáticos. Um dos modelos de simuladores de tráfego largamente difundido entre universidades mundiais, inclusive a Universidade Federal de Santa Catarina, é o simulador francês *Orniéreur* do LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*), atual IFSTTAR na França, procedimento que segue especificações da norma francesa AFNOR NF P 98-253-1 (1993) (*Essais Relatifs Aux Chaussées, Déformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés*).

Embora todos os ensaios de simulação utilizando simuladores de tráfego sejam semelhantes, segundo Gardete (2006), existem diferenças entre eles, que vão desde a carga aplicada e sua forma de aplicação, diâmetro, tipo e velocidade da roda, realização do ensaio ao ar ou em imersão, etc. Foram desenvolvidos em diferentes países diversos equipamentos para este fim. Como exemplos utilizados são citados:

- i. *Asphalt Pavement Analyser* (APA) – equipamento desenvolvido pelo *Georgia Loaded Wheel Tester* (GLWT);
- ii. *Hamburg Wheel Tracker Device* - equipamento desenvolvido na Alemanha;
- iii. *Nottingham Rutting Tester* – desenvolvido pela universidade de Nottingham, Inglaterra;
- iv. *Georgia Loaded Wheel Tester* – desenvolvido pelo Estado da Georgia nos Estados Unidos, de onde deriva o APA.

- Estrutura interna

Misturas asfálticas drenantes são caracterizadas, principalmente, por sua elevada permeabilidade, o que possibilita a percolação da água por entre os vazios (OLIVEIRA, 2003).

A distribuição interna dos vazios é de difícil previsão, desta forma, mesmo apresentando grande volume, seu comportamento pode não representar valores de permeabilidade condizentes, por exemplo.

Segundo Caltrans (2006), por vezes, a diminuição do volume de vazios em função do aumento do teor de ligante nas misturas não é comprovada. O arranjo dos agregados na medida em que o ligante é introduzido na mistura, por vezes pode permitir “grandes” vazios internos, em determinadas regiões e desta forma maior permeabilidade pontual, destoando da tendência de redução dos vazios pelo aumento do ligante (PUTMAN, 2012).

Desta forma, a análise e quantificação do volume de vazios e de vazios comunicantes em revestimentos drenantes são fundamentais para sua caracterização. Ensaios de permeabilidade sempre devem ser associados à esta mensuração, vista as diferenças na estrutura interna de cada mistura e a variabilidade destes valores, mesmo quando mantidos constantes parâmetros de dosagem.

### **Volume de vazios**

Segundo a norma ASTM D7064 (2013), a porcentagem total do volume das pequenas bolsas de ar entre as partículas de agregado revestidas por ligante ao longo de uma mistura de pavimentação compactada, representa o volume de vazios da mistura. Este valor é expresso como uma porcentagem do volume total da amostra compactada. A norma apresenta mínimo de 18% de vazios para misturas drenantes.

Um método comum e eficaz para determinar o volume de vazios total é determinar a densidade aparente e a densidade teórica máxima e calcular os vazios pela razão das duas (LEE *et al.* 1990).

A relação entre a densidade máxima medida e a aparente determinam o volume de vazios da mistura de acordo com a Equação 1.

$$V_v = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \cdot 100 \quad 1$$

Onde:

V<sub>v</sub> – Volume de vazios da mistura, (%);

$G_{mb}$  - A densidade aparente, determinada pela norma DNER-ME 117 (1994), g/cm<sup>3</sup>;

$G_{mb}$  - Densidade máxima medida, segue especificações AASHTO T 209 (2015), g/cm<sup>3</sup>.

## Volume de vazios comunicantes

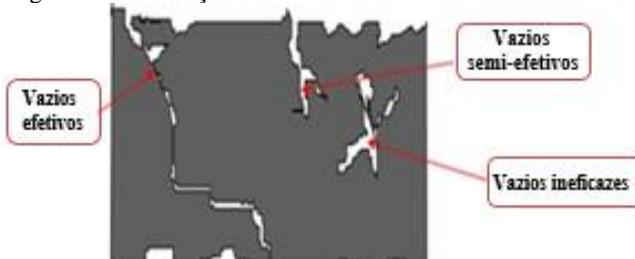
Em misturas asfálticas drenantes, quantidade de vazios comunicantes (conectados) é muito importante porque a funcionalidade com respeito à permeabilidade é influenciada diretamente por esta propriedade. A norma francesa AFNOR-NF-P-98-254-2 (1993), apresenta as especificações deste ensaio. A porcentagem dos vazios comunicantes é determinada a partir da massa de água introduzida na amostra cujas paredes laterais e a parte inferior foi impermeabilizada. Desta forma é determinado o volume efetivo dos vazios conectados sem levar em consideração os vazios na superfície da amostra (EMPA, 2006).

De acordo com Caltrans (2006), a disposição e agrupamento, os vazios das misturas drenantes, podem ser classificados como:

- **Vazios efetivos:** São aqueles vazios que contribuem para a passagem e armazenamento da água;
- **Vazios semi-efetivos:** São aqueles vazios que não contribuem para a passagem da água, mas permitem o armazenamento da água;
- **Vazios ineficazes:** São aqueles vazios que não contribuem nem para o armazenamento e nem para a passagem de água.

Os vazios são os responsáveis pela condução da água através da mistura. Geralmente a quantidade dos vazios eficazes e a permeabilidade da mistura drenante estão diretamente relacionadas. A Figura 1 apresenta a representação da disposição interna dos vazios e sua nomenclatura.

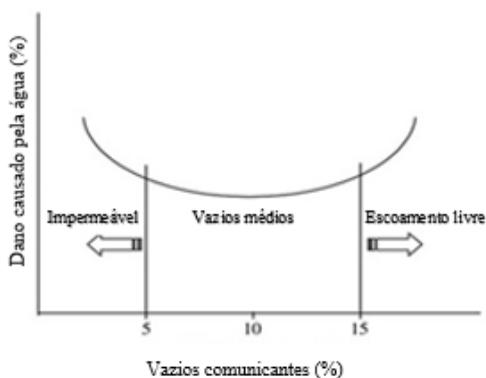
Figura 1. Distribuição dos vazios em misturas drenantes



Fonte: Adaptado de Delorme, Roche; Wendling (2007)

Segundo Raimbault *et al.* (2002), o índice de vazios comunicantes, em misturas drenantes, deve apresentar mínimo de 12% e no máximo de 20%. De acordo com Terrel e Shute (1989) a suscetibilidade da mistura asfáltica, ou seja, seu dano causado pelo contato com água em eventos de congelamento e degelo, está diretamente relacionada com sua porcentagem de vazios comunicantes. Segundo esse estudo, misturas drenantes devem apresentar volume de vazios comunicantes máximos de 15%, conforme apresentado na Figura 2. A partir deste valor, a mistura passa a apresentar escoamento livre, agindo apenas como passagem da água, não sendo capaz de reter, em sua estrutura, impurezas provenientes do tráfego e águas de *runoff*. Como consequência desta passagem constante de água, sistemas de drenagem poderiam ser sobrecarregados.

Figura 2. Definição do volume de vazios comunicantes (%)



Fonte: Adaptado de Terrel e Shute (1989)

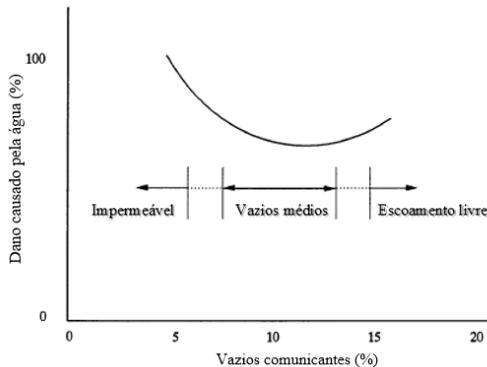
Al-Swailm (1992), complementou os estudos de Terrel e Shute (1989). O volume de vazios comunicantes encontrados nas misturas é determinante para definição de sua permeabilidade, entretanto o conceito de escoamento livre foi redefinido em função da resistência das misturas ao congelamento e degelo. Nesta definição de valores variaram em função dos conceitos sobre estas misturas, uma vez que com o passar dos anos, materiais e ligantes de melhor qualidade foram introduzidos nas misturas, o que fez com que sua resistência aos danos causados pela água aumentassem.

O conceito de escoamento livre segundo Al-Swailm (1992), é intitulado para revestimentos drenantes, que com a utilização de ligantes

modificados, conseguem conduzir a água por seus vazios, entretanto após determinado tempo apresentam processo de entupimento. Este processo é denominado colmatção, resultado do armazenamento de impurezas provenientes do tráfego e de águas de *runoff* no interior do revestimento.

Desta forma, a Figura 3 apresenta a classificação funcional das misturas de acordo com sua porcentagem de vazios comunicantes. A classificação das misturas é relacionada com sua susceptibilidade ao congelamento e degelo.

Figura 3. Dano acarretado pela água em misturas drenantes



Fonte: Adaptado de Al-Swailm (1992)

Segundo Al-Swailm (1992), as misturas asfálticas podem ser classificadas em função de seus vazios comunicantes como:

- **Impermeáveis:** Misturas com elevado teor de ligante, ou mastigue, com graduação contínua que pode conter mais de um tipo de material.
- **Vazios médios:** Representam misturas densas, de graduação descontínua, comumente utilizada nos Estados Unidos da América, podendo ser classificadas como misturas porosas.
- **Escoamento livre:** Misturas de graduação aberta, com ligantes modificados, que garantem o escoamento da água entre seus vazios devido ao volume de vazios comunicantes, superior à 15%.

De acordo com estes valores, misturas drenantes devem apresentar porcentagem de volume de vazios comunicantes próximo a 15%, podendo apresentar variações de até 3%, sem que suas propriedades sejam comprometidas. Esta porcentagem garante às misturas capacidade de percolação, capaz de conduzir entre seus vazios, a água que escoou sobre

a superfície do revestimento. Prévia a aplicação de revestimentos drenantes, é recomendado ensaios de dano por umidade induzida (AASHTO T 283, 2011), onde a relação entre as resistências retidas à tração seja inferior a 80%, ou seja, que o dano causado pela água nestas misturas seja máximo de 20%.

### **2.2.5 Distribuição interna dos vazios**

O volume de vazios e de vazios comunicantes de misturas asfálticas drenantes, frequentemente é correlacionado com sua capacidade de percolação pelo revestimento. Entretanto, por vezes, quando há comparações entre amostras, o fato de apresentar elevado volume de vazios e vazios comunicantes, não garante a mistura maior capacidade de percolação. A variabilidade dos valores é então relacionada a diversos fatores, como o embricamento causado por ligante e agregado ou a distribuição interna dos vazios.

A distribuição interna dos vazios das misturas asfálticas é fator exclusivo, proveniente principalmente do processo de compactação das amostras. A diferença entre as dimensões dos grãos que compõem a mistura proporciona diferenças internas em cada amostra, vista o arranjo durante o processo de mistura, desde a acomodação na forma, até a aplicação dos ciclos.

Como forma de visualização da distribuição interna dos vazios, utilizam-se ensaios como a tomografia computadorizada através da utilização de um tomógrafo específico para materiais asfálticos. A tomografia computadorizada compõe um tipo de ensaio não destrutivo, com utilização de análise superficial, onde não há necessidade do rompimento da amostra a ser estudada, conforme detalhamento de procedimentos apresentados na ASTM E 1411 (2016).

A tomografia gera um arquivo de uma matriz matemática onde cada elemento da matriz corresponde ao coeficiente de atenuação em um ponto da imagem. A matriz matemática gerada pode ser convertida em imagem tridimensional por meio da utilização de um *software* apropriado. (CARDOSO, 2004).

A tomografia computacional permite a comparação da qualidade e integridade de amostras realizadas em laboratório e extraídas de campo (BRAZ *et al.* 1999). O Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES), localizado no Rio de Janeiro, realiza atualmente análises em corpos de prova, utilizando termógrafo de terceira geração (MARQUES, 2004).

Braz *et al.* (1999) analisaram a porcentagem de vazios em amostras

de mistura densa extraídas do campo, com diferentes idades, através da tomografia computadorizada. Os corpos de prova foram serrados em diversas alturas, dividindo a camada de ligação (*binder*) da camada de rolamento. Foi verificado que houve maior porcentagem de vazios na camada de ligação do que na camada de rolamento, estando estes mais dispersos e apresentando densificação acentuada em algumas áreas. Na camada de rolamento, há certa distribuição homogênea dos vazios ao longo de toda a altura dos corpos de prova. A determinação de uma espessura única para análise na tomografia pode comprometer os resultados, desta forma, estes autores recomendam muita cautela na escolha da fatia a ser analisada ou que seja realizada uma média de algumas análises.

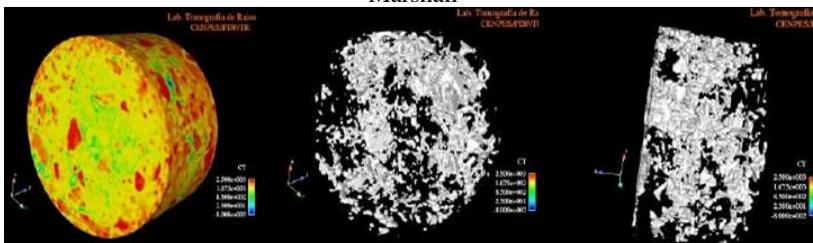
Marques (2004) comparou as diferenças na distribuição dos vazios internos de corpos de prova de mistura densa quando compactados por Marshall e no compactador giratório CGS, utilizando tomografia computadorizada. A Figura 4 apresenta o corpo de prova compactado com 75 golpes por fase (compactação Marshall) e 5% de ligante tipo CAP-20. A

Figura 5 apresenta o corpo de prova compactado no CGS com 75 giros e 5% de ligante tipo CAP-20.

Na Figura 4 e

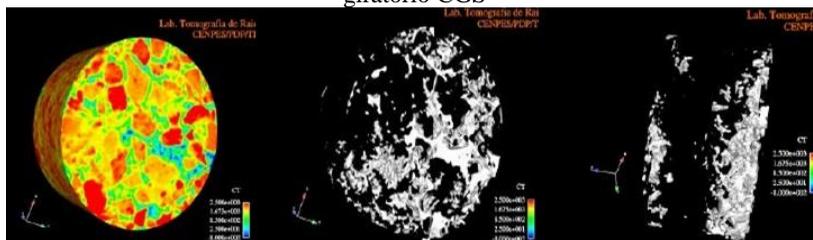
Figura 5, a tonalidade de cores e representação utilizada nas duas imagens é a mesma. A cor azul representa a faixa menos densa da mistura, corresponde aos vazios de ar. O vermelho representa a parte mais densa, como os minerais presentes nas britas. A parte central de cada figura é mostrado apenas a faixa menos densa dos corpos de prova (vazios), a parte azul da primeira parte, é representada em branco. Na terceira parte de cada imagem é mostrada a mesma imagem central, mas em posição frontal, para que os vazios sejam visualizados ao longo da altura.

Figura 4. Imagens de tomografia computadorizada - Compactação Marshall



Fonte: Adaptado de Marques (2004)

Figura 5. Imagens de tomografia computadorizada - Compactador giratório CGS

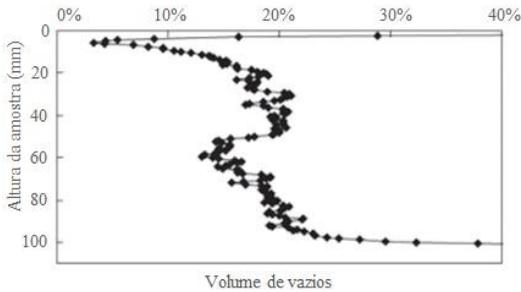


Fonte: Adaptado de Marques (2004)

Na Figura 4 percebe-se que os vazios são distribuídos de maneira uniforme ao longo da altura do corpo de prova. Na Figura 5, os vazios são mais concentrados próximos às faces horizontais, indicando maior densificação na parte central. Com relação às misturas densas, a forma de distribuição dos vazios dentro da amostra compactada deve influenciar parâmetros mecânicos, especialmente aqueles obtidos por ruptura, como resistência à tração por compressão diametral (MARQUES, 2004).

Su *et al.* (2014), avaliaram a permeabilidade de misturas asfálticas drenantes em conjunto com a utilização da tomografia computadorizada, com um tomógrafo hospitalar. As misturas drenantes apresentam volume de vazios de projeto de 18%. Corpos de prova foram extraídos de campo, após 9 anos da implantação, a base da via é constituída de brita graduada e areia grossa. O coeficiente de permeabilidade do revestimento foi severamente degradado de  $2,2 \times 10^{-1}$  a  $1,2 \times 10^{-3}$  cm/s após nove (9) anos de serviço. Através das análises de imagens do tomógrafo, os vazios das camadas foram determinados através da compilação de dados no programa Mathwork Matlab® R2010b. A Figura 6 apresenta a distribuição de vazios ao longo da altura do corpo de prova.

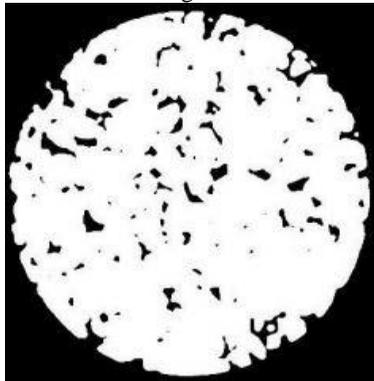
Figura 6. Distribuição estimada de vazios *in situ* de misturas drenantes



Fonte: Adaptado Su *et al.* (2014)

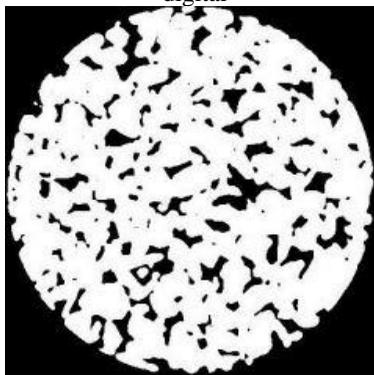
Através da análise da distribuição dos vazios, percebe-se que os vazios reduzem imediatamente para 3%, a 5 mm da altura da amostra a partir do topo. A partir de 5 mm, os vazios retornam a cerca de 18%, até 20 mm da altura do topo. Percebe-se então a zona colmatada na mistura após nove anos em uso. Quando a profundidade atinge cerca de 50 mm, a redução de quase 4% de vazios, indica que a camada foi construída em duas etapas. A Figura 7 especifica os vazios obstruídos a 20 mm de altura do corpo de prova, os agregados são representados pela cor branca, e os vazios, pela preta. A Figura 8 apresenta os vazios a 40 mm, seus vazios a esta altura permanecem intactos e bem distribuídos.

Figura 7. Vazios a 20 mm de altura da superfície através de tomografia digital



Fonte: Adaptado Su *et al.* (2014)

Figura 8. Vazios a 40 mm de altura da superfície através de tomografia digital



Fonte: Adaptado Su *et al.* (2014)

A utilização da tomografia digital se mostrou eficiente no estudo da avaliação da colmatação de misturas drenantes em função da obstrução de seus vazios. Reconhecendo a dimensão da camada obstruída, medidas de limpeza dos vazios podem ser realizadas para que a permeabilidade seja recuperada visto que a partir de 20 mm a estrutura mantém número elevado de volume de vazios.

## 2.3 FUNCIONALIDADES

O desempenho funcional de misturas drenantes refere-se às propriedades impostas a vias e aos seus usuários. Novas pesquisas nesta área são desenvolvidas para que seja possível aliar sua funcionalidade com durabilidade. Para que os avanços sejam constantes, propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas são avaliadas constantemente (PUTMAN, 2012).

Aliados aos aspectos funcionais, alguns benefícios conferidos por misturas drenantes, merecem maior destaque, como redução sonora, segurança e durabilidade das misturas asfálticas drenantes. São listadas também algumas desvantagens destes revestimentos.

### 2.3.1 Absorção sonora

Estudos realizados pelo Caltrans (2006) indicaram que misturas de graduação abertas são tipicamente 3-5 dBA mais silenciosas do que misturas densas. Os níveis de ruído nestas vias aumenta cerca de 1 dBA a cada 3 anos, índice considerável baixo.

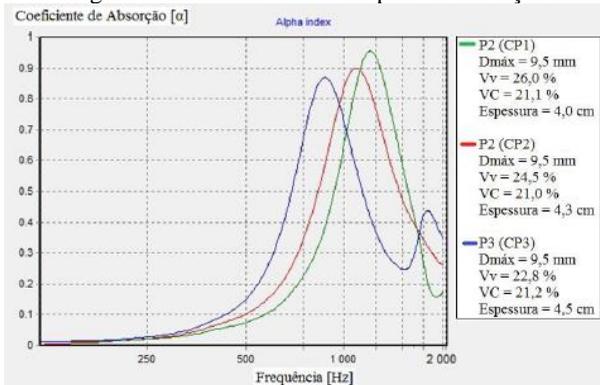
Na velocidade de 110 km/h, por exemplo, estudos comprovam que

pavimentos convencionais possuem nível de ruído de 82 dB e em pavimentos drenantes foi registrado a marca de nível de ruído 79 dB (SANTOS, 2007).

A diminuição destes índices ocorre segundo Kandhal (2002), porque a graduação aberta das misturas drenantes cria uma textura no pavimento que ajuda a capturar ruídos indesejados. O volume de vazios e o índice de ruídos tem relação linear indireta de acordo com Cooley *et al.* (2009).

Estudos realizados por Knabben (2012) definem que quanto maior o valor do volume de vazios e de vazios comunicantes de misturas drenantes, maior o coeficiente de absorção sonora. Esta afirmação é representada na Figura 9, onde o valor do pico de absorção é apresentado para três espessuras de revestimentos drenantes com diâmetro máximo de 9,5 mm.

Figura 9. Influência do Vv no pico de absorção sonora



Fonte: Knabben (2012)

Por vezes, a espessura da camada de revestimento é relacionável com a frequência em que se encontra o pico de absorção, ou seja, quanto maior a espessura do revestimento, o pico de absorção estará em uma frequência menor.

### 2.3.2 Segurança

Rodovias com baixa aderência pneu/pavimento são propensas a maiores taxas de acidentes, principalmente em dias de chuva. Durante os eventos de chuva, a lâmina de água formada sobre a superfície do pavimento dificulta a aderência com o pneu, fator que é agravado à medida que a velocidade imposta pelos condutores aumenta (PUTMAN,

2012). A camada de água formada entre o pneu e o pavimento rompe o contato existente entre estes, causando aquaplanagem. Este fenômeno é um dos maiores riscos durante a condução, pois quando o “pneu flutua na água” o condutor perde o controle do veículo (TAVARES, 2013).

Devido aos vazios, as misturas permeáveis apresentam maior coeficiente de atrito entre pneu e pavimento. Esse atrito varia em função do tipo e forma do agregado utilizado, embora apresente valores superiores ao de misturas densas (ONGEL, HARVEY e KOHLER, 2007).

Em 2008, segundo Ongel, Harvey, e Kohler (2007), a implantação de mistura drenante em uma rodovia da Carolina do Sul diminuiu 26% dos acidentes em dias de chuva. Entre os anos de 1979 e 1985, na França ocorreram 52 acidentes de trânsito em rodovias de misturas densas, quando estas rodovias foram substituídas por misturas permeáveis, o número de acidentes caiu para zero, em análises realizadas entre os anos de 1985 e 1989.

Quanto à visibilidade, observou-se que os pavimentos drenantes eliminam a camada de água formada sobre o pavimento em dias de chuva e assim, a mantém livre da água, impedindo que ocorressem fenômenos como o de levantamento da água, o chamado *splash* e de projeção de água, o *spray*, melhorando a visibilidade e segurança dos condutores (OLIVEIRA, 2003).

Segundo o EMPA (2006), revestimentos drenantes propiciam maior segurança ao usuário, pois não há formação de películas de água sobre a superfície. Desta forma, não há reflexibilidade de luz quando usuários trafegam em direções opostas.

### **2.3.3 Durabilidade**

A durabilidade de misturas de granulometria aberta geralmente é inferior à de mistura densas e desta forma necessita de cuidados especiais durante sua dosagem. Através da condução da água nestas misturas pelos vazios comunicantes, a oxidação do ligante asfáltico pode ser acelerada, vista a quantidade de oxigênio em seu interior, o que pode fragilizar a camada (PUTMAN, 2012). A fragilidade da mistura pode levar além da diminuição de seu desempenho mecânico, um aumento no nível de desgaste superficial.

Devido às diferenças quanto sua capacidade estrutural, alguns países timidamente incrementam misturas abertas em suas rodovias. Segundo Recasens (2006), as diferenças quanto à capacidade estrutural podem ser de 50% a 75% inferior nas misturas drenantes. Misturas

asfálticas drenantes com 4 cm de espessura equivalem a 2-3 cm de uma mistura convencional, embora esta relação varie de acordo com as condições ambientais.

### 2.3.4 Desvantagens de misturas drenantes

Segundo Porto (1999), uma das principais desvantagens dos revestimentos drenantes é a colmatação dos seus vazios. Esta característica é inevitável e mais intensa nos dois primeiros anos de uso do revestimento sendo que após esse período, apresenta pequenas reduções.

Na Holanda, em 1990, a fim de minimizar os efeitos da colmatação, foram executados revestimentos drenantes com dupla camada. Essa metodologia consiste na execução da primeira camada com tamanho máximo do agregado maior que o da segunda camada. A primeira camada é utilizada como espécie de peneira para que as partículas maiores de material não consigam alcançar os vazios da segunda camada, diminuindo a colmatação (OLIVEIRA, 2003).

A manutenção destas misturas em países com invernos rigorosos deve ser efetiva, necessita-se, por exemplo, de grande quantidade de sal, para que as vias permaneçam livres da ação do gelo. A presença do gelo nestas misturas, no entanto, não acarreta maiores prejuízos, visto que devido ao seu elevado volume de vazios internos, este pode realizar congelamento e degelo sem produzir maiores tensões ou danos à estrutura (RECASENS, 2006).

## 2.4 ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Devido à sua alta permeabilidade, misturas asfálticas drenantes auxiliam na infiltração da água da chuva e são capazes de reter entre seus poros substâncias contaminantes (FONTANEDA *et al.* 2011). Revestimentos drenantes integram o Sistema de Drenagem Urbana Sustentável (SUDS) como técnica de controle da fonte de escoamentos superficiais em países do Reino Unido.

A água proveniente do escoamento superficial é também denominada água de *runoff*. Após eventos de chuva, as impurezas presentes sobre os revestimentos, sedimentos, partículas sólidas de materiais dos arredores da rodovia, da poluição atmosférica e das emissões dos veículos são carregados pela água e contribuem para a colmatação dos vazios dos revestimentos drenantes.

Entre as impurezas provenientes dos veículos ou da superfície exposta do revestimento, é constante a presença de metais pesados.

Partículas de metais pesados, como cobre (Cu), chumbo (Pb), cromo (Cr) e cádmio (Cd), gerados pela abrasão das pastilhas de freio, são exemplos de poluentes providos os veículos que-se infiltram o pavimento drenante (JIANG *et al.* 2015).

Segundo Faghri *et al.* (2002), no Reino Unido, o tráfego é considerado uma das maiores fontes produtoras de zinco (Zn) (23%) e chumbo (Pb) (59%). Aproximadamente 14% dos rios classificados como água imprópria para uso, tiveram essa classificação devido à poluição causada pelo escoamento superficial de rodovias próximas.

O poluente encontrado na superfície do pavimento provém das plantas em torno do pavimento, além de matéria orgânica e nutriente de nitrogênio e fósforo produzidos pelas folhas caídas, restos de animais e fertilizantes químicos (JIANG *et al.* 2015).

O grau e tipo de poluição provenientes do escoamento superficial dependem da intensidade do tráfego, número de rodovias presentes, tipo de superfície, intensidade e distribuição das chuvas, localização da rodovia (meio urbano ou rural), tipo de solo da região, etc.

Estas partículas além de contaminar o solo do local podem atingir o lençol freático da região, se houver infiltração. Desta forma, revestimentos drenantes agem também como armazenadores desses poluentes, diminuindo seu alcance ao solo.

#### **2.4.1 Qualidade da água de *runoff***

Revestimentos drenantes podem reduzir a pressão sob sistemas de drenagem, além de amortecerem o sistema de cheias. Devido à esta percolação da água através dos revestimentos, muitas substâncias poluentes ficam retidas em seu interior. A retenção de partículas poluentes auxilia o melhoramento da qualidade da água que chega às camadas subjacentes e ao subsolo. A análise destas substâncias é fundamental para escolha deste tipo de revestimento (OKAMOTO *et al.* 2010).

A retenção eficiente de altas porcentagens de metais pesados em misturas asfálticas drenantes tem se mostrado eficiente. Metais como cobre (Cu), zinco (Zn), chumbo (Pb) e cádmio (Cd) apresentam infiltração no solo reduzida entre 55% a 70%. Também apresentaram reduções consideráveis de amônia (NH<sub>4</sub>) (BRIGGS, 2006).

### **2.5 COLMATAÇÃO DOS VAZIOS**

Um dos principais problemas encontrados em revestimentos drenantes é a colmatação de seus vazios ao longo da vida útil, o que reduz

gradativamente suas funções de drenagem (OLIVEIRA, 2003). Estudos conduzidos por Astrana Junior (2006) mostraram que a colmatação dos vazios pode chegar a 50% em um período de cinco anos. Alguns esforços de sucção produzidos pelo tráfego possuem efeito descolmatador, o que auxilia na manutenção desta permeabilidade, em casos onde a poluição da via é baixa.

Em áreas de alta poluição, os cuidados para manutenção da permeabilidade devem ser mais rigorosos, com a utilização de máquinas para limpeza dos vazios. Estes equipamentos aplicam sobre o revestimento efeitos de varredura geralmente associados com a utilização de jatos de ar ou água, postergando a colmatação (RECASENS, 2006).

Cada revestimento possui necessidades próprias de limpeza de seus poros em diferentes intervalos de tempo, mas como medida geral, deve-se realizar a primeira limpeza um ano após a construção do pavimento como tempo limite para esta inicialização. Estudos apresentados por Raz (1997) mostraram que a perda de permeabilidade é 50% recuperável no primeiro ano e que quando mantida esta frequência anual, esta porcentagem aumenta para 70%.

Porto (1999) observou que por 5 anos e meio houve redução na permeabilidade da Rodovia dos Bandeirantes, em São Paulo, esta redução foi intensa do primeiro para o segundo ano reduzindo quase que 50%, a partir deste ponto, a mesma se manteve estável.

Raz (1997) acompanhou a evolução da colmatação de revestimentos drenantes em rodovias espanholas durante simulações de chuva com intensidade controlada. Todas as simulações de chuva foram de 200 mm, variando o tempo de escoamento superficial sobre o revestimento, conforme apresentado na Figura 10. A colmatação dos vazios em revestimentos que receberam limpeza periódica foram inferiores aqueles não limpos. Pôde-se observar a colmatação, já que o tempo de escoamento em revestimentos colmatados é superior, pois não há infiltração de água.

Figura 10. Escoamento sobre revestimentos ao longo dos anos



Fonte: RAZ (1997)

Não há indicativos para a frequência da limpeza, porem a experiência espanhola apresentada por Raz (1997), recomenda que a mesma seja realizada anualmente para que as características drenantes sejam mantidas.

## 2.6 MENSURAÇÃO DA PERMEABILIDADE

Colley (2002) relata que misturas com diferentes tamanhos máximos têm características de permeabilidade diferentes, pois este tem efeito no volume de vazios de ar dentro da mistura asfáltica. Os vazios aumentam proporcionalmente com o aumento do tamanho máximo do agregado e este aumento conduz a um potencial aumento de vazios comunicantes. A existência dos vazios comunicantes conduz a permeabilidade dentro do revestimento.

A maioria das rodovias americanas e europeias apresenta vida útil com boas taxas de permeabilidade entre 8 a 10 anos. A limpeza dos poros é fundamental para que esta taxa seja mantida (COOLEY *et al.* 2009).

A permeabilidade de revestimentos drenantes podem permanecer entre 1 e 5 anos sem nenhuma intervenção, segundo Legret *et al.* (1996), dependendo do tamanho dos agregados utilizados e da área em que estão implantados, ou seja, o nível de contaminação sobre a superfície. Entretanto, com a manutenção adequada, esta pode se manter por maior período de tempo. A manutenção das rodovias garante, além da permeabilidade, propriedades importantes, como absorção sonora, que apresenta redução em suas taxas por até 9 anos.

A avaliação da permeabilidade de misturas asfálticas drenantes é realizada através de permeômetros. Existem diversos modelos que podem ser utilizados em campo ou laboratório. Os dois tipos de permeômetros

utilizados para a avaliação de misturas asfálticas drenantes são: os permeâmetros de carga hidráulica variável e os permeâmetros de carga hidráulica constante. Simuladores de chuva laboratoriais também apresentam boa correlação com os valores obtidos em campo, quanto à permeabilidades (SCHOLZ, GRABOWIECKI, 2007).

A norma europeia BS EN 13108-7: 2006 (*Bituminous mixtures. Material specifications. Porous Asphalt*) especifica a permeabilidade mínima horizontal ou mínima vertical de misturas asfálticas drenantes e aplicação do revestimento em campo. A permeabilidade é determinada no laboratório por um permeâmetro de carga constante, os valores mínimos devem estar compreendidos entre  $0,1 \times 10^{-3}$  a  $4,0 \times 10^{-4}$  metros/segundo (ONGEL, HARVEY; KOHLER, 2007).

### 2.6.1 Lei de Darcy

Os métodos estabelecidos para determinar condutividade hidráulica saturada dos materiais porosos seguem a Lei de Darcy. Durante a determinação, a amostra permeável é submetida a uma carga hidráulica mais baixa possível, mas suficiente para manter fluxo laminar sobre a amostra (ZAHARIEVA, 2003).

A taxa de fluxo associada ( $\text{cm}^3/\text{segundos}$ ) é medida para estimar a permeabilidade da amostra. A carga hidráulica durante a medição pode ser mantida constante, permeâmetros de carga constante, ou ser permitida a decomposição, permeâmetros de carga variável (QIN, 2015).

- Carga variável

Permeâmetros de carga variável permitem que a carga de água acima da amostra reduza de um nível pré-determinado até outro. O intervalo de queda entre estes níveis é registrado.

Existem vários esquemas de montagem destes permeâmetros, pois o princípio de funcionalidade é o mesmo. Uma válvula fornece água suficiente na entrada do aparato que permite o fluxo de água através da amostra e sua saída. A carga de água na entrada é mantida a um nível desejado até que o fluxo através da amostra seja constante (ZAHARIEVA, 2003). O ensaio tem início com o fechamento da válvula que faz com que a carga de água reduza progressivamente até o nível da carga de saída. O intervalo de tempo durante a queda dos níveis da água de entrada e saída são definidos como (T1 e T2). A altura da carga hidráulica inicial e final do ensaio também é determinada como ( $h_1$  e  $h_2$ ).

O coeficiente de permeabilidade medido no permeâmetro de carga variável é determinado conforme norma NBR 14545 (2000), através da

Equação 2.

$$k = \frac{aH}{A\Delta t} \ln\left(\frac{h1}{h2}\right) \quad 2$$

Onde:

$k$  - é o coeficiente de permeabilidade, em centímetros por segundo;

$\Delta t$  - é dado pela diferença entre os instantes  $T2 - T1$ , em segundos;

$h1$  - é a carga hidráulica no instante  $T1$ , em centímetros;

$h2$  - é a carga hidráulica no instante  $T2$ , em centímetros;

$a$  - é a área interna da bureta blindada, somada à área interna do tubo manométrico, em centímetros quadrados;

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

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

A permeabilidade de misturas drenantes com uso do permeâmetro de carga variável pode ser verificada através de vários equipamentos normatizados, um destes é o permeâmetro espanhol LCS, desenvolvido pelo *Laboratorio Escuela de Caminos de Santander*. Este permeâmetro é utilizado para determinar *in situ* a permeabilidade de revestimentos e também a textura das amostras. A funcionalidade deste permeâmetro confere com a dos utilizados em laboratório.

O ensaio determina o tempo para que um volume conhecido de água percole de um nível determinado no permeâmetro até outro nível abaixo, mesmo quando sua superfície de medição já esteja saturada. Os resultados são obtidos pela correlação entre coeficiente de permeabilidade e tempo de percolação. A percolação é proporcionada por um orifício de 10 mm. De acordo com a norma NLT - 327 (2000), a permeabilidade de revestimentos é definida através do ábaco presente na norma ou da Equação 3. A Figura 11 apresenta esquematicamente o permeâmetro LCS.

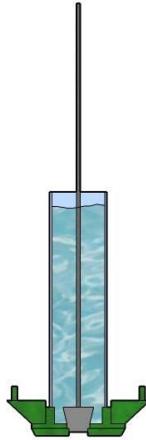
$$\ln K = 7,624 - 1,348 \ln T \quad 3$$

Onde:

$k$  - Coeficiente de permeabilidade, centímetros/segundos;

$T$  - Tempo de percolação, segundos.

Figura 11. Permeâmetro de carga variável LCS



Fonte: Adaptado de NLT – 327 (2000)

A determinação do coeficiente de permeabilidade através deste tipo de permeâmetro corresponde à lei de fluxo tridimensional. Neste conceito, a percolação ocorre quando os vazios estão preenchidos com água e em todas as direções ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ) (ARRAES, 2014). Como não há confinamento dos revestimentos e nem das placas compactadas em laboratório, a percolação tem maior espaço para ocorrer.

- Carga constante

Permeômetros de carga constante medem a permeabilidade das amostras mantendo sobre elas, uma lâmina de água constante. O tempo necessário para infiltração desta água de volume conhecido na amostra determina o coeficiente de permeabilidade (QIN, 2015).

Devido à carga constante, estes ensaios exercem maior pressão sobre as amostras, desta forma. A norma NBR 13292 (1995) recomenda sua utilização para materiais com permeabilidade elevada, como solos granulares e misturas de granulometria aberta, de asfalto e concreto.

O permeâmetro conta com dois reservatórios onde os níveis de água são mantidos constantes, conforme Figura 12. Mantida a carga  $h$ , durante certo tempo, a água percolada é coletada e o seu volume é medido. Conhecidas a vazão e as dimensões do corpo de prova (comprimento  $L$  e a área da seção transversal  $A$ ), calcula-se o valor da permeabilidade,  $k$ , através da Equação 4.

$$k = \frac{q \cdot L}{A \cdot h \cdot t}$$

Onde:

$q$  – é a quantidade de água medida na proveta, centímetros cúbicos;

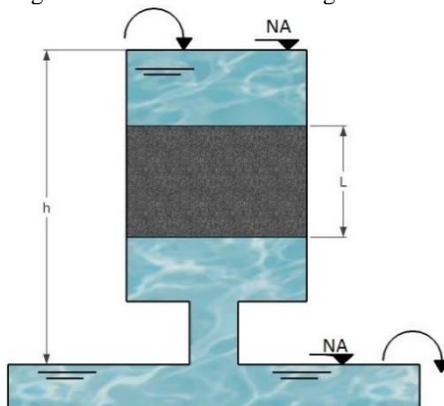
$L$  – é o comprimento da amostra medido no sentido do fluxo, centímetros;

$A$  – área da seção transversal da amostra, centímetros quadrados;

$h$  – diferença do nível entre o reservatório superior e o inferior, centímetros;

$t$  – é o tempo medido entre o início e o fim do ensaio, segundos.

Figura 12. Permeâmetro de carga constante



Fonte: Adaptado de NBR 13292 (1995)

Segundo Arraes (2014), em permeâmetros de carga constante o fluxo da água tem comportamento unidimensional. Devido ao confinamento das amostras pelas laterais do permeâmetro, o fluxo ocorre verticalmente. A diferença de percolação de fluxo de acordo com o tipo de permeâmetro pode representar diferenças nas leituras, permeâmetros de carga variável tendem a apresentar coeficientes de permeabilidade superior aos de carga constante, vista a percolação de fluxo ser tridimensional.

### 2.6.2 Simuladores de chuva em laboratório

A análise da chuva natural sobre revestimentos drenantes apresenta dificuldades quanto ao controle sobre intensidade, duração, distribuição e tipo de chuva. Com o objetivo de analisar o efeito das chuvas naturais em laboratório, podem ser utilizados, simuladores de chuva.

Alessi, Kokot e Gomes (2006), apresentam um modelo de simulador de chuva, com armação retangular e pernas reguláveis capaz de gerar precipitação sobre áreas de 1 m<sup>2</sup>. As faces laterais da armação são cobertas com plásticos, que minimizam o efeito dos ventos. Na parte superior, foi fixado um sistema de tubulações perfurado uniformemente para simular gotas da chuva. A Figura 13 apresenta a esquematização do simulador desenvolvido.

Figura 13. Modelo de simulador de chuva



Fonte: Alessi, Kokot e Gomes (2006)

Este tipo de simulador não analisa a água drenada pela mistura, o sistema é abastecido por duas fontes de alimentação e tem funcionamento conforme determinado.

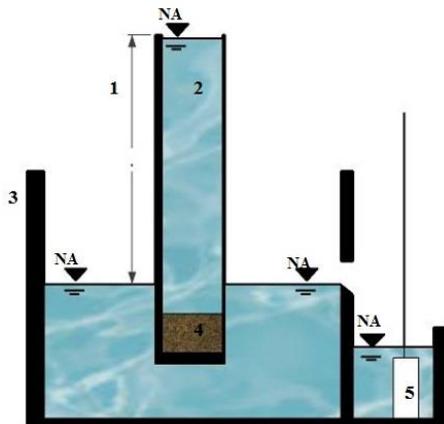
## 2.7 ESTUDOS REALIZADOS COM MISTURAS DRENANTES

Fwa *et al.* (2014), compararam a permeabilidade e as características de colmatação entre misturas asfálticas drenantes e concreto permeável. O estudo realizado em Singapura considerou quatro níveis de volume de vazios (10%, 15%, 20% e 25%) para cada tipo de estrutura na analisada, com três amostras por volume de vazios. A

obstrução dos poros foi determinada pela introdução progressiva de materiais com propriedades colmatadoras nas amostras. Para determinar os coeficientes de permeabilidade dos materiais em diferentes níveis do ensaio, foi desenvolvido em laboratório um permeâmetro de carga constante. As características de colmatção de cada material foram determinadas conforme redução da permeabilidade ao longo do ensaio.

A Figura 14 apresenta esquematicamente o permeâmetro desenvolvido para a pesquisa. A montante havia um reservatório com nível de água constante e um descarregador de carga à jusante para manter o nível de água inferior constante. O aparelho consiste de um cilindro vertical aberto na extremidade de 150 mm de diâmetro interno. Uma bomba submersa garante o fornecimento de água constante ao reservatório superior. A carga hidráulica de 41,5 cm foi mantida constante. As amostras testadas tinham diâmetro fixo de 150 mm e 50 mm de altura. Após cada aplicação de material colmatador, as amostras eram removidas e os materiais retidos na superfície da amostra, analisados. O cálculo do coeficiente de permeabilidade foi definido considerando a Lei de Darcy (Equação 4).

Figura 14. Esquemática do permeâmetro da pesquisa



Fonte: Adaptado de Fwa *et al.* (2014)

Conforme a Figura 14, o permeâmetro de carga constante desenvolvido por Fwa *et al.* (2014) é composto por:

1. Nível de água, mantido constante;
2. Cilindro de entrada e acomodação do corpo de prova;
3. Tanque de água;

4. Corpo de prova;
5. Bomba que garante fornecimento constante de água na entrada do cilindro.

O material utilizado para colmatar os vazios da amostra vazios foi proveniente da mistura de solo residual com areia de construção. As partículas apresentam dimensões entre 600µm e 1,18 mm. A determinação da permeabilidade das amostras seguiu da seguinte forma: (i) 5,3 gramas de material são aplicadas uniformemente sobre a superfície das amostras; (ii) o cilindro é completado com água; (iii) a partir do momento em que a válvula é aberta e a água começa a percolar a mistura, são realizadas leituras a cada 3 minutos, ou até que não haja variação no valor de permeabilidade medido; (iv) repetir o ensaio de 1 até 4 vezes. A análise das permeabilidades ao longo das repetições dos ensaios apontou que o concreto permeável obteve melhores resultados do que o asfalto permeável. As amostras de concreto mantiveram os valores de coeficiente de permeabilidade mais altos ao longo de todo o período de obstrução e mesmo com as repetições, sua permeabilidade se manteve próxima a 18%, enquanto o asfalto permeável reduziu até cerca de 10% (FWA *et al.* 2014).

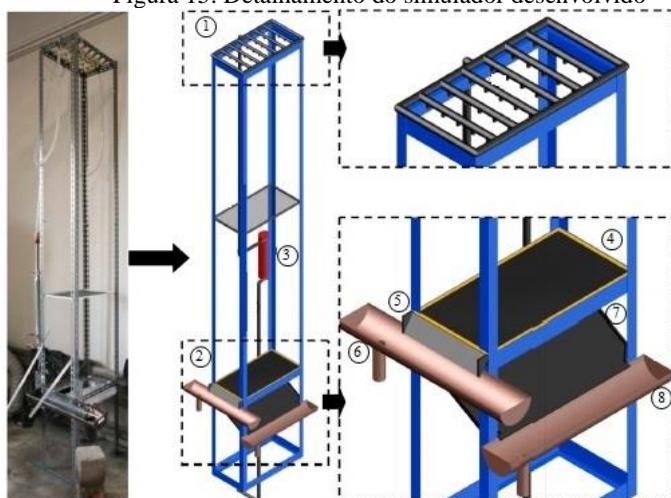
Valeri *et al.* (2016) avaliaram em laboratório a redução da capacidade de infiltração em superfícies de misturas drenantes obstruídas. A intensidade da precipitação sobre a capacidade de infiltração das superfícies das amostras também foi analisada. Foram compactadas placas de 50 cm x 26 cm, com 5 cm de espessura em concreto permeável e mistura asfáltica drenante. Foram produzidas seis placas de cada mistura, com três volumes de vazios (15%, 20% e 25%), resultando em duas placas para cada volume de vazios. Os experimentos de permeabilidade foram realizados em todas as placas compactadas através de simulador de chuva desenvolvido para o trabalho e apresentado na Figura 15. As simulações de chuva ocorreram por 30 gotejadores distribuídos em seis fileiras no topo do equipamento. Os gotejadores foram conectados por tubos flexíveis, e ligados a um medidor de fluxo que forneceu uma faixa de fluxo de 2 a 30 L/h e controla a intensidade de chuva simulada em instantes determinados. O dispositivo foi projetado para coletar a água infiltrada e para capturar o escoamento superficial com o objetivo de avaliar a capacidade de infiltração das amostras e calcular o coeficiente de escoamento em cada superfície drenante.

Conforme Figura 15, o simulador de chuva desenvolvido por de

Valeri *et al.* (2016), é composto por:

1. Gotejador;
2. Área de realização do ensaio;
3. Medidor de fluxo;
4. Corpo de prova;
5. Rampa de transporte da água de escoamento;
6. Tubulação para coleta do volume de escoamento;
7. Rampa para transporte da água infiltrada;
8. Tubulação para coleta da água infiltrada.

Figura 15. Detalhamento do simulador desenvolvido



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

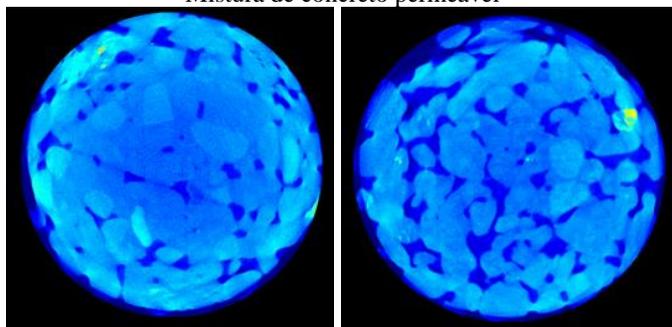
As medidas de permeabilidade seguiram uma combinação de diferentes eventos de precipitação (50, 100 e 150 mm/h) simulada sobre as amostras, juntamente com a aplicação do material colmatador (0, 500, e 1000 g/m<sup>2</sup>). O material adotado como colmatador trata-se de areia de pedra, com partícula de diâmetro máximo de 1,18 mm. A capacidade de infiltração das placas testadas foi avaliada utilizando um permeômetro de carga variável, de acordo com a Norma Europeia EN 12697-40, além do simulador de chuva desenvolvido. O simulador teve como preceito avaliar as condições reais de precipitação e sua infiltração (altura de queda da água de 3 metros). Ambas misturas testadas mostraram

fragilidade quanto ao entupimento, mesmo com pequena quantidade de sedimentos. Verificou-se que o tempo de descarga do permeâmetro de carga variável estava de 3 a 5 vezes mais elevado em misturas obstruídas com 500 g/m<sup>2</sup> e entre 6 e 10 vezes mais alta em misturas obstruídas com 1000 g/m<sup>2</sup>. Os autores concluíram que misturas de concreto proporcionam capacidade de infiltração superior às misturas asfálticas drenantes sob aplicação de sedimentos. Além deste fator, misturas de concreto drenante apresentaram maior recuperação da capacidade de infiltração devido à lavagem de sedimentos do que misturas asfálticas. As misturas de concreto obtiveram melhor desempenho em termos de potencial de obstrução e capacidade de infiltração, permitindo retardar as atividades de manutenção.

Pagotto et al. (2000), compararam no LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), atual IFSTTAR na França, o comportamento hidráulico da qualidade da água de rodovias, segundo o tipo de revestimento. Os autores determinaram o impacto do tipo de revestimento, convencional ou drenante, sobre o comportamento hidráulico e a qualidade da água de escoamento superficial. Foram coletados dados de uma rodovia francesa antes e depois da substituição de revestimento convencional por revestimento asfáltico drenante. Os resultados obtidos resultaram de análises estatísticas entre as diferenças detectadas. A rodovia analisada, apresenta 3 faixas em cada direção com volume médio de tráfego de 12.000 veículos por dia em cada direção. Inicialmente, o revestimento era constituído de asfalto convencional, mas foi restaurado com asfalto drenante em 1996. A camada drenante apresenta 30 mm de espessura sobre uma superfície impermeável. Um pluviômetro foi utilizado para medir, duração, precipitação e intensidade das chuvas. O sedimento carregado pelo escoamento superficial foi coletado e quantificado para análise, após os eventos de chuva. Foi concluído que quanto ao comportamento hidrológico, os resultados da substituição pelo revestimento asfáltico drenante são nítidos em função da diminuição do spray e splash, além da qualidade da água de escoamento superficial. As descargas de materiais pesados no ambiente são reduzidas em 20% para cobre e 74% para chumbo. Basicamente houve retenção da poluição de partículas finas pela filtração proporcionada pelo revestimento. Esta filtração explica a redução na quantidade de hidrocarbonetos e metais na água coletada. É válida também a retenção de formas dissolvidas de metais como zinco e cádmio. A redução da absorção destes materiais no solo, acarreta benefícios hidrológicos, desta forma, a implementação de revestimentos drenantes é considerada essencial em determinadas áreas.

Schaefer *et al.*, (2006), analisaram a condutividade hidráulica de corpos de prova de misturas drenantes de concreto, utilizando dois níveis de energia de compactação. Energia de compactação regular, compactada com mesa de vibração e amplitude de 0,005 polegadas e energia de compactação baixa com amplitude de vibração de 0,0034 polegadas. Para análise do coeficiente de permeabilidade, foi utilizado um permeômetro de carga variável. Os resultados dos coeficientes de permeabilidade variaram exponencialmente na medida em que o volume de vazios das duas amostras aumentou, seus valores ficaram entre 0,01 cm/s e 1,5 cm/s. À medida que houve aumento no nível de compactação das amostras, houve redução no coeficiente de permeabilidade. Os autores também realizaram leituras utilizando tomografia computadorizada para entender a distribuição interna dos vazios, A Figura 16 apresenta a distribuição interna dos vazios da mistura, analisadas de cima para baixo do corpo de prova. Seções transversais da metade superior da amostra (a) mostram menos vazios do que aqueles do fundo da amostra (b).

Figura 16. Seções transversais obtidas com tomografia computacional – Mistura de concreto permeável



(a) Metade superior do CP

(b) Fundo da amostra

Fonte: Adaptado de Schaefer *et al.* (2006)

A variabilidade dos vazios internos dos corpos de prova mostrou que a estrutura é afetada diretamente pelo processo de compactação. Cada corpo de prova apresentou uma distribuição interna, desta forma, o coeficiente de permeabilidade é exclusivo em cada análise e sua repetitividade nem sempre garante as mesmas características.



## CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

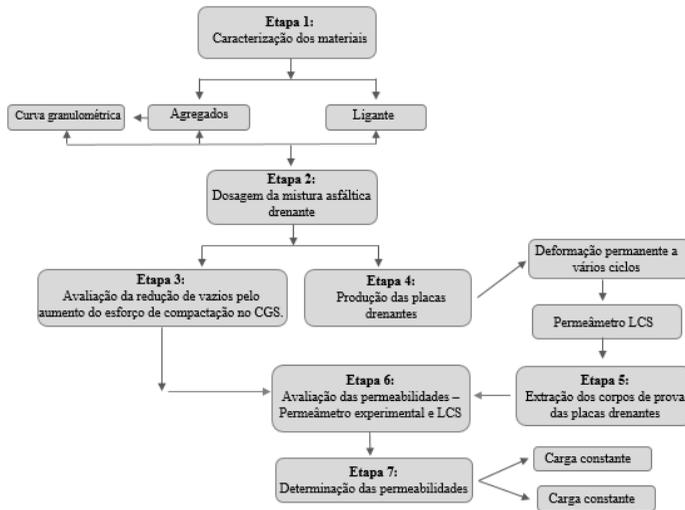
### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental proposto nesta dissertação trata da avaliação da redução da permeabilidade de misturas asfálticas drenantes com base em diferentes níveis de compactação e ciclos de deformação permanente. Para tanto foram produzidos corpos de prova cilíndricos (100 mm de diâmetro) com número crescente de giros (50, 75, 100, 150 e 200) no compactador giratório SUPERPAVE® (CGS) de modo a representar a redução do volume de vazios ao longo do tempo e cargas aplicadas pelo tráfego. Para simular o efeito da redução de vazios pelo tráfego, foram confeccionadas placas em misturas asfálticas drenantes com dimensões de 18 x 50 x 5 cm (4500 cm<sup>3</sup>). As placas foram submetidas ao ensaio de deformação permanente a diferentes números de ciclos de modo a simular a redução do volume de vazios com a passagem do tráfego. Após, foram extraídos das placas corpos de prova cilíndricos (100 mm de diâmetro).

Posteriormente, os corpos de prova (do CGS e das placas) foram ensaiados quanto à permeabilidade por meio de um permeâmetro de carga constante produzido para esta dissertação. Foram conduzidos ensaios com água limpa e com água de *runoff*. A permeabilidade dos corpos de prova também foi avaliada por meio do permeâmetro de carga variável LCS. O volume de vazios e vazios comunicantes foi determinado em todos os corpos de prova antes da utilização dos permeômetros.

Para desenvolvimento da dissertação e visando alcançar os objetivos propostos, o programa experimental foi dividido em oito etapas, apresentado na Figura 17 e detalhado a seguir.

Figura 17. Fluxograma do programa experimental



Fonte: Elaborado pela autora

### 3.2 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta etapa foi realizada a caracterização dos materiais componentes da mistura asfáltica drenante. Os agregados e o ligante foram caracterizados por meio de ensaios convencionais. A composição granulométrica da mistura asfáltica drenante foi à definida por Guimarães (2012) com diâmetro nominal máximo de 9,52 mm e estabelecida de acordo com os critérios da metodologia da norma DNIT 111 (2009). O teor de ligante de projeto e o volume de vazios foram determinados de acordo com a norma ASTM D 7064/2013.

#### 3.2.1 Caracterização dos agregados

Os agregados utilizados neste trabalho são de origem granítica provenientes de uma pedra localizada no município de Paulo Lopes/SC e foram fornecidos pela empresa SETEP Construções S/A.

A coleta dos agregados foi realizada nas pilhas de acordo com a norma DNER-PRO 120/1997. Comercialmente, as pilhas são assim denominadas: (i) brita zero – tamanho nominal de 4,8 a 9,5 mm; (ii) pó de pedra - tamanho nominal inferior a 4,8 mm. No laboratório, as amostras para os ensaios foram separadas pelo método do quarteamento, de acordo com a norma DNER-PRO 199/1996. Os agregados foram

caracterizados por meio dos seguintes métodos de ensaio, normatizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- Análise granulométrica - DNER-ME 083/1998;
- Determinação da abrasão “Los Angeles” – DNER - ME 035/1998;
- Avaliação da durabilidade –DNER - ME 089/1994;
- Absorção do agregado graúdo – DNER - ME 081/1998;
- Partículas máximas não cúbicas – ABNT - NBR 5564/2011.

Os agregados fornecidos pela empresa SETEP Construções S/A foram utilizados e caracterizados por outros pesquisadores do Laboratório de Pavimentação da UFSC (Kolodziej, 2016). Desta forma, os ensaios de caracterização apresentados na Tabela 1, para os mesmos agregados utilizados nesta dissertação foram realizados por Kolodziej (2016).

Tabela 1. Resultados de caracterização do agregado

Ensaio	Unidade	Norma	Límites	Resultado
Abrasão "Los Angeles"	(%)	DNER-ME 035-1998	$\leq 30$	21,47
Avaliação da durabilidade	(%)	DNER-ME 089-1994	$\leq 12$	2,80
Absorção do agregado graúdo	(%)	DNER-ME 081/1998	-	0,47
Partículas máximas não cúbicas	(%)	ABNT NBR 5564/2011	$\leq 10$	9,00

Fonte: Adaptado de Kolodziej (2016)

De acordo com os resultados dos ensaios convencionais (Tabela 1), os agregados atenderam às normas e podem ser utilizados em serviços de pavimentação.

A curva granulométrica das misturas drenantes apresenta determinada especificidade. Isto porque para granulometria requerida, aberta, em geral os tamanhos nominais das pilhas em britagens comerciais nem sempre atendem a faixa especificada deste tipo de mistura.

Para a curva granulométrica escolhida, os agregados coletados na britagem não atenderam as frações granulométricas requeridas. Assim, os agregados foram fracionados em laboratório para obtenção da curva teórica. Para tanto, foi adotada a metodologia de análise granulométrica com lavagem para a adequada seleção de cada fração, seguindo procedimento da norma DNER ME 084/1994.

- Curva granulométrica

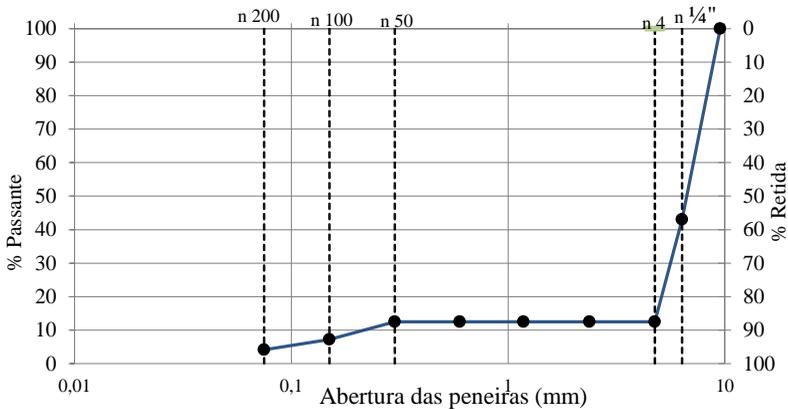
A curva granulométrica escolhida foi a desenvolvida por Guimarães (2012) tendo em conta o bom desempenho à deformação permanente e o uso de asfalto modificado com borracha. A Tabela 2 apresenta a composição granulométrica da curva teórica, também ilustrada na Figura 18.

Tabela 2. Composição granulométrica

Abertura (mm)	% Retida	% Acumulada	% Passante
9,52	0,00	0,00	100,00
6,35	56,93	56,93	43,07
4,76	30,56	87,49	12,51
2,38	0,00	87,49	12,51
1,18	0,00	87,49	12,51
0,6	0,00	87,49	12,51
0,3	0,00	87,49	12,51
0,15	5,36	92,85	7,15
0,075	3,07	95,92	4,08
<b>Fundo</b>	4,08	100,00	0,00

Fonte: Adaptado de Guimarães (2012)

Figura 18. Curva granulométrica



Fonte: Adaptado de Guimarães (2012)

### 3.2.2 Caracterização do Ligante

O elevado volume de vazios das misturas drenantes requer o uso de ligantes modificados de forma a minimizar os efeitos da oxidação durante a percolação de água. Nesta dissertação foi utilizado o ligante asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis tipo TYREFLEX AB8. Devido ao uso da curva granulométrica de Guimarães (2012), o ligante utilizado foi do mesmo tipo, entretanto de empresas diferentes, não havendo correlação entre os autores.

O asfalto borracha foi fornecido pela distribuidora CBB Asfaltos localizada em Curitiba/PR. O ligante foi fornecido em latas de 3,6 litros e a caracterização foi realizada pelo fabricante. Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Ensaio de caracterização do TYREFLEX AB8

Qualidade	Unidade	Norma	Resultados	Limite Mínimo	Limite Máximo
Penetração, 100g, 5 s, 25°C, 0,1mm	0,1 mm	NBR 6576	49	30	70
Ponto de Amolecimento	°C	NBR 6560	57	50	-
Viscosidade Brookfield (150°C)	cP	NBR 15529	2432	-	-
Viscosidade Brookfield (160°C)	cP	NBR 15529	1667	-	-
Viscosidade Brookfield (175°3)	cP	NBR 15529	960	800	2000
Ponto de Fulgor	°C	NBR 11341	284	235	-
Recuperação Elástica, 10cm, 25°C	%	NBR 15086	66	50	-
Estabilidade a estocagem e armazenagem	Δ P.A. (°C)	NBR 15166	5,2	-	9
Massa específica a 25°C	kg/m <sup>3</sup>	NBR 6296	1,019	-	-

Fonte: Adaptado, CBB ASFALTOS (2015)

A determinação da viscosidade aparente foi realizada com o uso de um viscosímetro tipo Brookfield, (*spindle* n° 3 a 20 rpm) em três temperaturas: 150 °C, 160 °C e 175 °C que resultaram nas seguintes condições de trabalho:

- Temperatura de aquecimento do ligante, 170 °C;
- Temperatura de mínima de compactação, 150 °C;
- Temperatura de ideal de mistura, 175 °C.

Os resultados do ensaio de viscosidade atendem os limites exigidos pela norma DNIT – ES 112/2009 (Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto borracha, via úmida, do tipo “*Terminal Blending*” -

Especificação de Serviço) que define: (i) temperatura de aquecimento do ligante borracha, entre 170 °C e 180 °C, não devendo exceder 180 °C; (ii) aquecimento do agregado 10° a 15°C acima do ligante; (iii) usinagem do ligante entre 165 °C e 180 °C e (iv) temperatura mínima de compactação de 145 °C.

### 3.3 ETAPA 2: DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA

A dosagem da mistura asfáltica drenante foi realizada de acordo com a metodologia ASTM D-7064 (2013). Para a determinação do teor de projeto, foram adotados 4 (quatro) teores iniciais de ligante (4,50%; 5,0%; 5,5% e 6,0%).

Foram moldados 3 corpos de prova (molde de 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura) para cada teor de ligante em relação à massa total da mistura. Os resultados representam a média dos 3 corpos de prova por teor.

Para o diâmetro máximo dos agregados de 9,52 mm, a adoção do molde de 100 mm se justifica, uma vez que, de acordo com Jackson e Cozor (2003) não há diferença significativa no percentual da massa específica máxima medida (% $G_{mm}$ ) para os corpos de prova moldados com o cilindro de 100 e 150 mm de diâmetro. Ainda, a adequação dos dois tamanhos de molde é limitada a misturas com tamanho máximo de agregado de 25,4mm, ou menor.

A compactação dos corpos de prova drenantes foi realizada no compactador giratório SUPERPAVE® (CGS) marca IPC Global®, com pressão aproximada de 600 kPa, ângulo de  $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$  e 50 giros conforme a norma ASTM D7064 (2013).

A massa específica máxima medida ( $G_{mm}$ ) foi determinada pelo método Rice, de acordo com a norma AASHTO T 209 (2015). A norma apresenta valores de viscosidade padrão da água a 25 °C. A temperatura e consequente viscosidade foram corrigidas para a temperatura verificada no dia do ensaio (28 °C). Desta forma, os valores de densidade estabelecidos correspondem a temperatura de 28 °C.

#### 3.3.1 Determinação do volume de vazios

A densidade aparente ( $G_{mb}$ ) foi determinada pela norma DNER - ME 117/94 para corpos de prova com porcentagem do volume de vazios ( $V_v$ ) maior que 10%. Neste estudo, foi utilizada a fita do tipo extraforte e parafina para envolvimento dos corpos de prova durante a pesagem imersa. A densidade da fita foi determinada em laboratório, cujo resultado foi igual ao indicado pelo fabricante, de 1,10 g/cm<sup>3</sup>. Quanto à parafina,

foi utilizada a mesma marca para todos os corpos de prova. A parafina foi aquecida a 45 °C. A temperatura da água utilizada na pesagem imersa dos corpos de prova foi controlada e mantida a 25 °C ± 0,5 °C. Foi observado que, em temperaturas inferiores a 25°C, ocorreu a fissuração da parafina e consequentemente, erros de leitura da  $G_{mb}$ . Por esta razão, houve o controle da temperatura da parafina. A Figura 19 apresenta, em (a), o corpo de prova envolto pela fita extraforte e em (b), o corpo de prova coberto por parafina, conforme especificado na norma DNER - ME 117/94.

Figura 19. Preparação dos corpos de prova para determinação de Vv



(a) Corpo de prova envolto em fita (b) Corpo de prova envolto em parafina  
Fonte: Elaborado pela autora

Com a determinação das densidades  $G_{mm}$  e  $G_{mb}$ , a porcentagem do volume de vazios (Vv) das misturas foi calculado de acordo com a Equação 1.

### 3.3.2 Determinação do volume de vazios comunicantes

A quantidade de vazios comunicantes de uma mistura determina sua capacidade drenante e é avaliada por seus vazios comunicantes. O ensaio para determinação do volume de vazios comunicantes (Vvc) foi realizado de acordo com a norma francesa AFNOR-NF-P-98-254-2 (1993). O ensaio foi realizado para cada corpo de prova, sendo que o valor obtido é único e resultante de uma leitura.

A Figura 20 ilustra os corpos de prova preparados para a realização do ensaio para determinação do Vvc, conforme metodologia proposta.

Figura 20. Determinação de Vvc nos corpos de prova dosados



Fonte: Elaborado pela autora

Com base em estudos de Al-Swailm (2004), foram estabelecidos, nesta dissertação, critérios para o volume de vazios e para o volume de vazios comunicantes. A porcentagem do volume de vazios (Vv) dos corpos de prova foi mantida em  $20\% \pm 2\%$  e a porcentagem do volume de vazios comunicantes (Vvc) de  $15\% \pm 3\%$ .

### 3.3.3 Determinação do dano por umidade

As misturas drenantes, por permitirem a passagem de água entre seus vazios, tendem a ser mais suscetíveis à ação da água em relação às misturas densas. O ensaio para avaliação da ação da água utilizado tem sido o dano por umidade induzida, conhecido como ensaio Lottman modificado. O ensaio foi realizado de acordo com a norma AASHTO T 283 (2011). A relação da resistência retida à tração mínima deve ser de 80% segundo critérios de dosagem atribuídos pela norma ASTM D 7064 (2013).

### 3.3.4 Determinação da perda de massa por desgaste

Para cada corpo de prova foi realizado o ensaio de perda de massa por desgaste (Cântabro) de acordo com a norma DNER-ME 383 (1999). As características do ensaio foram: 300 revoluções do tambor, velocidade de  $30 \pm 3$  rpm. O valor adotado para cada teor de ligante foi definido com a média aritmética dos corpos de prova (três por teor). Previa à realização do ensaio, os corpos de prova foram condicionados a temperatura de  $25^\circ\text{C}$  durante 2 horas.

Com base na norma ASTM D7064 (2013), o valor máximo de perda considerado foi de 20%.

### 3.3.5 Teor de ligante de projeto

Para escolha do teor de projeto, para os teores de ligante testados, de acordo com os critérios já estabelecidos ( $V_v$  superior a  $20\% \pm 2\%$  e  $V_{vc}$  de  $15\% \pm 3\%$ ) e perda de massa máximo de 20%. O teor de projeto levou em conta os critérios estabelecidos e menor desvio padrão entre os três corpos de prova (por teor).

## 3.4 ETAPA 3: AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DE VAZIOS PELO AUMENTO DO ESFORÇO DE COMPACTAÇÃO NO CGS

De acordo com a metodologia SUPERPAVE® (ASTM D7064, 2013), as misturas drenantes são dosadas mediante aplicação de 50 giros no CGS de modo a se obter porcentagem do volume de vazios de  $20\% \pm 2\%$ .

Em laboratório, os processos de compactação possuem maior controle o que resulta na porcentagem do volume de vazios determinados, critério mais eficaz do que em campo. Em campo, as misturas asfálticas são compactadas por meio de rolos compactadores e o volume de vazios também deve estar situado no intervalo da dosagem de modo que a mistura cumpra a sua função. Revestimentos drenantes sofrem, ao longo do tempo, redução do volume de vazios, seja pela compactação devida as cargas do tráfego, seja pelo acúmulo de deformações permanentes. Assim, durante sua vida útil, a capacidade drenante das misturas asfálticas utilizadas como revestimento tendem a ter sua permeabilidade reduzida.

A Etapa 3 visa avaliar a redução do volume de vazios em corpos de prova compactados à diferentes giros no CGS e correlacionar esta redução ( $V_v$ ) com seu coeficiente de permeabilidade (mm/seg).

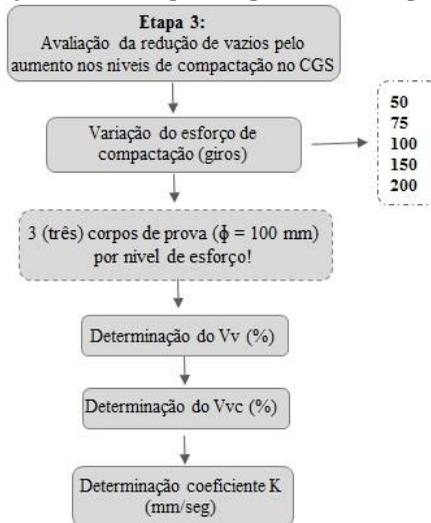
Os critérios estabelecidos na Etapa 2, foram mantidos como seleção dos corpos de prova.

Esta etapa conta com as seguintes fases:

- Variação do esforço de compactação (50, 75, 100, 150 e 200 giros);
- Determinação da porcentagem do  $V_v$  (%);
- Determinação da porcentagem do  $V_{vc}$  (%);
- Determinação do coeficiente de permeabilidade  $k$  (cm/seg) por meio do permeâmetro LCS.

A ordem de execução de cada fase da Etapa 3 é apresentada na Figura 21.

Figura 21. Fases que compreendem a Etapa 3



Fonte: Elaborado pela autora

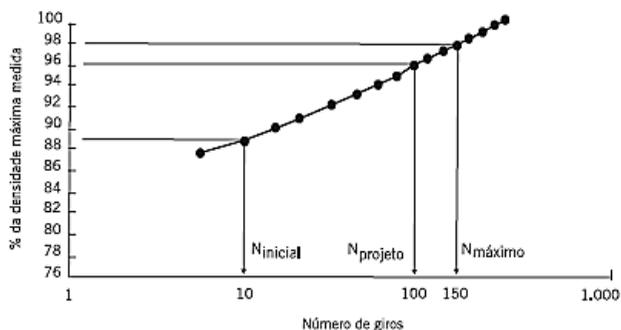
### 3.4.1 Aumento nos níveis de compactação

Os corpos de prova utilizados neste processo seguiram as condições de dosagem com relação a quantidade de massa e teor de ligante. O cilindro de compactação utilizado foi de 100 mm de diâmetro.

A variação durante o processo de compactação foi determinada em função do aumento no número de giros impostos. Os valores determinados para esta variação utilizaram como base a especificação SUPERPAVE® (Figura 22 e Tabela 4) apresentadas por Controls (2017). Além dos 50 giros utilizados como padrão na dosagem de misturas drenantes ( $V_v 20\% \pm 2\%$ ), foram atribuídos mais 4 níveis de compactação objetivando redução na porcentagem do volume de vazios e vazios comunicantes.

Três corpos de prova foram compactados para cada número de giros determinado. Os corpos de prova foram compactados a 50, 75, 100, 150 e 200 giros.

Figura 22. Curva de compactação típica obtida no CGS



Fonte: Controls (2017)

A Figura 22 mostra a densificação da mistura causada pelo CGS em relação ao  $G_{mm}$  da mistura. Observa-se que à medida que o número de giros utilizados durante a compactação é aumentada, há aumento na  $G_{mm}$  da mistura, o que conseqüentemente resulta na redução da porcentagem do volume de vazios e de vazios comunicantes. Esta redução se dá pelo maior esforço de compactação.

O  $N_{projeto}$  utilizado pela metodologia SUPERPAVE® e apresentado na Tabela 4. Este valor varia de acordo com a destinação da rodovia em função do tráfego que atuará sobre ela. Desta forma, rodovias de tráfego intenso exigem maior esforço de compactação, para maior densificação da mistura. Estes valores são válidos para misturas asfálticas densas, entretanto, foram utilizados para que a redução da porcentagem do volume de vazios e vazios comunicantes fosse observada quando relacionada com seu coeficiente de permeabilidade.

Tabela 4. Número de giros especificados na dosagem SUPERPAVE®

Parâmetros de compactação			Tráfego
N inicial	N projeto	N máximo	
	50	75	Muito leve (local)
7	75	115	Médio ( rodovias coletoras)
8	100	160	Médio a alto (vias principais, rodovias rurais)
9	125	205	Alto volume de tráfego ( interestaduais, muito pesado)

Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2008)

### **3.4.2 Determinação de volume de vazios e volume de vazios comunicantes**

A Etapa 3 visa determinar a relação entre o aumento do esforço de compactação no CGS e os volume de vazios internos das misturas. Esta determinação é importante considerando a aplicabilidade das misturas em campo no desempenho de sua função drenante. Mesmo com nível de esforço elevado de compactação (200 giros), misturas drenantes devem atender aos critérios estabelecidos neste trabalho na dosagem. O volume de vazios dos quinze (15) corpos de prova (3 para cada número de giros), foi definido de acordo com a norma DNER - ME 117/94 e a Equação 1. O volume de vazios comunicantes foi determinado segundo a norma AFNOR-NF-P-98-254-2 (1993).

### **3.4.3 Determinação da permeabilidade LCS**

A permeabilidade dos corpos de prova foi determinada inicialmente com o permeâmetro LCS, de acordo com a norma espanhola NLT – 327 (2000). Este tipo de permeâmetro (carga variável) é utilizado em campo para determinar a permeabilidade das misturas. Nesta dissertação o uso deste ensaio teve como objetivo a avaliação inicial da relação entre o aumento do esforço de compactação no CGS e o volume de vazios de cada corpo de prova, ou seja, avaliação da permeabilidade após o aumento do esforço de compactação que tende a reduzir o volume de vazios dos corpos de prova progressivamente ao aumento do esforço. Posteriormente, no capítulo 4, a permeabilidade determinada pelo LCS será comparada com o permeâmetro de carga constante desenvolvido em laboratório para a dissertação. O comparativo objetivou a compreensão da medição da permeabilidade medida em campo e em laboratório.

O ensaio foi realizado em corpos de prova cilíndricos e montado conforme sequência mostrada na Figura 23. Na Figura 23 em (a) é mostrada a montagem do permeâmetro sobre o corpo de prova. A tentativa de assegurar a estabilidade e verticalidade da água é mostrada em (b), onde as laterais dos corpos de prova foram impermeabilizadas com fita extra forte.

Os corpos de prova foram suspensos 5 cm para que o fluxo de água pudesse escoar livremente. As laterais dos corpos de prova foram impermeabilizadas com fita extraforte, do tipo Silvertape®. Esta vedação teve como objetivo eliminar o efeito parede e manter a verticalidade do fluxo de água no corpo de prova.

Figura 23. Montagem do ensaio com o permeâmetro LCS sobre CP



(a) Montagem sobre o CP      (b) Garantia da verticalidade

Fonte: Elaborado pela autora

O ensaio de permeabilidade com permeâmetro LCS foi realizado em todos os corpos de prova compactados. Foram realizadas 3 leituras de permeabilidade em cada corpo de prova e adotado o valor de média aritmética.

### 3.5 ETAPA 4: PRODUÇÃO DE PLACAS DRENANTES

As placas drenantes foram compactadas na mesa compactadora desenvolvida pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC), atual *Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux* (IFSTTAR), da França.

A compactação seguiu como referência o prescrito na norma AFNOR NF 98-250-2 (1991), entretanto algumas modificações foram realizadas de modo criterioso e experimental. Desta forma o número de passadas necessárias para compactação foi a determinada na norma que corresponde a rodovias com tráfego pesado. O molde utilizado tem dimensões de 50 x 18 x 5 cm. A espessura de 50 mm foi escolhida uma vez que as camadas de misturas drenantes em campo são, em geral, de sacrifício tendo em conta sua menor vida. As misturas asfálticas foram compactadas com pressão do pneu constante de 6 bars, até atingir a densidade aparente determinada na dosagem.

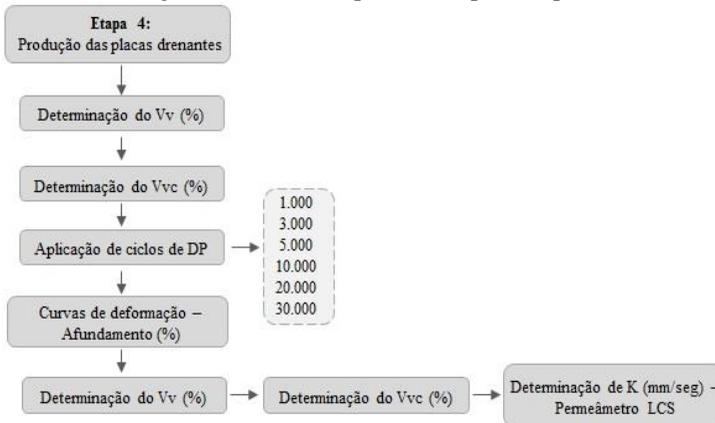
Em campo, misturas abertas (drenantes), são compactadas preferencialmente com o auxílio de rolo liso, sendo finalizada quando a altura especificada em projeto é atingida. Em laboratório, a sequência de

compactação seguiu a recomendada pela especificação francesa, entretanto, com a introdução, sobre a mistura, de uma chapa metálica com dimensões de 50 x 18 x 5 cm em intercaladas passagens do pneu.

A sequência de compactação seguiu um número de passadas determinadas em cada região horizontal da placa (central e suas laterais), conforme a norma. Para representar a compactação realizada em campo, as placas drenantes foram compactadas em laboratório com uma sequência de passadas dos pneus lisos e outra, idêntica, com a chapa metálica sobre a mistura. A compactação foi finalizada quando a altura da placa atingiu  $5 \pm 0,5$  cm.

Nesta etapa, foram estabelecidas as etapas mostradas na Figura 24. A seguir é apresentado, detalhadamente, o método adotado na quarta etapa.

Figura 24. Fases compreendidas pela Etapa 4



Fonte: Elaborado pela autora

Após compactação e resfriamento das placas, foram determinados os  $V_v$  e  $V_{vc}$  seguindo as normas DNER - ME 117 (1994) e AFNOR-NF-P-98-254-2 (1993) sequencialmente.

Após a verificação dos critérios estabelecidos na dosagem, as placas foram submetidas ao ensaio de deformação permanente de acordo com a norma AFNOR NF P 98-253-1 (1993).

### 3.5.1 Desempenho das placas drenantes à deformação permanente

A deformação permanente de misturas asfálticas pode ser avaliada por meio do seu desempenho à formação de trilhas de roda. O

equipamento utilizado em laboratório para esta determinação é o Simulador de Tráfego Francês *Orniéreur*. O ensaio segue a norma francesa AFNOR NF P 98-253-1 (1993).

São ensaiadas duas placas simultaneamente, uma em cada lado do equipamento. O pneu aplica sobre a placa asfáltica carregamento em movimento longitudinal em ciclos de 1 Hz. Inicialmente ao processo, são aplicados 1.000 ciclos em temperatura ambiente para garantir conformação das placas, o condicionamento para início do ensaio ocorre após estabilização da temperatura a 60 °C.

O afundamento na trilha de roda é medido em quinze pontos a determinados número de ciclos, com o auxílio de paquímetro digital. A localização dos pontos está prescrita na norma francesa AFNOR NF P 98-253-1 (1991). As leituras são realizadas nos seguintes ciclos: 1.000, 3.000, 5.000, 10.000, 20.000 e 30.000.

### **3.5.2 Determinação do volume de vazios e vazios comunicantes das placas após deformação permanente**

Foram produzidas placas e verificadas a deformação permanente após determinado número de ciclos. Uma placa foi utilizada como referência, sem realização de solicitações.

Os ciclos selecionados foram os seguintes: 1.000, 3.000, 5.000, 10.000, 20.000 e 30.000.

Após a aplicação dos ciclos selecionados, em cada placa, foram determinados o volume de vazios (DNER - ME 117, 1994) e o volume de vazios comunicantes (AFNOR-NF-P-98-254-2, 1993). Da mesma forma, foram mantidos os critérios definidos durante a dosagem da mistura.

### **3.5.3 Determinação do coeficiente de permeabilidade das placas após deformação permanente**

Posteriormente à análise da porcentagem do  $V_v$  (%) e do  $V_{vc}$  (%) das placas e realização da aplicação dos ciclos de deformação permanente, foi determinado o coeficiente de permeabilidade  $k$  (mm/seg) de cada placa com o uso do permeâmetro de carga variável LCS.

A determinação do coeficiente de permeabilidade das placas seguiu a norma espanhola NLT – 327 (2000). Foram realizadas quatro leituras em cada placa, sendo o resultado referente à média aritmética dos valores. A aplicação dos ciclos resultou em diferentes afundamentos ou deformações em cada placa, nas quais, a horizontalidade não se manteve. Em função da deformação singular apresentada por cada placa, uma

borracha maleável foi utilizada para vedar as laterais do permeâmetro. Com a vedação das laterais, foi mantida a percolação do líquido através das placas, sem que houvesse escoamentos superficiais.

### 3.6 ETAPA 5: EXTRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DAS PLACAS DRENANTES

A Etapa 5 trata da extração de corpos de prova cilíndricos das placas, com 100 mm de diâmetro e alturas que variaram em função da deformação obtida.

Os resultados das permeabilidades obtidas nesta etapa, foram correlacionados com os valores de permeabilidade da Etapa 4 deste capítulo. Estas correlações são apresentadas na Etapa 6 do próximo capítulo. O comparativo foi importante para avaliação das diferenças obtidas nas permeabilidades da placa antes e depois da extração dos corpos de prova.

Para analisar a redução da permeabilidade de corpos de prova em diferentes situações de compactação e ciclos de deformação permanente, foi necessária a adaptação das placas drenantes à corpos de prova cilíndricos. No método proposto neste estudo, a avaliação da permeabilidade foi realizada em corpos de prova cilíndricos. Para tanto, foram extraídos três corpos de prova de cada placa deformada no simulador de tráfego e também da placa utilizada como referência (sem deformação). O número de três (3) corpos de prova por placa está relacionado com as dimensões da placa (180 mm de largura e 500 mm de comprimento). Na extração foi determinado um espaçamento de 50 mm das bordas e entre os pontos de extração.

A extração foi realizada por meio de uma sonda rotativa com motor elétrico e diâmetro de 100 mm. Cada extração ocorreu de forma criteriosa, por causa da fragilidade das misturas drenantes pelo elevado volume de vazios. Para que a estabilidade fosse assegurada e não houvesse aquecimento do ligante, água corrente foi utilizada durante todo o processo. O exemplo de uma extração dos corpos de prova a partir das placas esta apresentada na Figura 25. A Figura 26 mostra o aspecto após extração dos corpos de prova, mostrando que se mantiveram íntegros.

Figura 25. Extração dos corpos de prova das placas após DP



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 26. Corpos de prova após extração com sonda rotativa



Fonte: Elaborado pela autora

Após a extração dos corpos de prova das placas, estes foram secos em estufa na temperatura 25 °C por 5 dias até que a água armazenada internamente em seus vazios, evaporasse. Posteriormente foram determinados, em cada corpo de prova, o  $V_v$ , (DNER - ME 117, 1994); o  $V_{vc}$ , (AFNOR-NF-P-98-254-2, 1993); e a permeabilidade com permeâmetro LCS (NLT – 327, 2000) e com o permeâmetro desenvolvido em laboratório (Etapa 6).

### 3.7 ETAPA 6: AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE- PERMEÂMETRO EXPERIMENTAL

Uma das principais precauções no uso de revestimentos drenantes está relacionada com a colmatação dos seus vazios. O entupimento é causado pelas partículas de sujeira carregadas pela água da chuva, ou seja, durante o escoamento superficial (água de *runoff*). Em campo são realizados ensaios de permeabilidade para avaliação da progressão da

colmatção e redução da permeabilidade. O permeâmetro LCS (norma NLT – 327/2000) tem sido utilizado para determinação da permeabilidade dos revestimentos drenantes em campo.

Nesta dissertação, além da permeabilidade medida no permeâmetro de carga variável LCS, foi também medida em um permeâmetro de carga constante numa metodologia desenvolvida no estudo.

Com o permeâmetro proposto, foram realizados ensaios de permeabilidade nos corpos de prova compactados com diferentes números de giros no compactador CGS e nos extraídos das placas após ensaio de deformação permanente a diferentes ciclos.

Inicialmente, foram realizadas três (3) análises por corpo de prova com água limpa. Cada corpo de prova compactado no CGS e extraído das placas deformadas passou por três leituras de permeabilidade com água limpa, totalizando 15 corpos de prova compactados a diferentes giros e 21 extraídos das placas deformadas.

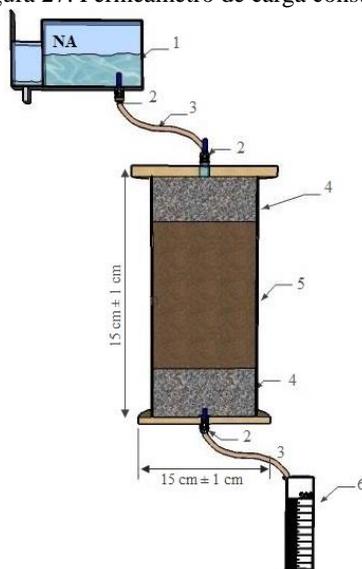
Posteriormente, à análise da permeabilidade foi realizada em todos os corpos de prova com água de *runoff*.

Usualmente a permeabilidade de misturas asfálticas drenantes é determinada, em laboratório com o uso de permeômetros de carga constante. A Figura 27 representa um tipo de permeâmetro de carga constante, descrito pela norma NBR 13292 (1995). Permeômetros de carga constante são utilizados para materiais de alta permeabilidade, como é o caso das misturas drenantes e de solos granulares.

Conforme a Figura 27, os componentes que constituem o permeâmetro de carga constante conforme a norma NBR 13292 (1995) são:

1. Reservatório, com alimentação constante;
2. Válvula metálica com regulação;
3. Mangueira de silicone de 10 mm de diâmetro;
4. Brita de granulometria superior ao corpo de prova, para garantir estabilidade ao corpo de prova;
5. Corpo de prova, compactado em laboratório ou extraído de campo;
6. Proveta acrílica graduada, para conferência de volume.

Figura 27. Permeâmetro de carga constante



Fonte: Adaptado norma NBR 13292/1995 (figura sem escala)

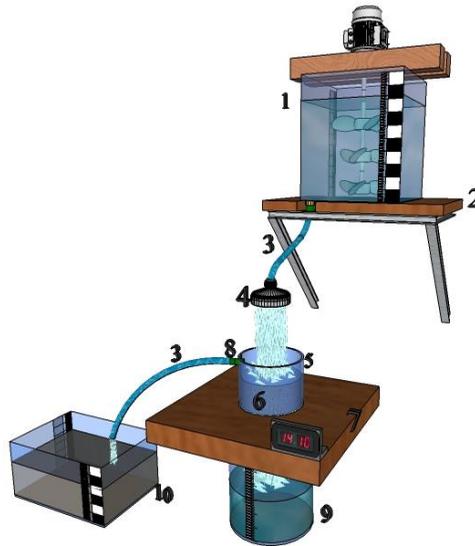
Corpos de prova cilíndricos (150 x 200 mm) são utilizados neste permeâmetro segundo a norma. O encaixe do permeâmetro é composto por encaixes em suas extremidades, desta forma, quando utilizadas amostras inferiores às dimensões normatizadas, as laterais devem ser impermeabilizadas com lama bentonítica. Para que a estabilidade seja mantida, uma camada de material granular é utilizada nas extremidades da amostra. Um orifício de  $5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ , acionado por válvula, posicionado no topo e no fundo do molde, é responsável pela entrada e saída do fluxo de água. Uma bureta graduada é utilizada como coletora do fluxo permeado.

Nesta dissertação os corpos de prova apresentam dimensões de 100 mm de diâmetro e alturas de  $63,5 \pm 3 \text{ mm}$ . Assim, foi necessário o desenvolvimento de um permeâmetro adaptado. Com base no permeâmetro de carga constante (NBR 13292/1995), foi desenvolvido em laboratório o permeâmetro ilustrado na Figura 28.

Todas as peças foram dimensionadas para seu uso em corpos de prova de 100 mm de diâmetro com alturas  $63,5 \pm 3 \text{ mm}$ . Esta variabilidade da altura ocorre em função do tipo de solicitação à que foram expostos, durante a compactação CGS ou deformação permanente. O sistema de armazenamento de água foi adaptado para que pudessem ser realizadas

análises de permeabilidade com água limpa e água de *runoff*.

Figura 28. Permeâmetro desenvolvido em laboratório



Fonte: Elaborado pela autora

De acordo com a Figura 28, o permeâmetro desenvolvido neste trabalho apresenta os seguintes componentes:

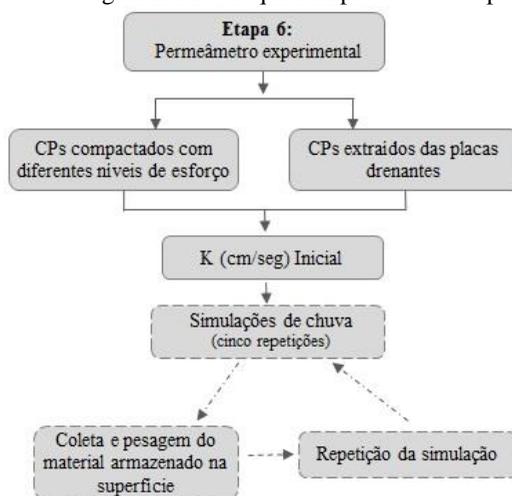
1. Reservatório: com capacidade de máxima de 7,50 litros. Para todos os ensaios o volume determinado foi de 5 litros;
2. Fixação: apoio de madeira que serve de suporte ao reservatório. Apoiado na parede e suspenso 50 cm em relação ao corpo de prova compactado;
3. Mangueira: diâmetro de 10 mm, determinado devido à eficiência na condução do fluxo;
4. Ducha plástica: destinada ao controle do fluxo de entrada nos CPs, possui regulagem, de fácil manuseio. Alguns orifícios foram modificados para que servissem como base de fluxo;
5. Molde: confeccionado com garrafa de polietileno tereftalato (PET) transparente e altura variável, conforme necessidade do corpo de prova. Cada corpo de prova possui um molde fixo. Possui o fundo aberto, desta forma o fluxo escoar por toda a superfície do corpo de prova, sem obstruções;
6. Corpo de prova impermeabilizado: as laterais de cada corpo de

- prova foram impermeabilizadas utilizando cola de silicone;
7. Suporte de madeira: peça de madeira com 20 mm de espessura. No centro da peça, um furo de 100 mm de diâmetro serve para a acomodação do molde com o corpo de prova impermeabilizado;
  8. Extravasor: emenda metálica utilizada para mangueira de fogão (bitola de 3/8”). A peça metálica garante maior estabilidade para acoplamento da mangueira. Inserido 20 mm acima da superfície do CP, como delimitador da lâmina de água;
  9. Béquero de plástico graduado: graduação de 2.000 ml. Utilizado como volume padrão de drenagem de cada corpo de prova;
  10. Coletor de água: recipiente destinado a coletar a água eliminada pelo extravasor.

As partes constituintes do permeâmetro são detalhadas nesta etapa juntamente com sua funcionalidade, considerando as adaptações realizadas e controle da permeabilidade de cada corpo de prova.

A Figura 29 apresenta a sequência de atividades compreendidas na Etapa 6 a partir do detalhamento das peças do permeâmetro.

Figura 29. Fases que compoem a Etapa 6



Fonte: Elaborado pela autora

Os corpos de prova compactados no compactador CGS ficaram armazenados em local seco até o início das leituras de permeabilidade. Os extraídos das placas drenantes com sonda rotativa, possuíam umidade em

seu interior, devido a utilização de água durante a extração. Para que houvesse igualdade de umidade entre os corpos de prova, anterior ao início das leituras de permeabilidade, estes permaneceram durante 5 dias em estufa com temperatura controlada de 25 °C. Este período foi definido com intuito de que a umidade presente em todos os corpos de prova pudesse ser eliminada pelo processo de evaporação.

A eliminação da umidade interna nos corpos de prova foi verificada através do procedimento de igualdade de massa. Posteriormente, as laterais dos corpos de prova foram impermeabilizadas com fita do tipo extraforte e cola silicone. Esta impermeabilização tem como objetivo a manutenção do fluxo vertical das amostras durante os ensaios de permeabilidade.

As leituras de permeabilidade foram realizadas em duas etapas. A primeira, para definição da permeabilidade inicial foi utilizando água limpa. A segunda etapa trata das simulações de eventos de chuva, utilizando água de *runoff*. Para representar a pluviosidade anual de Florianópolis, foi definido o número de cinco simulações de eventos de chuva para cada corpo de prova.

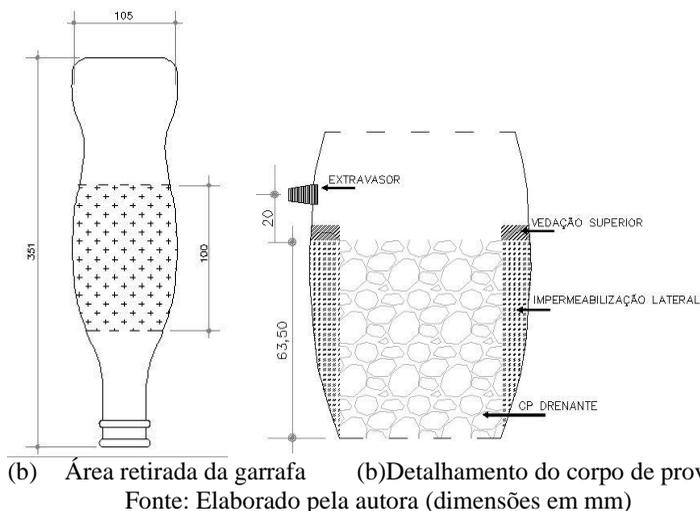
Em função da exclusividade de cada corpo de prova, alguns podem ser finalizados sem que as cinco simulações sejam realizadas, o critério para esta finalização prévia é detalhada nesta etapa assim como todos os procedimentos adotados para realização das leituras de permeabilidade.

### 3.7.1 Molde

Moldes exclusivos foram confeccionados para todos os corpos de prova analisados, desta forma, as leituras com água limpa e de *runoff* puderam ser realizadas sem intervenções no corpo de prova, depois de sua moldagem.

O molde foi confeccionado e adaptado a partir de garrafas transparentes de PET, com diâmetro de  $\pm 105$  mm e altura de  $\pm 351$  mm. A parte média da garrafa foi seccionada de modo a apresentar uma altura de  $100 \pm 3$  mm. A parte de maior dimensão é utilizada para entrada e acomodação do corpo de prova, estando suas laterais já impermeabilizadas. A Figura 30 apresenta em (a) a área da garrafa extraída para confecção do permeâmetro e em (b) o detalhamento do corpo de prova com suas laterais impermeabilizadas e o extravasador posicionado.

Figura 30. Confeção do molde em garrafa PET



Após a confecção do molde, os corpos de prova foram introduzidos nos mesmos. Para assegurar o fluxo vertical da água nos corpos de prova durante o ensaio de permeabilidade, o diâmetro circundante do corpo de prova em contato com o molde superior foi impermeabilizado. Inicialmente a impermeabilização foi feita com lama bentonítica, como prescrito na norma NBR 13292 (1995). No entanto, como vários ensaios de permeabilidade foram realizados com o mesmo corpo de prova, a lama bentonítica mostrou-se inadequada uma vez que após a secagem e molhagem grumos do material se desprendiam das laterais do molde e estes contribuía para a colmatação dos poros, o que se tornou inviável. Após outras tentativas com materiais impermeabilizantes, a cola epóxi e o silicone mostraram-se adequados. As faces laterais (diâmetro) do corpo de prova em contato com o molde foram impermeabilizadas com silicone e a face superior no entorno do diâmetro com cola epóxi para garantir o fluxo vertical de água durante o ensaio.

A Figura 31 apresenta o corpo de prova lateralmente com a impermeabilização utilizando as colas de silicone e epóxi. Na Figura 32 é notável a vista superior do molde, com a aplicação da cola epóxi, através desta vedação somente o fluxo vertical é analisado durante os ensaios de permeabilidade.

Figura 31. Corpo de prova impermeabilizada no interior do molde



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 32. Vista superior do corpo de prova com vedação de cola epóxi no diâmetro

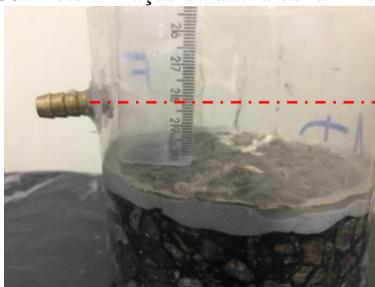


Fonte: Elaborado pela autora

De modo a simular a película de água sobre a camada de revestimento em eventos de chuva e representar o princípio de carga constante no ensaio de permeabilidade, foi utilizado um extravasor metálico com bitola de 3/8 polegadas. O extravasor foi posicionado a  $20 \text{ mm} \pm 1$ , em relação à superfície do corpo de prova.

Na medida em que a água atravessa o corpo de prova, o extravasor conduz o excesso para um reservatório e a lâmina de água de 20 mm se mantém constante. A Figura 33 ilustra o posicionamento do extravasor em relação à superfície do corpo de prova no interior do molde.

Figura 33. Determinação da altura de lâmina da água



Fonte: Elaborada pela autora

### 3.7.2 Controle de fluxo

Os corpos de prova analisados foram expostos a condições distintas de compactação e de deformação permanente, desta forma sua velocidade de fluxo é variável. Para introdução da água no molde foi utilizado uma ducha plástica, conforme Figura 34. Esta ducha serviu tanto como regulador de vazão quanto para a simulação de chuva.

A permeabilidade dos corpos de prova foi avaliada com uso de água limpa e de *runoff*. Considerando que a água de *runoff* apresenta partículas sólidas, foi necessário o aumento do diâmetro dos orifícios da ducha. Este procedimento foi adotado porque em testes realizados anteriormente ocorreu o entupimento dos orifícios da ducha para o material sólido da água de *runoff*. Em todas as simulações foram utilizadas duchas da mesma marca e feito o controle do diâmetro dos orifícios, posicionados no mesmo local e mesma abertura.

Para determinação do fluxo inicial das misturas foram realizadas três leituras de permeabilidade, após a saturação de cada corpo de prova. Havendo constância dos dados, a permeabilidade foi medida e as simulações com água e partículas colmatadoras (*runoff*) iniciadas.

Figura 34. Ducha para controle de fluxo



Fonte: Elaborada pela autora

### 3.7.3 Volume drenado

A vazão de fluxo está diretamente relacionada com volume drenado em certo período de tempo. Assim, foi fixado o volume a ser drenado em todos os corpos de prova. Adotou-se volume drenado de 2.000 ml e foi medido o tempo de drenagem deste volume e, determinada a permeabilidade.

Para padronização do volume drenado foi utilizado um béquer graduado (2.000 ml) e, o volume coletado foi conferido por meio de uma proveta graduada (melhor precisão volumétrica).

O volume drenado corresponde a 2.000 ml. A área da superfície dos corpos é calculada de acordo com a Equação 5:

$$A = \pi \cdot r^2 \quad 5$$

Onde:

A – área da superfície do corpo de prova, metros quadrados;

r – raio da superfície do corpo de prova, metros.

Através da área da superfície de cada corpo de prova e do volume drenado, é determinada a pluviosidade (milímetros) correspondente, calculada pela equação 6.

$$p = \frac{V}{A}$$

6

Onde:

$p$  – pluviosidade, milímetros;

$V$  – volume drenado pelo corpo de prova, mililitros;

$A$  – área do corpo de prova, metros quadrados.

A partir do valor obtido na Equação 6, cada simulação de evento de chuva, com drenagem de 2.000.000,0 mm<sup>3</sup>, de água, equivale a uma precipitação de 255 mm de chuva. As seis simulações de eventos de chuva correspondem a 1530 mm de precipitação.

Florianópolis apresenta uma precipitação média anual em torno de 1570 mm. Os dados volumétricos referem-se a 20 anos de pesquisa e acompanhamento pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI, 2017). Desta forma, os valores referentes às seis simulações de eventos de chuva, com água limpa e de *runoff* são correlacionados à precipitação anual de Florianópolis.

Na Etapa 7 do capítulo 4 é feita correlação entre o volume máximo drenando em cada tipo de corpo de prova e a precipitação média anual em Florianópolis. Assim, é correlacionado o momento máximo para intervenção na rodovia para que as propriedades drenantes no revestimento sejam mantidas.

### 3.7.4 Água de *runoff*

De modo a simular a colmatção dos poros, a água de *runoff* utilizada foi coletada a partir do acúmulo de material sólido sob um viaduto na cidade de Florianópolis. O material definido é resultante do acúmulo de partículas sólidas provenientes de escoamento superficial de uma via de tráfego elevado que desemboca na sarjeta junto ao viaduto. Devido a sua origem, este material apresenta diâmetro máximo das partículas variado e composto por diversos materiais e resíduos urbanos.

Prévia a utilização do material, este foi seco em estufa e inicialmente peneirado na peneira n° 4 de abertura de 4,80 mm, como forma de exclusão de partículas maiores. A partir do estudo de Fwa, *et al.* (2014) no qual foi quantificado e avaliada a granulometria do material sólido de águas de escoamento de rodovias, o material coletado foi selecionado, seco e peneirado. O estudo realizado pelos autores mostrou que a quantidade de material colmatador proveniente da água de *runoff*

de vias pavimentadas quando utilizado em laboratório, apresentava colmatção progressiva a partir de partículas com diâmetro retido na peneira nº 100 (0,149 mm).

A partir dos dados de Fwa *et al.* (2014), foi feita a adequação da quantidade de material para o diâmetro de corpos de prova de 100 mm de diâmetro. A Figura 35 apresenta o material utilizado, após coleta (a) e após retenção por peneiramento na peneira nº100 (b). Os autores utilizaram corpos de prova de 150 mm e para isso aplicaram em sua superfície 5,30 gramas de material. Nesta dissertação, 3,53 gramas de material sólido selecionado foram dissolvidos por litro de água no reservatório (item 1 da Figura 28).

Figura 35. Granulometria do material colmatador



(a) Material após coleta

(b) Material pronto para uso

Fonte: Elaborado pela autora

A cada ciclo de permeabilidade foram dissolvidos 17,65 gramas de material colmatador (peneirado e retido na peneira nº 100) em 5 litros de água contida no reservatório.

Anteriormente à introdução deste material, a permeabilidade dos corpos de prova foi definida com água limpa, denominada de permeabilidade inicial de projeto. Esta determinação teve como objetivo a determinação do ponto denominado “inicial” da permeabilidade de cada corpo de prova. A partir destes pontos, as demais medições e, conseqüente redução de permeabilidade foi determinada à medida que os sequenciais ciclos de água de *runoff* foram realizados.

Considerando que o material colmatador utilizado apresenta diâmetro máximo muito fino seu contato com a água leva à formação de grumos. Assim, de modo a evitar este fator, no reservatório de água foi introduzido um agitador motorizado, mostrado na Figura 36. Um apoio

de madeira foi construído para apoio do motor, e colocado sobre o reservatório durante as simulações de chuva.

Figura 36. Motor de agitação de partículas



Fonte: Elaborado pela autora

Verticalmente ao motor foi introduzida uma haste metálica de 20 cm de comprimento, que possui em sua extremidade pás que propiciam a homogeneização da solução água e material colmatador. A haste chega rente ao fundo do reservatório de modo que toda a solução permaneça em agitação durante todo o tempo de ensaio.

Antes do início das simulações de eventos de chuva, o material colmatador é dissolvido no reservatório por tempo médio de 5 minutos. As análises são iniciadas quando a solução apresentar homogeneidade.

### **3.7.5 Ensaio de permeabilidade com o permeâmetro experimental**

O permeâmetro experimental desenvolvido no ensaio foi montado conforme Figura 28.

Durante o ensaio com água limpa não foi utilizado o agitador. A temperatura da água foi mantida entre  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , monitorada com o uso de termômetros e climatização da sala de ensaios.

Esta temperatura foi mantida para que a viscosidade da água não apresentasse variações significativas. O permeâmetro funciona por gravidade, desta forma, a velocidade de escoamento pode ser influenciada pela viscosidade da água.

Figura 37. Permeâmetro utilizando água limpa



Fonte: Elaborada pela autora

O motor de agitação foi acoplado no aparato após a determinação da permeabilidade inicial.

Para análise da redução da permeabilidade de cada corpo de prova, foi definido o número de cinco simulações de chuva além da permeabilidade inicial. Desta forma, foi possível a avaliação progressiva da permeabilidade. A Figura 38 apresenta o permeâmetro durante a realização de uma simulação de chuva, com a utilização do motor de agitação.

Figura 38. Permeâmetro durante simulação de chuva



Fonte: Elaborado pela autora

Ao final de cada simulação a estrutura do permeâmetro foi desmontada, as mangueiras e reservatórios lavados em água corrente e a ducha plástica, limpa e acoplada novamente. Esta sequência de limpeza foi realizada em todas as análises para que fossem drenados por simulação somente a quantidade de material determinada metodologicamente. Desta forma, não houve interferência de materiais de simulações anteriores.

### 3.7.6 Procedimentos para repetição das simulações de eventos de chuva

Após as simulações com água de *runoff*, parte do material colmatador se acumulou sobre a superfície do corpo de prova conforme Figura 39. As simulações foram realizadas a cada 5 dias para que o material acumulado excedente secasse. Posteriormente o material foi removido com um pincel (Figura 40).

O material que permanece acumulado sobre o corpo de prova, quando seco, contribui para a colmatagem dos vazios. O tempo de secagem foi definido em 5 dias para que as partículas presas internamente no corpo de prova pudessem aderir sua superfície e não fossem eliminadas no próximo evento de chuva.

Figura 39. Material acumulado sobre o CP



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 40. Material retido na superfície do corpo de prova



Fonte: Elaborado pela autora

A limpeza da superfície após secagem simula o efeito do tráfego que após eventos de chuva, com auxílio do vento, ajuda a remover as partículas presentes na superfície do pavimento.

Visando a eficácia da pesquisa, as simulações puderam ser interrompidas antes dos cinco ciclos, se o tempo de percolação do corpo de prova (2.000 ml) ultrapassasse 2 horas.

Estando a água drenada sem partículas colmatadoras, foi definida a ocorrência de escoamento superficial sem percolação, o que não é abrangido nesta pesquisa. Assim sendo, nestas condições, o ensaio foi interrompido.

### 3.8 ETAPA 7: DETERMINAÇÃO DAS PERMEABILIDADES

Para determinação do coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) inicial (mm/seg), em cada corpo de prova foram realizadas 3 (três) leituras e seu

valor definido através da média aritmética.

Sequencialmente à definição da permeabilidade inicial de cada corpo de prova, as simulações de eventos de chuva foram iniciadas, conforme descritos na Etapa 6. O coeficiente de permeabilidade  $k$  (mm/seg) foi determinado com base na hidrologia e seguindo a Lei de Darcy.

Em cada análise foram considerados fatores fixos e variáveis. Os fatores fixos foram; (i) isolamento superior com cola epóxi; (ii) volume drenado de 2.000 ml e (iii) lâmina de água em 20 mm. São considerados como fatores variáveis: (i) giros no CGS ou ciclos de DP; (ii)  $V_v$ ; (iii)  $V_{vc}$ ; (iv) diâmetro; (v) espessura; (vi) tempo de ensaio; (vii) velocidade de escoamento e (viii) gradiente hidráulico.

O gradiente hidráulico, diretamente relacionado com a permeabilidade, foi obtido pela Equação 7.

$$i = \frac{H}{L} \quad 7$$

Onde:

$i$  = gradiente hidráulico;

$H$  = Espessura da lâmina de água sobre o corpo de prova, milímetros;

$L$  = Espessura do corpo de prova, milímetros.

A velocidade de escoamento (mm/seg), apresentada pela Equação 8 foi utilizada para a avaliação do coeficiente de permeabilidade e mostra a quantidade de material transportado através de um conduto, por unidade de tempo. Em função das diferenças da distribuição interna dos agregados e ligante, pode-se correlacionar a velocidade de escoamento com  $V_v$  (%).

$$V = \frac{Q}{t \cdot A} \quad 8$$

Onde:

$V$  = Velocidade de escoamento, milímetros/segundo;

$Q$  = Volume drenado, milímetros cúbicos;

$t$  = tempo de cada análise, segundos;

$A$  = área de cada CP em análise, milímetros quadrados.

O coeficiente de permeabilidade  $k$  (mm/seg) de cada corpo de

prova foi definido em função da Equação 9. Fwa *et al.* (2014) analisaram misturas drenantes com diferentes porcentagens de vazios e constaram que materiais drenantes apresentam variabilidade relativamente grande em seus dados. Desta forma, definiram como constante minimizadora do erro significativo entre leituras de materiais permeáveis para ensaios com permeâmetros laboratoriais. Como valor de constante de  $n = 0,70$  foi adotado como coeficiente definido no estudo.

$$k = \frac{V}{i^n} \quad 9$$

Onde:

$k$  = Coeficiente de permeabilidade (mm/seg);

$V$  = Velocidade de escoamento superficial (mm/seg);

$i$  = Gradiente hidráulico;

$n = 0,70$ , constante definida por Fwa *et al.* (2014).

Foram definidos 5 grupos para os corpos de prova compactados no CGS, em função do número de giros na compactação, (50, 75, 100, 150 e 200). Para os corpos de prova extraídos das placas drenantes a ciclos no equipamento de deformação permanente, foram nominados 7 grupos em função dos ciclos (0, 1.000, 3.000, 5.000, 10.000, 20.000 e 30.000).

Adotou-se como erro possível das análises experimentais, a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro de uma grandeza. A repetição de uma medida de uma variável nas mesmas condições experimentais conduz a uma distribuição aleatória de resultados em torno de um valor médio  $\mu$  (média aritmética) que pode ser considerado como o melhor valor obtido nesta medida (SCHNEIDER, 2007).

A análise dos dados experimentais na pesquisa foi determinada em função da variabilidade da faixa de incerteza de medição de uma grandeza. Incertezas do Tipo “A” são aquelas obtidas a partir de uma série de medições, ou seja, a tradicional análise de repetibilidade. Segundo Schneider (2007), dados de incerteza padrão apresenta confiabilidade de 68,27%, calculada de acordo com a Equação 10.

$$u = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad 10$$

Onde:

$u$  = Incerteza padrão (desvio padrão da média das medições);

$\sigma$  = Desvio padrão das medições;

N = Número de medições.

A faixa de incerteza adotada como referencial para apresentação da redução do coeficiente de permeabilidade dos corpos de prova foi definida pela Equação

11.

$$\text{incerteza} = \mu + u$$

11

Onde:

Incerteza = Faixa de valores adotada como referencial;

$\mu$  = Média aritmética dos valores analisados;

u = Incerteza padrão (desvio padrão da média das medições).

Em função da faixa de incerteza em relação à média aritmética dos valores obtidos, a redução do coeficiente de permeabilidade dos corpos de prova foi definida através de equações exponenciais. Cada conjunto de corpos de prova apresenta uma equação que descreve a provável redução do coeficiente de permeabilidade ao longo do tempo de exposição os eventos de simulação de chuva.

Após a definição da faixa de incerteza que delimita cada redução de permeabilidade dos corpos de prova, seus valores máximos e mínimos foram definidos. O valor máximo foi definido como a permeabilidade inicial do corpo de prova, utilizando água limpa, e associada à simulação de chuva, considerada número zero. O valor mínimo de permeabilidade corresponde à última simulação de chuva a que o corpo de prova foi solicitado, valor atribuído a colmatação.

Para mensurar os valores máximos e mínimos, foram definidos parâmetros de permeabilidade classificatórios para solos. Estes parâmetros foram adotados, pois não há ainda no Brasil, uma classificação normatizada para misturas abertas em relação ao grau de permeabilidade. A Tabela 5 apresenta a classificação de solos conforme seu grau de permeabilidade. Estes valores serão relacionados neste estudo com os corpos de prova de misturas drenantes utilizando ligante modificado com borracha.

Tabela 5. Classificação dos solos segundo grau de permeabilidade

Grau de permeabilidade	Valor de $k$ (m/seg)	Valor de $k$ (mm/seg)
Elevada	Superior a $10^{-3}$	Superior a 1,00
Média	$10^{-3}$ a $10^{-5}$	1,00 a 0,01
Baixa	$10^{-5}$ a $10^{-7}$	0,01 a $10^{-4}$
Muito Baixa	$10^{-7}$ a $10^{-9}$	$10^{-4}$ a $10^{-6}$
Praticamente Impermeável	Menor de $10^{-9}$	Menor que $10^{-6}$

Fonte: Rambo (2015) adaptado de Lambe e Witman (1974)

### 3.8.1 Comparação de permeabilidades

A permeabilidade de revestimentos drenantes pode ser mensurada com o uso de permeâmetros de carga constante e variável. A definição do tipo de permeâmetro utilizado influencia diretamente os valores de seus resultados. Esta influência é conferida ao tipo de fluxo que cada permeâmetro impõem sobre o corpo de prova.

Em permeâmetros de carga variável o fluxo é tridimensional, enquanto permeâmetros de carga constante, o fluxo é unidimensional. Esta variabilidade se dá em função do confinamento conferido à amostra, no caso de permeâmetros de carga constante.

Kolodziej (2016) utilizou o permeâmetro de carga variável LCS, segundo recomendações da norma NLT 327 (2000). Confeccionou placas de revestimentos drenantes, utilizando a granulometria de Guimarães (2012) e ligante FLEXPAVE 60/85. As leituras de permeabilidade realizadas com o permeâmetro LCS foram realizadas ao longo da placa e os resultados representam a média de três leituras.

Dresch (2016) analisou cinco misturas de CPA que serão utilizadas em obras de rodovias federais do Rio Grande do Sul (BR 158 e BR 258). As misturas foram denominadas CPA1, CPA2, CPA3, onde não havia adição de material e CPA4 e CPA5 com adição de cal. Cada nomenclatura corresponde a uma granulometria, mantendo constante o uso de ligante 60/85. Para determinação do coeficiente de permeabilidade de cada corpo de prova, foi confeccionado no LMCC (Laboratório de Materiais de Construção Civil) um permeâmetro de carga constante e desta forma, estes parâmetros foram determinados com a utilização de água limpa.

Anterior ao momento de intervenção no revestimento é feita a comparação dos valores de permeabilidade. Os valores obtidos com o permeâmetro de carga variável LCS são analisados juntamente com os obtidos por Kolodziej (2016). A utilização do permeâmetro de carga constante varia em função da estrutura de cada permeâmetro, de modo

geral, os valores obtidos por Dresch (2016) são relacionados com os obtidos através da utilização de água limpa e apresentados na Etapa 6 do Capítulo 4, de resultados.

### 3.9 ETAPA 8: MOMENTO DE INTERVENÇÃO NO REVESTIMENTO

A Etapa 8 da metodologia trata do momento de intervenção no revestimento para recuperação parcial da capacidade de drenagem. A redução da permeabilidade de cada grupo de corpos de prova é determinada em função da distribuição de seus valores médios e da faixa de incerteza obtida ao final da Etapa 7.

Verificada a tendência dos valores obtidos, a redução do coeficiente de permeabilidade  $k$  (mm/seg) de cada grupo de prova é representada por uma relação. Esta relação foi obtida sob a forma de equação para representar a redução de  $k$  e é relacionada com o número  $N$  de simulações de eventos de chuva a que foram solicitados.

Nesta pesquisa, o momento de intervenção foi definido de acordo com a variação das permeabilidades de cada grupo de corpos de prova em função dos seus valores iniciais de  $V_v$  (%) e  $V_{vc}$  (%). Os parâmetros para intervenção são mantidos de acordo com o processo de dosagem, sendo  $V_v \geq 20\%$  e  $V_{vc}$  mínimo de 12%. O valor de  $V_v$  (%) foi usado para selecionar os corpos de prova, enquanto que o valor de  $V_{vc}$  (%) foi o adotado para obtenção do momento de intervenção no revestimento.

Após análise, o valor de  $V_{vc}$  (%) foi extrapolado até 12%, e o valor do coeficiente de permeabilidade médio mínimo final dos corpos de prova foi obtido. Em função destes valores, foi definido o coeficiente de permeabilidade de  $k$  aproximado. Com o valor de  $k$  aproximado e a função do Excel® “alcançar meta”, a equação de variação da redução dos coeficientes de permeabilidade foi determinada. Finalmente, a partir desta variação, foi definido o valor de  $N$  chuvas necessários para que o índice ( $k$  aproximado) seja atingido. As simulações de eventos de chuva são definidas como sendo seis (uma com água limpa e cinco com água de *runoff*). Estas simulações, no total, correspondem a 1530 mm, pluviosidade compatível com a frequência anual em Florianópolis (1570 mm). A partir do valor de  $N$  chuvas necessárias para atingir 12% de  $V_{vc}$ , são calculadas com relação à precipitação anual determinada (1570 mm) o tempo máximo para intervenção no revestimento, em meses. O valor de  $V_{vc}$  de 12% é definido nesta dissertação como a colmatagem do revestimento e por isso, a intervenção para recuperação das características drenantes é simulada com este valor.



## CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas sete etapas do método, apresentados no Capítulo 3.

### 4.1 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização dos agregados, e a caracterização do ligante modificado por borracha foram apresentados na Etapa 1 no Capítulo 3.

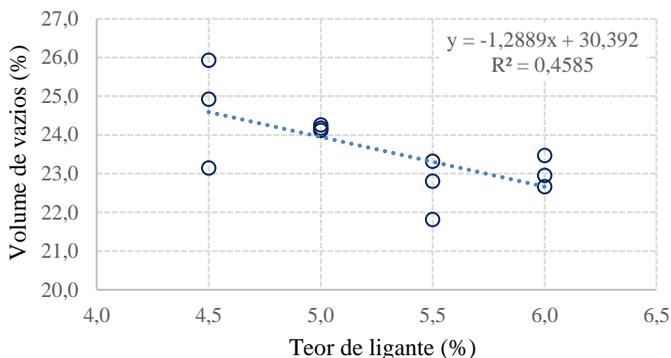
Os materiais, agregados e ligantes se mostraram satisfatórios quanto às exigências das normativas, estando aptos à produção de misturas asfálticas.

### 4.2 ETAPA 2: DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA

#### 4.2.1 Teor de ligante de projeto

A Figura 41 apresenta a variação do Vv (volume de vazios) em função de 4 (quatro) teores de ligante testados (4,50%, 5,0%, 5,5%, 6,0%). O aumento no teor de ligante acarretou na redução progressiva do Vv. Para o teor de 6,0% esta relação não foi observada, pois os valores de Vv apresentaram pequeno aumento em relação ao teor de 5,5%.

Figura 41. Variação do Vv *versus* teor de ligante

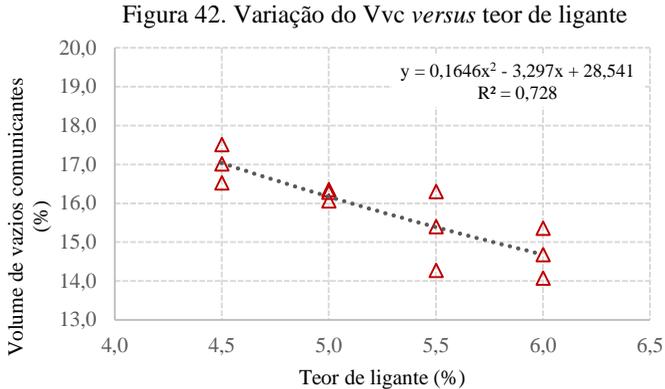


Fonte: Elaborado pela autora

Todos os corpos de prova dosados atenderam aos critérios de dosagem (Vv igual a 20% ± 2). Os pontos apresentados na Figura 41 representam a distribuição do valor do volume de vazios de cada corpo prova em função do teor de ligante testado. Para determinação do critério

de teor de ligante de projeto, foi utilizada a média entre as três amostras.

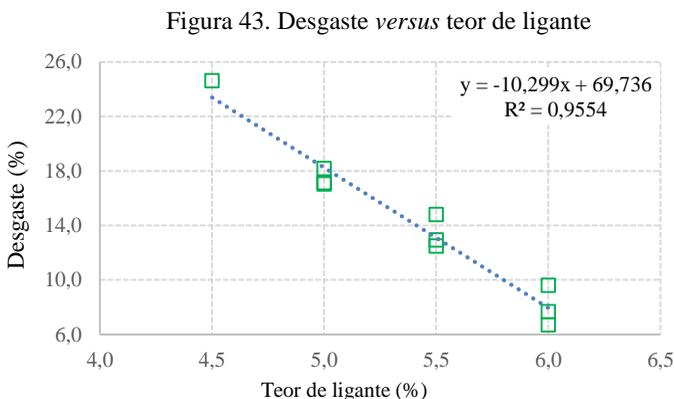
A variação do Vvc em função do teor de ligante dos corpos de prova é apresentada na Figura 42.



Fonte: Elaborado pela autora

De acordo com Figura 42, o Vvc apresentou redução com o aumento do teor de ligante. O critério adotado na dosagem de volume de vazios comunicantes de  $15\% \pm 3\%$  foi obtido em todos os corpos de prova.

A Figura 43 apresenta a porcentagem de perda de massa de cada corpo de prova durante ensaio de Cantabro, após 300 revoluções.



Fonte: Elaborado pela autora

As duas primeiras amostras inseridas no tambor, com 4,5% de

teor de ligante, apresentaram grande perda de massa. Este fato se deu à presença de umidade interna no tambor Los Angeles. Não houve reposição destes corpos de prova, pois o teor referente não satisfaz os critérios de dosagem ( $V_v$  de  $20\% \pm 2$ ). Os demais corpos de prova atenderam a especificação, com perda de massa inferior a 20%. Os dados ensaios em cada teor de ligante testado são apresentados na Tabela 6. O teor de ligante de projeto foi definido em 5,0%.

Tabela 6. Resultados de dosagem por corpo de prova

Teor de ligante (%)	Gmm ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Gmb ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Vv (%)	Vvc (%)	Cântabro (%)
4,50	2,486	1,842	25,921	17,017	-
	2,486	1,867	24,921	16,523	-
	2,486	1,911	23,138	17,511	24,639
$\mu$	-	1,873	24,660	17,017	24,639
$\sigma$	0,028	0,035	1,410	0,494	-
5,00	2,499	1,895	24,170	16,064	17,135
	2,499	1,897	24,109	16,350	18,169
	2,499	1,893	24,251	16,288	17,051
$\mu$	-	1,895	<b>24,176</b>	<b>16,234</b>	<b>17,452</b>
$\sigma$	0,027	0,002	0,071	0,151	0,623
5,50	2,454	1,882	23,314	16,301	12,945
	2,454	1,919	21,814	14,273	12,499
	2,454	1,895	22,796	15,398	14,797
$\mu$	-	1,899	22,641	15,324	13,414
$\sigma$	0,002	0,019	0,762	1,016	1,218
6,00	2,453	1,890	22,946	14,680	7,662
	2,453	1,877	23,462	15,363	6,692
	2,453	1,897	22,662	14,074	9,604
$\mu$	-	1,888	23,023	14,706	7,986
$\sigma$	0,035	0,010	0,405	0,645	1,483

Nota: A média dos valores é representada na tabela pelo símbolo  $\mu$  e o desvio padrão dos valores pelo símbolo  $\sigma$ .

Fonte: Elaborado pela autora

O teor de ligante de 5,5% também poderia ser adotado como de

projeto, visto que satisfaz todos os critérios de dosagem. No entanto não foi o teor escolhido visando à economia de ligante, fator importante a ser considerado no uso de ligantes modificados.

O ensaio de dano por umidade foi realizado para o teor de projeto de 5,0%. No ensaio, a relação entre a resistência à tração dos corpos de prova que sofreram condicionamento (RT1) e os sem condicionamento, rompidos a temperatura de 25°C (RT2) deve apresentar valores superiores a 80%.

O resultado obtido no ensaio de dano por umidade induzida foi de 0,82, ou seja, perda de 18%, satisfazendo assim os limites apresentados na normativa.

#### 4.3 ETAPA 3: AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DE VAZIOS PELO AUMENTO DO ESFORÇO DE COMPACTAÇÃO NO CGS

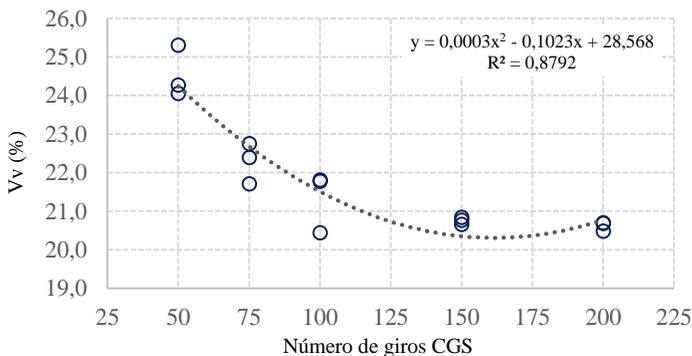
A compactação dos corpos de prova nesta etapa seguiu os procedimentos utilizados na dosagem. Foram compactados 3 corpos de prova par cada número de giros, 50; 75; 100; 150 e 200.

##### 4.3.1 Determinação do volume de vazios e de vazios comunicantes

###### Volume de vazios

A Figura 44 apresenta a distribuição do volume de vazios em função do número de giros utilizados durante a compactação no compactador CGS para cada corpo de prova.

Figura 44. Vv em função do aumento de giros



Fonte: Elaborado pela autora

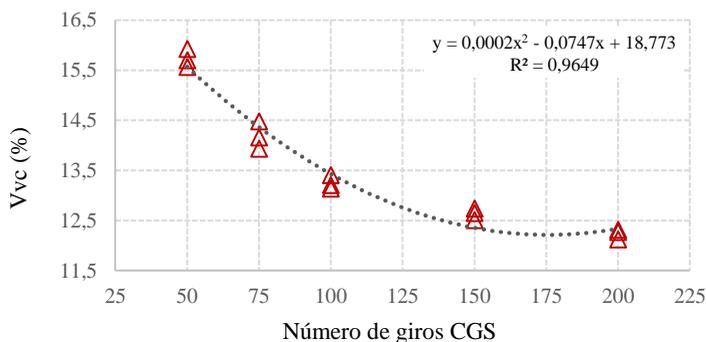
Através da Figura 44 foi possível observar que à medida que o nível de esforço de compactação aumentou, o volume de vazios das misturas diminuiu. No entanto, a tendência destes resultados não se deu de forma linear, possivelmente pelo o arranjo interno da mistura durante a compactação. Neste trabalho, optou-se pela representação dos dados através de equações polinomiais de grau 2. Esta tendência descreve resultados—quando há flutuação entre os dados, caracterizada pela formação de um vale. Para os dados encontrados, o vale correspondeu aos 100 giros, avaliado pela mudança da curvatura de tendência.

A análise a partir da média dos corpos de prova em função do número de giros observou-se ainda que a partir dos 100 giros, os corpos de prova tendem à estabilização dos seus volumes de vazios. Apresentando valores de 21,34%, 20,76% e 20,62%, respectivamente para 100,150 e 200 giros.

### Volume de vazios comunicantes

A redução do volume de vazios comunicantes foi um indicativo de que a permeabilidade foi reduzida, conforme o aumento do esforço de compactação. A Figura 45 apresenta a redução do Vvc obtida com relação ao número de giros submetidos.

Figura 45. Vvc em função do aumento de giros



Fonte: Elaborado pela autora

O valor mínimo de vazios comunicantes, de 12% foi mantido mesmo para o número de giros de 200. Esta é uma constatação importante no respeito às misturas drenantes, considerando, que para compactação pós-tráfego e durante a vida em serviço, a drenagem será mantida em termos de Vvc.

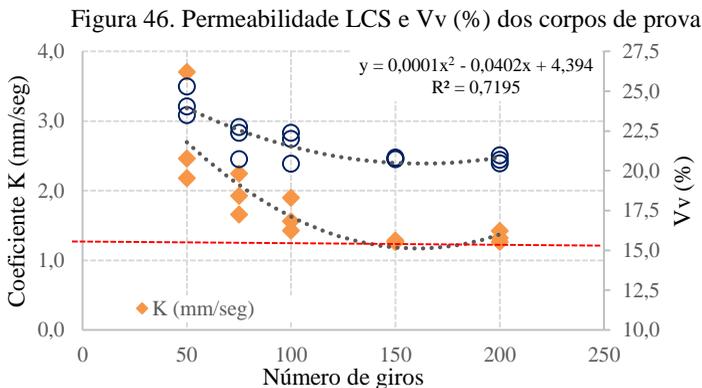
O volume de vazios comunicantes dos corpos de prova, assim

como o de vazios, apresentou redução não linear em função do número de giros. A distribuição dos dados apresenta comportamento polinomial, pois houve flutuação entre os dados. Da mesma forma apresentada pelo volume de vazios, a partir dos 100 giros, os corpos de prova passam a apresentar médias que tenderiam à estabilização. Com valores de 13,25%, 12,63% e 12,23% para os corpos de prova compactados com 100, 150 e 200 giros, respectivamente.

### 4.3.2 Determinação da permeabilidade LCS

O permeâmetro de carga variável LCS é utilizado em laboratório, para verificar a permeabilidade de revestimentos *in situ*. Os dados foram determinados como quesito de veracidade da redução da permeabilidade em corpos de prova compactados à diferente números de giros. Posteriormente, os resultados foram comparados com os obtidos pelo permeâmetro de carga constante desenvolvido para a dissertação.

O NCAT (*National Center of Asphalt Technology*) indica o valor mínimo de permeabilidade de 100 m/dia (0,12 cm/s) para a nova geração de misturas abertas (ALVAREZ *et al.* 2006). De modo a padronizar a apresentação dos resultados de permeabilidade, os dados são apresentados em mm/seg Assim, tem-se que o valor mínimo do NCAT é de 1,20 mm/s. A Figura 46 apresenta os coeficientes de permeabilidade  $k$  (mm/seg) obtidos em função do número de giros, juntamente com os resultados da porcentagem do volume de vazios.

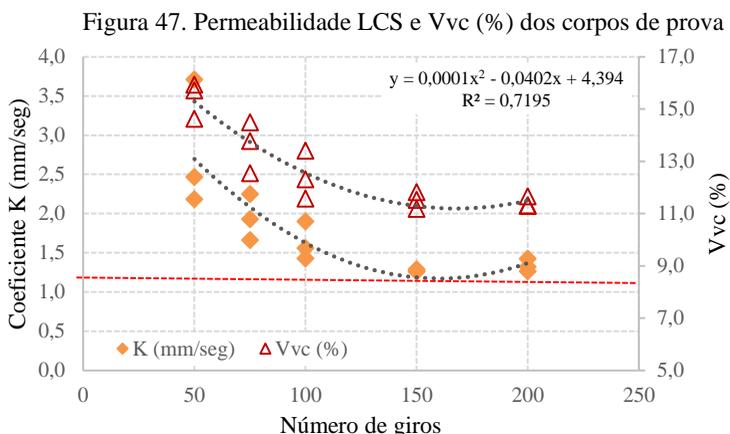


Nota: A equação apresentada e o valor de  $R^2$  correspondem aos dados do coeficiente  $k$ .

Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados obtidos com o permeâmetro LCS demonstraram que, para corpos de prova compactados sob as mesmas condições, com variação apenas no número de giros, a permeabilidade apresenta comportamento semelhante ao volume de vazios, apresentando a mesma forma de curvatura nas análises. Para todos os corpos de prova, o valor mínimo de 1,20 (mm/seg) foi atingido (linha vermelha). Conforme o NCAT, misturas produzidas com estes esforços de compactação ainda poderiam ser utilizadas em campo. A tendência definida para ambos os resultados foi mantida como polinomial de grau 2.

O volume de vazios comunicantes e o coeficiente de permeabilidade dos corpos de prova são apresentados juntos, podendo ser correlacionados com o número de giros na Figura 47.



Nota: A equação apresentada e o valor de  $R^2$  correspondem aos dados do coeficiente  $k$ .

Fonte: Elaborado pela autora

Da mesma forma que o volume de vazios, o volume de vazios comunicantes apresentou comportamento compatível com as permeabilidades obtidas no LCS. A curva do Vvc (%) apresenta a mesma curvatura da apresentada pelo permeâmetro LCS, representando que a diminuição em um ponto, representa a diminuição de sua permeabilidade também.

O volume de vazios comunicantes exerce grande influência na capacidade drenante de uma mistura. Sua determinação apresenta o valor total de poros efetivos presentes no interior da mistura, mas conforme constatado neste estudo, não foi possível estimar qual sua distribuição. Muitas vezes a permeabilidade de uma mistura pode apresentar valores

divergentes aos esperados, devido a esta distribuição interna. Através destes ensaios não é possível determinar o caminho da água em sua percolação através da mistura. Estudos apresentados por Marques (2004), Su *et al.*(2014) e Braz *et al.* (1991) determinaram as características internas das misturas asfálticas drenantes e apresentaram a respeito das variações obtidas nos valores de permeabilidade com relação ao volume de vazios e volume de vazios comunicantes.

Os valores médios da permeabilidade (mm/seg) dos corpos de prova compactados no CGS tenderam à estabilização a partir dos 100 giros, e apresentaram um pequeno aumento nos 150 e 200 giros com a utilização do permeâmetro de carga variável LCS. É importante salientar que a norma ASTM 7064 (2011) apresenta 50 giros como valor para dosagem de misturas drenantes, desta forma, simulando a densificação correspondente a mais de 100 giros, obtida em campo por alto volume de tráfego, a permeabilidade mínima estabelecida pela norma (1,20 mm/seg) é mantida em todos os corpos de prova. A Tabela 7 apresenta valores de  $k$  (mm/seg),  $V_v$  (%) e  $V_{vc}$  (%) de acordo com o aumento do esforço de compactação.

Tabela 7. Valores de  $k$  (mm/seg) pelo aumento no esforço de compactação

<b>Giros</b>	<b>V<sub>v</sub> (%)</b>	<b>V<sub>vc</sub> (%)</b>	<b><math>k</math> (mm/seg)</b>
50	24,29	15,42	2,78
75	21,96	13,60	1,94
100	21,62	12,43	1,63
150	20,79	11,50	1,27
200	20,72	11,42	1,34

Fonte: Elaborado pela autora

#### 4.4 ETAPA 4: PRODUÇÃO DAS PLACAS DRENANTES

A Tabela 8 apresenta os valores de  $V_v$  (%) e de  $V_{vc}$  (%) determinados a partir das placas condicionadas à diferentes ciclos no equipamento de deformação permanente. O simulador de tráfego funciona com aplicação de ciclos simultânea em duas placas. Para que houvesse o perfeito funcionamento da máquina, uma placa de mistura asfáltica drenante foi adicionada em um dos lados apenas para efeito de controle, visto que a outra placa foi ensaiada até cada número de ciclos determinados na metodologia. A placa controle era substituída a cada 10.000 ciclos, para que seu afundamento não comprometesse o

desempenho da placa em análise (mesmo assim, nenhuma atingiu limite máximo de afundamento). Desta forma, além das sete placas solicitadas à diferentes ciclos de deformação permanente e a placa de referência (sem deformação), mais quatro placas foram utilizadas nesta etapa.

A partir da Tabela 8 Foi observado uma variabilidade no volume de vazios e vazios comunicantes das placas, apesar do seguimento dos critérios estabelecidos durante dosagem. Atribui-se esta variabilidade à forma de compactação e arranjo interno da mistura durante o ensaio de deformação permanente, conduzido a 60°C.

Tabela 8. Vv e Vvc das placas drenantes

Nº Placa	Nº de ciclos aplicados	Vv ADP (%)	Vvc ADP (%)
1	0	23,52	14,57
2	1.000	23,41	15,06
3	3.000	23,98	15,40
4	5.000	24,11	15,11
5	10.000	23,30	13,05
6	20.000	24,49	16,29
7	30.000	22,96	13,95

Nota: As iniciais “ADP” nos índices indicam valores obtidos anteriormente ao ensaio de deformação permanente.

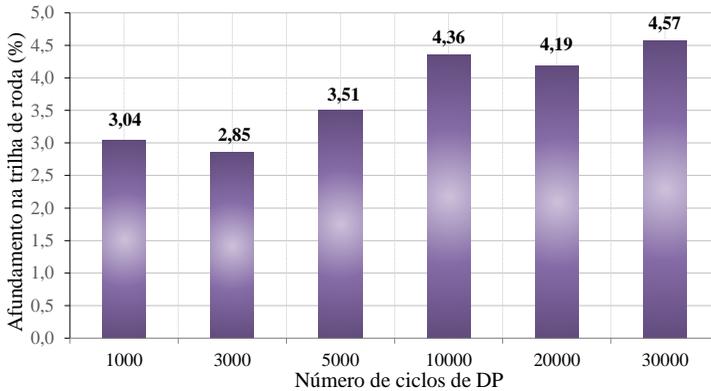
Fonte: Elaborado pela autora

#### 4.4.1 Desempenho das placas drenantes à deformação permanente

Como limite nas análises de desempenho mecânico a porcentagem de afundamento foi definida em função da altura inicial das placas. Segundo o LCPC (2007) este limite de afundamento se dá em 10% e segundo COST 333 (1999), em 5%. Os valores de afundamento são apresentados conforme a placa à que correspondem e ao número de ciclos à que foram solicitados (MELO, 2014).

Em função do número de ciclos determinados para análise, tem-se o afundamento máximo obtido por cada placa. A Figura 48 apresenta os valores de afundamento (%) em cada ciclo solicitado (1.000, 3.000, 5.000, 10.000, 20.000 e 30.000).

Figura 48. Valores máximos de afundamentos em função de deformação permanente



Fonte: Elaborado pela autora

As misturas produzidas apresentaram bom desempenho à deformação permanente, visto que satisfazem as exigências normativas. Os valores observados em todas as placas foram inferiores aos limites máximos de afundamento propostos. A Figura 48 é analisada em conjunto com a Tabela 8. Os valores de afundamento máximo obtidos em cada placa, não apresenta relação direta com seu  $V_v$  e  $V_{vc}$  iniciais. A placa solicitada a 20.000 ciclos, por exemplo, apresenta maior  $V_v$  (24,49%), entretanto não apresentou maior afundamento. É considerável então que o afundamento de cada placa depende de outras variáveis que não somente seu  $V_v$  e  $V_{vc}$ .

Contatou-se que os valores de afundamento máximo nas placas não apresentam tendência em relação ao seu  $V_v$ . Anteriormente aos resultados obtidos, era esperado que se todas as placas apresentassem os mesmos dados volumétricos iniciais, seria provável que apresentassem progressão nos valores de afundamento decorrentes do aumento no número de ciclos. À medida que o número de ciclos fosse aumentado, a deformação também teria aumento.

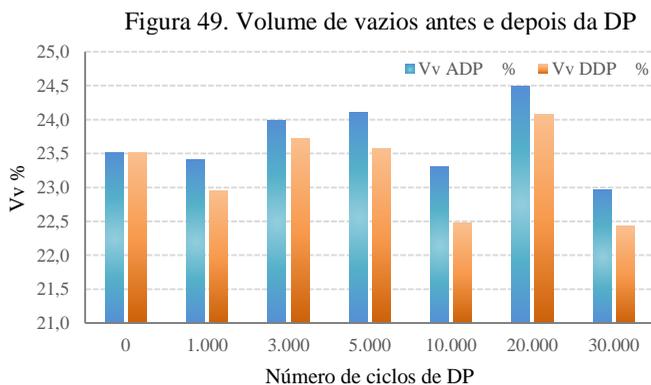
Os dados do afundamento ao longo dos ciclos em cada placa deformada são apresentados no APÊNDICE A.

#### 4.4.2 Determinação do volume de vazios e vazios comunicantes das placas após ciclos de deformação permanente

Após o ensaio de deformação permanente em cada placa, foram

determinadas as porcentagens do volume de vazios e volume de vazios comunicantes. As placas drenantes ensaiadas à diferentes ciclos de deformação permanente não apresentavam  $V_v$  (%) e  $V_{vc}$  (%) iguais, desta forma, apresentaram comportamento distintos quanto ao afundamento.

Em todas as placas ensaiadas, houve redução nos valores de  $V_v$  (%) e  $V_{vc}$  (%) a medida em que o ciclos foram aplicados. A Figura 49 apresenta a variação do  $V_v$  (%) de cada placa antes e após aplicação de ciclos de deformação permanente.



Fonte: Elaborado pela autora

A redução do  $V_v$  (%) e  $V_{vc}$  (%) apresentados não apresenta correlação definida, pois é influenciada por diversas variáveis, inclusive compactação da mistura e distribuição interna dos vazios. Desta forma neste estudo não foi possível estimar a redução destes valores ao longo dos ciclos de deformação permanente de forma a correlacionar esta simulação com ensaios realizados por outros autores. Os valores obtidos neste trabalho correspondem a placas compactadas segundo esta metodologia e  $V_v$  (%) e  $V_{vc}$  (%) com as variações impostas durante dosagem.

#### 4.4.3 Determinação do coeficiente de permeabilidade das placas após ciclos de deformação permanente

A Tabela 9 apresenta os valores médios das quatro leituras do coeficiente de permeabilidade realizada em cada placa após ciclos de deformação permanente, com utilização do permeâmetro LCS.

Tabela 9. Permeabilidade LCS (mm/seg) após DP

Nº Placa	Nº Ciclos Aplicados	$k$ (mm/seg)
1	0	4,97
2	1.000	4,41
3	3.000	6,78
4	5.000	6,15
5	10.000	3,79
6	20.000	5,58
7	30.000	5,80

Fonte: Elaborado pela autora

Os valores de permeabilidade obtidos com o permeâmetro de carga variável (Tabela 9) foram elevados em relação ao limite mínimo recomendado pelo NCAT de 1,20 mm/seg.

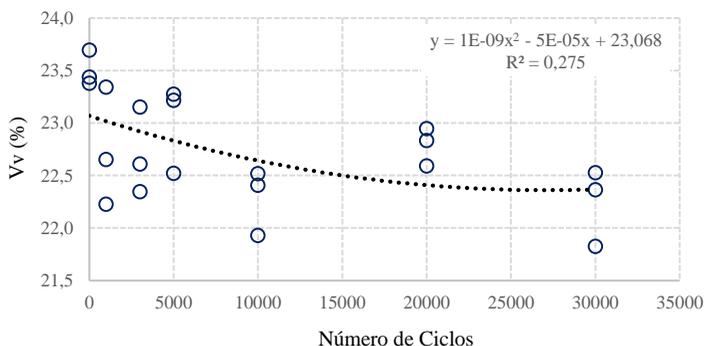
Após a determinação da permeabilidade LCS das placas, de cada uma, foram extraídos três corpos de prova (Etapa 5). Os valores de permeabilidade média dos três corpos de prova extraídos das placas deformadas foi analisado e comparado com o valor da permeabilidade da placa antes da extração na Etapa 6 deste capítulo.

As leituras de permeabilidade das placas desta etapa foram realizadas em quatro (4) pontos ao longo de sua extensão. As leituras da permeabilidade na Etapa 5, foram realizadas em pontos únicos sobre os corpos de prova extraídos. Esta análise em conjunto objetivou a avaliação das diferenças entre as leituras.

#### 4.5 ETAPA 5: EXTRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DAS PLACAS DRENANTES

Após extração dos corpos de prova cilíndricos (100 mm de diâmetro) das placas drenantes, foram realizados ensaios para determinação de  $V_v$  (%) e  $V_{vc}$  (%) e a permeabilidade com permeâmetro LCS (mm/seg). A Figura 50 apresenta o  $V_v$  (%) dos corpos de prova extraídos das placas drenantes.

Figura 50. Variação de Vv em corpos de prova extraídos

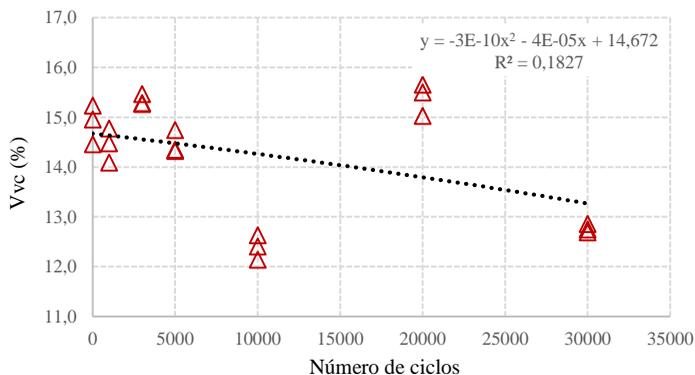


Fonte: Elaborado pela autora

A porcentagem dos volumes de vazios dos corpos de prova apresentou uma distribuição polinomial ao longo do aumento do número de ciclos de deformação permanente. Percebeu-se que mesmo se tratando de misturas submetidas às mesmas condições e solicitações, os corpos de prova apresentam variabilidade em seus valores. A variabilidade dos valores de Vv é observada ao longo dos ciclos e até mesmo em uma mesma placa.

O volume de vazios comunicantes também apresentou variabilidade entre os corpos de prova da mesma placa. A Figura 51 apresenta a distribuição destes valores nos corpos de prova extraídos das placas drenantes.

Figura 51. Variação de Vvc nos corpos de prova extraídos



Fonte: Elaborado pela autora

Mesmo com a variabilidade nos valores de  $V_{vc}$  (%) os corpos de prova, se enquadram nos critérios de dosagem definidos ( $V_{vc} 15 \% \pm 3\%$ ). Os valores de  $V_{vc}$  obtidos apresentaram grande variabilidade, estes resultados já eram esperados uma vez que os valores iniciais das placas não eram idênticos.

A partir destes valores, a sequência metodológica foi mantida e a permeabilidade dos corpos de prova, determinada. O coeficiente de permeabilidade de cada corpo de prova foi determinado com permeâmetro LCS a fim de analisar se a variabilidade destes valores foi transmitida ao  $k$ . Na Etapa 6 os valores do coeficiente de permeabilidade entre as placas após ciclos de deformação permanente e dos corpos de prova após extração são analisados em conjunto. A

Tabela 10 apresenta os valores médios de  $V_v$  (%),  $V_{vc}$  (%) e  $k$  (mm/seg).

Tabela 10. Dados médios dos corpos de prova extraídos das placas

<b>Nº de Ciclos</b>	<b>V<sub>v</sub> (%)</b>	<b>V<sub>vc</sub> (%)</b>	<b>k (mm/seg)</b>
0	23,50	14,88	1,84
1.000	22,74	14,44	1,55
3.000	22,70	15,33	1,52
5.000	23,00	14,47	1,77
10.000	22,28	12,39	1,34
20.000	22,79	15,39	1,72
30.000	22,24	12,76	1,55

Fonte: Elaborado pela autora

Os valores do coeficiente de permeabilidade correspondem a média das quatro leituras realizadas em cada corpo de prova. Os corpos de prova com 0 ciclos, apresentaram maiores valores de  $V_v$ ,  $V_{vc}$  e  $k$ , com 23,50%, 14,88% e 1,84 mm/seg, respectivamente. Entretanto, os corpos de prova com 30.000 ciclos, apresentaram menor  $V_v$  (22,24%), mas valores de  $V_{vc}$  (12,76%) e  $k$  (1,55 mm/seg) superior a outros grupos. Desta forma não é possível afirmar que a variação dos valores do coeficiente de permeabilidade de misturas asfálticas drenantes é relacionado diretamente com seu  $V_v$  (%) e  $V_{vc}$  (%) inicial e nem com o número de ciclos à que foram expostos na máquina de deformação permanente.

#### 4.6 ETAPA 6: DETERMINAÇÃO DAS PERMEABILIDADES

Nesta etapa são apresentados os valores de permeabilidade obtidos

nas Etapas 3 e 5. As permeabilidades, nesta dissertação, são distinguidas entre a utilização do permeâmetro de carga variável LCS e o de carga constante desenvolvido em laboratório.

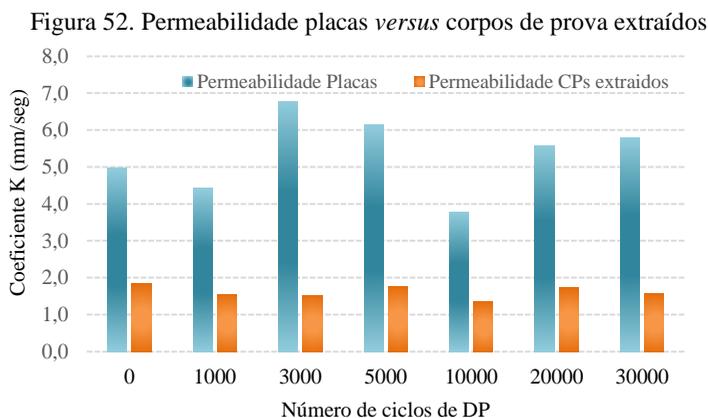
Os valores obtidos com o permeâmetro LCS, não representam integralmente a permeabilidade de misturas drenantes, entretanto foi utilizado como ponto de partida, pois é geralmente utilizado em campo.

#### 4.6.1 Permeabilidades com permeâmetro LCS

Após ensaios de deformação permanente realizados na Etapa 4, o coeficiente de permeabilidade das placas foi determinado. Foram realizadas quatro leituras em cada placa, ao longo da trilha de roda formada durante o ensaio com a utilização do permeâmetro de carga variável LCS. Para que não houvesse perda de água pelas laterais deformadas da placa, uma borracha maleável foi inserida nas bordas do permeâmetro.

A Etapa 5, trata da extração dos corpos de prova das placas ensaiadas quanto à deformação permanente na Etapa 4. Em cada corpo de prova, foram realizadas três leituras com o mesmo permeâmetro e a borracha maleável também foi utilizada para evitar a perda de água pelas laterais deformadas.

A Figura 52 apresenta a diferença entre os valores do coeficiente de permeabilidade obtidos na Etapa 4 e na Etapa 5.



Fonte: Elaborado pela autora

De acordo com resultados apresentados, foi observada a diferença de permeabilidade entre as duas leituras. As permeabilidades obtidas nas placas após ciclos de deformação permanente é superior à apresentada pela média dos corpos de prova, extraídos com sonda rotativa.

Nas placas drenantes, mesmo após aplicação de ciclos de deformação permanente, suas bordas mantiveram vazios expostos, visto que a deformação ocorreu apenas no centro da placa, formando a trilha de rodas. Os corpos de prova, extraídos das placas através da utilização da sonda rotativa, tiveram seus vazios fechados pelo processo de extração, visto o aquecimento do ligante que contribui para sua selagem. Desta forma o fluxo de percolação apresentado nos dois casos é distinto. Nas placas ocorre fluxo tridimensional e nos corpos de prova unidimensional (vertical), assim, as velocidades de escoamento variam e os valores obtidos pelas placas, é superior.

Kolodziej (2016) determinou a permeabilidade de placas drenantes com as mesmas dimensões das utilizadas neste estudo. Da mesma forma, foram realizadas três leituras ao longo da placa e seu valor médio, determinado. Utilizando ligante tipo FLEXPAVE 60/85 e teor de ligante de 6,0%, Kolodziej (2016) obteve coeficiente de permeabilidade  $k$  de 6,5 mm/seg. O valor obtido neste estudo correspondente à placa de referência (zero ciclos) foi de  $k = 4,97$  mm/seg. Mesmo com a utilização do mesmo permeâmetro e mesma curva granulométrica (Guimarães, 2012), os valores apresentam variabilidade que é associada às diferenças no tipo de ligante.

A partir da extração dos corpos de prova das placas drenantes, todos os demais ensaios foram realizados seguindo fluxo unidimensional, através da utilização do permeâmetro de carga constante desenvolvido em laboratório. Mesmo assim, é importante salientar que todos os corpos de prova apresentaram coeficiente de permeabilidade mínimo exigido pela NCAT de 1,20 mm/seg.

#### **4.6.2 Permeabilidades pelo esforço de compactação no CGS**

A partir da definição de  $k$  (mm/seg) inicial, foram iniciadas as simulações dos eventos de chuva em cada corpo de prova no permeâmetro desenvolvido em laboratório (Etapa 6), do Capítulo 3.

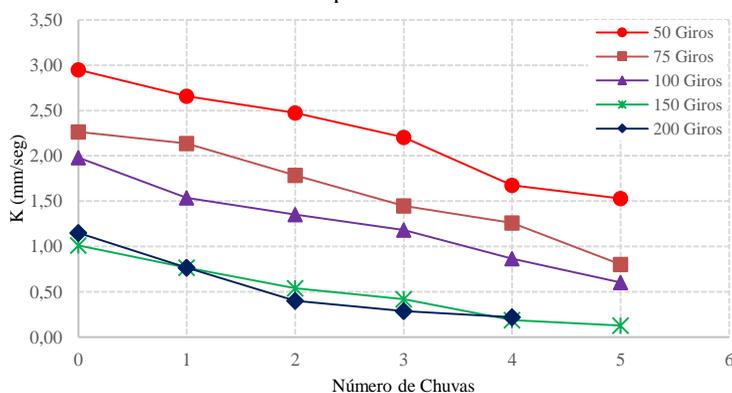
A redução nos valores dos coeficientes de permeabilidade dos corpos de prova foi analisada após cada simulação de evento de chuva. Para análise desta redução os valores obtidos pelos três corpos de prova, de cada número de giros, foram normalizados através dos seus valores médios. Após a normalização, a faixa de incerteza foi obtida,

considerando as variações positivas e negativas de cada valor. A faixa de incerteza admitida para estes resultados apresenta confiabilidade de 68,27%.

A redução detalhada do coeficiente de permeabilidade  $k$  (mm/seg) para cada número de giros, e os valores da faixa de incerteza são apresentados no APÊNDICE B.

Os valores médios desta redução, após processo de normalização, são apresentados na Figura 53. Esta redução é apresentada pelos conjuntos de corpos de prova em função dos eventos de chuva à que foram solicitados.

Figura 53. Redução de  $k$  em função do número de chuvas - Permeâmetro experimental



Fonte: Elaborado pela autora

É observada a redução de  $k$  a medida que o número de giros determinados durante a compactação aumenta. Os corpos de prova compactados no CGS apresentaram porcentagem de  $V_v$  e  $V_{vc}$  variando de acordo com o aumento de giros e desta forma, seu coeficiente de permeabilidade também reduziu nesta tendência. Para este ensaio e estes corpos de prova, é possível associar a permeabilidade com a energia de compactação adotada e com seus valores de  $V_v$  e  $V_{vc}$  iniciais.

Como forma de classificação dos valores iniciais e finais (quando da definição da colmatação) foi utilizada a Tabela 5, adaptada de Rambo (2015). A classificação de Rambo (2015) usada para relacionar o grau de permeabilidade dos solos, foi utilizada neste estudo como parâmetro de classificação da redução de permeabilidade pela colmatação dos vazios. Os valores dos coeficientes de permeabilidade  $k$  (mm/seg) no início dos ensaios (chuva zero) e no final (chuva 4 ou 5) é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11. Classificação de  $k$  (mm/seg) ao longo do número de giros

Nº Giros	$k$ (mm/seg) Inicial	Classificação	$k$ (mm/seg) Final	Classificação
50	2,95	Elevada	1,53	Elevada
75	2,26	Elevada	0,84	Média
100	1,98	Elevada	0,64	Média
150	1,01	Elevada	0,13	Média
200	1,15	Elevada	0,1	Média

Fonte: Elaborado pela autora

Conforme a classificação mostrada na Tabela 11, adaptou-se a redução da permeabilidade ao longo do número de simulações de chuvas que cada conjunto de corpos de prova foi solicitado. Percebe-se que todos os conjuntos de corpos de prova apresentaram elevada permeabilidade quando comparados à classificação dos solos. É importante salientar que a classificação de permeabilidade elevada corresponde às areias grossas e permeabilidade média às areias médias.

#### 4.6.3 Permeabilidades pelos ciclos de deformação permanente

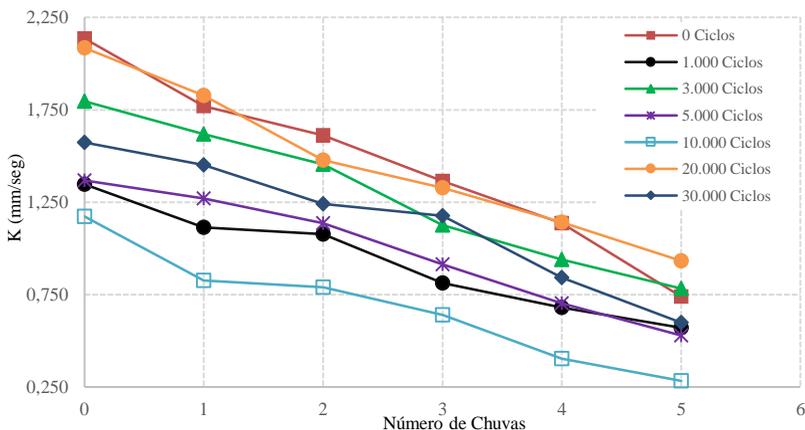
Cada placa foi solicitada a um número diferente de ciclos, desta forma, suas propriedades (porcentagem de  $V_v$  e  $V_{vc}$ ) e conseqüentemente seus coeficientes de permeabilidade não apresentaram redução linear.

Para análise da redução os valores obtidos pelos três corpos de prova, de cada número de ciclos de deformação permanente, foram normalizados através dos seus valores médios. Após a normalização, a faixa de incerteza foi obtida, considerando as variações positivas e negativas de cada valor. A faixa de incerteza admitida para estes resultados apresenta confiabilidade de 68,27%.

A redução detalhada do coeficiente de permeabilidade  $k$  (mm/seg) para cada número de ciclos de deformação permanente, e os valores da faixa de incerteza é apresentada no APÊNDICE C.

Os valores médios desta redução, após processo de normalização, são apresentados na Figura 54. Esta redução é apresentada pelos conjuntos de corpos de prova em função dos eventos de chuva à que foram solicitados. Os valores médios do coeficiente de permeabilidade dos corpos apresentaram variações distintas ao longo da aplicação dos ciclos de deformação permanente.

Figura 54. Redução de  $k$  pelo número de ciclos de deformação permanente – Permeâmetro experimental



Fonte: Elaborado pela autora

Os corpos de prova utilizados como referência, apresentaram valor de  $k$  inicial superiores aos demais, entretanto, sua variabilidade fez com que os corpos de prova com 20.000 ciclos se mostrassem mais estáveis em alguns pontos. Os corpos de prova com menores coeficientes de permeabilidade foram os com 10.000 ciclos, mesmo não apresentando os menores valores de  $V_v$  (21,82%) e  $V_{vc}$  (13,85%).

A partir da Figura 54 entende-se que a permeabilidade pode ser correlacionada com diversos fatores, entretanto sua redução não deve ser determinada somente em função de seu percentual de  $V_v$  e  $V_{vc}$  iniciais.

Os coeficientes de permeabilidade dos corpos de prova extraídos das placas drenantes foram classificados como iniciais e finais. Assim, a simulação de chuva de número zero corresponde ao uso de água limpa e a de número cinco ao corpo de prova colmatado. A Tabela 12 apresenta a classificação do coeficiente de permeabilidade inicial e final para cada conjunto de corpos de prova.

Devido à variabilidade da porcentagem inicial de  $V_v$  e  $V_{vc}$ , os corpos de prova extraídos das placas drenantes não apresentaram redução gradativa. A redução em seus valores é notória e quando comparado com valores de solos, variou da permeabilidade de areia grossa (ou pedregulho) para areia média.

Tabela 12. Classificação de  $k$  (mm/seg) ao longo do número de ciclos de DP

Nº Ciclos	$k$ (mm/seg) Inicial	Classificação	$k$ (mm/seg) Final	Classificação
0	2,14	Elevada	0,74	Média
1.000	1,35	Elevada	0,57	Média
3.000	1,8	Elevada	0,78	Média
5.000	1,37	Elevada	0,53	Média
10.000	1,17	Elevada	0,28	Média
20.000	2,08	Elevada	0,94	Média
30.000	1,58	Elevada	0,6	Média

Fonte: Elaborado pela autora

Dresch (2016) realizou ensaios utilizando misturas tipo CPA e com variação da curva granulométrica e dos teores de ligante modificado tipo 60/85. Para determinação da permeabilidade, um permeâmetro de carga constante foi desenvolvido pelo laboratório LMCC da Universidade Federal de Santa Maria. Como parâmetro de comparação das permeabilidades, foi definido teor de ligante de 4,5% utilizado por Dresch (2016), sendo este o valor mais próximo ao utilizado neste estudo (5,0%).

Para fins de comparação, foram escolhidos os valores dos coeficientes de permeabilidade obtidos ao corpo de prova compactado no CGS com 50 giros e o extraído da placa drenante sem deformação. Estes corpos de prova foram selecionados, uma vez que a permeabilidade foi obtida utilizando água limpa, mesmo procedimento adotado por Dresch (2016).

A Tabela 12 apresenta os valores obtidos por ambos os autores para misturas abertas com a utilização de permeâmetros de carga constante desenvolvidos em laboratório.

Tabela 13. Valores de  $k$  (mm/seg) para misturas abertas

Teor de ligante (%)	Tipo de ligante	Nomenclatura	$k$ (mm/seg)	Classificação
5,0	Borracha	CGS	2,95	Elevada
5,0	Borracha	Placa	2,14	Elevada
4,5	60/85	CPA1	3,32	Elevada
4,5	60/85	CPA2	4,36	Elevada
4,5	60/85	CPA3	2,18	Elevada
4,5	60/85	CPA4 - Cal	4,61	Elevada
4,5	60/85	CPA5 - Cal	5,44	Elevada

Fonte: Elaborado pela autora

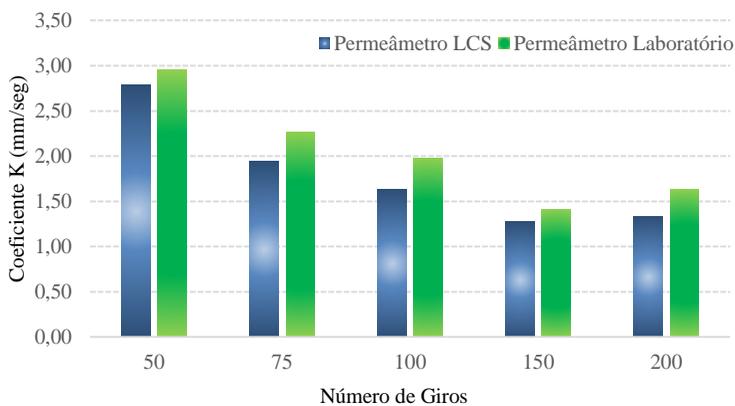
Para todos os corpos de prova em análise a classificação de permeabilidade corresponde às areias grossas e/ou pedregulhos. Estes valores condizem com os desejáveis para misturas abertas vista sua principal funcionalidade, absorver a água da superfície dos revestimentos.

Embora cada permeâmetro tenha sido desenvolvido à diferentes pesquisas, ambos seguem à lei de Darcy de condutividade hidráulica, podendo assim, ser possível a correlação dos obtidos.

#### 4.6.4 Comparação das permeabilidades pelo esforço compactação no CGS

Neste item, foi realizada a comparação das permeabilidades iniciais  $k$  (mm/seg) registradas nos corpos de prova, quando ensaiadas no LCS e ao permeâmetro de carga constante desenvolvido em laboratório. Estes valores representam a média de três leituras com cada permeâmetro (água limpa). A Figura 55 apresenta a diferença entre a permeabilidade média, utilizando cada permeâmetro.

Figura 55. Permeâmetros LCS *versus* desenvolvido em laboratório – corpos de prova CGS



Fonte: Elaborado pela autora

O valor definido como referência para coeficiente de permeabilidade mínima segue o determinado pela NCAT de 1,20 mm/seg. Percebeu-se a diferença nos valores de permeabilidade entre os dois modelos. O permeâmetro de carga variável, por exercer maior pressão inicial de carga de água sobre os corpos de prova, pode ter sofrido perdas de água na superfície, o que resultou em menores valores de  $k$

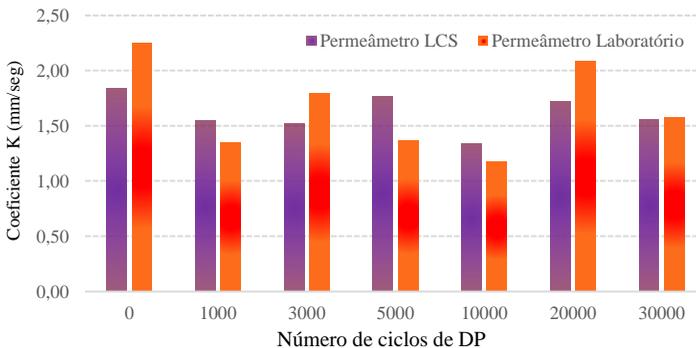
(mm/seg). O nível de água constante sobre os corpos de prova, fez com que a velocidade de percolação variasse. Esta variação pode ter ocorrido devido a distribuição interna dos vazios ser diferente para cada corpo de prova. Em função de não ter havido perdas, pode ter resultado em permeabilidades elevadas.

A variabilidade dos valores obtidos com cada permeâmetro apresentada pela Figura 55 aponta os cuidados na realização dos ensaios. Esta variabilidade deve ser levada em consideração antes da seleção entre os permeâmetros em pesquisas. Os corpos de prova compactados no CGS apresentam redução de  $V_v$ ,  $V_{vc}$  e  $k$  em função do aumento no número de giros, desta forma, seus valores podem ser utilizados como parâmetro de seleção entre os permeâmetros.

#### 4.6.5 Comparação das permeabilidades o corpos de prova extraídos das placas

A Figura 56 apresenta a média das leituras com o permeâmetro de carga variável LCS e do permeâmetro de carga constante desenvolvido em laboratório para os corpos de prova extraídos das placas após ciclos de deformação permanente.

Figura 56. Permeâmetros LCS versus desenvolvido em laboratório – corpos de prova extraídos das placas



Fonte: Elaborado pela autora

Diferente dos valores apresentados pela Figura 55 o coeficiente de permeabilidade obtido com o permeâmetro desenvolvido em laboratório não apresentou os maiores valores em todos os corpos de prova. Mantendo as mesmas considerações realizadas para os corpos de prova compactados no CGS, a variabilidade nos valores da Figura 56,

pode ser associada a distribuição interna dos vazios. Esta afirmação é mantida devido ao fato da água não percolar de maneira idêntica nos ensaios, mesmo sendo realizados nos mesmos corpos de prova e conforme estudos de Marques (2004), Su *et al.* (2014) e Braz *et al.* (1991).

Novamente é salientada que a escolha por determinado permeâmetro pode acarretar variabilidade nos valores obtidos, por isso deve ser realizada de forma criteriosa.

#### **4.6.6 Conclusões sobre as permeabilidades**

A redução das permeabilidades obtidas em função do aumento do esforço de compactação no CGS foi observada nas análises. Este valor pode estar relacionado ao arranjo interno das amostras, que por vezes devido a compactação pode dificultar a percolação da água através dos corpos de prova.

Para os grupos de corpos de prova extraídos das placas drenantes, não é a mantida a tendência de que a permeabilidade reduz em função do aumento dos ciclos. Em alguns pontos, mesmo com porcentagem de  $V_v$  e  $V_{vc}$  inferiores, a permeabilidade obtida é maior. Esta variabilidade nos dados também é fundamentada pelo arranjo interno das amostras, uma vez que nesta dissertação não foi possível determinar o caminho que a água percorre ao entrar e sair do corpo de prova.

A média aritmética dos valores foi definida como a melhor maneira de análise geral da permeabilidade. O coeficiente de permeabilidade de cada corpo de prova foi verificado com o permeâmetro de carga variável LCS e o de carga constante desenvolvido em laboratório. Os valores médios iniciais foram apresentados na Figura 55 e Figura 56. De acordo com estes resultados percebe-se que para os corpos de prova compactados no CGS, o  $k$  (mm/seg) obtido com o permeâmetro de carga constante desenvolvido em laboratório é superior. Os valores dos corpos de prova extraídos das placas não apresentam esta relação. As leituras realizadas com o permeâmetro de carga constante tendem a valores de maior confiabilidade e desta forma são recomendadas para misturas asfálticas drenantes.

Nesta dissertação, a redução da permeabilidade não pode ser definida em função do número de simulações de chuva à que os corpos de prova foram expostos. Cada corpo de prova apresenta variabilidade de valores, de acordo com seus dados iniciais e características únicas da mistura. O entendimento destas variáveis talvez seja aprimorado com a utilização de ensaios não destrutivos como forma de análise interna dos

vazios e o possível caminho percorrido pela água em situações de drenagem.

#### 4.7 ETAPA 7: MOMENTO DE INTERVENÇÃO NO REVESTIMENTO

Os vazios das misturas drenantes necessitam de limpezas periódicas para que suas propriedades sejam mantidas ao longo da sua vida de serviço. A determinação do momento máximo para intervenção no revestimento deve ser calculada para previsão do período em que a manutenção deve ser realizada. A Etapa 7 dos resultados trata do momento de intervenção no revestimento para recuperação parcial da capacidade de drenagem dos revestimentos. A redução da permeabilidade de cada grupo de corpos de prova foi determinada em função da distribuição de seus valores médios e da faixa de incerteza. Verificou-se a tendência exponencial dos dados em todos os casos analisados, desta forma, a redução do coeficiente de permeabilidade  $k$  (mm/seg) em função de  $N$  simulações de eventos de chuva, pode ser definido nesta dissertação conforme a Equação 12.

$$k = a \cdot e^{-bN} \quad 12$$

Onde, o coeficiente  $a$  apresenta valores positivo e o  $b$  negativo. A Tabela 14 apresenta os coeficientes utilizados para cada grupo de corpos de prova. A equação de cada grupo é apresentada, juntamente com a variação de  $V_{vc}$  (%) correspondente ao momento de intervenção no revestimento.

Tabela 14. Coeficientes de redução de permeabilidade

<b>Corpos de prova</b>	<b><math>a</math></b>	<b><math>b</math></b>
50 Giros	3,0786	0,137
75 Giros	2,5136	0,199
100 Giros	2,0386	0,223
150 Giros	1,1594	0,425
200 Giros	1,1013	0,429
0 ciclos - REF	2,2472	0,194
1.000 Ciclos	1,3773	0,173
3.000 Ciclos	1,8967	0,172
5.000 Ciclos	1,515	0,193
10.000 Ciclos	1,2173	0,271
20.000 Ciclos	2,099	0,158
30.000 Ciclos	1,7373	0,186

Fonte: Elaborado pela autora

A partir da equação determinada para cada conjunto de corpos de prova e dos conceitos descritos na metodologia, o momento de intervenção no revestimento foi calculado.

Utilizando o valor de  $k$  aproximado e a função do Excel® “alcançar meta”, é inserida a equação de variação da redução dos coeficientes de permeabilidade e a partir desta variação, definido o valor de  $N$  chuvas necessários para que o índice ( $k$  aproximado) seja atingido.

A partir do valor de  $N$  chuvas necessárias para atingir 12% de  $V_{vc}$ , foram calculadas com relação à precipitação anual determinada (Florianópolis com 1570 mm) o tempo máximo para intervenção no revestimento, em meses. O tempo de intervenção, referido em meses, foi calculado de acordo com os parâmetros adotados e em função do grupo de corpos de prova que correspondem. Assim, obteve-se cinco tempos para os corpos de prova compactados no CGS e sete para os extraídos com sonda rotativa das placas drenantes.

#### **4.7.1 Corpos de prova pelo esforço de compactação no CGS**

Neste item da Etapa 7 é detalhado o momento de intervenção no revestimento dos corpos de prova compactados a diferentes níveis de esforço no CGS. Os valores são apresentados de acordo com o número de giros que receberam na compactação. As leituras correspondem a valores obtidos com o permeâmetro de carga constante desenvolvido em laboratório. As permeabilidades apresentadas são os valores individuais encontrados por corpos de prova, não mais a média de suas leituras. Para utilização na previsão da intervenção no revestimento, são utilizados valores médios de  $k$  e  $V_{vc}$  (%). A representação está apresentada de forma individual em função do número de giros para ressaltar em detalhes, as diferenças encontradas entre os corpos de prova.

- Corpos de prova compactados com 50 giros

A Figura 57 apresenta a distribuição das permeabilidades de cada corpo de prova compactado com 50 giros em função de seus volumes de vazios. A Figura 58 apresenta a variabilidade do coeficiente de permeabilidade em função do  $V_{vc}$  (%) de cada amostra.

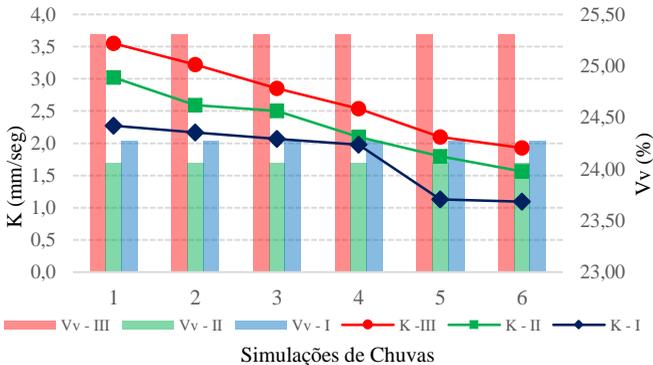
O coeficiente de permeabilidade médio mínimo dos corpos de prova foi de 1,53 mm/seg, e  $V_{vc}$  médio de 15,74%. Desta forma foi definido  $k$  (mm/seg) aproximado quando  $V_{vc}$  atingir 12%.

Para valor de  $k$  aproximado de 1,167 o momento de intervenção no revestimento utilizando a Equação 13 e os coeficientes apresentados na Tabela 14 foi determinado.

$$k = 3,078 \cdot e^{-0,137N}$$

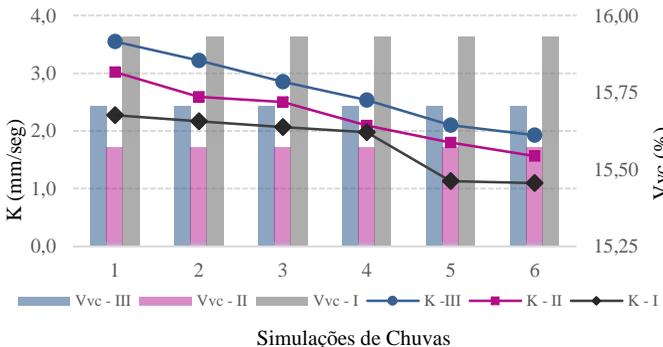
Para recuperação das características drenantes é necessária a intervenção no revestimento com procedimentos de limpeza 14,15 meses após a abertura ao tráfego.

Figura 57. Variação de Vv (%) - 50 giros



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 58. Variação de Vvc (%) - 50 giros



Fonte: Elaborado pela autora

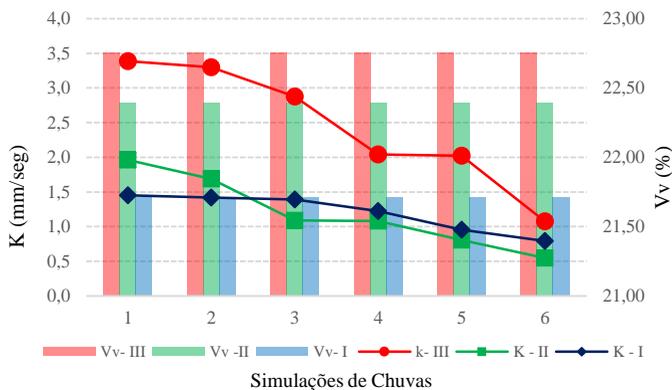
- Corpos de prova compactados com 75 giros

A Figura 59 apresenta a variabilidade das permeabilidades em função de Vv (%). A variação de Vvc (%) em função as permeabilidades obtidas é representada pela Figura 60. A maior porcentagem de Vv (%) não correspondem necessariamente à maior permeabilidade, nem ao maior índice de Vvc (%). O corpo de prova que apresentou menor Vvc

apresentou a maior permeabilidade, podendo corresponder as diferenças no interior das misturas.

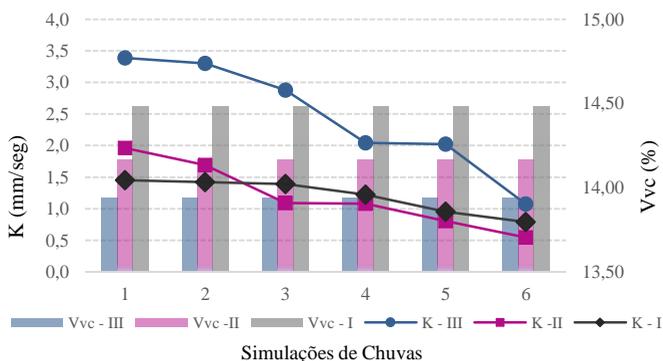
O valor médio de  $V_{vc}$  compactados com 75 giros foi de 14,20%, com coeficiente de permeabilidade mínimo de 0,80 mm/seg. De acordo com estes valores obtêm-se  $k$  aproximado de 0,70 mm/seg para quando o índice de vazios comunicantes atingirem 12%.

Figura 59. Variação de  $V_v$  (%) - 75 giros



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 60. Variação de  $V_{vc}$  (%) - 75 giros



Fonte: Elaborado pela autora

Através da utilização da Equação 14 da redução da permeabilidade e coeficientes da Tabela 14, tem-se que para que a rodovia mantenha suas características drenantes, a intervenção deve ser feita 13,15 meses após abertura ao tráfego.

$$k = 2,513 \cdot e^{-0,199N}$$

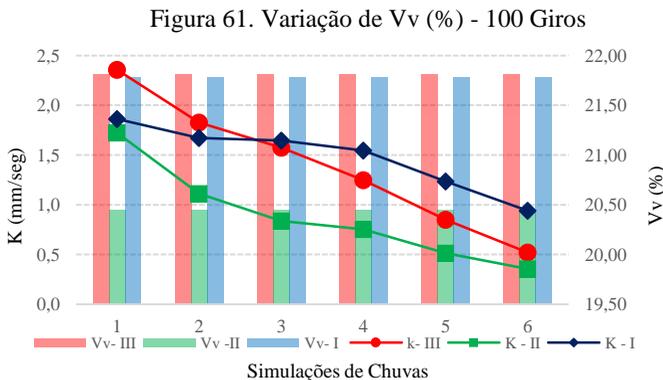
14

- Corpos de prova compactados com 100 giros

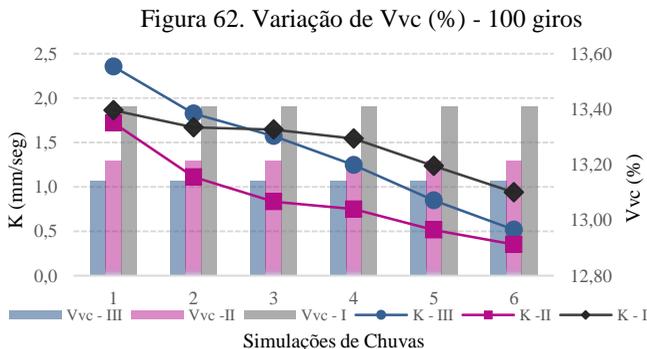
Os corpos de prova compactados com 100 giros apresentam pequena variabilidade entre os dados do volume de vazios já que duas amostras apresentaram resultados praticamente iguais.

Os valores de Vv (%) e das permeabilidades dos corpos de prova é apresentado pela Figura 61.

Os resultados de Vv satisfazem a condição mínima imposta em dosagem. A Figura 62 apresenta a variabilidade do volume de vazios comunicantes em função das permeabilidades. Os valores de maior permeabilidade não corresponderam ao corpo de prova com maior índice de Vvc. O valor médio de volume de vazios comunicantes foi de 13,25 % e o coeficiente de permeabilidade mínimo médio de 0,60 mm/seg em função destes valores, ao atingir 12% de Vvc as amostras apresentam coeficiente de permeabilidade aproximado de 0,50 mm/seg



Fonte: Elaborado pela autora



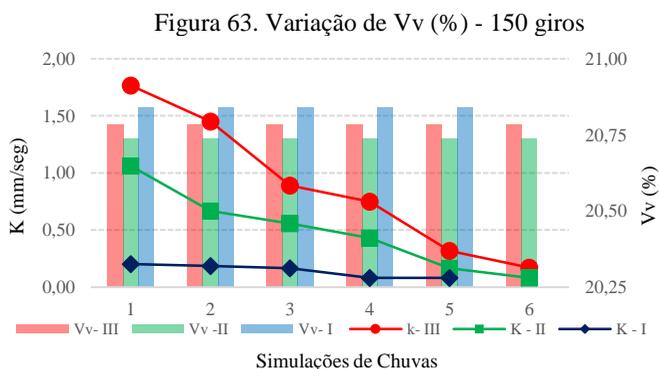
Fonte: Elaborado pela autora

Utilizando a equação da redução da permeabilidade apresentada (Equação 15 e coeficientes da Tabela 14), a intervenção na via deve ocorrer 12,65 meses após a abertura da via ao tráfego.

$$k = 2,0386 \cdot e^{-0,223N}$$

15

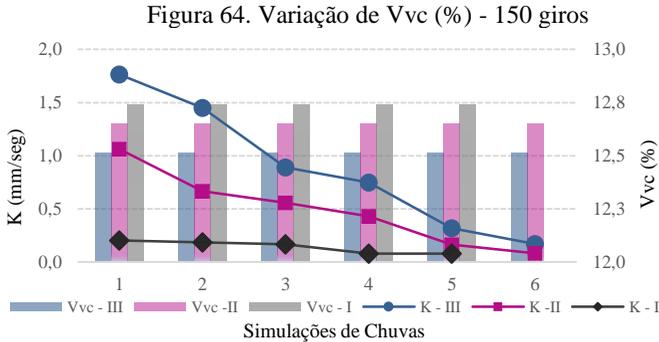
- Corpos de prova compactados com 150 giros  
A Figura 63 apresenta a variação da permeabilidade dos dados em função do volume de vazios comunicantes dos corpos de prova compactados com 150 giros.



Fonte: Elaborado pela autora

O ensaio realizado para o corpo de prova I foi encerrado na 5ª simulação (1275 mm) em função do tempo de duração do ensaio, que foi de 2h30min. Desta forma, os valores médios de Vvc (%) apresentados são

relativos as leituras dos corpos de prova II e III. Os valores de Vvc inicial em função da permeabilidade de cada amostra em cada simulação são apresentados pela Figura 64. O valor médio de Vvc (corpo de prova II e III) calculado foi de 12,58% e o coeficiente de permeabilidade mínimo médio de 0,13 mm/seg.



Fonte: Elaborado pela autora

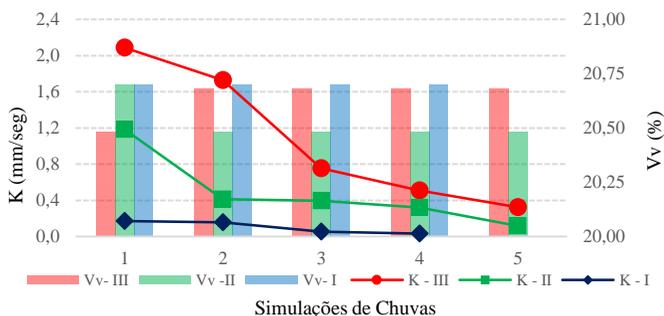
Para atingir Vvc de 12% a mistura com 150 giros deve apresentar K aproximado de 0,121 mm/seg. Utilizando a Equação 16 da redução da permeabilidade e os coeficientes da Tabela 14, a limpeza dos poros da mistura deve ser realizada 10,65 meses após a abertura da via ao tráfego.

$$k = 1,1594 \cdot e^{-0,425N}$$

16

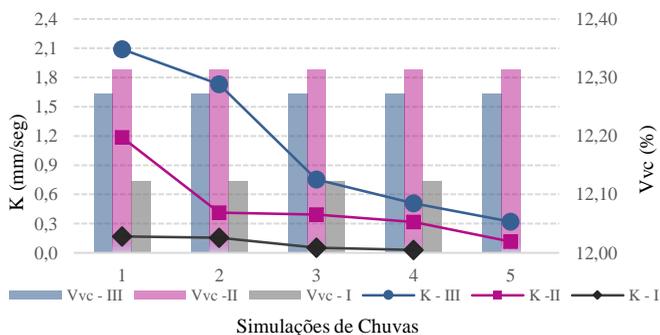
- Corpos de prova compactados com 200 giros  
A distribuição dos índices de vazios das três amostras é apresentado pela Figura 65 juntamente com as permeabilidades encontradas ao longo das simulações de eventos de chuva. A Figura 66 apresenta a variação de Vvc (%) em função das permeabilidades das misturas. Nestes corpos de prova, devido ao alto esforço de compactação, houve menor propensão ao ensaio de permeabilidade. O corpo de prova I foi encerrado na 4ª simulação de chuva e os corpos de prova II e III, na 5ª. O corpo de prova I foi ensaiado pelo tempo 5h18min. As médias apresentadas correspondem aos corpos de prova II e III, pois apresentaram maior resistência a colmatação. O volume de vazios comunicantes médio foi 12,29% e o coeficiente de permeabilidade médio mínimo de 0,22 mm/seg.

Figura 65. Variação de Vv (%) - 200 giros



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 66. Variações de Vvc (%) - 200 giros



Fonte: Elaborado pela autora

Para que os corpos de prova atinjam 12% de Vvc, seu  $k$  aproximado será de 0,215. De acordo com a Equação 17 da redução da permeabilidade e coeficientes da Tabela 14, como o valor de  $k$  aproximado pontual é praticamente igual ao valor das médias, a intervenção na via deve ocorrer 7,60 meses após a abertura ao tráfego para que suas propriedades permeáveis sejam mantidas.

$$k = 1,1013 \cdot e^{-0,429N}$$

17

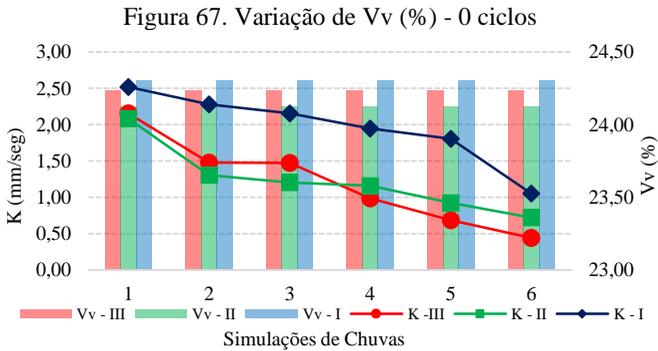
#### 4.7.2 Diferentes ciclos de deformação permanente

Este item apresenta o tempo máximo para que seja feita a intervenção no revestimento a tempo de que as propriedades drenantes sejam mantidas. O tempo para intervenção é determinado em função da

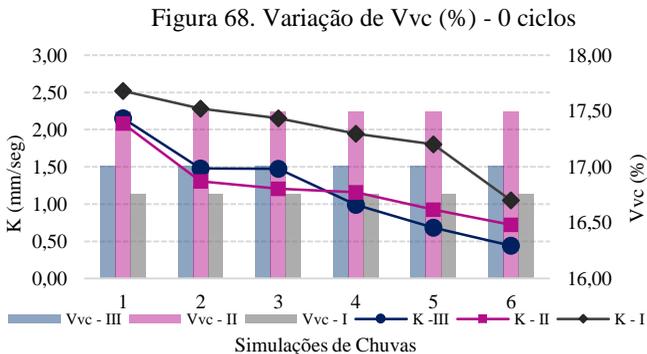
equação de redução da permeabilidade apresentada para cada grupo de corpos de prova utilizando os coeficientes da Tabela 14. Os corpos de prova são apresentados de acordo com o número de ciclos a que foram expostos durante ensaio de deformação permanente.

- Corpos de prova solicitados a 0 ciclos – Referência

A Figura 67 apresenta a variação do Vv (%), em função da permeabilidade obtida ao longo das simulações de eventos de chuva. Os corpos de prova satisfazem a condição inicial de volume de vazios de 20%  $\pm$  2%. A Figura 68 apresenta a variação de Vvc em função das permeabilidades.



Fonte: Elaborado pela autora



Fonte: Elaborado pela autora

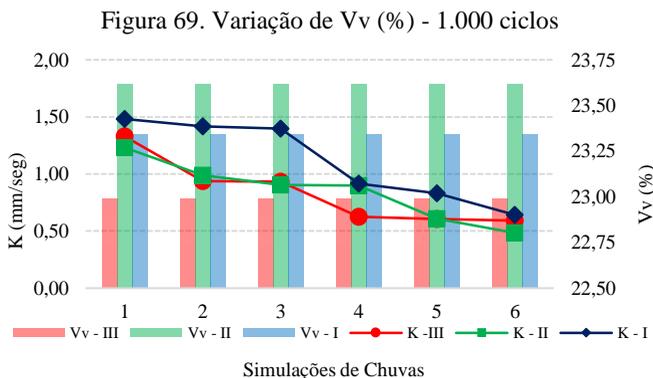
Os corpos de prova sem deformação apresentam alta porcentagem de volume de vazios, desta forma sua intervenção será necessária num intervalo de tempo maior. O valor médio de Vvc foi de

17,1% e o coeficiente de permeabilidade mínimo médio de 0,74%. Para que os corpos de prova atinjam  $V_{vc}$  de 12% é necessário  $k$  aproximado de 0,52 mm/seg. Através da Equação 18 da redução da permeabilidade e coeficientes da Tabela 14, a intervenção na via será necessária 15,10 meses após a abertura ao tráfego.

$$k = 2,2472 \cdot e^{-0,194N} \quad 18$$

- Corpos de prova solicitados a 1.000 ciclos

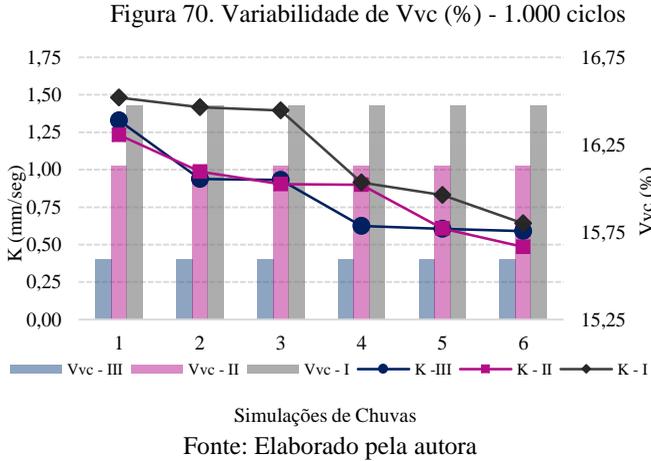
A variabilidade das permeabilidades em função do volume de vazios das mostras é apresentada pela Figura 69. Os valores de  $V_v$  apresentados pelas misturas são altos, o que resulta em altas permeabilidades. A Figura 70 apresenta a variabilidade de  $V_{vc}$  (%) em função dos coeficientes de permeabilidade obtidos.



Fonte: Elaborado pela autora

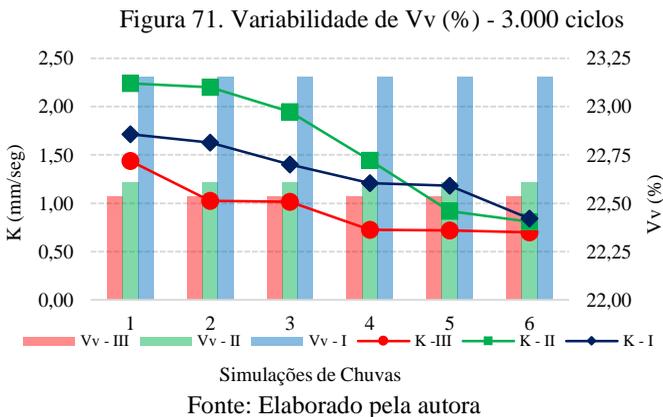
O valor médio de  $V_{vc}$  adotado foi de 16,1% e o coeficiente de permeabilidade mínimo médio de 0,57 mm/seg. Para que as misturas com 1.000 ciclos atinjam  $V_{vc}$  mínimo de 12% o  $k$  aproximado deve ser de 0,43 mm/seg. Através da Equação 19 da redução da permeabilidade obtida e com os coeficientes da Tabela 14, a intervenção na via será necessária 13,50 meses após a abertura ao tráfego.

$$k = 1,3773 \cdot e^{-0,173N} \quad 19$$



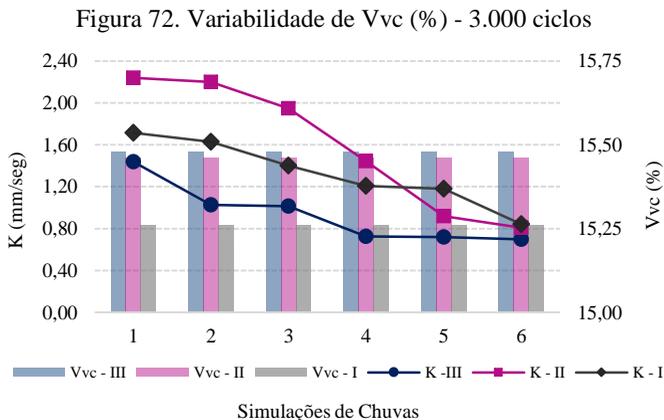
- Corpos de prova solicitados a 3.000 ciclos

O volume de vazios dos corpos de prova expostos a 3.000 apresenta baixa redução em relação ao de referência, assim como sua permeabilidade. A Figura 71 apresenta a variabilidade do Vv (%) das amostras em função da sua permeabilidade.



Os corpos de prova satisfazem a condição inicial de Vv de 20%  $\pm$  2%. Desta forma a variação de Vvc (%) das amostras foi considerada dentro dos limites. A

Figura 72 apresenta a variabilidade em função da permeabilidade encontrada ao longo das simulações de eventos de chuva.



O valor médio de Vvc das amostras foi de 15,40% e o coeficiente de permeabilidade médio mínimo de 0,78 mm/seg. Para que as amostras atinjam Vvc mínimo de 12% é necessário  $k$  aproximado de 0,61 mm/seg.

Em função destes valores e da Equação 20 da redução da permeabilidade com coeficientes da Tabela 14, a intervenção na via se faz necessária 13,20 meses após abertura ao tráfego.

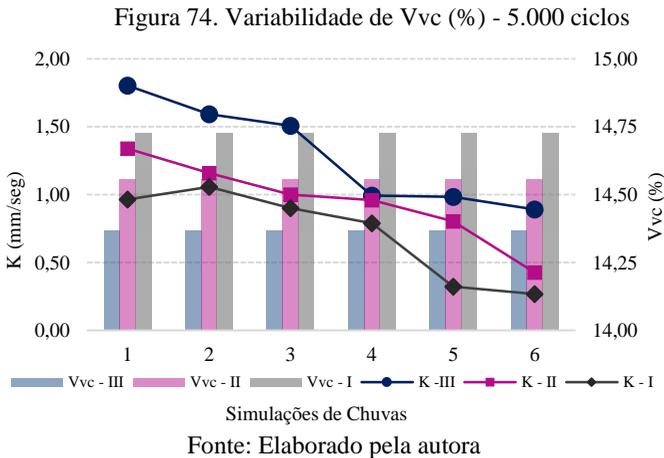
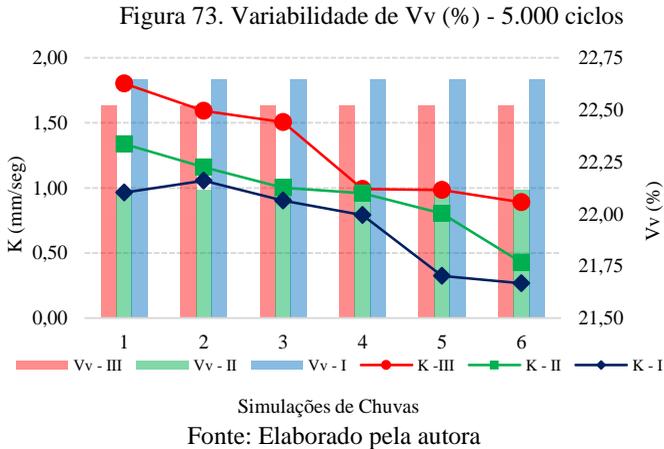
$$k = 1,8967 \cdot e^{-0,172N} \quad 20$$

- Corpos de prova solicitados à 5.000 ciclos

Os corpos de prova expostos a 5.000 simulações de tráfego apresentam permeabilidade inferior às misturas de referência. Houve bastante variabilidade entre seus dados, esta variabilidade é apresentada pela Figura 73, e correlacionada com seus índices de Vv (%). A variabilidade de Vvc (%) em função das permeabilidades é apresentada pela Figura 74.

Os valores de Vvc médio para análise da intervenção foi de 14,55% e o coeficiente de permeabilidade  $k$  de 0,53 mm/seg. Para que as amostras atinjam Vvc mínimo de 12% é necessário  $K$  aproximado de 0,43 mm/seg. Em função destes valores e da Equação 21 da redução da permeabilidade definida com coeficientes da Tabela 14, a intervenção na via se faz necessária 12,90 meses após abertura ao tráfego.

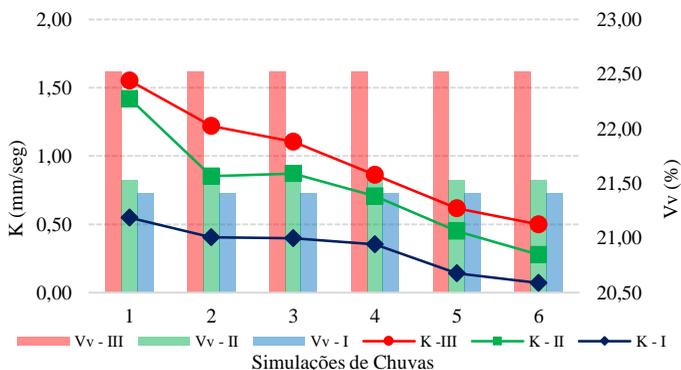
$$k = 1,515 \cdot e^{-0,193N} \quad 21$$



- Corpos de prova solicitados a 10.000 ciclos  
Os dados de permeabilidade dos corpos de prova expostos a 10.000 ciclos apresentam permeabilidade reduzida comparada com a de referência. Os dados e variabilidade da permeabilidade (mm/seg) em função do volume de vazios das amostras são apresentados pela Figura 75.

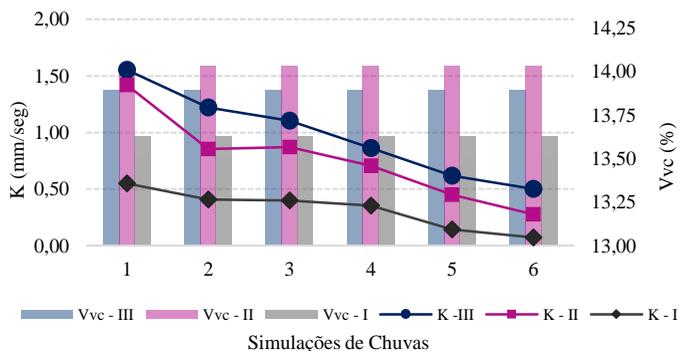
A variabilidade dos dados obtidos é refletida no índice de  $V_{vc}$  (%). A dispersão dos dados em função das permeabilidades é apresentada pela Figura 76. O valor médio de  $V_{vc}$  foi de 13,85% e o coeficiente de permeabilidade de 0,31 mm/seg. Para que a redução de  $V_{vc}$  atinja o mínimo de 12% o  $k$  aproximado deve ser de 0,26 mm/seg.

Figura 75. Variabilidade de Vv (%) - 10.000 ciclos



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 76. Variabilidade de Vvc (%) - 10.000 ciclos



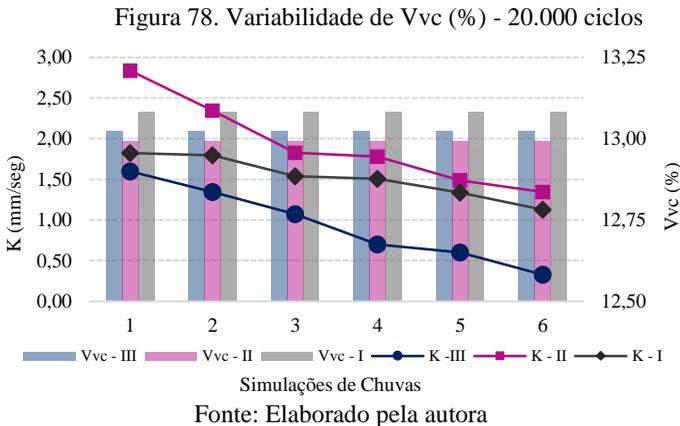
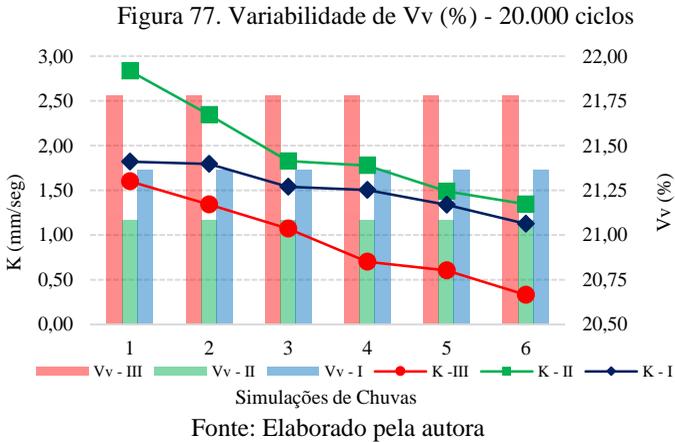
Fonte: Elaborado pela autora

Considerando a Equação 22 da redução da permeabilidade obtida para estes dados, com os coeficientes da Tabela 14 a intervenção na via será necessária 11,20 meses após a abertura ao tráfego.

$$k = 1,2173 \cdot e^{-0,271N}$$

22

- Corpos de prova solicitados a 20.000 ciclos  
A Figura 77 apresenta a variabilidade do volume de vazios das amostras em função de suas permeabilidades. A Figura 78 reflete esta variabilidade com relação ao volume de vazios comunicantes.



Com Vvc médio foi de 13,03% e o coeficiente de permeabilidade de 0,93 mm/seg. Para que Vvc atinja o valor mínimo de intervenção de 12% o  $k$  aproximado deve ser de 0,86 mm/seg. Considerando a Equação 23 da redução da permeabilidade obtida para estes dados com os coeficientes da Tabela 14, a intervenção na via será necessária 11,30 meses após a abertura ao tráfego.

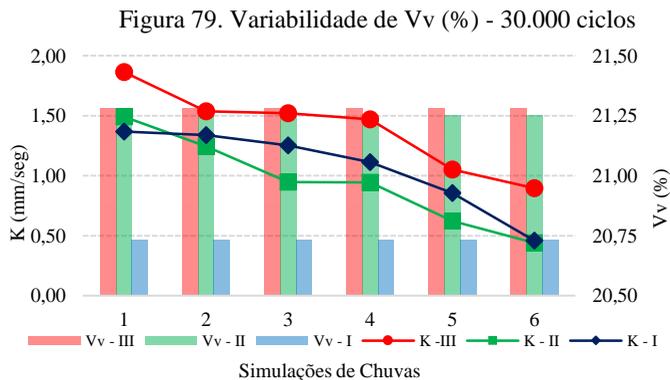
$$k = 2,099 \cdot e^{-0,158N}$$

23

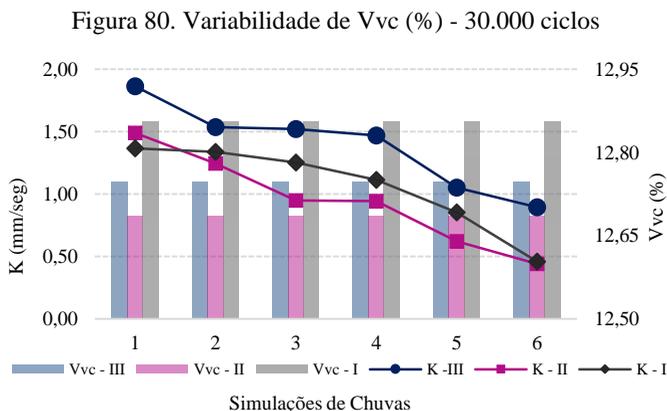
- Corpos de prova solicitados a 30.000 ciclos  
A Figura 79 apresenta a variabilidade do Vc (%) dos corpos de prova em função de sua permeabilidade ao longo dos eventos de chuva.

Os dados satisfazem a condição mínima de  $V_v$   $20\% \pm 2\%$ .

A Figura 80 apresenta a variabilidade dos resultados com relação sua permeabilidade.



Fonte: Elaborado pela autora



Fonte: Elaborado pela autora

O valor médio de  $V_{vc}$  foi de 12,76 % e o coeficiente de permeabilidade de 0,60 mm/seg. Para que a redução de  $V_{vc}$  atinja o valor determinado para intervenção  $V_{vc}$  de 12% o  $k$  aproximado deve ser de 0,56 mm/seg.

Considerando Equação 24 da redução da permeabilidade obtida para estes dados com coeficientes da Tabela 14 a intervenção na via será necessária 12,10 meses após a abertura ao tráfego.

$$k = 1,737 \cdot e^{-0,186N}$$

A Tabela 15 apresenta resumidamente os valores apresentados na Etapa 7, deste Capítulo de acordo com os corpos de prova. O valor de  $k$  aproximado é definido de acordo com  $V_{vc}$  de 12%. Os valores de  $N$  chuvas, representam o número de simulações de eventos de chuva necessários para que este  $k$  aproximado seja atingido. O tempo máximo para intervenção no revestimento é apresentado em meses. A limpeza dos vazios do revestimento nesta intervenção deve ser realizada com equipamentos apropriados.

Tabela 15. Valores para intervenção no revestimento

Corpos de prova	$k$ aproximado (mm/seg)	N chuvas	Tempo para intervenção (meses)
50 Giros	1,17	7,08	14,16
75 Giros	0,68	6,57	13,15
100 Giros	0,50	6,32	12,64
150 Giros	0,12	5,33	10,66
200 Giros	0,21	3,80	7,60
0 ciclos - REF	0,52	7,55	15,10
1.000 Ciclos	0,43	6,77	13,53
3.000 Ciclos	0,61	6,58	13,17
5.000 Ciclos	0,44	6,45	12,90
10.000 Ciclos	0,27	5,61	11,23
20.000 Ciclos	0,86	5,65	11,30
30.000 Ciclos	0,56	6,06	12,11

Fonte: Elaborado pela autora

Conforme valores apresentados na tabela, é observado que os corpos de prova definidos como referência, (50 giros e 0 ciclos) apresentam maior intervalo de tempo desde a abertura ao tráfego até a primeira intervenção. Estes valores correspondem a rodovia logo após sua implantação.

À medida que o número de giros aplicados no CGS foi aumentado, o tempo necessário para intervenção, diminuiu. Este fato corresponde à maior compactação dos corpos de prova e provável distribuição interna dos agregados, de forma que a percolação da água esteja dificultada. Os 200 giros definidos no CGS correspondem ao nível de compactação de rodovias de alto tráfego, desta forma, para este tipo de revestimento, a primeira intervenção deve ser realizada no máximo em 7,60 meses. Para

rodovias com baixo a médio volume de tráfego e que correspondem aos corpos de compactados no CGS com 50 giros, o tempo necessário para a primeira intervenção pode ser de até 14,16 meses.

Os corpos de prova extraídos das placas são correlacionados com as deformações ocasionadas pelo tráfego em campo, em função do seu número de ciclos. Considerando os critérios definidos na dosagem, o tempo máximo para a primeira intervenção nestes corpos de prova é em média de 12 meses. De acordo com estas relações, um revestimento com  $V_v$  médio inicial de 21,08% e  $V_{vc}$  médio de 12,76%, quando exposto a 30.000 ciclos de deformação permanente, apresentou tempo máximo para intervenção de 12,11 meses após abertura ao tráfego.

Foi determinado que o tempo de intervenção máximo para cada corpo de prova pode ser definido em função da sua permeabilidade. Estes valores, no entanto são relacionados diretamente com seu  $V_v$  e  $V_{vc}$  iniciais, mas podem variar de acordo com a estrutura interna de cada mistura.

Como conclusão, as seguintes considerações se fazem necessárias:

- Os ensaios de laboratório realizados neste estudo mostra que a limpeza dos vazios de revestimentos drenantes deve ser realizada anualmente;
- Estes ensaios foram realizados de maneira acelerada com grande quantidade de material colmatador;
- Quando realizado em campo, na prática, a colmatção pode ocorrer de maneira mais lenta, devido à presença de agentes adversos, como o vento, o poder de sucção realizado por veículos sobre o revestimento e a intensidade das chuvas, que por vezes, pode contribuir para limpeza da superfície.



## CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos objetivos propostos nesta dissertação, foram realizados ensaios laboratoriais e desenvolvidas metodologias de análise.

Para tanto, quinze corpos de prova foram compactados no compactador CGS em cinco níveis de esforço (50, 75, 100, 150 e 200 giros). E sete placas de misturas asfálticas drenantes compactadas na mesa compactadora IFSTTAR e seis solicitadas a diferentes ciclos de deformação permanente (DP) (1.000, 3.000, 5.000, 10.000, 20.000 e 30.000 ciclos), uma placa sem deformação foi utilizada como referência. De cada placa de misturas asfálticas drenantes foram extraídos três (3) corpos de prova de 100 mm de diâmetro.

### Considerações sobre o volume de vazios e vazios comunicantes dos corpos de prova

Os corpos de prova compactados no CGS apresentaram redução da porcentagem de  $V_v$  e  $V_{vc}$  à medida em que o esforço de compactação aumentou. Devido aos valores, a estabilização de valores escolhida para representação desta redução foi polinomial. A partir de 100 giros, os valores médios de  $V_v$  e  $V_{vc}$  tendem a estabilização, sugerindo que em maiores níveis de compactação seus valores podem apresentar pequenas variações. O  $V_v$  destes corpos de prova apresentou 21,34%, 20,76% e 20,62% para 100, 150 e 200 giros, respectivamente, enquanto para os mesmo número de giros, o  $V_{vc}$  é de 13,25%, 13,63% e 12,23%, respectivamente.

As placas de misturas asfálticas drenantes, apresentaram variabilidade no valor inicial de  $V_v$  e  $V_{vc}$ . O processo de compactação e os limites determinados foram definidos durante dosagem. Após a compactação, as placas foram expostas a diferentes ciclos de deformação permanente. Foi realizada a análise de  $V_v$  e  $V_{vc}$  das placas antes e depois da sua exposição à estes ciclos e também após a extração dos três corpos de prova por placa. Devido a variabilidade inicial de  $V_v$  e  $V_{vc}$  e dos ciclos, os valores da redução obtida nas placas e nos corpos de prova extraídos não apresentou tendência como os corpos de prova compactados no CGS. Supondo que estes valores fossem idênticos, era esperado na medida em que o número de ciclos aumentasse, as placas apresentassem redução de  $V_v$  e  $V_{vc}$  e conseqüentemente de  $k$ .

Mesmo com as mesmas condições de compactação e extração, os corpos de prova apresentaram variabilidade de valores dentro de uma

mesma placa, fato que pode ser associado a distribuição interna dos seus vazios.

#### Considerações sobre a resistência das placas a deformação permanente

Seis placas foram expostas a diferentes ciclos no simulador de tráfego francês, para que sua resistência a deformação permanente fosse verificada. Todas as placas apresentaram boa resistência a deformação permanente e nenhum dos valores, das normas europeia e americana, foi excedido. Devido a variabilidade de  $V_v$  e  $V_{vc}$  de cada placa, as deformações não apresentaram tendência em seus valores de afundamento máximo. A placa que foi exposta a 20.000 ciclos, por exemplo, apresentou afundamento máximo de 4,19%, enquanto a placa com 10.000 ciclos obteve afundamento máximo de 4,36%. Esta variabilidade nos valores não comprometeu os demais resultados, pois cada grupo de corpos de prova seja analisado de forma independente.

#### Considerações sobre a metodologia de análise da permeabilidade dos corpos de prova em laboratório

Como referência de valores de permeabilidade, foi utilizado o permeâmetro de carga variável LCS. Este tipo de permeâmetro é utilizado para leituras de permeabilidade *in situ*. Nesta dissertação, os valores obtidos com este permeâmetro foram utilizados em comparação com os obtidos com o permeâmetro de carga constante desenvolvido em laboratório. Os valores de permeabilidade são apresentados por seu coeficiente de permeabilidade  $k$  (mm/seg).

Decorrida a análise de permeabilidade das placas expostas a ciclos de deformação permanente, seus valores foram correlacionados com os obtidos pelos corpos de prova extraídos destas. O coeficiente de permeabilidade obtido nas placas de misturas asfálticas drenantes, foi superior ao obtidos por seus corpos de prova. Por exemplo, o valor de  $k$  nos corpos de prova com 5.000 ciclos foi 1/5 do valor da placa (1,52 mm/seg e 6,75 mm/seg, respectivamente). Esta variabilidade é associada ao fato das placas apresentarem maior área de abrangência horizontal. Desta forma, a água infiltrada na superfície, pode percolar horizontal e verticalmente com maior facilidade e assim, escoar mais rapidamente. Após a utilização da sonda rotativa, as laterais dos corpos de prova tiveram seus vazios expostos reduzidos, desta forma, a área para percolação de água horizontalmente foi reduzida.

Os coeficientes de permeabilidade iniciais médios dos corpos de prova compactados no CGS foram correlacionados de acordo com a

utilização dos dois permeâmetros. Os valores obtidos com o permeâmetro de carga constante apresentam maior confiabilidade e valores em média 30% superiores. A diferença entre estes resultados é atribuída a parcela de água que escoou sobre a superfície do corpo de prova no LCS, resultando em valores de coeficiente de permeabilidade inferiores.

Nos corpos de prova extraídos das placas drenantes, os valores do coeficiente de permeabilidade obtidos com o permeâmetro desenvolvido em laboratório nem sempre apresentam os maiores valores. A maior variabilidade entre os coeficientes de permeabilidade foi dos corpos de prova sem deformação, onde  $k$  com o permeâmetro experimental foi de 2,25 mm/seg e com o LCS de 1,84 mm/seg, variação de aproximadamente 20% entre os valores.

Com relação aos valores apresentados o permeâmetro LCS por vezes pode induzir a valores superiores de  $k$ , mesmo não drenando toda a água. Desta forma, em laboratório, para misturas asfálticas drenantes, é aconselhável que quando possível sejam utilizados permeâmetros de carga constante. De qualquer forma, a escolha entre estes tipos de permeâmetro seja realizada de forma criteriosa.

Utilizando o permeâmetro de carga constante desenvolvido em laboratório, foram realizadas seis (6) simulações de eventos de chuva sobre cada corpo de prova. Cada evento de chuva correspondeu a 255 mm pluviométricos. A primeira determinação foi realizada com água limpa, posteriormente, mais cinco simulações foram realizadas com água de *runoff*. É comprovada a redução de permeabilidade a medida em que os eventos de chuva foram realizados. Cada corpo de prova apresenta uma distribuição entre seus coeficientes de  $k$  e assim, uma equação de redução.

#### Considerações sobre a redução da permeabilidade dos corpos de prova

O tempo de percolação dos 255 mm em cada corpo de prova foi variável em função da distribuição interna dos corpos de prova.

A análise da redução da permeabilidade de cada conjunto de corpo de prova foi definida estatisticamente, através da faixa de incerteza e análise de dados experimentais. A faixa de incerteza, foi atribuída aos valores médios de  $k$  em cada corpo de prova e sua variação, representa a faixa de permeabilidade. Através da faixa de permeabilidade de cada corpo de prova, e da tendência linear dos valores, após normalização, foi definida a equação da redução de  $k$  de cada corpo de prova. Os coeficientes utilizados nas equações de redução são apresentados na Etapa 7, do capítulo 4.

Através da utilização destes coeficientes é possível determinar a permeabilidade mínima do revestimento quando este atingir  $V_v$  de 12%, considerado na dissertação como valor de colmatção.

### Considerações sobre a recuperação da capacidade drenantes de misturas asfálticas drenantes

A equação da redução de permeabilidade obtida para cada conjunto de corpos de prova foi determinante para definição do momento de intervenção no revestimento. Esta intervenção deve ser realizada para que as características drenantes das misturas asfálticas drenantes sejam mantidas.

A partir dos critérios de dosagem, com  $V_{vc}$  mínimo de 12%, foi feita a progressão de  $k$  até que este valor fosse atingido. O valor de  $k$  aproximado para este  $V_{vc}$  foi então relacionados com a precipitação a que os corpos de prova foram expostos (média anual de Florianópolis).

O tempo para esta intervenção foi apresentado em meses após liberação do revestimento ao tráfego de projeto. A redução da permeabilidade nos corpos de prova compactados no CGS é proporcional ao aumento de giros. Desta forma, as misturas asfálticas drenantes com 50 giros são capazes de permanecerem 14,15 meses sem que uma intervenção de limpeza seja necessária. Misturas asfálticas drenantes compactadas com 200 giros, entretanto, apresentam tempo máximo para intervenção de 7,6 meses. Este tempo é variável em função de valores de  $V_v$ ,  $V_{vc}$  e  $k$  iniciais de cada corpo de prova e por isso, as correlações futuras devem levar em consideração estes valores.

## 5.1 SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para o seguimento deste estudo propõe-se:

- Avaliar através da análise bi linear os resultados a partir de 100 giros de compactação, objetivando estipular tendência de resultados.
- Analisar internamente, através de ensaios não destrutivos, a distribuição dos vazios de misturas asfálticas drenantes. Assim, poder-se-á de uma forma mais eficaz correlacionar resultados de permeabilidade com os caminhos percorridos pela água;
- Avaliar a distribuição interna dos vazios, com ensaios não destrutivos em misturas asfálticas drenantes compactadas com diferente esforço de compactação;

- Realizar simulações com eventos de chuva natural, através de simuladores de chuva e correlacionar com a água de *runoff* produzida em laboratório;
- Analisar a variação no volume de vazios e vazios comunicantes ao longo do ensaio de deformação permanente, com a mesma placa, correlacionando seu afundamento com os dados iniciais, para possível estimativa de redução;
- Monitorar a execução de um trecho experimental de mistura drenante e sua colmatação ao longo do tempo, vista à influência do tráfego.



## REFERÊNCIAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation. **AASHTO M 323: Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design**. Test standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing. Washington, D. C., 2013.

\_\_\_\_. **AASHTO T 209: Standard method of test for theoretical maximum specific gravity ( $G_{mm}$ ) and density of Hot-Mix Asphalt (HMA)**. Test standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing. Washington, D. C., 2012.

\_\_\_\_. **AASHTO T 283 – Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage**. Test standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing. Washington, D. C., 2011.

ACIOLI, Laura Albuquerque. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

AFNOR – Association Française de Normalisation. **AFNOR NF P 98-250-2 – Essais Relatifs Aux Chaussées, Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 2: Compactage des Plaques**. AFNOR, 1991.

\_\_\_\_. **NF P 98-253-1 – Essais Relatifs Aux Chaussées, Déformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés**. AFNOR, 1993. 1989.

\_\_\_\_. **NF P 98-254-2 – Mesure de propriétés liées à la perméabilité des matériaux des mélanges hydrocarbonés, partie 2**. AFNOR, 1993.

ALESSI, F; KOKOT, P. J. e GOMES, J. Comparação do escoamento superficial gerado por pavimentos permeáveis em blocos de concreto e asfalto poroso. **da Vinci**, v, 3, n. 1, p 139-156. 2006.

AL-SWAILM, Saleh H. **Development of a Test Procedure for Water**

**Sensitivity of Asphalt Concrete Mixtures.** Final report, Doctor of Philosophy, Oregon State University. 1992.

ALVAREZ, A.E. *et al.* - **Synthesis of Current Practice on the Design, Construction, and Maintenance of Porous Friction Courses.** FHWA/TX-06/0-5262-1. Texas Transportation Institute. Austin, Texas, 2006.

ARRES, Francisco Dirceu Duarte. **Modelagem bidimensional do movimento da água em condições de solo não saturado.** Tese (doutorado) - Universidade de São Paulo. Piracicaba. 2014

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR – 5564: Via Férrea - Lastro - Padrão.** Rio de Janeiro. 2011.

\_\_\_\_. **NBR – 13292: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante.** Rio de Janeiro. 1995.

\_\_\_\_. **NBR – 14545: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável.** Rio de Janeiro. 2000.

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

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM – D 7064: Standard Practice for Open-Graded Friction Course (OGFC) Mix Design.** USA. 2013.

\_\_\_\_. **ASTM E – 1411: Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging.** USA. 2016.

ASTRANA JÚNIOR, Cândido A.L. **Estudo da absorção sonora e permeabilidade em concretos asfáltico drenantes.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis, S.C., 138p. 2006.

BERNUCCI, Leidi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2008.501 p.

BORGES, Rômulo Luiz. **Deformação permanente em misturas asfálticas a partir do *Shift Model* viscoplástico e ensaios triaxiais de carga repetida**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós – Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2014.

BRAZ, D. *et al.* Analysis of the percentage voids of test and field specimens using computerized tomography. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, v, 422, p 942-948. 1999.

BS - British Standards. **BS EN 12697-1: Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Soluble binder content**. England. 2012.

\_\_\_\_. **BS EN 13108-7: Bituminous mixtures. Material specifications. Porous Asphalt**. England. 2006.

CALTRANS - California Department of Transportation. **Open Graded Friction Course Usage Guide**. Division of Engineering Services Materials Engineering and Testing Services. Sacramento, California. EUA, 2006.

CARDOSO, E. R., **Estudo da Distribuição de Vazios em Misturas Asfálticas de Alto Desempenho do tipo SMA utilizando Tomografia Computadorizada**. Dissertação (Mestrado), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2004.

CASTRO, L. R.. **Mezclas drenantes**. In: 13º Congreso Ibero Americano del. Asfalto, São José, Costa Rica. 2005.

CONTROLS. **SHRP Method / Superpave System**. Disponível em: <[http://www.controls-group.com/backend/technology\\_comm/file\\_tmp/140505163271\\_shrp\\_method\\_superpave\\_system.pdf](http://www.controls-group.com/backend/technology_comm/file_tmp/140505163271_shrp_method_superpave_system.pdf)>. Acesso em: 13 Abril 2017.

COOLEY, L. A. JR *et al.* **Issues Pertaining to the Permeability Characteristics of Coarse-Graded Superpave Mixes**. Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT. 2009.

COST 333. **Development of New Bituminous Pavement Design Method: Final Report of the Action**. European Cooperation in the field

of Scientific and Technical Research. European Commission Directorate General Transport. Belgium. 1999.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ES 386: Pavimentação – pré – misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito.** Especificação de Serviço. Rio de Janeiro. 1999.

\_\_\_\_. **DNER – PRO 199: Redução de amostra de campo de agregado para ensaio de laboratório.** Procedimento. Rio de Janeiro. 1996.

\_\_\_\_. **DNER – ME 043: Misturas betuminosas a quente –ensaio Marshall.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 1995.

\_\_\_\_. **DNER – ME 117: Misturas betuminosas a quente – determinação da densidade aparente.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 1994.

\_\_\_\_. **DNER – ME 083: Agregados – análise granulométrica.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 1998.

\_\_\_\_. **DNER – ME 081: Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 1998.

\_\_\_\_. **DNER – ME 084: Agregados miúdo – determinação da densidade real.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 1994.

\_\_\_\_. **DNER – ME 383: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cantabro.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 1999.

\_\_\_\_. **DNER – PRO 120: Coleta de amostras de agregados.** Procedimento. Rio de Janeiro. 1997.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-111: Pavimentação flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de material.** Especificação de Material. Rio de Janeiro. 2009.

DRESCH, Fernanda. **Comportamento de Misturas Asfálticas Drenantes Tipo Camada Porosa de Atrito (CPA)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. 165p 2016.

EMPA - Swiss Federal Laboratory for Materials Testing and Research. **Mechanical Properties of Porous Asphalt, Recommendations for Standardization**. Propriétés mécaniques des asphaltes poreux, recommandations pour la normalisation. Suiça. 2006.

EPAGRI. **Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – Base de dados da pesquisa agropecuária**. Disponível em:<[http://www.ciram.epagri.sc.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=98&Itemid=285](http://www.ciram.epagri.sc.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=98&Itemid=285)>. Acesso em: 24 abril 2017.

FAGHRI, Mohammad. *et al.* **Performance Improvement of Open-Graded Asphalt Mixes**. Mechanical Engineering & Applied Mechanics Department. University of Rhode Island. EUA, 43p. 2002.

FWA, T. F. *et al.* **Comparison of Permeability and Clogging Characteristics of Porous Asphalt and Pervious Concrete Pavement Materials**. Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore. Singapore, 2014.

GARDETE, Dinis Correia. **Comparação de Ensaio Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Coimbra, 2006.

GUIMARÃES, Jose Marcos Faccin. **Concreto Asfáltico Drenante em Asfaltos modificados por polímero SBS e borracha moída de pneus**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação PPGEC-UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

HENDERSON, V. **Pervious Concrete Pavement Performance in Field Applications and Laboratory Testing**. University of Waterloo, Ontario, Canadá.2010.

JIANG, Wei. *et al.* Experimental study on filtration effect and mechanism of pavement runoff in permeable asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v, 100, p 102-110. 2015.

KNABBEN, Ramon Mendes. **Estudo do Ruído Pneu Pavimento e da Absorção Sonora em Diferentes Revestimentos de Pavimento**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2012.

KOŁODZIEJ, Vanesa María.. **Estudo das propriedades acústicas, drenantes e mecânicas de revestimentos asfálticos porosos**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, S.C., 184 p. 2016.

LCPC. **Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud**. Groupe de travail RST Formulation des enrobés à chaud. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. France. 2007.

LEE, Dah-Yinn *et al.* **Absorption of Asphalt into Porous Aggregates**. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C. 1996.

SANTOS, A.P.DA SILVA. **Estudo da eficiência na redução do ruído de tráfego em pavimentos drenantes**. Portugal, Dissertação (Mestrado em Engenharia Rodoviária), Universidade do Minho. 244p. 2007.

SCHOLZ, M; GRABOWIECKI, P. Review of permeable pavement systems. **Building and Environment**, v, 42, p 3830-3836. 2007.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica; Efeito da Compactação por Impacto e Giratória**. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, RJ, 461p, 2004.

MELO, João Victor Staub de. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2014.

MENDES, Roberto. **A tomografia computadorizada de raios x como método não destrutivo de análise volumétrica de concreto: estudo de caso em testemunho de concreto da usina hidroelétrica mourão.** Dissertação (Mestrado) - Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

MENEZES, Miguel V. P. de, **Estudo das Características de Superfície de Pavimentos Rodoviários para Análise da Segurança do Tráfego,** Dissertação de Mestrado, Instituto Superior técnico, IST, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Setembro. 2008.

MERIGHI, J. V.; FORTES, R. M. **Estudo de desempenho de diferentes misturas tipo “Open-Graded Friction Course”.** In: 13º Congresso Ibero-Americano del. Asfalto, São José, Costa Rica. 2005.

NASCIMENTO, Cátia Cristiana Carmona do - **Avaliação da Permeabilidade de Misturas Betuminosas Drenantes em Laboratório e “In Situ”.** Dissertação (Mestrado)-Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 263 p. 2012.

NLT-327/00. **Permeabilidad in situ de pavimentos drenantes con el permeámetro LCS.** Laboratorio Escuela de Caminos de Santander. 2000.

OKAMOTO, N. *et al.* Study on Drainage Performance of Porous Asphalt Pavements by Rainfall Simulation Testing. **11th International Conference on Asphalt Pavements**, v, 1, Nagoya, Aichi, Japan. 2010.

OLIVEIRA, Carlos Gustavo Macedo. - **Estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas de concreto asfáltico drenante.** Dissertação (Mestrado). Brasília. Universidade de Brasília. 2003.

ONGEL, A.; HARVEY, J. e KOHLER, E. **State of the Practice in 2006 for Open-Graded Asphalt Mix Design.** Caltrans Division of Research and Innovation. California, EUA, 39p. 2007.

PAGOTTO, C. *et al.* **Comparison of the hydraulic behavior and the quality of highway runoff water according to the type of pavement**, in Elsevier Science Ltd. Vol. 34. No 18. 2000.

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Tese de Doutorado. COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1991.

PORTO, H. G., **Pavimentos Drenantes**. Editora D & Z, São Paulo, 105p, 1999.

PUTMAN, B. J. - **Evaluation of open-graded friction courses: construction, maintenance, and performance**. Report FHWA- SC- 12-04. South Carolina Department of Transportation, Federal Highway Administration, Clemson University, Columbia, South Carolina. 2012.

QIN, Yinghong. *et al.* Water Permeability of Pervious Concrete Is Dependent on the Applied Pressure and Testing Methods. **Advances in Materials Science and Engineering**, v, 2015, 6 pages. 2015.

RAIMBAULT, G.; ANDRIEU, H.; BERTHIER, E.; JOANNIS, C.; LEGRET, M. - **Infiltration des eaux pluviales à travers les surfaces urbaines – Des revêtements imperméables aux structures-réservoirs** In: Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées. 238-Maio-Junho. pp 39-50. 2002.

RAMBO, R. S. **Análise das propriedades mecânicas e funcionais de misturas asfálticas do tipo CPA preparadas com diferentes volumes de vazios**. Monografia. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões Campus Santo Ângelo, Santo Ângelo, 2015.

RAZ R.T. Maintenance of permeability in porous mixes, **European conference on porous asphalt**, Madrid, p. 681. 1997.

RECASENS, Rodrigo M. - **Nuevas mezclas para capas de rodadura y su influencia em el confort (Ruido) y la seguridad**, Universidad Politécnica de Cataluña, Zaragoza, Espanha. 2006.

SANTOS, Fábio A. P. **Reciclagem de Escórias de Incineração de RSU através da Incorporação em Argamassas de Construção**, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Setembro. 2010.

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

SCHNEIDER, Paulo. **Incertezas de medição e ajuste de dados**. Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

SOUZA, Sérvulo Andrade de. **Avaliação da capacidade de escoamento da água em mistura asfáltica drenante: proposta de ensaio de laboratório**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2008.

SU, Yu-Min. *et al.* **Clogging Evaluation of Porous Asphalt Concrete Cores in Conjunction with Medical X-ray Computed Tomography**. Department of Civil Engineering, National Central University, Chungli, Taiwan. 2014.

TAKAHASHI, S; PARTL, M. N. – **Improvement of Mix Design for Porous Asphalt Report 113/11**. Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Dübendorf, Switzerland, 114 p. 1999.

TAVARES, Ana Isabel Ferreira. - **Mistura betuminosa drenante em vias urbanas: desempenho e manutenção**. Covilhã. Dissertação (Mestrado), Universidade da Beira Interior, Portugal, 123p. 2013.

TERREL, R. L.; SHUTE, J. W. **Summary Report on Water Sensitivity**. Report SHRP-A/IR-89003. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C. 1989.

VALERI, Andrés C. Valerio. *et al.* **Laboratory Assessment of the Infiltration Capacity Reduction in Clogged Porous Mixture Surfaces**. **Sustainability**, v, 8, 751. 2016.

YOUNG, C. F. *et al.* **Predicting physical clogging of porous and permeable pavements.** Final report, Elsevier B. V. Journal of Hydrology 481, 48-55. 2013.

ZAGONEL, Ana Regina – **Inovações em revestimentos asfálticos utilizados no Brasil,** Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí. 2013.

ZAHARIEVA, R. *et al.* Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, vol. 25, no. 2, pp. 223–232, 2003.

## APÊNDICE A – DESEMPENHO MECÂNICO A CICLOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

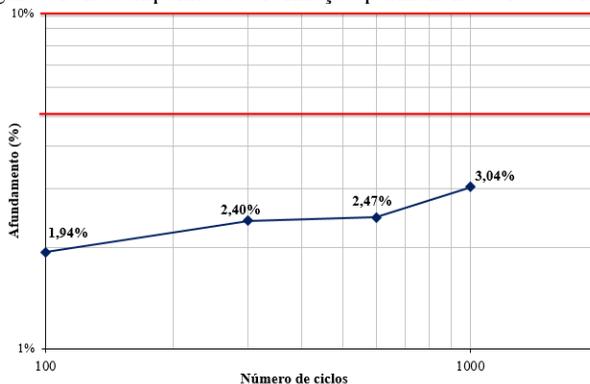
As placas em misturas asfálticas drenantes foram compactadas na mesa compactadora do IFSTTAR. Seu desempenho mecânico foi verificado através de ciclos de deformação permanente no simulador de tráfego *Orniéreur* e de acordo com a norma AFNOR NF P 98-253-1 (1991).

Os limites de afundamento máximo foram determinador em 5% de acordo com COST 333 (1999).

- Desempenho à deformação permanente à 1.000 ciclos

A norma AFNOR NF P 98-253-1 (1991), determina 2 pontos (300 e 500) para leitura de afundamento até 1.000 ciclos. Nesta pesquisa, a leitura do afundamento também foi realizada a 600 ciclos, de maneira a acompanhar a evolução do afundamento ao longo dos ciclos. A Figura 81 apresenta os valores de afundamento ao longo dos ciclos.

Figura 81. Desempenho à deformação permanente - 1.000 ciclos

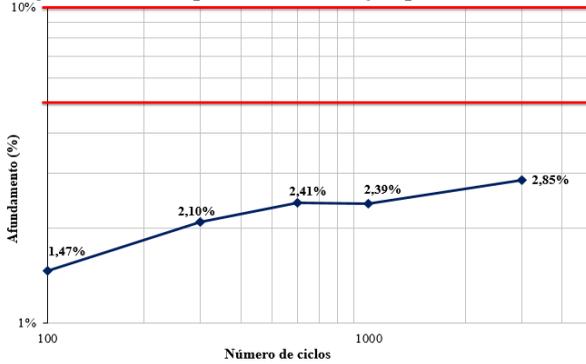


Fonte: Elaborada pela autora

- Desempenho à deformação permanente à 3.000 ciclos

Conforme determinado na placa n° 2, na placa de n° 3 também foi realizada leituras de afundamento em 600 ciclos. A Figura 82 apresenta a curva de deformação em função do número de ciclos impostos à placa.

Figura 82. Desempenho à deformação permanente - 3.000 ciclos

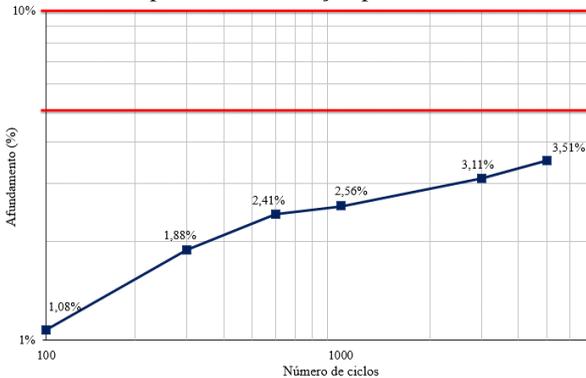


Fonte: Elaborada pela autora

- Desempenho à deformação permanente à 5.000 ciclos

A Figura 83 apresenta o afundamento proporcionado pela aplicação dos 5.000 no simulador de tráfego.

Figura 83. Desempenho à deformação permanente - 5.000 ciclos

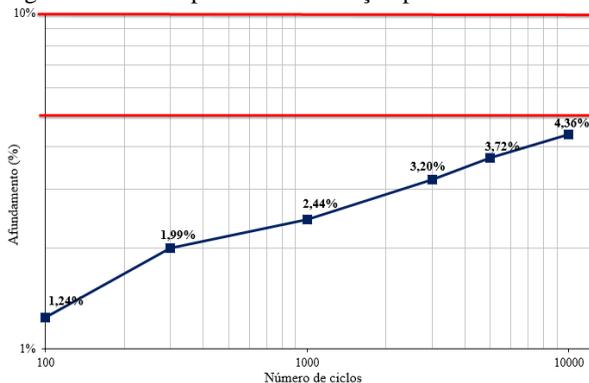


Fonte: Elaborada pela autora

- Desempenho à deformação permanente à 10.000 ciclos

A Figura 84 apresenta os valores de afundamento em função do número de ciclos aplicados no simulador de tráfego. Nesta fase foram aplicado 10.000 ciclos, conforme número maior de ciclos, não foi realizada leitura no ponto de 600 ciclos.

Figura 84. Desempenho à deformação permanente - 10.000 ciclos



Fonte: Elaborado pela autora

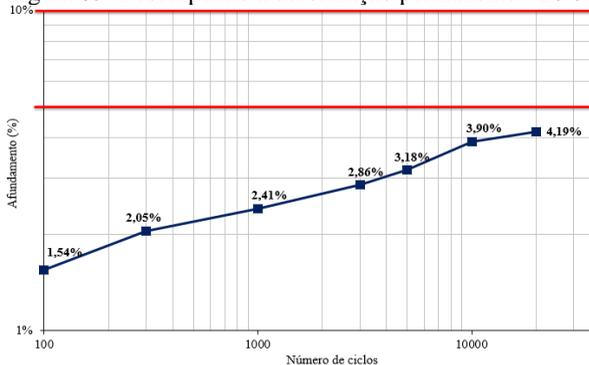
- Desempenho à deformação permanente à 20.000 ciclos

Entre os pontos de leitura determinados pela norma de deformação permanente, o ponto à 20.000 ciclos, não é citado. Nesta pesquisa, este ponto de leitura foi definido para que o acompanhamento da mistura tivesse um ponto de intermédio entre as leituras de 10.000 e 30.000.

A

Figura 85 apresenta a evolução da formação de trilhas de roda na mistura, à 20.000 ciclos.

Figura 85. Desempenho à deformação permanente - 20.000 ciclos

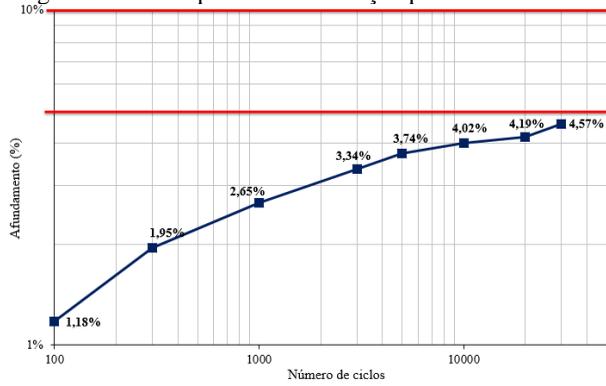


Fonte: Elaborado pela autora

- Desempenho à deformação permanente à 30.000 ciclos

A Figura 86 apresenta a evolução da deformação permanente em função da aplicação de 30.000 ciclos no simulador de tráfego.

Figura 86. Desempenho à deformação permanente - 30.000 ciclos



Fonte: Elaborado pela autora

## APÊNDICE B – REDUÇÃO DA PERMEABILIDADE DOS CORPOS DE PROVA COMPACTADOS NO CGS

Cada corpo de prova analisado foi exposto a repetidos eventos de simulação de chuva, esta exposição variou de acordo com sua capacidade drenante e resistência à colmatagem.

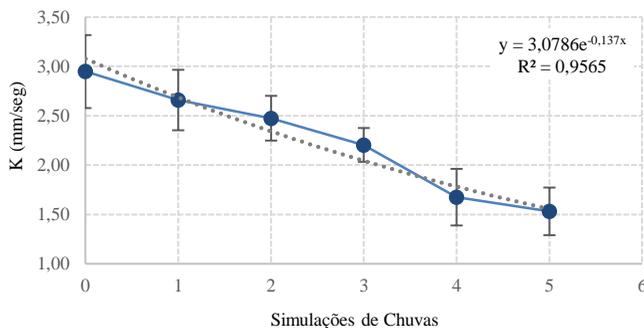
As figuras apresentadas neste apêndice detalham o valor médio da redução do coeficiente de permeabilidade em função do número de giros à que o conjunto de corpos de prova foram expostos no compactador CGS. A faixa de incerteza apresenta a variação positiva e negativa dos valores e seu provável comportamento, quanto à redução. Em todos os corpos de prova a redução foi melhor definida por uma equação exponencial.

- Compactação com 50 giros

Os corpos de prova compactados com 50 giros são definidos como referência. Sua permeabilidade representa valores desejáveis em campo, logo após a implantação.

Ao longo das 5 simulações de eventos de chuva, o valor de K (mm/seg) dos corpos de prova reduziu 51,90%. O alto valor da redução do coeficiente de permeabilidade em função das simulações de chuva é associado ao alto Vv e Vvc médios das amostras 24,55% e 15,75% respectivamente. A Figura 87 apresenta a redução da permeabilidade de corpos de prova compactados com 50 giros no CGS.

Figura 87. Corpos de prova com 50 giros - Redução de K (mm/seg)



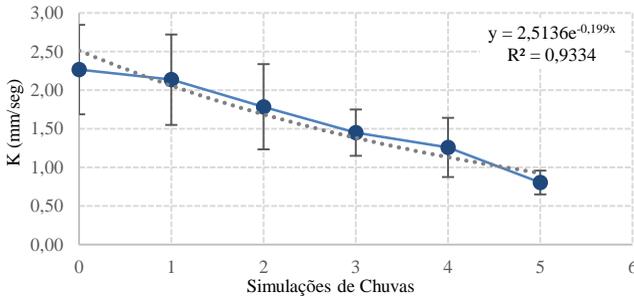
Fonte: Elaborado pela autora

- Compactação com 75 giros

Os corpos de prova compactados com 75 giros apresentaram Vv

de 22,28% e  $V_{vc}$  de 14,12%. A diferença entre as médias de  $K$  (mm/seg) ao longo deste ensaio, apresentam redução de 35,47%. A redução da permeabilidade dos corpos de prova é apresentada pela Figura 88.

Figura 88. Corpos de prova com 75 giros - Redução de  $K$  (mm/seg)

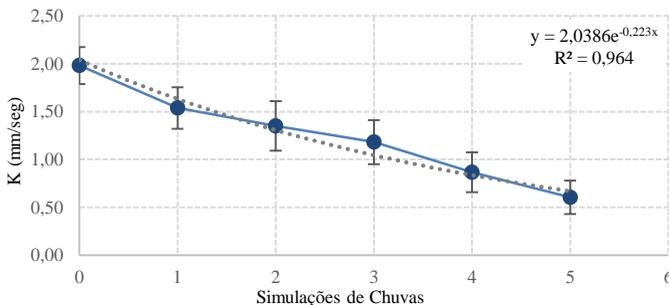


Fonte: Elaborado pela autora

- Compactação com 100 giros

Os corpos de prova compactados com 100 giros apresentaram  $V_v$  de 21,34% e  $V_{vc}$  de 13,25%. A redução média da permeabilidade das amostras foi de 30,50%. A distribuição das leituras de permeabilidade é apresentada na Figura 89.

Figura 89. Corpos de prova com 100 giros - Redução de  $K$  (mm/seg)



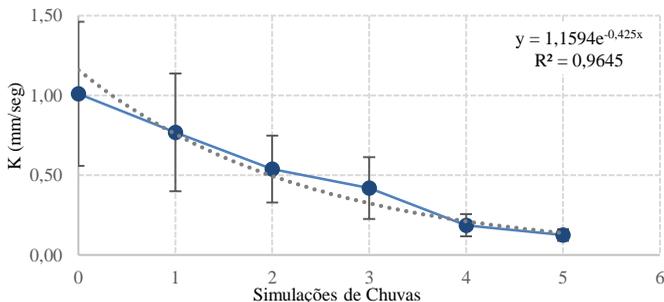
Fonte: Elaborado pela autora

A faixa de incerteza obtida neste grupo apresenta valores inferior aos anteriores, o que demonstra maior homogeneidade entre os corpos de prova analisados. É provável que esta homogeneidade esteja relacionada com o arranjo interno dos grãos, proporcionado pelo aumento da intensidade de compactação.

- Compactação com 150 giros

Os corpos de prova compactados com 150 giros apresentam valores médios de  $V_v$  de 20,78% e  $V_{vc}$  de 12,63%. A permeabilidade média  $K$  (mm/seg) ao longo das simulações de eventos de chuva apresentou redução de 12,53% sendo apresentada pela Figura 90. A tendência dos dados é definida exponencialmente.

Figura 90. Corpos de prova 150 giros - Redução de  $K$  (mm/seg)



Fonte: Elaborado pela autora

- Compactação com 200 giros

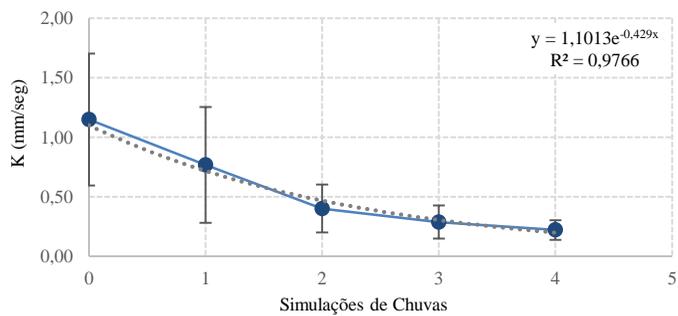
Os corpos de prova compactados com 150 e 200 giros apresentaram pequena estabilização entre seus dados, com  $V_v$  (20,78% e 20,62%) e  $V_{vc}$  (12,63% e 12,25%) respectivamente. Esta estabilização pode corresponder a estrutura interna das misturas, que a partir de certa intensidade de compactação, apresentam pequenas alterações.

A permeabilidade deste grupo teve início com valores baixos e reduziu consideravelmente ao longo das simulações, obtendo variação inicial de 19,17%. Dois corpos de prova foram encerrados na 4ª simulação de chuva, desta forma, os dados da 5ª simulação não foram apresentados.

O corpo de prova – I foi encerrado nesta simulação após tempo de ensaio de 5h19min e o corpo de prova – II após 1h21min.

A redução da permeabilidade do grupo de corpos de prova compactados com 200 giros é apresentado pela Figura 91.

Figura 91. Corpos de prova com 200 giros - Redução de K (mm/seg)



Fonte: Elaborado pela autora

## APÊNDICE C – REDUÇÃO DA PERMEABILIDADE DOS CORPOS DE PROVA EXPOSTOS A CICLOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Cada corpo de prova analisado foi exposto a repetidos eventos de simulação de chuva, esta exposição variou de acordo com sua capacidade drenante e resistência à colmatção.

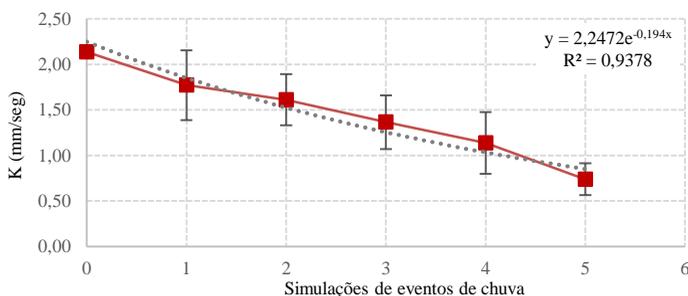
As figuras apresentadas neste apêndice detalham o valor médio da redução do coeficiente de permeabilidade em função do número de ciclos que o conjunto de corpos de prova foram expostos na máquina de deformação permanente. A faixa de incerteza apresenta a variação positiva e negativa dos valores e seu provável comportamento, quanto à redução. Em todos os corpos de prova a redução foi melhor definida por uma equação exponencial.

- Corpos de prova com 0 ciclos – Referência

A placa de referência apresentou valores médios  $V_v$  (24,23%) e  $V_{vc}$  (17,1%). Assim como o grupo de corpos de prova compactados com 50 giros, a permeabilidade de referência apresenta os maiores valores. Ao longo das simulações os corpos de prova com 0 ciclos apresentaram redução do coeficiente de permeabilidade de 34,62%.

A distribuição dos dados ao longo das simulações, apresenta tendência exponencial (Figura 92).

Figura 92. Corpos de prova com 0 ciclos - Redução de K (mm/seg)



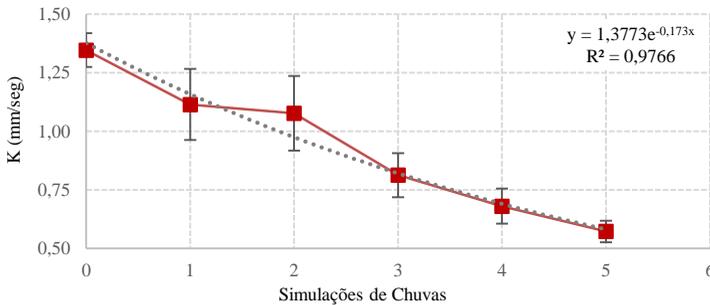
Fonte: Elaborado pela autora

- Corpos de prova com 1.000 ciclos

Os corpos de prova que receberam 1.000 ciclos de deformação permanente apresentaram valores de  $V_v$  de 23,34% e  $V_{vc}$  de 16,1%.

A permeabilidade média das amostras apresenta redução de 42,45%. A baixa faixa de incerteza, pode ser associada ao fato da mistura apresentar boa homogeneidade interna. A redução da permeabilidade do grupo de corpos de prova expostos a 1.000 ciclos é apresentado pela Figura 93.

Figura 93. Corpos de prova com 1.000 ciclos - Redução de K (mm/seg)



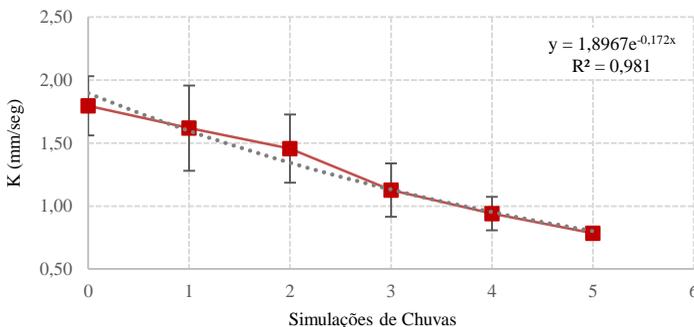
Fonte: Elaborado pela autora

- Corpos de prova com 3.000 ciclos

O grupo com corpos de prova que receberam 3.000 ciclos na deformação permanente, apresentaram valores de coeficiente de permeabilidade inferior ao grupo de referência, mas superior as amostras que receberam 1.000 ciclos.

Estes corpos de prova apresentaram valor médio de  $V_v$  e  $V_{vc}$  de 22,61% e 15,40%, respectivamente. A redução de  $K$ (mm/seg) ao longo das simulações foi de 43,65%. A Figura 94 apresenta a redução da permeabilidade ao longo das simulações de eventos de chuva.

Figura 94. Corpos de prova com 3.000 ciclos - Redução de K (mm/seg)

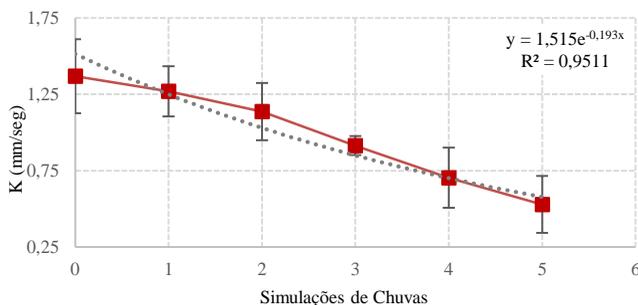


Fonte: Elaborado pela autora

- Corpos de prova com 5.000 ciclos

A leitura de 5.000 ciclos no ensaio de deformação permanente não é um número constante de ensaio. Nesta pesquisa este ponto de análise foi adicionado para o acompanhamento da redução das permeabilidades. Os corpos de prova apresentaram valores médios iniciais de  $V_v$  (22,52%) e  $V_{vc}$  (14,55%). A redução da permeabilidade ao longo das simulações de eventos de chuva foi de 38,64%. A Figura 95 apresenta a redução da permeabilidade do grupo de corpos de prova com 5.000 ao longo das simulações de eventos de chuva.

Figura 95. Corpos de prova com 5.000 ciclos - Redução de K (mm/seg)

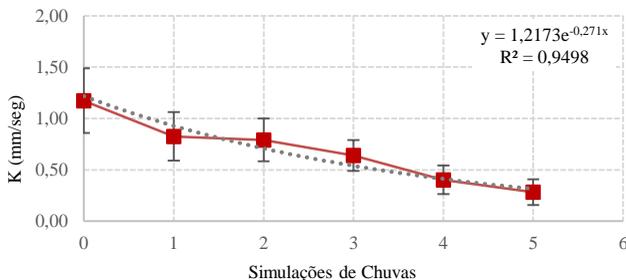


Fonte: Elaborado pela autora

- Corpos de prova com 10.000 ciclos

Os corpos de prova expostos a 10.000 ciclos apresentaram  $V_v$  médio de 21,53% e  $V_{vc}$  de 13,85%. A redução da permeabilidade ao longo das simulações de chuva neste ensaio foi de 24,13%. A Figura 96 apresenta a redução da permeabilidade dos corpos de prova.

Figura 96. CPs 10.000 ciclos - Redução de K (mm/seg)



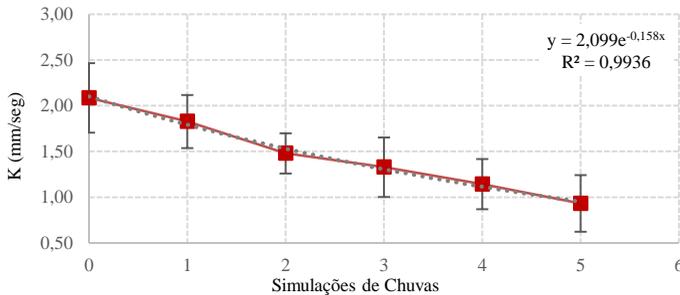
Fonte: Elaborado pela autora

- Corpos de prova com 20.000 ciclos

O coeficiente de permeabilidade com 20.000 ciclos, apresentou redução com relação ao de referência (0 ciclos), entretanto valor superior ao grupo de 10.000 ciclos.

O grupo de corpos de prova com 20.000 ciclos apresenta índice médio de  $V_v$  de 21,36% e  $V_{vc}$  de 13,03%. A redução da permeabilidade ao longo das simulações de eventos de chuva é de 44,77%. Na Figura 97 apresenta a redução da permeabilidade dos corpos de prova ao longo das simulações de eventos de chuva.

Figura 97. Corpos de prova com 20.000 ciclos - Redução de K (mm/seg)

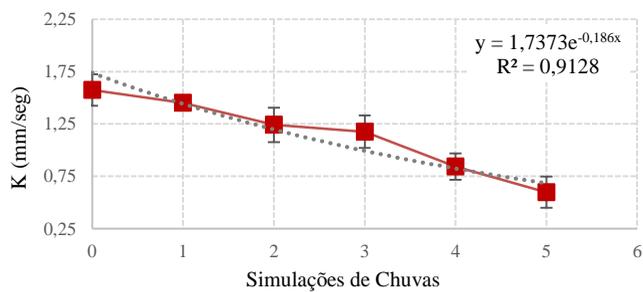


Fonte: Elaborado pela autora

- Corpos de prova com 30.000 ciclos

O número de 30.000 foi o valor máximo de ciclos aplicados na deformação permanente. Os valores dos coeficientes de permeabilidade apresentam valores inferiores ao de referência, entretanto apresentam valores superiores aos corpos de prova com 10.000 ciclos por exemplo. Com valores médios de  $V_v$  em 21,25% e  $V_{vc}$  em 12,76%, a redução da permeabilidade ao longo das simulações de chuva foi de 38,05%. A Figura 98 apresenta a redução da permeabilidade para corpos de prova com 30.000 ciclos.

Figura 98. Corpos de prova com 30.000 ciclos - Redução de K (mm/seg)



Fonte: Elaborado pela autora