



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**

CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO APLICADA À SELEÇÃO DE  
PROJETOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS UTILIZANDO O  
CONCEITO DE DOMINÂNCIA DE SOLUÇÕES**

Alcidney Batista Celeste

Campina Grande - Paraíba

2025

Alcidney Batista Celeste

**OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO APLICADA À SELEÇÃO DE  
PROJETOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS UTILIZANDO O  
CONCEITO DE DOMINÂNCIA DE SOLUÇÕES**

Tese apresentada à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) para obtenção do título de doutor.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Lêda Christiane de F. Lopes Lucena.

Coorientador: Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão.

Campina Grande - Paraíba

2025

C392o Celeste, Alcidney Batista.  
Otimização multiobjetivo aplicada à seleção de projetos de misturas asfálticas porosas utilizando o conceito de dominância de soluções / Alcidney Batista Celeste. – Campina Grande, 2025.  
227 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2025.  
"Orientação: Profa. Dra. Lêda Christiane de F. Lopes Lucena, Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão".  
Referências.

1. Misturas Asfálticas Porosas – Dominância de Soluções. 2. *Low Impact Development (LID)*. 3. Geotecnia. 4. Pavimentos Permeáveis. 5. Otimização Multiobjetivo. I. Lucena, Lêda Christiane de F. Lopes. II. Galvão, Carlos de Oliveira. III. Título.

CDU 625.85(043.2)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA SEVERINA SUELI DA SILVA OLIVEIRA CRB-15/225

Alcidney Batista Celeste

# OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO APLICADA À SELEÇÃO DE PROJETOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS UTILIZANDO O CONCEITO DE DOMINÂNCIA DE SOLUÇÕES

Tese apresentada à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) para obtenção do título de doutor.

Aprovado em: 14/05/2025

Documento assinado digitalmente  
 LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCEI  
Data: 26/05/2025 15:54:54-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Lêda Christiane de F. Lopes Lucena, PPGECA/UAEC/CTRN/UFCG  
**Orientadora**

Documento assinado digitalmente  
 CARLOS DE OLIVEIRA GALVAO  
Data: 27/05/2025 14:59:24-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão, PPGECA/UAEC/CTRN/UFCG  
**Co-orientador**

**Banca Examinadora:**

Documento assinado digitalmente  
 JUAN MARTIN BRAVO  
Data: 28/05/2025 09:17:02-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Juan Martín Bravo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)  
**Examinador externo**

Prof. PhD. Jorge Barbosa Soares, Universidade Federal do Ceará (UFC)  
**Examinador externo**

Documento assinado digitalmente  
 JOHN ELTON DE BRITO LEITE CUNHA  
Data: 27/05/2025 18:16:10-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. John Elton de Brito Leite Cunha, PPGECA/UAEC/CTRN/UFCG  
**Examinador interno**

Documento assinado digitalmente  
 ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA  
Data: 28/05/2025 09:37:26-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adriano Elisio de F. Lopes Lucena, PPGECA/UAEC/CTRN/UFCG  
**Examinador interno**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
 POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL  
 Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

### REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

2. **ALUNO(A): ALCIDNEY BATISTA CELESTE / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.<sup>a</sup> LÊDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR. CARLOS DE OLIVEIRA GALVÃO - PPGECA/UFCG - COORIENTADOR, DR. ADRIANO ELÍSIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA – PPGECA/UFCG - EXAMINADOR INTERNO, DR. JORGE BARBOSA SOARES - UFC - EXAMINADOR EXTERNO, DR. JOHN ELTON DE BRITO LEITE CUNHA – PPGECA/UFCG – EXAMINADOR INTERNO, DR. JUAN MARTÍN BRAVO – UFRGS – EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 18/2025). / TÍTULO DA DEFESA DA TESE: “OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO APLICADA À SELEÇÃO DE PROJETOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS UTILIZANDO O CONCEITO DE DOMINÂNCIA DE SOLUÇÕES” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INÍCIO: 08:00 HORAS / NO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS, BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFCG, EM CAMPINA GRANDE, DE FORMA HÍBRIDA.**

3. **EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) ALUNO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA TESE, SENDO-LHE ATRIBUÍDO O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE TESE, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO(A), ALUNO(A) E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**

4. **CAMPINA GRANDE, 14 DE MAIO DE 2025**

5.

6.

Documento assinado digitalmente  
 **JUAN MARTIN BRAVO**  
 Data: 19/05/2025 12:26:24-0300  
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>

7.

8.

9. **JUAN MARTÍN BRAVO – UFRGS – EXAMINADOR EXTERNO**

10.

11.

12.

13.

14.

**JORGE BARBOSA SOARES - UFC - EXAMINADOR EXTERNO**

Documento assinado eletronicamente por **ADRIANO ELISIO DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/05/2025, às 10:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/05/2025, às 11:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alcidney Batista Celeste, Usuário Externo**, em 15/05/2025, às 12:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS DE OLIVEIRA GALVAO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/05/2025, às 16:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 19/05/2025, às 09:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOHN ELTON DE BRITO LEITE CUNHA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/05/2025, às 09:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **5403464** e o código CRC **E49ECE3F**.

## **DEDICATÓRIA**

Às minhas queridas e amadas, esposa e filhas, Camilla, Catarina e Júlia;

Aos meus pais, Alcides e Geralda, pela educação que me deram.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, primeiramente, pois quando lhe pedi forças, Ele me deu dificuldades para me tornar forte. Quando pedi sabedoria, Ele me deu problemas para resolver.

Minhas orações foram atendidas;

À minha querida esposa, Camilla, pelo amor, companheirismo, paciência, cumplicidade e tolerância nos momentos difíceis e felizes que passamos juntos durante toda essa jornada;

Às minhas amadas filhas, Catarina e Júlia, minhas duas razões para continuar lutando e lhes concederem uma vida sempre melhor. O pai ama vocês;

Aos meus pais, meus irmãos e minha irmã, por tudo que sempre representam e proporcionam na minha vida;

À minha dedicada orientadora, a professora Dr<sup>a</sup> Lêda, pelo o que representou nesta pesquisa. Sua dedicação, cuidado, acurácia, sabedoria acadêmica e conselhos construtivos durante toda a pesquisa foram determinantes para a concretização desta tese. Muito obrigado por tudo, professora;

Ao meu co-orientador, professor Dr. Carlos Galvão, meu mestre desde os tempos da graduação e do mestrado, na universidade. Tê-lo como um dos meus orientadores me instigou ainda mais a entregar um trabalho minimamente à altura de seu peso acadêmico. Sempre será uma referência e exemplo para seus pares e seus alunos;

Agradeço aos que fazem o Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG, professores, técnicos, alunos e funcionários, que direta ou indiretamente, contribuíram para este trabalho;

Um agradecimento especial a todos os colegas da minha turma: Gabriel, Samuel, Maria Ingridy, Mateus, Juliette, Renato, Danilo, Bruna, Alice e Aline, como também aos colegas Thiago Lucena, Leonardo, Osíres, Manoel, Paulo, Talita, Arthur, Jadilson, Ildinho e Ladjane, pelo apoio durante toda a temporada que passei no LEP. De forma especial, aos amigos Ismael e Edmilson, do laboratório de hidráulica, que sempre se ofereceram para me ajudar durante os ensaios, sempre solícitos e determinados para encontrar soluções para qualquer problema com relação a eles.

Por fim, agradeço ao DNIT, ao LEP, ao Lab. de Hidráulica, às empresas Rocha Cavalcante e Vanguarda Engenharia, por também terem contribuído para a realização desta pesquisa. Meu muito obrigado a todos.

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> – HIDROGRAMAS DE CHEIA ESQUEMÁTICOS DA INFLUÊNCIA DA URBANIZAÇÃO NO ESCOAMENTO SUPERFICIAL .....	29
<b>FIGURA 2</b> – EXEMPLO DE TÉCNICAS DE LID.....	35
<b>FIGURA 3</b> – SISTEMAS DE INFILTRAÇÃO DO PAVIMENTO PERMEÁVEL .....	37
<b>FIGURA 4</b> – EXEMPLO DE FUNCIONALIDADE DA CPA NUMA RODOVIA .....	39
<b>FIGURA 5</b> – REPRESENTAÇÃO DOS VAZIOS NA MISTURA POROSA.....	41
<b>FIGURA 6</b> – FAIXAS GRANULOMÉTRICAS NOS ESTADOS DOS EUA .....	49
<b>FIGURA 7</b> – FAIXAS DE GRADUAÇÃO DE AGREGADOS EM MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS.....	50
<b>FIGURA 8</b> – ANÁLISE DE CUSTO-BENEFÍCIO .....	52
<b>FIGURA 9</b> – DEFLEXÕES DAS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE MISTURAS CPA .....	56
<b>FIGURA 10</b> – DESENHO ESQUEMÁTICO - A) CARGA VARIÁVEL B) CARGA CONSTANTE.....	58
<b>FIGURA 11</b> – VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO E INFILTRAÇÃO ACUMULADA EM FUNÇÃO DO TEMPO .....	60
<b>FIGURA 12</b> – VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO COM O TEMPO .....	62
<b>FIGURA 13</b> – COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO EM MISTURAS POROSAS APÓS UM EVENTO DE CHUVA .....	63
<b>FIGURA 14</b> – ESPAÇO DE DECISÃO E ESPAÇO DE OBJETIVOS.....	66
<b>FIGURA 15</b> – FRENTE DE PARETO E CONJUNTOS NÃO-DOMINADOS.....	68
<b>FIGURA 16</b> – COMBINAÇÕES DE FRENTE DE PARETO PARA DOIS OBJETIVOS. ....	69
<b>FIGURA 17</b> – ABORDAGEM CLÁSSICA DOS ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO.....	71
<b>FIGURA 18</b> – ABORDAGEM DIRETA DOS ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO. ....	72
<b>FIGURA 19</b> – SOLUÇÃO PARETO ÓTIMO NO ESPAÇO DE OBJETIVOS .....	73
<b>FIGURA 20</b> – FLUXOGRAMA DA PESQUISA .....	78
<b>FIGURA 21</b> – OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO .....	80
<b>FIGURA 22</b> – CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS .....	82
<b>FIGURA 23</b> – CURVAS AJUSTADAS PARA CADA FAIXA GRANULOMÉTRICA - ESCALA LOGARÍTMICA .....	85
<b>FIGURA 24</b> – CORPOS DE PROVA MOLDADOS NO CGS.....	87
<b>FIGURA 25</b> – VOLUME DE VAZIOS X TEOR DE LIGANTE (A), (B), (C), (D), (E).....	88
<b>FIGURA 26</b> – CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AO ENSAIO DE VAZIOS COMUNICANTES.....	91
<b>FIGURA 27</b> – VAZIOS COMUNICANTES DAS MISTURAS CPA/OGFC .....	92
<b>FIGURA 28</b> – CONDICIONAMENTO DOS CORPOS DE PROVA - SATURAÇÃO E CONGELAMENTO .....	96
<b>FIGURA 29</b> – PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE .....	98
<b>FIGURA 30</b> – INFILTRÔMETRO DE ANÉIS CONCÊNTRICOS PARA SOLO.....	99
<b>FIGURA 31</b> – INFILTRÔMETRO MODELADO COM UMA DAS ESTRUTURAS DE CAMADAS SOBREPOSTAS .....	100
<b>FIGURA 32</b> – PROTÓTIPOS DAS ESTRUTURAS DE CAMADAS SOBREPOSTAS.....	101
<b>FIGURA 33</b> – SIMULADOR DE CHUVA .....	104
<b>FIGURA 34</b> – PROCEDIMENTOS PARA OBTENÇÃO DA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO .....	105
<b>FIGURA 35</b> – EXEMPLO ILUSTRATIVO DAS FRENTEIRAS DE DOMINÂNCIA .....	117
<b>FIGURA 36</b> – RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	119
<b>FIGURA 37</b> – RESULTADOS DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA .....	121
<b>FIGURA 38</b> – RESULTADOS DA PERDA DE MASSA CÂNTABRO.....	123
<b>FIGURA 39</b> – RESULTADOS DA RELAÇÃO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO RETIDA.....	125
<b>FIGURA 40</b> – VELOCIDADE X GRADIENTE HIDRÁULICO - FAIXA I .....	126
<b>FIGURA 41</b> – VELOCIDADE X GRADIENTE HIDRÁULICO - FAIXA II .....	127
<b>FIGURA 42</b> – VELOCIDADE X GRADIENTE HIDRÁULICO - FAIXA V .....	127
<b>FIGURA 43</b> – VELOCIDADE X GRADIENTE HIDRÁULICO - FAIXA SC.....	128
<b>FIGURA 44</b> – VELOCIDADE X GRADIENTE HIDRÁULICO - FAIXA OR-1 .....	128
<b>FIGURA 45</b> – VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO - CPA FAIXA I .....	131
<b>FIGURA 46</b> – VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO - CPA FAIXA II .....	131
<b>FIGURA 47</b> – VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO - CPA FAIXA V .....	132
<b>FIGURA 48</b> – VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO - CPA FAIXA SC .....	132
<b>FIGURA 49</b> – VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO - CPA FAIXA OR-1 .....	132
<b>FIGURA 50</b> – VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO – T.LIGANTE: 5,0% .....	132

<b>FIGURA 51</b> – VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO – T.LIGANTE: 4,5% .....	132
<b>FIGURA 52</b> – VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO – T.LIGANTE: 4,0% .....	132
<b>FIGURA 53</b> – TAXA DE INFILTRAÇÃO (HORTON) – CPA FAIXA I – TEOR DE LIGANTE 5,0% .....	134
<b>FIGURA 54</b> – TAXA DE INFILTRAÇÃO (HORTON) – CPA FAIXA I – TEOR DE LIGANTE 4,5% .....	134
<b>FIGURA 55</b> – TAXA DE INFILTRAÇÃO (HORTON) – CPA FAIXA I – TEOR DE LIGANTE 4,0% .....	134
<b>FIGURA 56</b> – TAXA DE INFILTRAÇÃO (HORTON) – CPA FAIXA II – TEOR DE LIGANTE 5,0% .....	134
<b>FIGURA 57</b> – TAXA DE INFILTRAÇÃO (HORTON) – CPA FAIXA II – TEOR DE LIGANTE 4,5% .....	134
<b>FIGURA 58</b> – TAXA DE INFILTRAÇÃO (HORTON) – CPA FAIXA II – TEOR DE LIGANTE 4,0% .....	134
<b>FIGURA 59</b> – TAXA DE INFILTRAÇÃO (HORTON) – CPA FAIXA V – TEOR DE LIGANTE 5,0% .....	135
<b>FIGURA 60</b> – TAXA DE INFILTRAÇÃO (HORTON) – CPA FAIXA V – TEOR DE LIGANTE 4,5% .....	135
<b>FIGURA 61</b> – TAXA DE INFILTRAÇÃO (HORTON) – CPA FAIXA V – TEOR DE LIGANTE 4,0% .....	135
<b>FIGURA 62</b> – TAXA DE INFILTRAÇÃO (HORTON) – CPA FAIXA SC – TEOR DE LIGANTE 5,0% .....	135
<b>FIGURA 63</b> – TAXA DE INFILTRAÇÃO (HORTON) – CPA FAIXA SC – TEOR DE LIGANTE 4,5% .....	135
<b>FIGURA 64</b> – TAXA DE INFILTRAÇÃO (HORTON) – CPA FAIXA SC – TEOR DE LIGANTE 4,0% .....	135
<b>FIGURA 65</b> – TAXA DE INFILTRAÇÃO (HORTON) – CPA FAIXA OR-1 – TEOR DE LIGANTE 5,0% .....	136
<b>FIGURA 66</b> – TAXA DE INFILTRAÇÃO (HORTON) – CPA FAIXA OR-1 – TEOR DE LIGANTE 4,5% .....	136
<b>FIGURA 67</b> – TAXA DE INFILTRAÇÃO (HORTON) – CPA FAIXA OR-1 - TEOR DE LIGANTE 4,0% .....	136
<b>FIGURA 68</b> – IMPACTO DO TEOR DE LIGANTE NA TAXA DE INFILTRAÇÃO – CPA FAIXA I .....	137
<b>FIGURA 69</b> – IMPACTO DO TEOR DE LIGANTE NA TAXA DE INFILTRAÇÃO – CPA FAIXA II .....	137
<b>FIGURA 70</b> – IMPACTO DO TEOR DE LIGANTE NA TAXA DE INFILTRAÇÃO – CPA FAIXA V .....	137
<b>FIGURA 71</b> – IMPACTO DO TEOR DE LIGANTE NA TAXA DE INFILTRAÇÃO – CPA FAIXA SC .....	137
<b>FIGURA 72</b> – IMPACTO DO TEOR DE LIGANTE NA TAXA DE INFILTRAÇÃO – CPA FAIXA OR-1 .....	137
<b>FIGURA 73</b> – TEMPO DE ENCHARCAMENTO – CPA FAIXA I – 5,0% .....	139
<b>FIGURA 74</b> – TEMPO DE ENCHARCAMENTO – CPA FAIXA I – 4,5% .....	139
<b>FIGURA 75</b> – TEMPO DE ENCHARCAMENTO – CPA FAIXA I – 4,0% .....	140
<b>FIGURA 76</b> – TEMPO DE ENCHARCAMENTO – CPA FAIXA II – 5,0% .....	140
<b>FIGURA 77</b> – TEMPO DE ENCHARCAMENTO – CPA FAIXA II – 4,5% .....	140
<b>FIGURA 78</b> – TEMPO DE ENCHARCAMENTO – CPA FAIXA II – 4,0% .....	140
<b>FIGURA 79</b> – TEMPO DE ENCHARCAMENTO – CPA FAIXA V – 5,0% .....	140
<b>FIGURA 80</b> – TEMPO DE ENCHARCAMENTO – CPA FAIXA V – 4,5% .....	140
<b>FIGURA 81</b> – TEMPO DE ENCHARCAMENTO – CPA FAIXA V – 4,0% .....	141
<b>FIGURA 82</b> – TEMPO DE ENCHARCAMENTO – CPA FAIXA SC – 5,0% .....	141
<b>FIGURA 83</b> – TEMPO DE ENCHARCAMENTO – CPA FAIXA SC – 4,5% .....	141
<b>FIGURA 84</b> – TEMPO DE ENCHARCAMENTO – CPA FAIXA SC – 4,0% .....	141
<b>FIGURA 85</b> – TEMPO DE ENCHARCAMENTO – CPA FAIXA OR-1 – 5,0% .....	141
<b>FIGURA 86</b> – TEMPO DE ENCHARCAMENTO – CPA FAIXA OR-1 – 4,5% .....	141
<b>FIGURA 87</b> – TEMPO DE ENCHARCAMENTO – CPA FAIXA OR-1 – 4,0% .....	142
<b>FIGURA 88</b> – IMPACTO DO TEOR DE LIGANTE E DA GRANULOMETRIA NO TEMPO DE ENCHARCAMENTO .....	142
<b>FIGURA 89</b> – IMPACTO DA DURAÇÃO E INTENSIDADE DE CHUVA NO TEMPO DE ENCHARCAMENTO - TEOR DE LIGANTE 5,0% .....	143
<b>FIGURA 90</b> – IMPACTO DA DURAÇÃO E INTENSIDADE DE CHUVA NO TEMPO DE ENCHARCAMENTO - TEOR DE LIGANTE 4,5% .....	143
<b>FIGURA 91</b> – IMPACTO DA DURAÇÃO E INTENSIDADE DE CHUVA NO TEMPO DE ENCHARCAMENTO - TEOR DE LIGANTE 4,0% .....	144
<b>FIGURA 92</b> – IMPACTO DO TEOR DE LIGANTE E DA GRANULOMETRIA NO TEMPO DE ENCHARCAMENTO, I = 96,2 MM/H .....	145
<b>FIGURA 93</b> – CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE ÁGUA .....	147
<b>FIGURA 94</b> – SOLUÇÕES NÃO-DOMINADAS E DISTRIBUIÇÃO DAS FRONTEIRAS DO CENÁRIO 3.1 .....	173
<b>FIGURA 95</b> – SOLUÇÕES NÃO-DOMINADAS E DISTRIBUIÇÃO DAS FRONTEIRAS DO CENÁRIO 3.2 .....	176
<b>FIGURA 96</b> – SOLUÇÃO NÃO-DOMINADA DO CENÁRIO 3.3. ....	179
<b>FIGURA 97</b> – SOLUÇÕES NÃO-DOMINADAS E DISTRIBUIÇÃO DAS FRONTEIRAS DO CENÁRIO 4.1 .....	180
<b>FIGURA 98</b> – SOLUÇÕES NÃO-DOMINADAS E DISTRIBUIÇÃO DAS FRONTEIRAS DO CENÁRIO 4.2 .....	183
<b>FIGURA 99</b> – SOLUÇÕES NÃO-DOMINADAS E DISTRIBUIÇÃO DAS FRONTEIRAS DO CENÁRIO 4.3 .....	185

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CONTRIBUIÇÕES E CUSTOS DE CADA TÉCNICA LID DA SOLUÇÃO ÓTIMA .....	32
TABELA 2 – MÓDULOS DE RESILIÊNCIA DE MISTURAS CPA .....	53
TABELA 3 – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E REOLÓGICA DO LIGANTE AMP 55/75 .....	81
TABELA 4 – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS .....	83
TABELA 5 – PROPRIEDADES MECÂNICAS E NORMAS CORRESPONDENTES .....	93
TABELA 6 – PONDERAÇÃO DOS OBJETIVOS – CENÁRIO 3.1 .....	112
TABELA 7 – PONDERAÇÃO DE PESOS - CENÁRIO 3.2 .....	113
TABELA 8 – CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS SEGUNDO A PERMEABILIDADE .....	129
TABELA 9 – PARÂMETROS AJUSTADOS DA EQUAÇÃO DE HORTON .....	133
TABELA 10 – TEMPOS DE ENCHARCAMENTO DE CADA ESTRUTURA DE CAMADAS .....	139
TABELA 11 – RESULTADOS DA CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE ÁGUA .....	147
TABELA 12 – ANOVA DOS RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	148
TABELA 13 – TESTE DE TUKEY PARA OS RESULTADOS DE RT .....	149
TABELA 14 – MÉDIAS DA RT PARA OS GRUPOS DE FAIXAS GRANULOMÉTRICAS .....	149
TABELA 15 – ANOVA DOS RESULTADOS DE MÓDULOS DE RESILIÊNCIA .....	150
TABELA 16 – TESTE DE TUKEY PARA OS RESULTADOS DE MR .....	151
TABELA 17 – MÉDIAS DO MR PARA OS GRUPOS DE FAIXA GRANULOMÉTRICA .....	152
TABELA 18 – ANOVA PARA OS RESULTADOS DE PERDA DE MASSA .....	153
TABELA 19 – TESTE DE TUKEY PARA A PERDA DE MASSA .....	154
TABELA 20 – MÉDIAS DA PERDA DE MASSA PARA OS GRUPOS DE TEORES DE LIGANTE .....	154
TABELA 21 – ANOVA PARA OS RESULTADOS DA RELAÇÃO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO RETIDA (RRT) .....	155
TABELA 22 – TESTE DE TUKEY PARA OS RESULTADOS DE RRT .....	156
TABELA 23 – MÉDIAS DA RRT PARA OS GRUPOS DE FAIXA GRANULOMÉTRICA .....	156
TABELA 24 – ANOVA PARA OS RESULTADOS DE PERMEABILIDADE .....	157
TABELA 25 – TESTE DE TUKEY PARA A PERMEABILIDADE (K) – GRUPO FAIXA GRANULOMÉTRICA .....	158
TABELA 26 – TESTE DE TUKEY PARA A PERMEABILIDADE (K) – GRUPO TEOR DE LIGANTE .....	158
TABELA 27 – MÉDIAS DE K PARA OS GRUPOS DE FAIXAS GRANULOMÉTRICAS .....	159
TABELA 28 – MÉDIAS DE K PARA OS GRUPOS DE TEORES DE LIGANTE .....	159
TABELA 29 – ANOVA DOS RESULTADOS DE CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO ( $F_c$ ) .....	160
TABELA 30 – TESTE DE TUKEY PARA A CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO .....	160
TABELA 31 – MÉDIAS DA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO PARA OS GRUPOS DE TEORES DE LIGANTE .....	160
TABELA 32 – ANOVA PARA OS RESULTADOS DE TEMPO DE ENCHARCAMENTO .....	161
TABELA 33 – TESTE DE TUKEY PARA O GRUPO FAIXA GRANULOMÉTRICA .....	162
TABELA 34 – MÉDIAS DOS $T_p$ PARA OS GRUPOS DE FAIXAS GRANULOMÉTRICAS .....	162
TABELA 35 – ANOVA PARA A CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE ÁGUA .....	163
TABELA 36 – TESTE DE TUKEY PARA A CAPACIDADE DE RETENÇÃO - GRUPO FAIXA GRANULOMÉTRICA .....	164
TABELA 37 – TESTE DE TUKEY PARA CAPACIDADE DE RETENÇÃO - GRUPO TEOR DE LIGANTE .....	164
TABELA 38 – MÉDIAS DA CAPACIDADE DE RETENÇÃO PARA OS GRUPOS DE FAIXA GRANULOMÉTRICAS .....	164
TABELA 39 – MÉDIAS DA CAPACIDADE DE RETENÇÃO PARA OS GRUPOS DE TEORES DE LIGANTE .....	165
TABELA 40 – CONSOLIDAÇÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA PELO VALOR-P .....	166

## LISTA DE QUADROS

<b>QUADRO 1</b> – REQUISITOS DE PROJETO PARA MISTURA ASFÁLTICA DENSA E CPA .....	43
<b>QUADRO 2</b> – IDENTIFICAÇÃO DAS SOLUÇÕES DO ESPAÇO DE DECISÃO $S$ .....	108
<b>QUADRO 3</b> – IDENTIFICAÇÃO DAS FUNÇÕES E FUNÇÕES-OBJETIVO DO CENÁRIO 1.....	110
<b>QUADRO 4</b> – FUNÇÕES DO CENÁRIO 2 .....	111
<b>QUADRO 5</b> – PSEUDOCÓDIGO DO ALGORITMO <i>FNDS</i> .....	118
<b>QUADRO 6</b> – SOLUÇÕES POR FRONTEIRA .....	168
<b>QUADRO 7</b> – CONJUNTO DE SOLUÇÕES DOMINADAS.....	168
<b>QUADRO 8</b> – SOLUÇÕES POR FRONTEIRA .....	170
<b>QUADRO 9</b> – CONJUNTO DE SOLUÇÕES DOMINADAS CENÁRIO 2 .....	170
<b>QUADRO 10</b> – RESUMO DAS SOLUÇÕES NÃO-DOMINADAS - CENÁRIO 2 .....	171
<b>QUADRO 12</b> – CONJUNTO DE SOLUÇÕES DOMINADAS CENÁRIO 3.1 .....	173
<b>QUADRO 11</b> – FRONTEIRA DE CADA SOLUÇÃO CENÁRIO 3.1.....	173
<b>QUADRO 12</b> – CONJUNTO DE SOLUÇÕES DOMINADAS CENÁRIO 3.1 .....	173
<b>QUADRO 13</b> – FRONTEIRA DE CADA SOLUÇÃO CENÁRIO 3.2.....	177
<b>QUADRO 14</b> – CONJUNTO DE SOLUÇÕES DOMINADAS CENÁRIO 3.2 .....	177
<b>QUADRO 15</b> – FRONTEIRA DE CADA SOLUÇÃO CENÁRIO 4.1.....	181
<b>QUADRO 16</b> – CONJUNTO DE SOLUÇÕES DOMINADAS CENÁRIO 4.1.....	181
<b>QUADRO 17</b> – FRONTEIRA DE CADA SOLUÇÃO CENÁRIO 4.2.....	183
<b>QUADRO 18</b> – CONJUNTO DE SOLUÇÕES DOMINADAS CENÁRIO 4.2.....	183
<b>QUADRO 19</b> – FRONTEIRA DE CADA SOLUÇÃO CENÁRIO 4.3.....	185
<b>QUADRO 20</b> – CONJUNTO DE SOLUÇÕES DOMINADAS - CENÁRIO 4.3.....	185
<b>QUADRO 21</b> – IDENTIFICAÇÃO DAS SOLUÇÕES NÃO-DOMINADAS – CENÁRIO 4.3.....	186
<b>QUADRO 22</b> – INDICAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS EM SITUAÇÕES ESPECÍFICAS DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO DO PROBLEMA .....	188

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>AASHTO</b>	American Association of State Highway and Transportation Officials
<b>AB</b>	Asfalto Borracha
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>AEMC</b>	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
<b>AFNOR</b>	Association Française de Normalization
<b>AMP</b>	Asfalto Modificado por Polímero
<b>ANOVA</b>	Análise de Variância
<b>ANTT</b>	Agência Nacional de Transportes Terrestres
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>CE</b>	Cidades Esponjas
<b>CGS</b>	Compactador Giratório SUPERPAVE
<b>CH</b>	Cal Hidratada
<b>CP</b>	Corpo de Prova
<b>CPA</b>	Camada Porosa de Atrito
<b>DNIT</b>	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
<b>ES</b>	Especificação e Serviço
<b>EVA</b>	Etileno Acetado de Vinila
<b>FNDS</b>	Fast NonDominated Sorting
<b>GI</b>	Green infrastructure
<b>HSD</b>	Honestly Significance Difference
<b>IDF</b>	Intensidade-Duração-Frequência
<b>LCITP</b>	Lincang Center Innovation Technologic Parking
<b>LEP</b>	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
<b>LID</b>	Low Development Impact
<b>LIUDD</b>	Urban Design and Development
<b>LVDT</b>	Linear Variable Differential Transformer
<b>MAD</b>	Mistura Asfáltica Densa
<b>MATLAB</b>	Matrix Laboratory
<b>ME</b>	Método de Ensaio
<b>MeDiNa</b>	Método de Dimensionamento Nacional
<b>MR</b>	Módulo de Resiliência
<b>MSCR</b>	Multiple Stress Creep Recovery
<b>NBR</b>	Norma Brasileira Regulamentadora
<b>NCAT</b>	National Center for Appropriate Technology
<b>NSGA</b>	NonDominated Sorting Genetic Algorithm
<b>OGFC</b>	Open Graded Friction Course
<b>ONU</b>	Organização das Nações Unidas
<b>ORDOT</b>	Oregon Department of Transportation
<b>PA</b>	Porous Asphalt
<b>PG</b>	Performance Grade
<b>PM</b>	Perda de Massa
<b>rpm</b>	Rotações por Minuto
<b>RRT</b>	Relação de Resistência à Tração Retida
<b>RT</b>	Resistência à Tração
<b>RTc</b>	Resistência à tensão dos corpos de prova condicionados
<b>RTFO</b>	Rolling Thin-Film Oven

<b>SBS</b>	Styrene Butadiene Styrene
<b>SCDOT</b>	South Carolina Department of Transportation
<b>SUDS</b>	Sustainable Urban Drainage Systems
<b>SUPERPAVE</b>	Superior Performance Asphalt Pavements
<b>TMN</b>	Tamanho Máximo Nominal
<b>Tp</b>	Tempo de Encharcamento
<b>UFCG</b>	Universidade Federal de Campina Grande
<b>UTM</b>	Universal Testing Machine
<b>VIB</b>	Velocidade Inicial Básica
<b>WSUD</b>	Water Sensitive Urban Design

## RESUMO

A abordagem para a gestão de águas pluviais, no espaço urbano, denominada *Low Impact Development* (LID), vem conquistando o interesse da comunidade internacional devido à crescente urbanização dos países em desenvolvimento, à impermeabilização do solo urbano e, principalmente, às alterações do regime de precipitações provocadas pelas mudanças climáticas. Contudo, debates devido à falta de consenso sobre sua conceitualização reforçam a criação de pontos cegos na prática. Essa desconexão entre conceitualização e prática é uma manifestação da forma como as visões dominantes sobre o desenvolvimento urbano são impostas de cima para baixo. Não obstante às críticas em relação ao LID, esta pesquisa estudou uma de suas técnicas mais tradicionais, os denominados pavimentos permeáveis. Buscou-se, portanto, selecionar projetos de misturas asfálticas porosas utilizadas como revestimento superficial dos pavimentos permeáveis, com base em critérios mecânicos e funcionais. Foram concebidos 15 projetos de misturas asfálticas porosas, combinando cinco granulometrias e três teores de ligantes distintos. Das cinco granulometrias, três foram de faixas nacionais e duas de faixas internacionais. Na primeira etapa foram estudados os parâmetros mecânicos, por meio dos ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência, perda de massa cântabro e dano por umidade induzida. Na segunda etapa avaliou-se o desempenho funcional, com ensaios de permeabilidade, infiltração e retenção de água. O tempo de encharcamento da superfície do pavimento também foi outra variável avaliada. Na terceira etapa, problemas específicos de otimização, como conciliar objetivos mecânicos e funcionais conflitantes entre si, foram concebidos em diferentes cenários. Cada problema foi resolvido utilizando um modelo de otimização baseado no conceito de dominância de soluções, que consiste na escolha de uma ou mais soluções ótimas com melhores compromissos (*trade offs*) entre os múltiplos objetivos que se desejam otimizar. A solução para cada problema se deu pela seleção das misturas mais adequadas para cada cenário proposto. Algumas condições de contorno ajudaram a formular problemas com objetivos conflitantes envolvendo os pavimentos permeáveis, como o nível de tráfego, clima, temperatura e condições de drenagem da rodovia. Dentre os resultados dos ensaios mecânicos, o atendimento à resistência à tração mínima foi um problema quase sistemático, enquanto a rigidez mostrou-se mais influenciada pela granulometria da mistura e a perda de massa pelo teor de ligante. Quanto à suscetibilidade à umidade, as misturas obtiveram respostas satisfatórias, devido, principalmente, ao tipo de ligante utilizado. Sobre o desempenho funcional, os vazios comunicantes da mistura se mostraram diretamente proporcionais à permeabilidade e, juntamente com a granulometria e o teor de ligante, influenciam a sua capacidade de retenção de água. O teor de ligante e a granulometria também influenciaram a taxa de infiltração e, conseqüentemente, o tempo de encharcamento superficial, mas são as espessuras e a anisotropia das demais camadas do pavimento que determinam a rapidez para se atingir a sua capacidade de infiltração potencial, o que impacta, diretamente, o seu tempo de encharcamento superficial. Quanto aos resultados das otimizações, não apenas uma, mas um conjunto de misturas pode ser solução de um mesmo problema multiobjetivo e a tomada de decisão depende das condições de contorno do problema. De uma forma geral, misturas porosas com maiores teores de ligante e com diâmetros máximos de agregados de 12,5 mm se sobressaíram em relação às demais misturas disponíveis no espaço de decisão.

**Palavras-chave:** LID, pavimentos permeáveis, misturas asfálticas porosas, otimização multiobjetivo, dominância de soluções.

## ABSTRACT

The Low Impact Development (LID) approach to rainwater management in urban areas has been gaining interest from the international community due to the growing urbanization of developing countries, the sealing of urban soil and, mainly, the changes in rainfall patterns caused by climate change. However, debates due to the lack of consensus on its conceptualization reinforce the creation of blind spots in practice. This disconnect between conceptualization and practice is a manifestation of the way in which dominant visions of urban development are imposed from the top down. Despite the criticism of LID, this research studied one of its most traditional techniques, the permeable pavements. The aim was to select designs for porous asphalt mixtures used as a surface coating for permeable pavements, based on mechanical and functional criteria. Fifteen porous asphalt mix designs were conceived, combining five different grain sizes and three different binder contents. Among five gradings, three were from national ranges and two from international ranges. In the first stage, the mechanical parameters studied were restricted of tensile strength, resilience modulus, cantabro loss mass and induced moisture damage tests. In the second stage, the functional performance was assessed with permeability, infiltration and water retention tests. The ponding time of the pavement surface was also evaluated. In the third stage, specific optimization problems, such as reconciling conflicting mechanical and functional objectives, were designed in different scenarios. Each problem was solved using an optimization model based on the concept of solution dominance, which consists of choosing one or more optimal solutions with the best trade offs between the multiple objectives to be optimized. Each problem was solved by selecting the most suitable mixtures for each proposed scenario. Some boundary conditions helped formulate problems with conflicting objectives involving permeable pavements, such as traffic levels, climate, temperature and road drainage conditions. Among the results of the mechanical tests, meeting the minimum tensile strength was an almost systematic problem, while stiffness was more influenced by the grain size of the mixture and mass loss by the binder content. With regard to moisture susceptibility, the mixtures obtained satisfactory responses, mainly due to the type of binder used. In terms of functional performance, the communicating voids in the mix were directly proportional to the permeability and, together with the grain size and binder content, influence its water retention capacity. The binder content and granulometry also influenced the infiltration rate and, consequently, the ponding time, but it is the thickness and anisotropy of the other pavement layers that determine how quickly they reach their potential infiltration capacity, which directly impacts their ponding time. As for the results of the optimizations, not just one, but a set of mixtures can be the solution to the same multi-objective problem and the decision depends on the boundary conditions. In general, porous mixtures with higher binder contents and maximum aggregate diameters of 12.5 mm stood out from the other mixtures available in the decision space.

**Keywords:** LID, permeable pavements, porous asphalt mixture, multiobjective optimization, solution dominance.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1. Justificativa da pesquisa .....	23
1.2. Premissas e hipóteses da pesquisa .....	24
1.3. Objetivos .....	25
1.3.1. Objetivo geral .....	25
1.3.2. Objetivos específicos .....	25
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>27</b>
2.1. Gestão das águas pluviais .....	27
2.2. Low Impact Development (LID).....	30
2.3. Pavimentos Permeáveis .....	36
2.3.1. Revestimentos porosos – camada porosa de atrito .....	38
2.3.1.1. Histórico da camada porosa de atrito .....	39
2.3.1.2. Propriedades e pesquisas com camada porosa de atrito .....	40
2.3.1.2.1. Vida útil e vida funcional da CPA .....	44
2.3.1.2.2. Durabilidade da CPA .....	45
2.3.1.2.3. Projeto de mistura da camada porosa de atrito.....	47
2.3.1.2.4. Análise custo/benefício da camada porosa de atrito .....	51
2.3.1.2.6. Pesquisas relacionadas à camada porosa de atrito.....	53
2.3.1.3. Propriedades hidráulicas .....	58
2.3.1.3.1. Permeabilidade .....	58
2.3.1.3.2. Infiltração .....	59
2.3.1.3.3. Capacidade de retenção de Água .....	62
2.4. Otimização multiobjetivo .....	64
2.4.1. Espaço de decisão e espaço de objetivos .....	65
2.4.2. Conceito de dominância de soluções .....	66
2.4.3. Conjunto de soluções e frente de Pareto .....	67
2.5. Abordagem dos métodos de otimização multiobjetivo.....	69
2.5.1. Métodos clássicos – soma ponderada.....	70
2.5.2. Métodos diretos .....	71
2.6. Otimização multiobjetivo aplicada à pavimentação.....	72
2.7. Considerações finais do capítulo.....	75
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>77</b>
3.1. Planejamento da pesquisa .....	77
1ª Etapa – Seleção e caracterização de materiais .....	77
2ª Etapa – Curvas granulométricas, teores de ligante e projetos de mistura .....	77
3ª Etapa – Programa de ensaios mecânicos e funcionais.....	79
4ª Etapa – Cenários de duração e intensidade de chuva.....	79
5ª Etapa – Otimização multiobjetivo .....	79
3.2. Materiais .....	81
3.2.1. Ligante asfáltico .....	81
3.3.2. Agregados .....	82
3.4. Métodos .....	83
3.4.1. Projetos de misturas .....	83
3.4.1.1. Faixas granulométricas.....	83
3.4.1.2. Teores de ligante iniciais .....	86
3.4.1.3. Temperaturas de mistura e de compactação .....	86
3.4.1.4. Método de compactação .....	86
3.4.2. Programa de ensaios mecânicos .....	92
3.4.2.1. Resistência à tração.....	93
3.4.2.2. Módulo de resiliência .....	94

3.4.2.3. Dano por umidade Induzida.....	95
3.4.2.4. Perda de massa cântabro.....	96
3.4.3. Programa de ensaios funcionais.....	97
3.4.3.1. Permeabilidade.....	97
3.4.3.2. Capacidade de infiltração.....	99
3.4.3.3. Tempo de Encharcamento.....	102
3.4.3.3.1. Intensidade de chuva para determinação do tempo de encharcamento.....	103
3.4.3.3.2. Impacto no tempo de encharcamento devido à variação da duração e intensidade de chuva.....	103
3.4.3.4. Capacidade de retenção de água.....	104
3.4.4. Análise estatística dos resultados.....	106
3.4.5. Método de otimização.....	107
3.4.5.1. Variáveis de decisão.....	107
3.4.5.2. Problemas de otimização.....	109
3.4.5.2.1. Cenário 1 – objetivos mecânicos e funcionais.....	109
3.4.5.2.2. Cenário 2 – objetivos funcionais.....	110
3.4.5.2.3. Cenário 3 – objetivos mecânicos e funcionais ponderados.....	111
3.4.5.2.4. Cenário 4 – situações específicas de otimização – objetivos conflitantes.....	113
3.4.4.3. Algoritmo de busca multiobjetivo.....	115
3.4.4.3.1. Funcionamento do algoritmo FNDS.....	116
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>119</b>
4.1. Ensaio mecânicos.....	119
4.1.1. Resistência à tração por compressão diametral.....	119
4.1.2. Módulo de resiliência.....	121
4.1.3. Perda de massa cântabro.....	123
4.1.4. Dano por umidade induzida.....	124
4.2. Ensaio funcionais.....	126
4.2.1. Permeabilidade.....	126
4.2.2. Infiltração.....	130
4.2.2.2. Capacidade de infiltração.....	133
4.2.3. Tempo de encharcamento.....	138
4.2.3.1. Impacto da duração e intensidade de chuva no tempo de encharcamento.....	142
4.2.4. Capacidade de retenção de água.....	146
4.3. Resultados da análise estatística.....	148
4.4. Resultados da otimização.....	167
4.4.1. Cenário 1 – objetivos mecânicos e funcionais.....	167
4.4.2. Cenário 2 – apenas objetivos funcionais.....	170
4.4.3. Cenário 3 – objetivos mecânicos e funcionais ponderados.....	172
4.4.3.1. Resultados do cenário 3.1.....	172
4.4.3.2. Resultados do cenário 3.2.....	175
4.4.3.3. Resultados do cenário 3.3.....	178
4.4.4. Cenário 4 – situações específicas de otimização – objetivos conflitantes.....	180
4.4.4.1. Resultados do cenário 4.1: perda de massa cântabro x permeabilidade.....	180
4.4.4.2. Resultados do cenário 4.2: cap. retenção x relação de resistência à tração retida.....	182
4.4.4.3. Resultados do cenário 4.3: permeabilidade x cap. de retenção.....	184
4.5. Indicativo de misturas asfálticas porosas em situações específicas baseado nos resultados da pesquisa.....	187
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>191</b>
5.1. Considerações finais.....	192
5.2. Recomendações para futuras pesquisas.....	193
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>194</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Nos países em desenvolvimento, a urbanização acelerada, aliada à ocupação desordenada em áreas de risco e à intensa impermeabilização do solo urbano, respondem por consequências sociais e ambientais, dentre elas, os problemas relacionados à drenagem urbana (MCGRANE, 2016; SUN; LOTZ; CHANG, 2017; TALIB; RANDHIR, 2017; NUERNBERG, 2021). A redução da permeabilidade do solo contribui para o acréscimo do volume de escoamento superficial em relação à infiltração, diminuindo o tempo de pico dos hidrogramas, o que predispõe a um maior risco de inundação (BUTLER *et al.*, 2018; NUERNBERG, 2021). As alterações climáticas contribuem para agravar este problema principalmente nas zonas urbanas, resultando em fatalidades humanas, perda de biodiversidade, destruição de habitats e perdas econômicas consideráveis (FOGEIRO, 2019).

Uma forma de mitigar ou minimizar os efeitos supramencionados é projetar cidades que facilitem a infiltração de água em vez de escoá-la, de forma a aproximar a hidrologia das bacias urbanas das condições de pré-desenvolvimento. Neste sentido surgiu o conceito de Low Impact Development (LID), que se utiliza de controles distribuídos de águas pluviais, geralmente Infraestruturas Verdes (IG) – como espaços verdes e recursos hidrológicos naturais – para garantir as condições supramencionadas. Numa concepção ideal, o LID visa devolver às bacias hidrográficas tais condições, imitando os ciclos naturais da água. (DAMODARAM, *et al.*, 2010; SHUSTER *et al.*, 2008; VAN, ROON, 2007; VAN, ROON; KNIGHT-LENIHAN, 2004; ECKART, *et al.*, 2017).

Um exemplo clássico de aplicação dessa técnica em larga escala se deu na China. Segundo Li (2018), após graves inundações ocorridas na cidade de Pequim, em 2012, que resultaram em 79 mortes e um prejuízo de 1,78 bilhões de dólares, o governo chinês tornou a resiliência à água uma prioridade para suas cidades. O plano foi criar áreas que pudessem absorver quantidades elevadas de água e retê-las até que fossem lentamente devolvidas ao meio ambiente. Esta concepção para gestão das águas pluviais deu origem ao conceito das Cidades-Esponjas, que envolve coberturas verdes, bacias de infiltração, valas de retenção e pavimentos permeáveis (FOGEIRO, 2019).

Os pavimentos permeáveis são dispositivos de dupla função, atuando como

superfície pavimentada para o tráfego de veículos e como um sistema funcional sustentável de manejo de águas pluviais (BEAN, 2015; SCHOLZ; GRABOWIECKI, 2007; WOODS-BALLARD, 2015; NUERNBERG, 2021). Estudos recentes têm mostrado que os pavimentos permeáveis proporcionam um decréscimo do volume e do pico de escoamento superficial (BAI *et al.* 2019; PALLA; GNECCO, 2015; WANG *et al.*, 2019; NUERNBERG, 2021).

Woods-Ballard *et al.* (2015) afirmam que existem duas tipologias para a camada de revestimento do pavimento permeável: os revestimentos permeáveis e os revestimentos porosos. Os revestimentos permeáveis são constituídos por um material impermeável em que a infiltração da água da chuva ocorre nos espaços vazios ou juntas alargadas, como é o caso dos blocos intertravados. Por outro lado, os revestimentos porosos permitem a infiltração da água por entre seus poros.

De acordo com Kuruppu *et al.* (2019), os dois tipos de estruturas monolíticas de revestimento poroso são o concreto poroso e a mistura asfáltica porosa. O projeto de concreto poroso monolítico desempenha um papel importante no controle dos desempenhos estruturais e hidráulicos dos pavimentos permeáveis, contudo, o que mais influencia a sua resistência são a permeabilidade, o fator água-cimento, o tamanho e a capacidade adesiva das partículas e a distribuição dos agregados graúdos.

As misturas asfálticas porosas possuem um elevado volume de vazios comunicantes (porosidade efetiva) que potencializam os atributos funcionais da camada superficial do pavimento. A percentagem de vazios permitida varia de acordo com o país. No Brasil, a percentagem de vazios aplicada varia de 18 a 25% (DNIT ES-386/99), de 18% a 22% nos Estados Unidos (ASTM D7064/D7064M-21), de 14% a 32% na Europa (EN 13108-7:2016) e na Alemanha, de 22 a 28% (FGSV 2013a, 2013b) (ALBER; RESSEL; SCHUCK, 2020).

As misturas asfálticas porosas são conhecidas no Brasil como *Camadas Porosas de Atrito* (CPA), enquanto nos Estados Unidos este tipo de revestimento recebe a sigla OGFC (*Open-Graded Friction Course*) e na Europa, Japão e China recebem a sigla PA (*Porous Asphalt*) (ALVAREZ; MARTIN; ESTAKHRI, 2011).

Normalmente, ao projetar um pavimento, atenta-se à sua função estrutural, mas aspectos funcionais, como as propriedades acústicas e hidráulicas do pavimento, são

negligenciados. Especificamente às propriedades hidráulicas pode-se citar a taxa de infiltração, a permeabilidade e a capacidade de retenção de água do pavimento. Embora algumas dessas propriedades sejam conflitantes entre si, a busca de otimizá-las se torna cada vez mais importante para as vias e rodovias por proporcionarem aos seus usuários mais qualidade, segurança e conforto (PIARC, 2013; KOLODZIEJ, 2016). A presença de lâmina de água sobre o pavimento provoca a perda de aderência entre os pneus dos veículos e o revestimento, o aumento do risco de hidroplanagem, pulverização, redução da visibilidade pela névoa formada atrás dos veículos e aumenta a reflexão luminosa, o que impede visualizar a sinalização horizontal à noite. Esta situação produz um aumento do número de acidentes nos dias chuvosos (MEURER FILHO, 2001; KOLODZIEJ, 2016).

Diante dessa realidade, os manuais e normativos técnicos vigentes, como a ABNT NBR 16416/2015, determinam que se construam vias e rodovias a partir de projetos que ofereçam, além da durabilidade estrutural, as condições de segurança e de conforto aos usuários, ou seja, como um adequado escoamento das águas e a redução de ruídos.

Alvarez *et al.* (2011) afirmam que a otimização do equilíbrio entre funcionalidade e durabilidade das misturas porosas é uma área que carece de mais pesquisas. O desafio é buscar uma mistura que apresente, ao mesmo tempo, boas propriedades drenantes e resistência mecânica. Não é tarefa fácil otimizar, ao mesmo tempo, atributos funcionais e estruturais conflitantes entre si, uma vez que a solução não é trivial. Porém, em alguns países, como no Brasil, existem estudos que buscam atender ao critério funcional dos pavimentos (PIARC, 2013; KOLODZIEJ, 2016). As misturas asfálticas porosas, como a camada porosa de atrito, foram concebidas, a princípio, para atenderem aos critérios funcionais e não aos aspectos estruturais do pavimento, portanto, o desafio é a busca de novas tecnologias de materiais, projetos padronizados e relação custo/benefício atraente que possam atender a esses dois critérios de projeto.

Wu *et al.* (2020) afirmam que a revisão sobre o tema é limitada, neste sentido, os autores realizaram uma revisão para facilitar o entendimento fundamental do comportamento das misturas asfálticas porosas em termos de caracterização dos materiais, durabilidade e funcionalidade. Os autores procuraram identificar os desafios atuais e futuros para melhorar o desempenho deste tipo de mistura de tal modo que

seja possível o seu uso generalizado. Eles concluíram que a melhoria das matérias-primas e a manutenção preventiva são determinantes para aumentar a durabilidade. Quanto à drenabilidade, os autores recomendam o aperfeiçoamento dos ensaios de permeabilidade considerando a anisotropia do meio poroso. Com relação aos custos, os autores afirmam que se fazem necessários mais estudos de eficácia para este tipo de revestimento em pavimentos para que seja possível dimensionar de forma mais consistente os custos em relação aos benefícios.

Não obstante o mérito dos trabalhos de Meurer Filho (2001), Souza (2008), Dresch (2016), Kolodziej (2016), Jacques (2018), Alves (2019), Alecrim (2021), Sousa (2024), dentre outros, que estudaram as misturas asfálticas porosas do tipo CPA, uma abordagem integrada na busca da otimização conjunta das propriedades mecânicas e funcionais dessas misturas não foi encontrada. A falta de subsídios suficientes para auxiliar a tomada de decisão do projetista/consultor dificulta a seleção da melhor mistura asfáltica a ser aplicada num projeto específico de pavimentação.

Conforme menção anterior, a resposta não é trivial e não existe solução única para este tipo de problema. Em problemas de otimização com múltiplos objetivos conflitantes, as soluções ótimas se impõem pela relação de não-dominância entre elas. Tal relação é baseada no conceito denominado *Dominância de Soluções*, que significa que, se uma solução A é melhor ou indiferente a uma solução B em múltiplos objetivos, e existe, pelo menos, um objetivo em que A seja estritamente melhor do que a solução B, então, nesta condição, a solução A domina a solução B. Portanto, B seria uma solução dominada e A uma solução não-dominada.

Portanto, esta pesquisa estudou a aplicação de um método de otimização multiobjetivo para a seleção ótima de projetos de misturas asfálticas porosas. Com a otimização do revestimento poroso, principalmente dos seus atributos funcionais, pretendeu-se, de forma direta, mitigar (ou eliminar) os impactos causados pela presença de lâmina d'água na superfície dos pavimentos, sejam estes de rodovias ou de vias urbanas, de forma a proporcionar mais segurança e conforto aos usuários. De forma indireta, buscou-se contribuir pra otimizar os projetos de pavimentos permeáveis que, juntamente com outras técnicas de LID, possam reduzir o risco de inundações em áreas suscetíveis a este fenômeno.

## 1.1. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O Brasil, por ser um país tropical, apresenta ocorrência de chuvas intensas e de curta duração muito frequente. Tal fato, aliado ao elevado nível de impermeabilização do solo dos principais centros urbanos e o efeito das mudanças climáticas, contribui significativamente para a ocorrência e recorrência de inundações provocada pelas chuvas, resultando em calamidade pública e perdas de vidas devido à falta de planejamento urbano e à ocupação desordenada de áreas de risco pela população. Calamidades desse tipo não são raras de acontecer, a exemplo das enchentes no estado do Rio Grande do Sul em 2024.

Uma forma eliminar ou minimizar o risco das inundações e os transtornos causados pela presença de lâmina d'água nas vias, avenidas e rodovias dos grandes centros urbanos é incorporar uma ou mais alternativas do rol de soluções presentes na técnica de LID.

Alber *et al.* (2020) afirmam que as vantagens da drenagem da mistura asfáltica porosa são baseadas na característica de que a água pode facilmente se infiltrar da superfície na estrutura porosa e percolar entre os vazios da mistura. A redução dos riscos de aquaplanagem, pulverização e perigos relacionados a superfícies molhadas da estrada são as vantagens mais evidentes e aumentam a segurança do tráfego para o usuário. Portanto, quanto mais tempo a superfície do pavimento estiver livre de lâmina d'água, que vai depender da intensidade e da duração da chuva a qual o pavimento estiver submetido, menor será a probabilidade de ocorrências dos inconvenientes supramencionados. Esse tempo é definido como Tempo de Encharcamento ( $t_p$ ), que é o intervalo entre o início da chuva e o início do surgimento de lâmina d'água na superfície. Se o pavimento permitir a infiltração de água por entre as camadas porosas (granulares) subjacentes à camada de revestimento, pode contribuir para a absorção de água pela sua estrutura de camadas e retardar por mais tempo o surgimento da lâmina d'água na superfície.

Além disso, a água pode ser retida dentro da estrutura porosa até certo ponto e, assim, reduzir a descarga dos pavimentos, conseqüentemente, aliviando as instalações de drenagem ou até mesmo evitando o risco de inundações em um contexto mais amplo (PAGOTTO; LEGRET; LE CLOIREC, 2000). Esse atributo é denominado de capacidade de retenção de água. Segundo Ressel (2019) *apud* Alber

*et al.* (2020) o percentual retido pode variar entre 10 e 25% da água total infiltrada no pavimento.

Um revestimento poroso, pela sua própria definição e característica, favorece aos atributos da infiltração e da permeabilidade em detrimento da sua capacidade de retenção de água, visto que os dois primeiros são conflitantes em relação ao terceiro. Não bastasse a complexidade de otimizar critérios estruturais e funcionais conflitantes, há situações em que diferentes atributos, dentro de um mesmo critério, também são conflitantes entre si. Portanto, sendo este um problema clássico de otimização multiobjetivo, o desafio é otimizar atributos mecânicos e funcionais conflitantes que minimizem os efeitos contraditórios entre ambos na busca de um compromisso (equilíbrio) razoável que atenda, ao mesmo tempo, os critérios de durabilidade e funcionalidade.

Como já introduzido, quando se trata de problemas multiobjetivos não existe uma solução única, pois várias soluções ótimas são possíveis. Essas soluções são conhecidas como soluções não-dominadas, originadas do conceito de dominância já mencionado anteriormente e que será abordado e detalhado mais adiante.

## **1.2. PREMISSAS E HIPÓTESES DA PESQUISA**

Serão adotadas as seguintes premissas para a pesquisa:

- Os teores de ligante asfáltico e a distribuição e o tamanho das partículas das misturas asfálticas porosas são determinantes para a otimização das propriedades hidráulicas das misturas asfálticas porosas;
- Quanto maior a intensidade de chuva (mm/h), menor o tempo de encharcamento ( $t_p$ ), ou seja, levará menos tempo para o surgimento da lâmina d'água na superfície do pavimento quanto maior for a intensidade da chuva, sob uma mesma configuração de granulometria e teor de ligante da mistura;
- A seleção ótima em termos de granulometria e teor de ligante de um projeto de uma mistura asfáltica porosa é função dos objetivos que se queiram priorizar, sejam eles propriedades mecânicas ou funcionais.

Diante das premissas supramencionadas, as seguintes hipóteses serão testadas:

- O percentual de vazios comunicantes (porosidade efetiva) e o tamanho das partículas terão impacto no desempenho funcional das misturas asfálticas porosas;
- Embora o teor de ligante, percentual de vazios e o tamanho de partículas do revestimento asfáltico poroso possam influenciar a taxa de infiltração do pavimento, impactando o tempo de encharcamento ( $t_p$ ) na superfície, o nível de intensidade e duração da chuva serão os fatores determinantes para esta variável de tempo;
- Pode existir mais de uma combinação entre granulometrias e teores de ligante que otimiza atributos mecânicos e funcionais conflitantes em misturas asfálticas porosas.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVO GERAL**

Propor critérios e procedimentos para seleção de projetos de misturas asfálticas porosas em função de desempenhos mecânicos e funcionais utilizando métodos de otimização multiobjetivo baseados no conceito de dominância para a tomada de decisão.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Verificar a influência da distribuição e tamanho dos grãos e do teor de ligante asfáltico nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas porosas;
- Avaliar o desempenho funcional de misturas asfálticas porosas concebidas sob diferentes granulometrias e teores de ligante;
- Determinar propriedades hidrológicas como a capacidade de infiltração e o tempo de encharcamento superficial de pavimentos asfálticos permeáveis e avaliar o impacto da distribuição e tamanho dos grãos e do teor de ligante da mistura asfáltica nessas propriedades;
- Avaliar a influência de diferentes cenários de duração e intensidade de chuvas no tempo de encharcamento superficial de um pavimento permeável;

- Sugerir soluções de misturas asfálticas porosas que otimizam objetivos conflitantes a partir de problemas específicos de otimização multiobjetivo considerando diferentes condições de contorno.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

Neste capítulo, inicialmente, foi discutida uma abordagem sobre a importância da gestão de águas pluviais e as principais consequências da urbanização e das mudanças climáticas sobre o regime do escoamento que afetam diretamente o funcionamento do sistema convencional de drenagem das águas pluviais.

Em seguida, foram discutidos os principais problemas observados pela crescente mudança do ambiente natural que, ao longo do tempo, tornam ineficazes e/ou ineficientes as soluções tradicionais da abordagem atual de gestão das águas pluviais. Em seguida, introduziu-se a nova abordagem para a gestão das águas pluviais baseada no conceito de Low Impact Development (LID).

Neste contexto, e sendo o principal objeto desta pesquisa, foram discutidos com maior ênfase o conceito e pesquisas sobre pavimentos permeáveis revestidos com misturas asfálticas porosas conhecidas no Brasil como Camadas Porosas de Atrito (CPA).

Conceitos de otimização multiobjetivo, tipo de problemas e métodos para encontrar a(s) solução(s) ótima(s) de problemas multiobjetivos foram introduzidos pois são fundamentais para o objetivo principal desta pesquisa.

Finalmente, foram apresentados estudos que utilizaram a otimização multiobjetivo na resolução de problemas em variadas situações na área de pavimentação.

### **2.1. GESTÃO DAS ÁGUAS PLUVIAIS**

O aumento das áreas urbanizadas, associado à desproporcionalidade com que as infraestruturas de drenagem urbana se ampliam e a forma inadequada de sua utilização pela população torna cada vez mais evidente que os sistemas tradicionais de manejo de águas pluviais são ineficientes na gestão do escoamento superficial. Essa situação, somada aos eventos de enchentes, alagamentos e deslizamentos de terras no meio urbano, alerta para a urgência na transformação dos modelos de desenvolvimento urbano, integrando o manejo e consumo sustentável dos recursos naturais (MENDES e SANTOS, 2022).

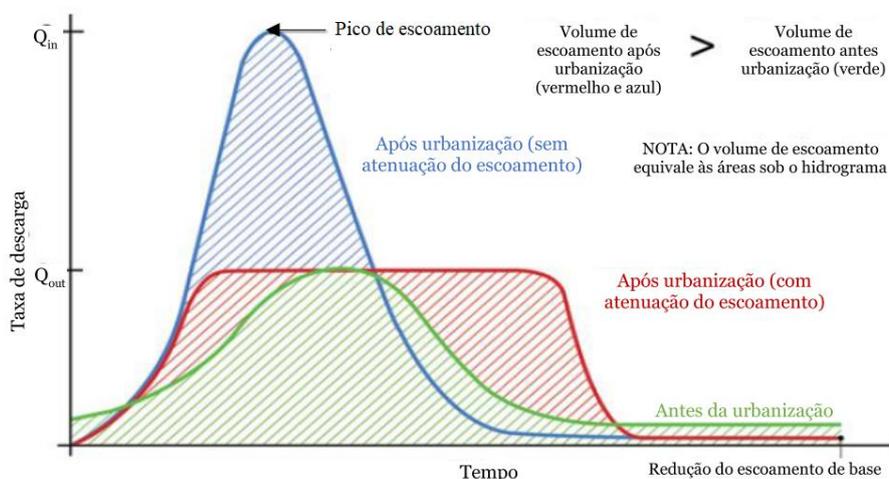
Outra preocupação é o impacto do aumento, em frequência e em intensidade,

de eventos naturais extremos, como as chuvas de grande intensidade e de curta duração (ZAHMATKESH, 2015a; GHODSI, 2020; FAO, 2021; WMO, 2021; ROSEBORO, 2021), afetando as infraestruturas existentes (WILBANKS, T. J.; FERNANDEZ, 2014; HOWARD, 2016). São também preocupantes os impactos das mudanças climáticas e de outros eventos, como a urbanização desordenada, na elevação de riscos à vida e à qualidade e quantidade da água (JAIN, C. K.; SINGH, 2018; SHIRU, 2019; ZANGO, 2021; MENDES e SANTOS, 2022).

Entre os impactos dos desastres de natureza hidrológica, os mais evidentes são as perdas materiais e humanas principalmente nas comunidades mais vulneráveis (WATER, 2019). Por isso, o tema manejo das águas, em todo o seu ciclo, está na Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), que é um guia e plano de ação para que a comunidade internacional busque um mundo mais sustentável e resiliente, especificamente nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 (água e saneamento) e 11 (cidades e comunidades sustentáveis). O Brasil, como outros países em desenvolvimento, sofre com a falta de infraestrutura básica, com destaque para áreas urbanas irregulares, inclusive em encostas e áreas alagáveis, agravando os efeitos das chuvas (MIGUEZ, VERÓL, BIANCHINI, 2014; MENDES e SANTOS, 2022).

A abordagem tradicional para a gestão de águas pluviais urbanas tem sido usar meios-fios, sarjetas e esgotos para as águas pluviais por meio de um sistema centralizado com a maior rapidez e segurança possível. O melhor transporte de águas pluviais em áreas urbanas combinado com o aumento das superfícies impermeáveis resultou no aumento dos picos de escoamento (Figura 1), redução dos tempos de concentração e das taxas de infiltração e conseqüentes reduções nas taxas de recarga das águas subterrâneas e redistribuição do balanço hídrico (KONRAD, C.P., BOOTH, 2005; WONG, EADIE, 2000; ECKART *et al.*, 2017). Esta abordagem geralmente não contribui para o desenvolvimento urbano sustentável (CHEN *et al.*, 2016; MITCHELL, 2006; PAULE-MERCADO *et al.*, 2017; VAN, ROON, 2007; WONG, EADIE, 2000; ECKART *et al.*, 2017).

**Figura 1** - Hidrogramas de cheia esquemáticos da influência da urbanização no escoamento superficial  
 Fonte: (Afonso, 2021)



As soluções sustentáveis de manejo das águas urbanas, especialmente de drenagem, além dos benefícios ambientais como redução do escoamento superficial (LIAO, DENG, TAN, 2017; BROWN, MIJIC, 2019; YANG, 2020; SUI, VEN, 2021) e da poluição (BRESSY, 2014 ; LIAO, DENG, TAN, 2017; BRASWELL, ANDERSON, HUNT, 2018; ZHAO, MENG, 2020) são vistas como soluções viáveis economicamente, como mostrado no levantamento das experiências feito em Mendes e Santos (2021). De acordo com Weitman *et al.* (2008), Davis e Naumann (2017) e Mendes e Santos (2021) esse manejo sustentável, quando comparado às técnicas convencionais, torna-se um elemento-chave para a solução da situação presente e futura, inclusive em razão das variações e mudanças climáticas.

A política dominante de desenvolvimento e controle dos impactos quantitativos na drenagem ainda se baseia no conceito de escoar a água precipitada o mais rápido possível. Segundo Tucci (2003) este princípio foi abandonado nos países desenvolvidos no início da década de 1970. A consequência imediata dos projetos baseados neste conceito é o aumento das inundações a jusante devido à canalização. Na medida em que a precipitação ocorre, e a água não é infiltrada, este aumento de volume, da ordem de seis vezes, escoam pelos condutos.

Tucci (2003) enfatiza que a irracionalidade dos projetos leva a custos insustentáveis, podendo chegar a ser dez vezes maior do que o custo de amortecer o

pico dos hidrogramas e diminuir a vazão máxima para jusante por meio de uma retenção. Portanto, o paradoxo é que países ricos verificaram que os custos de canalização e condutos eram muito altos e abandonaram esse tipo de solução (início dos anos 1970), enquanto países pobres continuavam a adotar sistematicamente essas medidas, perdendo duas vezes, uma com custos muito maiores e outra com o aumento dos prejuízos (TUCCI, 2003).

No fim da década de 1990 o Brasil acompanhou a evolução de outros países, contudo não conseguiu avançar satisfatoriamente na gestão e manejo de suas águas pluviais nos anos seguintes. Mais de uma década depois, Tucci (2012) apontou que grande parte das cidades brasileiras ainda permanecia atrasada na gestão da drenagem urbana e que apenas um número reduzido de cidades, como Porto Alegre, Brasília, Campo Grande e São Paulo, transitava para a gestão sustentável das águas pluviais (MENDES e SANTOS, 2022). Entretanto, no caso de Porto Alegre, a experiência recente das enchentes de 2024 demonstrou que a solução não foi tão eficaz.

Não obstante, Miguez *et al.* (2016) destacam que as fases evolutivas da drenagem urbana não foram estanques. Em função de especificidades locais elas podem ter acontecido simultaneamente ou até mesmo ter variado em uma mesma cidade, conforme projetos distintos de setores ou bairros. Além disso, independentemente de qual seja a trajetória mais coerente com a realidade brasileira, um dos paradigmas atuais da gestão das águas pluviais no Brasil é a mudança na filosofia construtiva de sistemas exclusivamente tradicionais de drenagem para modelos mais resilientes e sensíveis à água. Dessa forma, eles são mais coerentes com as políticas de desenvolvimento sustentável nas cidades e em todo o país. (MENDES e SANTOS, 2022).

É nesse contexto que surge uma filosofia emergente para a gestão de águas pluviais, denominado *Low Impact Development* (Desenvolvimento de Baixo Impacto).

## **2.2. LOW IMPACT DEVELOPMENT (LID)**

Segundo Eckart *et al.* (2017) o LID foi introduzido pela primeira vez em 1999 no condado de Prince George's County, Maryland, EUA, como um meio para mitigar os

efeitos do aumento das superfícies impermeáveis, embora algumas técnicas individuais tenham entrado já em vigor antes do uso do termo LID. Este termo é uma terminologia norte-americana para uma filosofia de projeto que se tornou popular em muitas partes do mundo. Outros nomes usados para LID ou, pelo menos, concepções de projeto semelhantes, são Green Infrastructure (GI), Low Impact Urban Design and Development (LIUDD) na Nova Zelândia, Water Sensitive Urban Design (WSUD) na Austrália e Sustainable Urban Drainage Systems (SuDS) na Europa (ECKART; MCPHEE; BOLISSETTI, 2017).

Fletcher *et al.* (2015) discorrem sobre desenvolvimento e aplicação dessas e outras terminologias utilizadas no campo da drenagem urbana. O LID visa reduzir os custos de gerenciamento de águas pluviais considerando as características naturais do local no projeto. Dispositivos de tratamento de águas pluviais de pequena escala que incentivam a infiltração e a evaporação localizados na fonte de escoamento ou perto dela são considerados como controles de LID. O WSUD é uma metodologia que tenta gerenciar o equilíbrio hídrico, melhorar a qualidade e incentivar a conservação da água. Semelhante ao LID, o WSUD visa minimizar os impactos hidrológicos do desenvolvimento urbano. No mesmo contexto, o SuDS é uma gama de técnicas e tecnologias que são aplicadas para drenar águas pluviais de forma mais sustentável do que os sistemas convencionais e que buscam replicar as condições de pré-desenvolvimento em um local. Best Management Practice (BMP), por sua vez, é um termo usado para descrever uma prática ou técnica implementada para prevenir a poluição (FLETCHER *et al.*, 2015).

As alternativas de LID, comparadas com os padrões tradicionais de gestão de águas pluviais, têm a função de devolver o escoamento para o ciclo hidrológico natural, incluindo a redução no escoamento volume (AHIABLAME, *et al.*, 2013; JIA *et al.*, 2012), a melhora da infiltração (AHIABLAME *et al.*, 2012) e redução no pico de fluxo (DRAKE *et al.*, 2014), prolongando o tempo de atraso, redução nas cargas poluentes (LIU, Y. *et al.*, 2015) e aumento no fluxo de base (HAMEL; *et al.* 2013; ECKART, *et al.*, 2017).

Segundo Nuernberg (2021) a eficiência dos LID na diminuição de escoamento superficial é demonstrada em alguns estudos, por exemplo: Guo *et al.* (2019) concluíram que, sob eventos de chuva simulados e monitorados (com um período de retorno de um, dois e cinco anos) em uma bacia hidrográfica, a aplicação de LID

reduziu o escoamento superficial em toda a área, com índices de redução variando de 20,7% a 63,2%. Para eventos de chuva com período de retorno e intensidade menor, o desempenho dos LID se apresentou superior.

Uma experiência aplicada pela China foi no Parque de Inovação Tecnológica de Lincang (LCITP, sigla em inglês), na cidade de Lincang, pertencente à província de Yunnan (Li *et al.*, 2018). Numa área total de 3,78 ha foram aplicadas, simultaneamente, soluções de LID do tipo telhados verdes, jardins de chuva, trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis e áreas verdes, as quais abrangeram uma área de 8.382 m<sup>2</sup>, equivalente a 22% da área total do LCITP. De forma a observar a eficácia das soluções, foram feitas simulações do escoamento superficial para períodos de retorno de 5, 10, 20, 50 e 100 anos. Para o período de retorno de 10 anos, por exemplo, as soluções de LIDs, em conjunto, promoveram a redução de 37,78% do volume escoado superficialmente e uma redução de 28,56% na vazão de pico. Para o período de retorno de 100 anos, as reduções foram de 30,32% e 28,49%, respectivamente. Os pavimentos permeáveis responderam pela segunda maior contribuição pra estas reduções, em torno de 10% de acordo com a Tabela 1 (Li *et al.*, 2018).

**Tabela 1** - Contribuições e custos de cada técnica LID da solução ótima

LIDs	Contribuição para redução do escoamento superficial (%)	Custos (\$ M)
Jardins de chuva (Bio-retenção)	76	1,117
Pavimentos Permeáveis	10	0,147
Telhados Verdes	8	0,118
Valas gramadas	3	0,044
Trincheiras de infiltração	3	0,044

Fonte: Li *et al.* (2018)

Os pavimentos permeáveis, portanto, sejam eles constituídos com revestimentos permeáveis (blocos modulares/intertravados de concreto) ou com revestimentos porosos como o concreto poroso e as misturas asfálticas porosas, podem contribuir para a redução do escoamento superficial conforme demonstrado na Tabela 1. Entretanto, estes dispositivos, isoladamente, não resolvem o problema do excedente do escoamento superficial dos grandes centros urbanos. É necessário somar as contribuições destes pavimentos com as de outras técnicas de LID para perceber a eficácia da solução do problema das inundações, conforme demonstrado

por Li *et al.* (2018).

Da mesma forma, Qin, Li e Fu (2013) concluíram, por meio de simulações, que a implantação de técnicas LID foi eficaz para aliviar o impacto das inundações em uma bacia hidrográfica em urbanização na China. Isso é ratificado por Eckart; Mcphee; Bolisetti (2017) que também relatam que as práticas LID possuem resultados mais significativos quando associadas ao gerenciamento tradicional de águas pluviais. Porém, apesar de eficazes, Kong *et al.*(2017) afirmam que mesmo nos cenários mais benéficos o desempenho hidrológico das áreas urbanizadas com LID não é equivalente ao nível de pré-desenvolvimento (NUERNBERG, 2021).

Há uma concordância na literatura de que técnicas combinadas de LID apresentam desempenho melhor do que as práticas únicas, em termos de redução do escoamento superficial (HUANG; WANG; ZHANG, 2017; QIN; LI; FU, 2013; ZAHMATKESH, 2015). Apesar disso, alguns tópicos merecem atenção durante o projeto de implementação de LID. Por exemplo, Palla e Gnecco (2015) preconizam que é necessária uma área mínima de conversão do uso da terra, correspondente à redução da área impermeável efetiva de 5%, para obter benefícios hidrológicos perceptíveis (NUERNBERG, 2021).

Shafique & Kim (2015) afirmam que a pesquisa inicial sobre diferentes práticas de LID mostrou resultados positivos e atualmente quase todos os países desenvolvidos estão adotando a tecnologia, contudo, debates a respeito de LID são recorrentes, indicando que há conhecimento prático limitado sobre o tema. Portanto, segundo os pesquisadores supramencionados, faz-se necessária mais pesquisas para eficácia e aplicação de práticas de LID em larga escala. Uma síntese da literatura atual para apoiar a continuidade de pesquisas mais aprofundadas se fazem necessárias para que as práticas de LID possam ser amplamente adotadas como uma abordagem estabelecida para o gerenciamento de águas pluviais (SHAFIQUE & KIM, 2015).

Nesse contexto de debates e limitações de conhecimento a respeito de LIDs – cujas soluções são geralmente baseadas na implantação das chamadas Infraestruturas Verdes (GI) – que Diep *et al.* (2023) alertam para a assimetria de informações sobre o tema. Com base nos resultados da implantação de parques lineares para gestão das águas pluviais na cidade de São Paulo, e nos estudos de

outros pesquisadores, os autores alertam para as promessas de “ganha-ganha” nos discursos sobre GI. A falta de consenso sobre a sua conceitualização podem reforçar a criação de pontos cegos na prática. Diep *et al.* (2023) demonstraram que a desconexão entre a conceitualização e a prática de GI é uma manifestação da forma como as visões dominantes sobre o desenvolvimento urbano são impostas de cima para baixo. Segundo os autores, de uma forma geral, as autoridades governamentais contratam especialistas técnicos para conceber abordagens tecnocráticas para questões mais complexas e mais amplas de desigualdade socioambiental no sentido de legitimar as suas tomadas de decisões. Portanto, os autores defendem o afastamento dessas abordagens e o estabelecimento de mecanismos mais fortes para envolver – e integrar – o conhecimento de diferentes intervenientes, incluindo o das comunidades diretamente afetadas pelo projeto. Tais mecanismos devem ser acompanhados da construção de novas narrativas para afastar os discursos que excluem os “não especialistas” (DIEP *et al.*, 2023).

Não obstante às críticas em relação às GI, que se assemelham às técnicas de LID, em 2013, surge, na China, o conceito de Cidades-Esponjas (CE), com o objetivo de mimetizar os processos naturais de armazenamento, retenção, infiltração, purificação, utilização e drenagem de águas pluviais. Segundo Li *et al.* (2018) o LID é uma técnica chave usada na construção das Cidades Esponjas.

Conforme já mencionado, o conceito de CE surgiu após graves inundações ocorridas em Pequim, na China, em 2012. Por este motivo, o governo chinês tornou a resiliência à água uma prioridade para suas cidades, introduzindo soluções dentro do contexto de LID como coberturas verdes, jardins de chuva, bacias de infiltração, pavimento permeável, mistura asfáltica porosa, etc. (Figura 2) com o objetivo de criar áreas que pudessem absorver grandes volumes de água e retê-la até que possam ser lentamente devolvidas ao meio ambiente (FOGEIRO, 2019).

**Figura 2** - Exemplo de técnicas de LID  
Fonte: Nuernberg (2021)



Segundo Fogueiro (2019) CEs é uma denominação para espaços capazes de integrar a gestão da água urbana em políticas e projetos de planejamento urbano. Este deve ter o planejamento adequado e as estruturas para implementar, manter e adaptar os sistemas de infraestrutura para recolher, armazenar e tratar a água da chuva em excesso. Dentre outros, é um design com elevada permeabilidade como estradas e pavimentos permeáveis que podem acomodar com segurança o tráfego de veículos e pedestres, permitindo que a água seja absorvida e aumente a vazão das águas subterrâneas. Ou seja, são sistemas de drenagem que permitem a infiltração de água no solo.

Dentre as inúmeras vantagens das CEs, Fogueiro (2019) ressalta a redução do risco de inundação, devido a possibilidade de a cidade fornecer maior quantidade de espaços permeáveis de maneira que as águas sejam absorvidas e não totalmente escoadas.

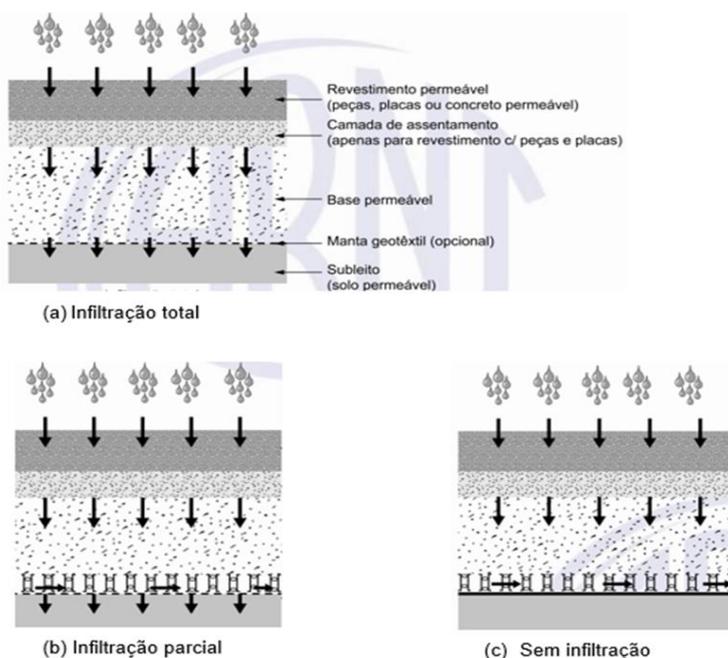
Em sua pesquisa, Fogueiro (2019) aplica o conceito de CE com base na revisão da literatura num caso de estudo na Cidade do Porto (Portugal) e calcula os índices aproximados de permeabilidade do espaço. Na pesquisa foi desenvolvida uma proposta com o objetivo de otimizar e aumentar a permeabilidade do espaço assim

como a sua capacidade quanto ao nível da retenção de águas. As soluções propostas consideram a criação de uma rede de valas de infiltração, jardins de chuva e pavimentos permeáveis. O impacto causado pelas intervenções foi o aumento do índice de permeabilidade de menos de 15% para mais de 80% em espaços públicos.

### **2.3. PAVIMENTOS PERMEÁVEIS**

A norma ABNT NBR 16416 (2015) denomina pavimento permeável como o sistema que atende simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e/ou condições de rolamento e cuja estrutura permite a percolação e/ou o acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar dano à sua estrutura. Os locais revestidos com pavimentos permeáveis devem permitir a percolação de 100% da água precipitada sobre esta área, bem como a área de contribuição considerada em projeto. Dentre outros, os pavimentos permeáveis têm por objetivo contribuir para a infiltração e a retenção da água, reduzindo o escoamento superficial das águas pluviais (MULLANEY; LUCKE, 2014). Segundo a norma ABNT NBR 16416 (2015) o pavimento permeável pode ser concebido de três diferentes maneiras em relação à infiltração de água precipitada, conforme demonstrado na Figura 3. A escolha do sistema de infiltração depende das características do solo ou de condicionantes de projeto.

**Figura 3** - Sistemas de Infiltração do pavimento permeável  
Fonte: Norma ABNT NBR 16416/2015



Dentre os impactos e problemas causados pela falta de uma resposta mais eficaz para o excesso de escoamento superficial, tanto nos grandes centros urbanos como nas vias, avenidas, rodovias, aeroportos, etc., as inundações, o risco de aquaplanagem, pulverização e redução da visibilidade são as mais evidentes e recorrentes. No que tange à mitigação dos impactos causados nas rodovias e aeroportos, como o risco de aquaplanagem, pulverização e redução da visibilidade, Afonso (2021) aborda a solução por meio dos pavimentos permeáveis. Por proporcionarem benefícios como o aumento da resistência ao atrito devido à macrotextura do seu revestimento e uma maior infiltração de água devido ao seu elevado teor de ligante, reduzindo o efeito de pulverização, do risco de aquaplanagem e aumento de visibilidade, que os pavimentos permeáveis se apresentam como soluções adequadas para mitigação dos impactos supramencionados.

De acordo com King *et al.* (2013) o Departamento de Transportes do estado da Lousiana/EUA revelou que os acidentes causados por chuva em três seções das rodovias US 171, US 71 e I-20 diminuíram em 57%, 76% e 100%, respectivamente, durante os primeiros 5 anos após a construção (KING *et al.*, 2013, ZHANG *et al.*, 2020). Resultado de segurança semelhante foi observado nas autoestradas japonesas: O número de acidentes relacionados com a umidade caiu drasticamente

em mais de 80% após a aplicação de pavimentos permeáveis no período de um ano (TAKAHASHI, 2013, ZHANG et al, 2020).

### **2.3.1. REVESTIMENTOS POROSOS – CAMADA POROSA DE ATRITO**

Conforme menção anterior, existem duas tipologias para a camada de revestimento do pavimento permeável: os revestimentos permeáveis e os revestimentos porosos. Estes últimos são estruturas monolíticas que permitem a infiltração da água por entre seus poros. Podem ser de concreto poroso ou de mistura asfáltica porosa. Como já discutido na introdução, o revestimento constituído por mistura asfáltica porosa é conhecido como *Camada Porosa de Atrito* (CPA), termo mais usual no Brasil.

De acordo com Alber *et al.* (2020), a CPA é um material de desgaste aplicado na camada superficial dos pavimentos rodoviários em virtude de suas propriedades funcionais especiais como a redução de ruído e drenagem. Essas funções são respostas do conteúdo de vazios altamente interconectado em comparação com os materiais asfálticos de granulometria densa usados para camadas de desgaste.

Neste sentido, pode-se afirmar que os pavimentos asfálticos permeáveis aplicados nas rodovias são constituídos de uma camada superficial revestida com uma mistura asfáltica porosa, como a CPA, que possui característica drenante, com graduação aberta e sobrejacente a uma camada impermeável (Figura 4). O objetivo deste revestimento é proporcionar uma rápida drenagem das águas superficiais de modo a diminuir o risco de ocorrência do fenômeno de hidroplanagem e da perda de visibilidade associada à projeção de água precipitada (MEURER FILHO, 2001).

**Figura 4** – Exemplo de funcionalidade da CPA numa rodovia  
Fonte: (Dresch, 2016)



É importante perceber a diferença entre os sistemas de infiltração dos pavimentos da Figura 4 e da Figura 3. Neste, a água infiltra através da superfície (revestimento) e percola todas as camadas inferiores do pavimento e, dependendo do sistema de infiltração, permite ou não a percolação da água através do subleito. A estrutura de pavimento permeável da Figura 3 é mais indicada à ruas, avenidas, pátios e estacionamentos.

O perfil de pavimento da Figura 4 é geralmente aplicado às rodovias e aeroportos pois não permite a infiltração da água para as camadas inferiores (base e sub-base) e subleito. A água percola através da camada de revestimento poroso (ex. CPA) até encontrar a camada impermeável, geralmente constituída de uma mistura asfáltica convencional (densa), e percola lateralmente até os dispositivos de drenagens da rodovia.

### **2.3.1.1. HISTÓRICO DA CAMADA POROSA DE ATRITO**

A necessidade de drenagem do excesso de água proveniente das chuvas da superfície do pavimento acarretou nos primeiros estudos sobre mistura asfáltica de granulometria aberta na década de 1930 no Estados Unidos da América. Na década de 1950 chegou-se ao revestimento chamado de Camada Asfáltica de Atrito de Graduação Aberta (Open Graded Asphalt Friction Courses), o OGFC, que diferia dos anteriores por apresentar granulometria muito aberta e reduzida espessura (BOTELHO *et al.*, 2004; SOUZA, 2008).

Segundo Afonso (2021) o uso de misturas asfálticas porosas em pavimentos rodoviários teve início nos anos 70 tendo-se desenvolvido por países como o Reino Unido, Alemanha, Holanda, França, Itália, Bélgica, Espanha, Suíça, Áustria e Dinamarca. Além desses, alguns dos primeiros estudos práticos também foram

efetuados em países como a Austrália, Canadá, China e Japão. No entanto, apenas nos últimos 20 anos têm sido realizadas melhorias na concepção e construção deste tipo de pavimentos.

Em Portugal tem-se verificado um aumento gradual do uso de misturas asfálticas porosas, tanto em infraestruturas novas como em reabilitação de infraestruturas existentes (AFONSO, 2021).

No Brasil, os estudos sobre este tipo de mistura asfáltica foi iniciativa da Diretoria de Engenharia da Aeronáutica (DIRENG) no início da década de 1960, na busca de aumentar a segurança nos procedimentos de pouso e decolagem nos aeroportos (BOTELHO, *et al.*, 2004; SOUZA, 2008). A partir daí, a denominação corrente no país para esse tipo de mistura asfáltica porosa passou a ser Camada Porosa de Atrito (CPA).

As primeiras aplicações da Camada Porosa de Atrito (CPA) no Brasil são datadas de 1983 na pista do Aeroporto de Confins, em Belo Horizonte (MG) e 1987 no recapeamento da pista do Aeroporto de Santos Dumont, no Rio de Janeiro (RJ) (BOTELHO, *et al.*, 2004; SOUZA, 2008). Em rodovias, a primeira aplicação da CPA foi em 1992 em trecho da Rodovia dos Bandeirantes (SP) e, posteriormente, na via marginal da Rodovia Presidente Dutra, em 1997. Citam-se, também, trecho de CPA lançado na Rodovia dos Imigrantes, em 1998 (SOUZA, 2008). Em vias urbanas, registram-se aplicações na cidade de Fortaleza (Alecrim, 2021) e no rodoanel, na cidade de São Paulo, com o objetivo de reduzir os níveis de ruídos (Strufaldi *et al.* 2010; Alecrim, 2021).

### **2.3.1.2. PROPRIEDADES E PESQUISAS COM CAMADA POROSA DE ATRITO**

Destaca-se na CPA sua elevada permeabilidade, que permite a passagem da água pelos vazios comunicantes da mistura, sendo que é importante que se tenha uma noção de como os vazios estão distribuídos no interior da mistura, para uma correta análise da permeabilidade (DUMKE, 2005).

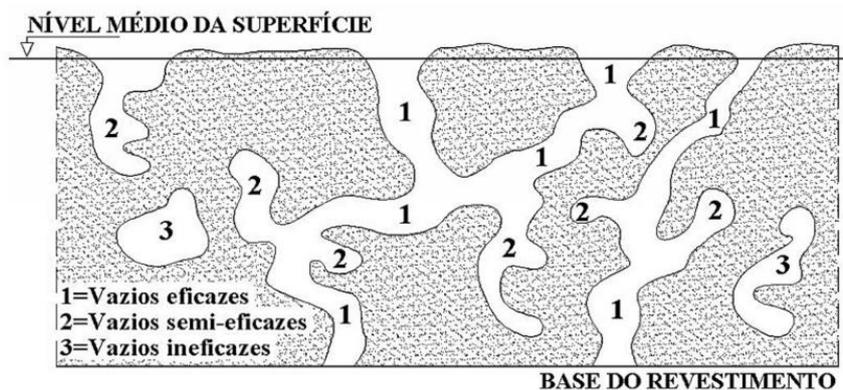
Alves (2019) afirma que os fatores que influenciam a permeabilidade são a porcentagem de vazios comunicantes, a natureza do ligante, o tamanho máximo de agregado e a espessura do revestimento. A condutividade hidráulica, expressa em

m/s, é função da vazão da área transversal de fluxo, do comprimento de percolação e da diferença de pressão entre os pontos avaliados.

A porcentagem de vazios é o parâmetro que melhor traduz a capacidade de drenagem de uma mistura porosa. De acordo com Oliveira (2003) os poros das misturas podem ser classificados conforme ilustrado na Figura 5, como:

- Poros eficazes: poros que contribuem para a passagem e armazenamento de água;
- Poros semi-eficazes: poros que não contribuem para a passagem, mas permitem o armazenamento de água;
- Poros ineficazes: poros que não contribuem para a passagem nem armazenamento da água.

**Figura 5** - Representação dos vazios na mistura porosa  
Fonte: Alves (2019)



Desta forma, pode-se concluir que os vazios eficazes ou comunicantes são os que permitem a passagem da água através do revestimento. Quanto maior for a porcentagem de vazios comunicantes ou eficazes da mistura, maior será a sua permeabilidade (ALVES, 2019).

Portanto, quando a mistura tem elevada quantidade de poros eficazes ou vazios comunicantes, a água se infiltra verticalmente e se acumula no fundo da camada, junto à camada impermeável, formando uma zona saturada. Após essa etapa ocorre o escoamento lento transversal por percolação, devido ao gradiente hidráulico, até o bordo, se a drenagem na interface de saída for devidamente assegurada (DUMKE, 2005).

De acordo com Dumke (2005), nas misturas densas, o teor de ligante, a granulometria dos agregados e as características reológicas são responsáveis pelas características físicas e mecânicas da mistura. Para as misturas porosas estes fatores apresentam uma influência ainda maior pois este tipo de mistura tem uma constituição mais frágil e necessita de controle de características adicionais, como permeabilidade e percentagem de vazios comunicantes. As misturas porosas apresentam descontinuidade na curva granulométrica e essa descontinuidade é a responsável pelo teor de vazios comunicantes, que deve ser otimizado para oferecer boa permeabilidade à mistura.

Na Espanha, as misturas asfálticas descontínuas apresentam um esqueleto mineral de elevada percentagem de agregados graúdos (75-80%). Estas misturas possuem características parecidas às misturas drenantes, com uma capacidade de drenagem elevada devido a sua macrotextura e percentagem de vazios e redução dos níveis de ruído em comparação com misturas convencionais (MIRÓ RECASENS, 2006; DRESCH, 2016)

Nos Estados Unidos, as misturas conhecidas como OGFC (Open Graded Friction Course) apresentam as melhores propriedades acústicas e drenantes, são uma classe especial de misturas com graduação aberta, com teor de ligante elevado (18-22%) e agregados de alta qualidade (ALVAREZ, MARTIN, ESTAKHRI, 2010). As principais vantagens dessas misturas quando utilizadas como revestimentos são a drenabilidade e a redução do ruído devido apresentarem em sua estrutura vazios comunicantes. Atualmente, nos Estados Unidos a maioria das misturas OGFC utilizadas apresentam agregados com tamanhos máximos nominais de 12,5 e 19 mm.

No Brasil, quando se trata de CPA, sabe-se que estas são projetadas com percentagens de vazios entre 18% e 25% e utilizadas como camada de rolamento sobre revestimentos asfálticos. Seu objetivo inicial era promover a drenagem superficial da água nos dias de chuva, mobilizando sua percolação para as sarjetas de drenagem, reduzindo significativamente o spray decorrente da interação pneu-pavimento nos dias chuvosos (PINTO, S.; PINTO, 2015).

Esse tipo de solução foi implementado no Brasil depois de sua preconização na pesquisa desenvolvida pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR/DNIT) sobre asfalto-polímero, na década de 1990, por meio de especificações de serviços, onde

recomenda o uso de asfalto modificado por polímero, sendo que a camada subjacente à CPA deve ser impermeável (PINTO, S.; PINTO, 2015).

Segundo Alves (2019) a mistura asfáltica porosa com ligante asfáltico modificado por polímero é uma mistura executada à quente, em usina apropriada, com características específicas. Esta é composta de agregado graduado, cimento asfáltico modificado por polímero e, se necessário, material de enchimento (fíler) melhorador de adesividade, sendo espalhada e compactada a quente. A mistura deve ser empregada como camada sobrejacente ao revestimento, com a função de drenar a água superficial evitando a aquaplanagem.

A CPA apresenta determinados requisitos para projeto, verificados por métodos de ensaio. O Quadro 1 apresenta a comparação dos requisitos de projeto de uma mistura CPA com os exigidos para uma Mistura Asfáltica Densa (MAD).

**Quadro 1** - Requisitos de projeto para Mistura Asfáltica Densa e CPA  
Fonte: Autor

REQUISITOS DE PROJETO	MISTURA ASFÁLTICA DENSA (MAD)		MISTURA CPA	
	Limite	Fonte	Limite	Fonte
Teor de ligante (%)	4 - 5	projeto	4 - 6	DNIT ES-386/99
Volume de Vazios (%)	4 mín.	projeto	18 - 25	DNIT ES-386/99
Perda de massa Cântabro (%)	20 máx.	DNIT ME 383/1999	25 máx.	DNIT ES-386/99
Resistência à tração (MPa)	0,65 mín.	ABNT NBR-15087/ 2012	0,55 mín.	DNIT ES-386/99
Dano por umidade induzida (%)	70 mín.	ABNT NBR 15617/ 2015	80 mín.	ASTM D 7064/2021

Dentre os requisitos de projeto, é evidente a diferença entre os vazios das misturas MAD e CPA, contudo, observando os demais requisitos, como teor de ligante, perda de massa e resistência à tração, percebe-se que Norma DNIT ES-386/99 é relativamente conservadora quanto comparada às normas que regulamentam as misturas asfálticas convencionais. Segundo Sousa (2024), a norma não é atualizada há mais de 25 anos, portanto, não é razoável afirmar que a mesma não necessite de uma revisão.

### 2.3.1.2.1. VIDA ÚTIL E VIDA FUNCIONAL DA CPA

Embora possua vantagens significativas ao proporcionar conforto e segurança aos usuários, a camada porosa de atrito se depara com alguns desafios que comprometem sua vida útil e funcional. Segundo Cooley *et al.* (2009) a vida útil é definida como o período de tempo entre o novo pavimento concluído e a primeira reabilitação ou o ano da falha referindo-se a um certo limite de capacidade de serviço. Enquanto a vida funcional é definida como o número de anos em que as características funcionais esperadas da camada porosa de atrito permanecem efetivas durante este período. No entanto, é importante frisar que o pavimento constituído por este tipo de mistura ainda tem a capacidade básica de fluxo de tráfego mesmo após perder sua funcionalidade original (ZHANG *et al.*, 2020).

A vida útil do pavimento permeável revestido com CPA depende da combinação de vários fatores, como materiais, projeto de mistura, construção e programas de manutenção, etc. Além disso, a carga de tráfego e fatores ambientais, como água, oxigênio, radiação ultravioleta, etc., são os fatores críticos que afetam a durabilidade da mistura. As questões sobre durabilidade e funcionalidade, como desfiamento, colmatação (entupimento) e manutenção no inverno, etc., são os principais desafios que afetam o uso generalizado da CPA (FAY e AKIN, 2014, ZHANG *et al.*, 2020).

As estatísticas indicam que a vida útil da camada porosa de atrito varia de 3 a 12 anos ou até mais, e a vida útil média é de cerca de 5 a 8 anos. Em contrapartida, a vida funcional é geralmente de 50% a 80% da vida útil. Uma porcentagem menor de apenas cerca de 38% a 60% também é relatada na literatura (NCHRP PROJECT 9-41, 2008, ZHANG *et al.*, 2020).

Segundo Takahashi (2013), no Japão, devido à precipitação abundante, misturas asfálticas porosa como a CPA têm sido amplamente aplicadas como um revestimento de superfície padrão. Em uma pesquisa comparativa incluindo 34 seções em 10 vias expressas em regiões quentes e 35 seções em 6 vias expressas em regiões com neve, foi observado que a vida útil da mistura asfáltica porosa não é inferior à de uma mistura asfáltica densa (convencional) em áreas quentes, desde que tenha sido razoavelmente projetada para ser suficientemente resistente à descamação e ao desfiamento. No entanto, o número de seções investigadas com vida útil inferior a 8 anos em regiões com neve foi o dobro do que na regiões quentes (TAKAHASHI,

2013; ZHANG *et al.*, 2020).

Portanto, a aplicação de camadas porosas de atrito é restrita em regiões frias com muita neve no inverno. Conclusões idênticas foram obtidas em estudo onde a mistura asfáltica porosa não foi recomendada para uso em zona de neve devido à sua remoção extensiva, o que pode causar o desfiamento do agregado graúdo da camada superficial (KANDHAL, 2002, ZHANG *et al.* 2020).

#### **2.3.1.2.2. DURABILIDADE DA CPA**

Segundo Zhang et tal. (2020), a durabilidade sempre foi uma questão de preocupação pois esta é a principal fraqueza devido à estrutura de graduação aberta da CPA. A durabilidade, de uma forma geral, se refere principalmente a todo o pavimento, em vez, de apenas, à mistura asfáltica. Deste ponto de vista, a durabilidade do pavimento é definida como a capacidade de manter um nível satisfatório de serviço ao longo de sua vida útil estrutural sem grandes manutenções.

A durabilidade do pavimento revestido com CPA é um problema complexo e abrangente que é afetado pela durabilidade da própria mistura, bem como pelos efeitos danosos combinados do ambiente e das cargas de tráfego, afetando, em última análise, a mecânica estrutural e as propriedades funcionais do pavimento. Enquanto que, para o revestimento CPA em si, a durabilidade se refere à capacidade da mistura asfáltica compactada de reter sua integridade estrutural ao longo de sua vida útil esperada (COUNCIL, 2014, ZHANG *et al.*, 2020).

A deterioração da CPA é atribuída à falha de coesão e adesão, o que geralmente resulta no seu desfiamento precoce, que afeta a durabilidade geral do pavimento, potencializando a colmatação dos poros (entupimento) que leva à perda da função original da CPA. Para Afonso (2021), o problema é tanto mais lento quanto maior o teor de vazios. Para se conseguir uma boa drenagem é preciso que a mistura mantenha um mínimo de 20% de vazios demonstrando que a colmatação pode reduzir a capacidade de escoamento da água em CPA em até 60% após cinco anos de uso do revestimento em rodovias (CASTRO, 2005). A perda de permeabilidade devido à colmatação é a principal limitação dos pavimentos permeáveis revestidos com CPA, uma vez que compromete a sua capacidade de infiltração (AFONSO, 2021).

Além disso, a graduação aberta torna a estrutura da CPA mais suscetível a

fatores externos. Esses problemas que afetam sua durabilidade estão relacionados principalmente à umidade e à temperatura (SCHMITT, 1994, ZHANG *et al.*, 2020).

A presença de água afeta inicialmente a microestrutura do material asfáltico, levando, em última instância, a problemas que vão desde fissuras até a formação de sulcos na macroestrutura (CARO *et al.*, 2008, ZHANG *et al.*, 2020). A existência de umidade provavelmente causa falha de coesão dentro do ligante asfáltico ou falha de adesão entre o ligante e o agregado (BAGAMPADDE *et al.*, 2005, ZHANG *et al.*, 2020). Normalmente, a perda de adesão pode resultar na remoção ou descolamento da película de ligante asfáltico da superfície do agregado, até mesmo rachaduras permanentes mais sérias (MO *et al.*, 2011, BAGAMPADDE *et al.*, 2005, ZHANG *et al.*, 2020). Isso ocorre porque o agregado tem maior afinidade com a água e a pressão repetida da água nos poros pode facilmente causar erosão hidráulica (WANG e WANG, 2011, BAGAMPADDE *et al.*, 2005, ZHANG *et al.*, 2020).

Por outro lado, a mistura asfáltica é, na verdade, um material dependente da temperatura. A temperatura ambiente tem um impacto significativo nos ligantes asfálticos. Quando a temperatura do pavimento cai rapidamente o suficiente para uma temperatura baixa, a camada superficial desenvolverá tensões de tração por gradiente de temperatura (BELSHIE *et al.*, 2011, ZHANG *et al.*, 2020). Na CPA, sendo esta uma estrutura de contato pedra com pedra, essas tensões de tração resultantes podem causar rachaduras no interior da CPA (KAMAR e SARIF, 2009, ZHANG *et al.*, 2020).

Embora a fissuração em baixa temperatura a princípio possa não levar a uma patologia significativa no pavimento com CPA, essas fissuras tendem a se expandir e aumentar gradualmente com o tempo e, fatalmente, afetar o desempenho do pavimento e a expectativa de vida ao longo dos anos (ZHANG *et al.*, 2020).

Além da temperatura ambiente, a temperatura de compactação também está intimamente relacionada às características de volume e propriedades mecânicas da mistura CPA. Uma temperatura de compactação mais alta pode diminuir os vazios de ar da mistura CPA, falhando, deste modo, em atingir a densidade necessária e o desempenho projetado. Em contrapartida, a diminuição da temperatura de compactação pode levar a um aumento nos vazios de ar e uma redução na densidade da mistura, o que pode afetar adversamente a capacidade da CPA de resistir à perda por abrasão, deformação permanente e danos induzidos pela umidade (LUXMAN *et*

*al.*, 2019, ZHANG *et al.*, 2020).

De acordo com Zhang *et al.* (2020), a durabilidade do pavimento permeável revestido com misturas asfálticas de graduação aberta, como as camadas porosas de atrito, é um problema complexo devido aos fatores que foram discutidos, contudo, além desses, a durabilidade não pode ser dissociada de um outro fator não menos importante: o projeto de mistura.

### **2.3.1.2.3. PROJETO DE MISTURA DA CAMADA POROSA DE ATRITO**

Segundo Zhang *et al.* (2020), embora a CPA tenha gradualmente atraído uma ampla atenção em diversos países, a falta de padrões de projeto unificados atualmente é outra limitação importante para a utilização da mistura de forma generalizada. Muitos dos métodos têm diferentes requisitos de projeto de mistura ou procedimentos diferentes, como, por exemplo, o cálculo para determinar o teor ótimo de ligante na mistura asfáltica.

Em um projeto de mistura asfáltica, é importante a seleção de materiais, tanto do ligante asfáltico a ser utilizado quanto dos agregados. Para as misturas porosas (OGFC, CPA, PA, etc.), devido às suas particularidades, esta importância se torna mais evidente.

No que tange ao ligante asfáltico, a investigação da literatura mostrou que a geração anterior de misturas porosas nos Estados Unidos e na Europa sofreu danos precoces após 2 ou 3 anos em que foram implementadas. A principal razão foi atribuída ao uso de mistura asfáltica convencional, bem como ao reduzido teor de ligante da mistura. A espessura insuficiente de filme asfáltico causa perda de adesão entre os agregados e o asfalto, acompanhada pelo envelhecimento precoce do ligante. Com base nessa experiência, a tendência geral na maioria dos países é utilizar agentes modificadores, como polímeros, em misturas asfálticas porosas inclusive na CPA (KAMAR e SARIF, 2009, ZHANG, *et al.*, 2020).

Da perspectiva das propriedades do ligante, os modificadores são considerados eficazes no aumento do teor de ligante e no espessamento da película asfáltica, melhorando assim a coesão e a adesão em misturas porosas. Outro efeito importante resultante do uso de modificadores está na redução da suscetibilidade à temperatura das misturas devido à maior viscosidade em altas temperaturas e melhor flexibilidade

em baixas temperaturas (NIELSEN, 2006, ZHANG *et al.*, 2020).

De acordo com Zhang *et al.* (2020), atualmente há três tipos principais de modificadores usados em misturas do tipo CPA, entre eles, o SBS (estireno-butadieno-estireno), que tem sido amplamente usado na maioria dos países europeus, Japão e China desde que substituiu o EVA (etileno acetato de vinila) devido ao seu melhor desempenho de uma forma geral.

Em seguida estão os modificadores de borracha, comumente usados em áreas relativamente frias nos Estados Unidos e na Europa, bem como na África do Sul (POTGIETER *et al.*, 2002, ZHANG, *et al.*, 2020). O ligante modificado com Asfalto-Borracha (AB) tem a capacidade de melhorar a resistência à formação de sulcos, o módulo de resiliência e a resistência à fissuração por fadiga das misturas porosas. (CETIN, 2013, ZHANG *et al.*, 2020).

Com respeito à seleção de agregados para projetos de mistura CPA, a proporção média de agregados graúdos é de 85% ou mais na mistura e a área de contato entre os agregados é reduzida em cerca de 25%. Com menor área de contato, significa que os pontos de contato serão submetidos a tensões maiores. Portanto, a natureza, a forma, o tamanho das partículas e a graduação dos agregados definitivamente terão um grande impacto no desempenho da mistura (KATHRYN, 2007, ZHANG *et al.*, 2020).

O agregado graúdo usado em misturas afálticas porosas deve ter resistência ao desgaste suficiente para resistir a cargas externas e fornecer atrito necessário para a segurança da direção. Geralmente, considera-se que o nível aceitável da perda de massa por abração deve ser inferior a 30%, contudo, este não é um padrão seguido em diferentes países (KANDHAL, 2002, ZHANG *et al.*, 2020).

A porcentagem de partículas planas e alongadas deve ser controlada na mistura asfáltica. Se houver muitas partículas planas e alongadas no agregado graúdo isso pode afetar a durabilidade e a função da CPA. Segundo a Norma ASTM D4791/D4791M (2009), quando a proporção da espessura mínima (ou diâmetro) para o comprimento máximo (ou largura) em todas as direções do formato da partícula é menor que um valor específico (principalmente 0,3), ela pertence às partículas planas e alongadas (ASTM D4791/D4791M, 2009, KANDHAL, 2002, ZHANG, *et al.*, 2020).

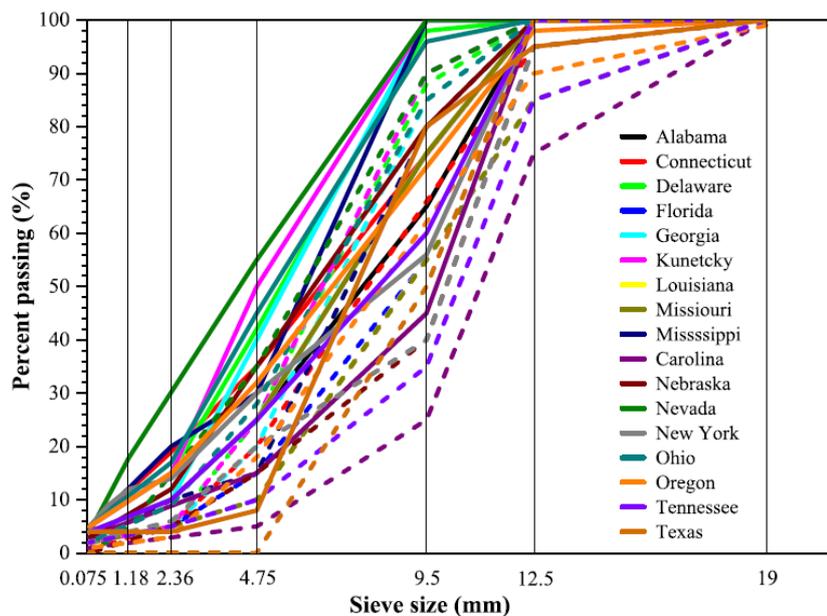
Agregados com absorção de água relativamente baixa (menos de 2%) são os

mais indicados (MENG, 2013, ZHANG *et al.*, 2020). Dentre eles, os agregados graúdos comumente mais usados nas misturas CPA são o basalto, o granito e o diabásio (ZHANG *et al.*, 2020).

Quanto às faixas de graduação dos agregados, Zhang *et al.*(2020) realizaram uma pesquisa para obter o máximo de informações sobre as faixas de graduação utilizada nos Estados Unidos e em diversos países. A Figura 6 ilustra as graduações de 17 estados nos EUA. As linhas sólidas representam o limite superior e as tracejadas o limite inferior de cada faixa. (COOLEY *et al.*, 2009, ZHANG *et al.* (2020).

A maioria dos estados (13 de 17 estados) usa o tamanho máximo de agregado de 12,5 mm (1/2 pol.) em suas graduações de projeto de misturas OGFC, 3 estados usam 19 mm (3/4 pol.). Oregon é o único estado que usa o tamanho máximo de agregado de 25 mm (1 pol.) nos Estados Unidos. O tamanho máximo de agregado significa a peneira mais fina com 100% do agregado passando. Conseqüentemente, o TMN (Tamanho Máximo Nominal) é de 9,5 mm, 12,5 mm e 19 mm, respectivamente (ZHANG *et al.*,2020).

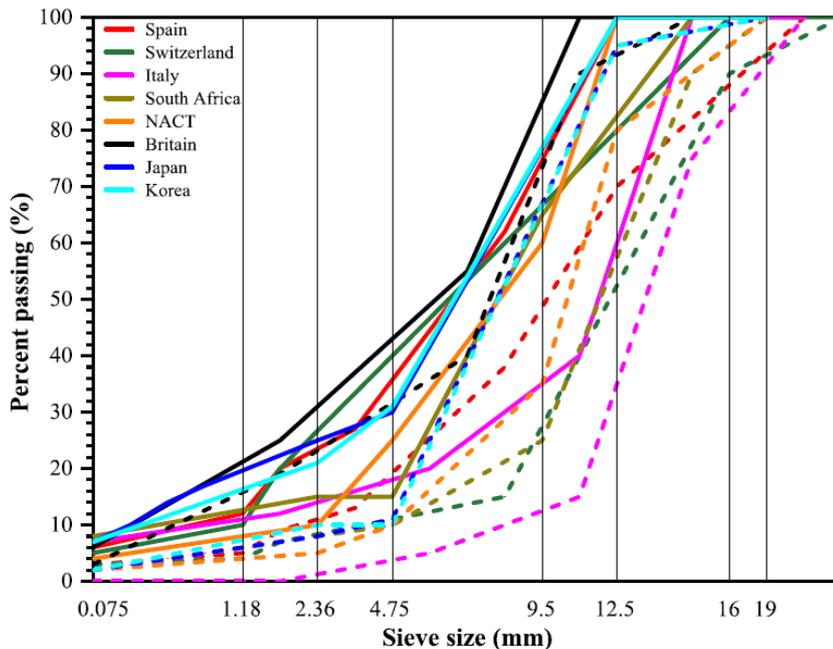
**Figura 6.** - Faixas Granulométricas nos estados dos EUA  
Fonte: Adaptado de Cooley *et al.* (2009), Zhang *et al.* (2020)



A Figura 7 ilustra as faixas de graduação de agregados de misturas asfálticas porosas em diferentes países. O tamanho máximo do agregado se concentra principalmente em torno de 19 mm (3/4 pol.), o que é ligeiramente excedido em alguns países devido ao uso de peneiras padrão diferentes, como Espanha, Suíça e Itália. (ZHANG *et al.*, 2020).

**Figura 7** - Faixas de graduação de agregados em misturas asfálticas porosas de diferentes países

Fonte: Adaptado de Cooley *et al.* (2009), Zhang *et al.* (2020)



Finalmente, para a determinação do teor ótimo de ligante da nova geração de misturas asfálticas de graduação aberta (OGFC, CPA, PA, etc.), o novo método do NACT, lançado no ano 2000 e que teve como base a experiência da Europa, Japão e outros países, é o mais difundido.

No método, as amostras são preparadas com a graduação desejada em vários teores de ligantes (com incrementos de 0,5 por cento) e são submetidos aos ensaios de volume de vazios, escorrimento de ligante e perda de massa Cântabro. O teor de ligante mínimo que atende a todos os requisitos é considerado como o teor de ligante ótimo. Se os teores de ligante não atenderem aos quatro critérios acima ao mesmo tempo, é necessário tomar algumas medidas corretivas, como o uso de estabilizantes e modificadores na mistura (KUMAR *et al.*, 2014, ZHANG *et al.*, 2020).

#### 2.3.1.2.4. ANÁLISE CUSTO/BENEFÍCIO DA CAMADA POROSA DE ATRITO

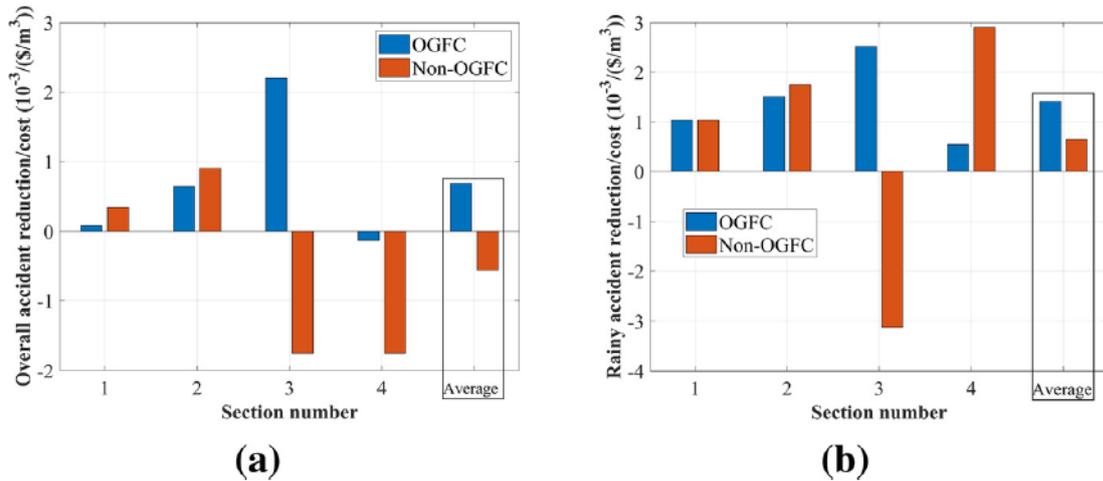
De acordo com Shaffer *et al.* (2009), a Análise Custo-Benefício é uma metodologia econômica que fornece um conjunto estruturado de métodos para entender os custos e benefícios, direta ou indiretamente de uma ou mais opções de um empreendimento (WU, *et al.*, 2020).

No contexto das misturas CPA, para garantir a funcionalidade e alcançar comportamentos mecânicos definidos e durabilidade, matérias-primas de alta qualidade, como ligante asfáltico e agregados, são os pré-requisitos necessários. As matérias-primas de alta qualidade e a construção do pavimento geralmente aumentam o custo inicial das misturas porosas. O custo unitário (\$/ m<sup>3</sup>) da mistura porosa (OGFC, CPA, PA, etc.) é cerca de 42% superior ao custo das misturas densas tradicionais (CHEN, *et al.*, 2017, WU *et al.*, 2020).

Miranda Júnior *et al.* (2017) compararam o custo do m<sup>2</sup> de pavimentação com revestimentos em Mistura Asfáltica Densa (MAD) e CPA, referente à valores de mercado da data-base de 2016 do Departamento de Estradas e Rodagem do estado do Espírito Santo. O custo de implantação do m<sup>2</sup> da CPA foi de R\$ 145,61/m<sup>2</sup>, enquanto para a MAD foi de R\$ 51,31/m<sup>2</sup>, uma diferença de 64,7%. Segundo os autores, o custo de produção do m<sup>3</sup> da mistura asfáltica porosa (R\$ 32,99/m<sup>3</sup>) representa mais da metade do custo total de implantação do m<sup>2</sup> da mistura asfáltica convencional.

Chen *et al.* (2017) observaram que o custo da mistura asfáltica porosa era maior devido às matérias-primas caras e aos procedimentos de construção mais rigorosos. No entanto, a taxa de acidentes foi significativamente reduzida especialmente em dias chuvosos após o tratamento com misturas OGFC, conforme apresentado na Figura 8.

**Figura 8** - Análise de custo-benefício da OGFC: redução geral de acidentes em relação ao custo (a) e redução de acidentes em dias de chuva em relação ao custo (b)  
 Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2017), Wu *et al.* (2020)



A Figura 8 demonstra a eficácia de custo-benefício da mistura OGFC com base na relação entre a redução da taxa de acidentes e o custo. Observa-se, a partir da Figura 8 (a), que as taxas de custo-benefício de três das quatro seções OGFC eram maiores do que as seções não-OGFC adjacentes. Os valores médios elucidaram que a OGFC demonstrou maior relação custo-benefício do que a não-OGFC. Além disso, segundo a Figura 8 (b), a razão média de OGFC em dias chuvosos é cerca de duas vezes a proporção de misturas asfálticas densas. Portanto, a melhoria da segurança proporcionada pelos pavimentos OGFC é mais significativa em dias chuvosos.

De uma forma geral, pavimentos permeáveis proporcionam economias adicionais em relação às práticas tradicionais de gerenciamento de águas pluviais. Isso é obtido reduzindo o custo de instalação de dispositivos de drenagem e da infraestrutura para transportar o escoamento de águas pluviais para águas receptoras próximas. No entanto, devido ao custos mais elevados de uma estrutura de pavimentos permeáveis e problemas de entupimento dos vazios, instalá-lo em grandes escalas pode não ser econômico. Portanto, uma abordagem para combinar pavimentos permeáveis como parte de sistema de tratamento está se tornando uma solução viável no gerenciamento de águas pluviais (KURUPPU, *et al.*, 2019).

### 2.3.1.2.6. PESQUISAS RELACIONADAS À CAMADA POROSA DE ATRITO

Para poder controlar os defeitos gerados pela alta porosidade, misturas asfálticas porosas (CPA, OGFC, PA, etc.) devem constituir-se de materiais com elevada qualidade, que se refletirá numa mistura estável e num bom desempenho mecânico e hidráulico (BOTELHO *et al.*, 2004).

Também se sabe que esse tipo de mistura não possui como característica principal a função estrutural. Por exemplo, os Estados Unidos a usam para melhorar a resistência ao atrito. A França se dedica principalmente à redução do ruído do pneu no pavimento. O Japão usa a mistura asfáltica porosa como superfície padrão para eliminar acidentes de trânsito em condições de chuva, enquanto a Nova Zelândia considera a redução de ruído e a resistência à colmatação (ZHANG *et al.*, 2020).

Pela prática internacional supramencionada, é praticamente consenso entre os pesquisadores e projetistas da engenharia rodoviária que as misturas asfálticas porosas apresentam vantagem predominantemente funcional em detrimento de sua capacidade estrutural, logo deve ser aplicada sobre uma camada de ligação (capa) impermeável e bem acabada.

Todavia, Alves (2019) refuta a afirmação acima em virtude dos elevados módulos de resiliência das misturas CPAs estudadas em sua pesquisa como também nas misturas CPA estudadas por Kolodziej (2016) e Dresch (2016), conforme demonstrado na Tabela 2.

**Tabela 2 - Módulos de Resiliência de Misturas CPA**

Autor	Teor de Ligante (%)	MR (MPa)
Alves (2019)	3,5 – 5,0	4.122 – 7.294
Dresch (2016)	3,5 – 5,0	3.760 – 5.426
Kolodziej (2016)	5,5 – 6,0	2.938 – 3.522

Fonte: Alves (2019)

Alves (2019) concentrou sua pesquisa para as funcionalidades de redução de ruídos das misturas CPA. O objetivo principal foi desenvolver uma avaliação mecânica, funcional e ambiental da CPA. A metodologia utilizada nos experimentos em laboratório seguiu os procedimentos convencionais para os ensaios de: resistência à tração, módulo de resiliência, desgaste cântabro, condutividade hidráulica, vazios comunicantes, ensaio uniaxial e triaxial de carga repetida, módulo dinâmico uniaxial e

do coeficiente de absorção acústica, por meio do tubo de impedância. A partir das avaliações, Alves (2019) verificou nos pavimentos com CPA que seu comportamento ligado à redução de ruídos ao longo do tempo se mantém constante, com reduções próximas a 6 dB, semelhantes aos pavimentos silenciosos utilizados internacionalmente. Em uma análise ligada ao afundamento em trilha de roda, a CPA apresentou deformações menores que 7 mm (limite da ANTT) mesmo para trechos com mais de 15 anos de abertura ao tráfego, demonstrando seu bom comportamento também em relação a este parâmetro.

Knabben (2017) afirma que os mecanismos de geração do ruído da interação pneu-pavimento podem ser divididos em duas parcelas principais. A primeira é a de geração do ruído mecânico que está diretamente relacionado com a textura do revestimento. A segunda parcela é da geração de ruído aerodinâmico que está correlacionado, principalmente, com a porosidade do revestimento. Essas duas parcelas podem ser reduzidas otimizando a textura e a porosidade da mistura asfáltica (Knabben, 2017). De acordo com Zhang *et al.*(2020), descobriu-se que o ruído pode ser reduzido de 3 a 6 dB em períodos secos e em até 8 dB em períodos chuvosos.

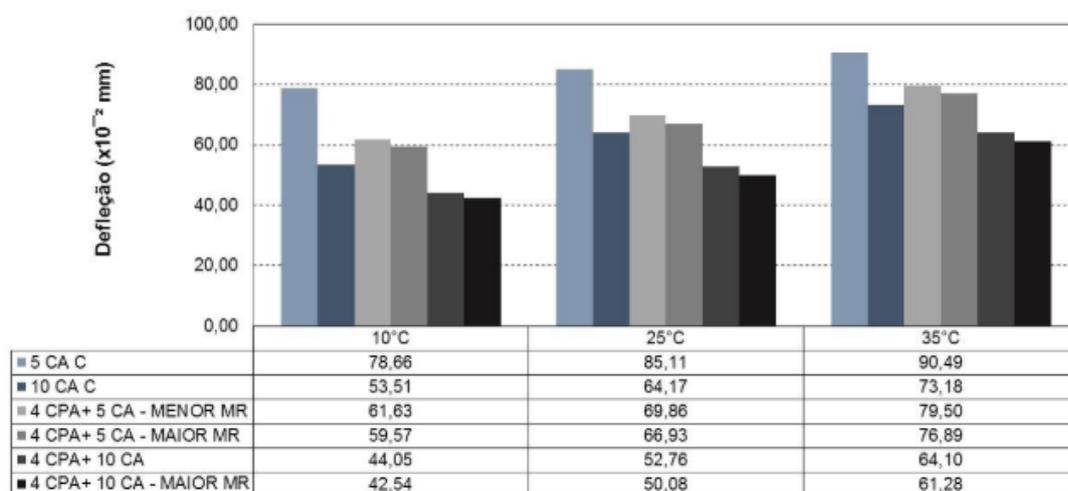
Kolodziej (2016), em sua pesquisa, estudou misturas com três granulometrias diferentes, todas com diâmetro máximo de 9,5 mm. Para definir o teor ótimo de ligante, a autora analisou os resultados obtidos para a porcentagem de teor de ligante, de vazios comunicantes e do desgaste Cântabro. Para a determinação da durabilidade e da resistência mecânica realizou ensaios de desgaste Cântabro, dano por umidade induzida, módulo de resiliência e de deformação permanente. Quanto à funcionalidade das misturas foram realizados ensaios de absorção sonora e de permeabilidade. A autora concluiu que, dentre as três granulometrias trabalhadas, a mistura cuja granulometria foi selecionada com base no trabalho de LU *et al.* (2009), da Universidade da Califórnia (EUA), modificada com um aumento da porcentagem de agregado retida na peneira 4,75 mm, apresentou o melhor desempenho perante as misturas das demais granulometrias estudadas. A mistura atendeu todos os limites e especificações de todos os ensaios mecânicos e funcionais realizados, enquanto para as outras duas misturas de granulometrias distintas, uma não atendeu ao requisito mínimo de resistência à tração (0,55 MPa) e a outra ao de deformação permanente (KOLODZIEJ, 2016).

Dresch (2016) avaliou o comportamento mecânico e funcional de cinco tipos de

misturas CPA, que se diferenciavam entre si pelas fontes e proporções de materiais pétreos da mistura, que eram de cinco pedreiras diferentes utilizadas em obras de rodovias federais do Rio Grande do Sul BR 158 e BR 285. Todas as misturas se enquadravam na Faixa V (norma DNIT 386/99-ES) e foram comparadas com dados de duas misturas asfálticas densas (MAD – Faixa B e C). Para investigar as propriedades mecânicas foram usados os ensaios mecânicos de Módulo de Resiliência (MR), Resistência a Tração (RT) e o ensaio de Perda de Massa Cântabro (PM). Para analisar as propriedades funcionais foram usados os ensaios de absorção sonora e de condutibilidade hidráulica. Por fim, a contribuição estrutural da CPA em pavimentos flexíveis, foi avaliada por meio de uma análise mecanística. Segundo a autora, as misturas CPA com maior quantidade de vazios apresentaram maiores coeficientes de absorção de ruído. Os valores do pico de absorção variaram entre 0,90 e 0,98, entre a faixa de frequência de 500 e 800 Hz. O ensaio de condutividade hidráulica demonstrou que o teor de ligante influencia diretamente no valor do coeficiente de condutividade hidráulica, visto que um aumento do teor de ligante de 3,5% para 5,0 % correspondia, em média, a uma diminuição entre 40 e 50% da permeabilidade.

Com relação aos valores de deflexão, a CPA deu uma pequena contribuição para a estrutura do pavimento gerando uma pequena diminuição desse parâmetro (Figura 9). Por exemplo, em uma das amostras, a 25°C, o pavimento revestido com 4 cm de CPA mais 5 cm de MAD – Faixa C gerou a deflexão de  $69,86 \times 10^{-2}$  mm, enquanto o pavimento revestido apenas de 5 cm de MAD obteve uma deflexão  $85,11 \times 10^{-2}$ mm, ou seja, uma redução de 18%. O mesmo comportamento de redução se deu para a deformação horizontal de tração e deformação vertical de compressão, 25,9% e 25,8%, respectivamente (DRESCH, 2016).

**Figura 9** – Deflexões das diferentes configurações de misturas CPA  
 Fonte: Adaptado de Dresch (2016)



NOTA: \* 5 CA C = 5 cm de Concreto Asfáltico (Faixa C), \* 10 CA C = 10 cm de Concreto Asfáltico (Faixa C),  
 \* 4 CPA = 4 cm de Camada Porosa de Atrito

Jacques (2018) avaliou a viabilidade técnica de se produzirem misturas do tipo CPA com temperaturas intermediárias e sem adição de fibras. A redução das temperaturas de mistura e compactação foi possível por meio da incorporação de um agente surfactante. Foram utilizados os ligantes modificados com polímeros, o AMP 60/85 e AMP 65/90. As características mecânicas da CPA foram avaliadas por meio dos ensaios cântabro, dano por umidade induzida, resistência à tração por compressão diametral e módulo de resiliência. Também foram realizados ensaios de permeabilidade. Os resultados foram comparados com os obtidos em misturas porosas quentes, usadas como referência. O autor afirma que a substituição da mistura quente pela morna traz vantagens relacionadas à emissão de gases de efeito estufa na ordem de 15 a 45% menor do que na produção das misturas quentes e a possibilidade de usinagem em temperaturas até 30<sup>0</sup> C mais baixas do que a temperatura de usinagem das misturas convencionais.

Alecrim (2021) avaliou a utilização das misturas virgens e recicladas de CPA nos pavimentos das vias urbanas da cidade de Fortaleza/CE. A autora fez a análise estrutural do pavimento constituído com estes revestimentos por meio do software (AEMC-MeDiNa) e uma análise em campo de desempenhos acústico. Os resultados sugerem que a incorporação de 15% de fresado em CPA não prejudicou o comportamento da mistura asfáltica se comparado a misturas de referência (virgens). A autora concluiu que a presença de uma camada de CPA no topo do revestimento

convencional implica em ganho de vida útil para o pavimento. Da mesma forma que Alves (2019), a autora afirma que a contribuição estrutural do revestimento do tipo CPA não deveria ser negligenciada no processo de dimensionamento de pavimentos. A análise estrutural demonstrou que a utilização de uma camada de CPA, faixa II, implicou em diminuições de deformações na fibra inferior da camada asfáltica subjacente à CPA de até 26% e no topo do subleito em até 22%. A análise do desempenho em campo mostrou que houve redução de até 5,6 dB no ruído pneu-pavimento com uso da CPA em relação ao Concreto Asfáltico (CA) tradicional.

Barbosa *et al.* (2024) avaliaram o desempenho mecânico de misturas asfálticas porosas, especificamente a CPA, incorporando 10% de pavimento asfáltico recuperado (RAP) e asfalto emborrachado. Diferentes métodos foram investigados para avaliar a rigidez das misturas: o ensaio de módulo de resiliência em uma única temperatura e frequência de carga, o ensaio de módulo diâmico de carga compressiva realizado em várias temperaturas e frequências e os ensaios de ressonância de impacto realizados em três temperaturas com cinco impactos aplicados à mistura. Segundo os autores, os resultados demonstraram que a mistura contendo RAP apresentou um módulo de resiliência mais alto em todas as temperaturas testadas, indicando maior rigidez em comparação com a mistura sem RAP. Os resultados demonstraram a influência do RAP na melhoria das propriedades mecânicas da CPA, apesar de sua menor elasticidade em comparação com a mistura de referência.

Sousa (2024) avaliou a capacidade de rejuvenescimento da mistura CPA com a incorporação de agregado poroso saturado em óleo de soja residual. A autora combinou protocolos de envelhecimento de curto e longo prazo, nos quais, amostras foram compactadas com adição de 0,5% e 0,7%, em peso, de óleo de soja residual na mistura. As amostras com óleo e amostras puras (sem aditivos) foram mantidas em estufa convencional e, em seguida, submetidas a um simulador de chuva. Os resultados demonstraram que o teor de 0,5% de óleo residual apresentou um desempenho superior, ou seja, com maior redução nos índices de oxidação e menor impacto na resistência à tração após o envelhecimento. Segundo a autora, o agregado poroso mostrou-se viável como veículo para agentes rejuvenescedores da CPA, contudo, ela alerta para os métodos de extração do ligante utilizados pois os resultados de ensaios reológicos não confirmaram a eficácia, de forma incisiva, da ação efetiva do óleo de soja residual na recuperação das propriedades reológicas do ligante

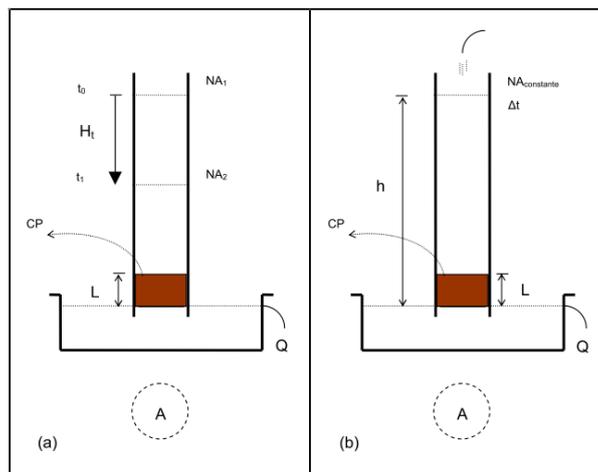
envelhecido.

### 2.3.1.3. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

#### 2.3.1.3.1. PERMEABILIDADE

O procedimento clássico para a determinação da permeabilidade ou condutividade hidráulica em meios porosos são os ensaios de permeabilidade à carga constante e à carga variável com o uso de permeômetros (Figura 10). No Brasil, os ensaios são regulamentados pelas Normas ABNT NBR 13292 (2021) e NBR 14545 (2021), respectivamente.

**Figura 10** - Desenho Esquemático - a) Carga Variável b) Carga constante  
Fonte: Adaptado de Souza (2008)



A base do ensaio fundamenta-se na interpretação da Lei de Darcy, que tem como condições o uso de amostras saturadas em escoamento de regime laminar e em meio isotrópico. De acordo com a Lei de Darcy, a velocidade com que um dado volume de água atravessa uma seção transversal à direção do fluxo é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico, sendo a constante de proporcionalidade o coeficiente de permeabilidade do material.

Souza (2008), ao pesquisar a condutividade hidráulica ( $K$ ), especificamente das misturas asfálticas drenantes, com o uso de permeômetros, demonstrou que o valor de  $K$  era superestimado. Devido ao elevado teor de ligante nas misturas, o escoamento

sob elevada carga hidráulica (gradiente) favorecia o surgimento de altas velocidades que ultrapassavam a velocidade crítica que divide o regime do escoamento entre laminar e turbulento. Portanto, não se verificava, conforme exige a Lei de Darcy, a relação linear entre velocidade e gradiente hidráulico. Para contornar o problema, o autor utilizou um simulador de chuvas para encontrar a intensidade de chuva necessária para saturar a amostra. Desta forma, atingindo-se a capacidade de escoamento subsuperficial, foi possível obter uma lâmina d'água constante na superfície da amostra. Com isso, foi possível aplicar a Equação 1, que é resultante da combinação da Lei de Darcy com a equação da continuidade. Após garantir a estabilidade em termos de lâmina e vazão, é feita a média de cinco medidas para estimar o valor da permeabilidade.

$$k = \frac{Q L}{A h} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:  $K$  é o coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica, (L/T);

$Q$  é a vazão medida, (L<sup>3</sup>/T);

$L$  é a altura do corpo de prova na direção do fluxo, (L);

$A$  é a área da seção transversal do corpo de prova, (L<sup>2</sup>);

$h$  é a carga hidráulica, (L)

### 2.3.1.3.2. INFILTRAÇÃO

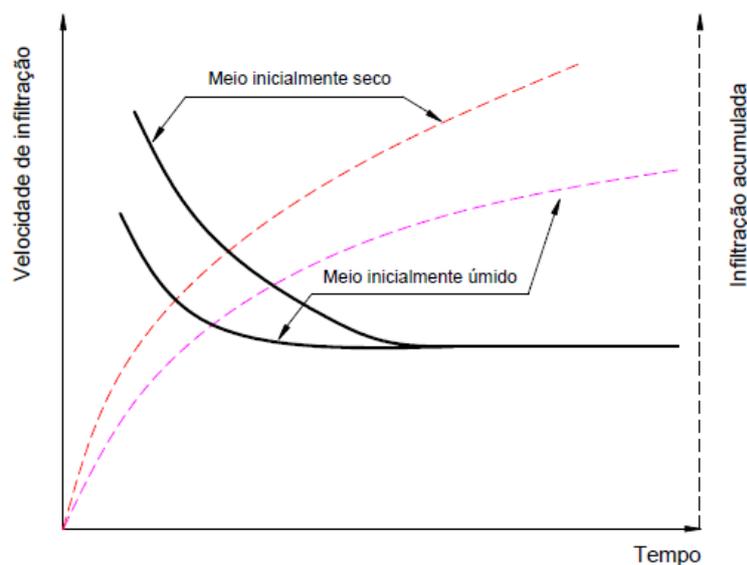
A infiltração é caracterizada pela passagem de água proveniente da precipitação para o interior do meio poroso (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

No que tange aos pavimentos permeáveis revestidos com misturas asfálticas porosas, a sua estrutura de camadas sobrepostas também é considerada como um meio poroso, portanto, as mesmas definições e procedimentos para a determinação da Taxa de Infiltração (TI) aplicados aos solos podem ser replicados às esse tipo de mistura, conforme demonstrado no trabalho de Jabur *et al.* (2015). Os autores avaliaram as taxas de infiltração de pavimentos permeáveis revestido com bloco de concreto intertravado e com mistura asfáltica porosa, construídos numa área de estacionamento da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, utilizando, dentre outras, a metodologia clássica dos infiltrômetros de anéis concêntricos. Os resultados

obtidos apresentaram valores de taxa de infiltração entre  $8,9 \times 10^{-6}$  m/s e  $19 \times 10^{-6}$  m/s para a mistura asfáltica porosa, valores equivalentes a um grau de permeabilidade médio à baixo.

Segundo Carvalho e Silva (2006) a capacidade de infiltração ( $f$ ) é a quantidade máxima de água que pode infiltrar no meio poroso em um dado intervalo de tempo, sendo expresso geralmente em mm/h. Essa capacidade só é atingida durante uma chuva se houver excesso de precipitação, caso contrário, a TI da água do meio não é máxima, não se igualando à  $f$ . A capacidade de infiltração apresenta magnitude alta no início do processo e com o transcorrer do mesmo, esta atinge um valor aproximadamente constante após um longo período de tempo. Este valor é denominado taxa de infiltração estável, comumente conhecido com VIB (Figura 11).

**Figura 11** - Velocidade de infiltração e infiltração acumulada em função do tempo  
Fonte: Adaptado de Carvalho e Silva (2006)



A taxa de infiltração é definida como a lâmina de água (volume de água por unidade de área) que atravessa a superfície do meio, por unidade de tempo. A taxa de infiltração pode ser expressa em termos de altura de lâmina d'água ou volume d'água por unidade de tempo (mm/h). A Equação 2 representa a taxa de infiltração de água no meio poroso, correspondendo à variação da infiltração acumulada ao longo do tempo (CARVALHO, 2006).

$$TI = \frac{DI}{DT}$$

Equação 2

Onde: TI é a taxa de infiltração da água no meio poroso, (mm/h);

I é a infiltração acumulada, mm;

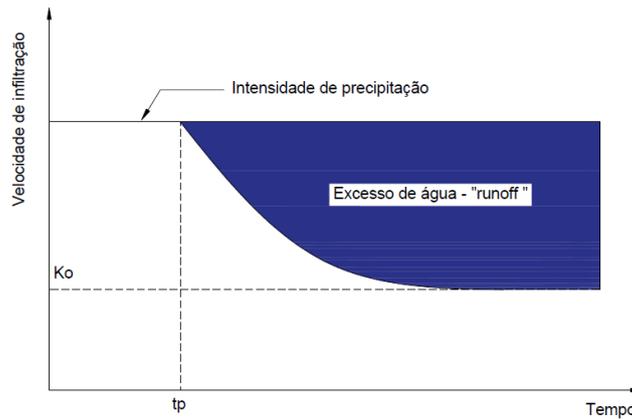
T é o tempo, h;

Se em um meio com baixa capacidade de infiltração aplica-se água a uma taxa elevada, a taxa de infiltração será correspondente à capacidade de infiltração daquele meio. Deverá existir empoçamento da água na superfície e o escoamento superficial daquela água aplicada na taxa excedente à capacidade de infiltração do meio poderá ocorrer (CARVALHO e SILVA, 2006).

De acordo com Carvalho e Silva (2006) à medida que se adiciona água ao meio poroso, a frente de umedecimento vai atingindo uma profundidade cada vez maior, diminuindo a diferença de umidade entre essa frente e a camada superficial, que vai se tornando cada vez mais úmida. Com isto, a TI vai se reduzindo substancialmente até um valor praticamente constante (VIB) característico de cada tipo de meio poroso. Portanto, a TI depende diretamente da textura e estrutura do meio poroso e, para um mesmo meio, depende do teor de umidade na época da chuva, da sua porosidade efetiva e da existência de camada menos permeável (camada compactada) ao longo do perfil.

Quando uma precipitação atinge o meio poroso com intensidade menor do que a capacidade de infiltração ( $f$ ), toda a água penetra no meio, provocando progressiva diminuição de  $f$ . À medida que a precipitação ocorre, a partir de um tempo  $t = t_p$ , denominado *Tempo de Encharcamento* ( $t_p$ ), representado na Figura 12, a taxa de infiltração iguala-se à capacidade de infiltração, passando a decrescer com o tempo e tendendo a um valor constante, que, após grandes períodos de tempo, é caracterizado como a condutividade hidráulica do meio saturado ( $K_o$ ) (CARVALHO e SILVA, 2006).

**Figura 12** - Variação da velocidade de infiltração com o tempo  
 Fonte: Adaptado de Carvalho e Silva (2006)



Segundo BAZZO e HORN (2017) para o caso onde se tem um meio exposto a uma chuva com intensidade sempre superior à capacidade de infiltração ( $i$  (mm/h)  $> f_c$  (mm/h)), a Equação 3, denominada Equação de Horton, formulada com base em experimentos empíricos, estabelece o decaimento dessa infiltração em relação ao tempo.

$$f(t) = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$k$  é a constante de decaimento do meio poroso;  $f_o$  é a taxa de infiltração inicial e  $f_c$  é a taxa (capacidade) de infiltração mínima (VIB - constante). Os parâmetros  $f_c$ ,  $f_o$  e  $k$  são determinados experimentalmente.

### 2.3.1.3.3. CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE ÁGUA

As vantagens de drenagem da mistura asfáltica porosa como a CPA são baseadas na característica de que a água pode facilmente se infiltrar da superfície na estrutura porosa. Entretanto, Pagotto *et al.* (2000) afirmam que a água também pode ser retida dentro da estrutura porosa, reduzindo a descarga dos pavimentos e contribuindo para aliviar o sistema de drenagem superficial das vias e rodovias em geral.

Para estudar o comportamento do escoamento subsuperficial da água em pavimentos porosos, Alber *et al.* (2020) aplicaram um tipo de modelagem hidrológica denominada de Reservatório Linear. Segundo o modelo, a quantidade de água

armazenada no interior do reservatório (meio poroso) é linearmente proporcional à taxa de descarga que sai do mesmo. A Equação 4 apresenta esta relação.

$$S(t) = k \cdot q(t) \quad \text{Equação 4}$$

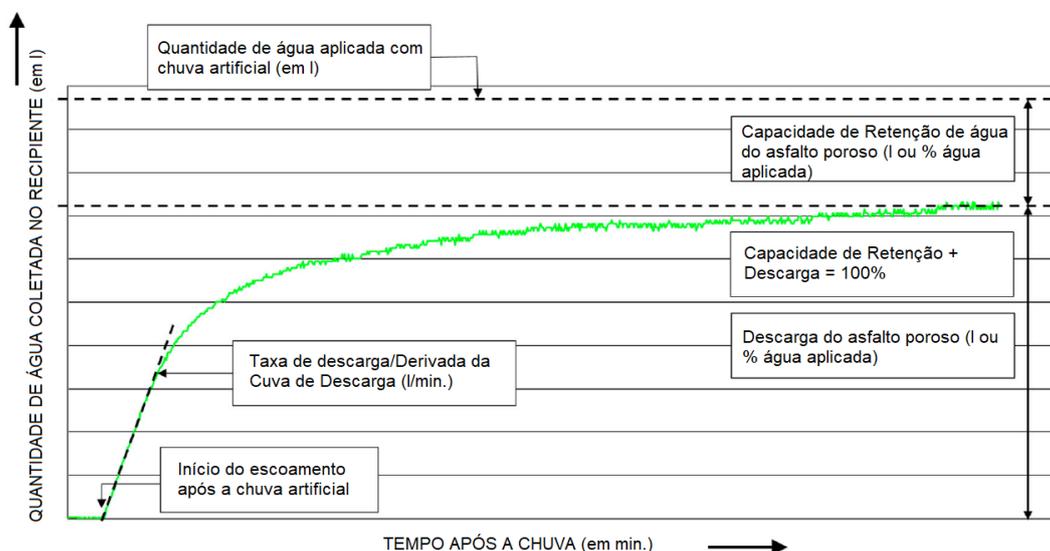
Sendo:  $S(t)$ : a água armazenada no reservatório, em litros;  
 $q(t)$ : a taxa de descarga, ou vazão, em l/min.;  
 $k$ : a constante de armazenamento (decaimento), em min.;

A diferença  $I(t) - q(t)$  resulta na variação do armazenamento  $\frac{\partial S}{\partial t}$  do sistema hidrológico considerado, que, no caso da presente pesquisa, será a amostra da mistura asfáltica porosa. Ao longo do tempo, a taxa tende a se estabilizar, mantendo-se constante. Neste momento, a diferença  $I - q$  representará a quantidade água retida pelo sistema. A curva de decaimento da vazão ao longo do tempo é exponencial e pode ser expressa pela Equação 5, enquanto o início do escoamento é representado pela Equação 6. Alber *et al.* (2020) demonstraram que a curva de decaimento da vazão se ajusta à curva experimental de descarga do reservatório representada na Figura 13.

$$q(t) = q_0 e^{-\frac{(t-t_0)}{k}} \quad \text{Equação 5}$$

$$q_0 = \frac{S(t_0)}{k} \quad \text{Equação 6}$$

**Figura 13** - Comportamento do escoamento em misturas porosas após um evento de chuva  
 Fonte: Alber *et al.* (2020)



## 2.4. OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

Otimizar significa maximizar ou minimizar uma função de um determinado problema, denominada função-objetivo. Quando há mais de uma função a ser otimizada, trata-se de um problema de otimização multiobjetivo. A solução do problema é encontrar a variável ou o conjunto de variáveis que maximizam ou minimizam essa(s) função(ões). Dar-se a essas variáveis o nome de solução(ões) ótima(s) do problema. Os métodos de otimização têm por finalidade encontrar a melhor combinação dentre um conjunto de variáveis de decisão representadas numa região viável que minimizem ou maximizem as funções objetivo (COELLO, 2011).

Existem muitas variedades de problemas reais em que surgem dois ou mais objetivos conflitantes. Alvarez *et al.* (2011) e Wu *et al.* (2020) enfatizam a necessidade de esforços para a otimização de atributos funcionais e estruturais dos pavimentos, que possuem objetivos conflitantes entre si. A concepção de projeto de pavimentos permeáveis é um exemplo desses esforços. Dar-se a este tipo de problema a denominação de problemas multiobjetivos.

As soluções para problemas multiobjetivos são aquelas que têm a melhor solução de compromisso possível entre cada um dos objetivos envolvidos. Portanto, nos problemas de otimização multiobjetivo, é importante encontrar o conjunto de melhores soluções relacionadas possíveis por meio do conceito de dominância. Esses problemas buscam minimizar ou maximizar simultaneamente os valores de todas as funções consideradas no problema, no intuito de encontrar um conjunto de soluções ótimas, chamadas de soluções não-dominadas (COELLO, 2011; GAUTIER, 2020).

Segundo Coello (2011) a otimização pode ser entendida como um procedimento iterativo para encontrar e comparar soluções viáveis num domínio particular, até que não seja possível encontrar uma solução melhor num problema específico. As soluções são denominadas melhores ou piores em termos do valor que apresentam ao serem avaliadas por cada uma das funções. Os métodos de otimização têm por finalidade, encontrar a melhor combinação dentre um conjunto de variáveis de decisão representadas numa região viável que minimizem ou maximizem as funções que definem o problema de otimização.

Os problemas podem ser classificados com base na natureza das variáveis de decisão, da função objetivo e das restrições. Quando se classificam com base na

função objetivo são chamados de problemas mono-objetivo ou multiobjetivo. A maioria dos grupos de pesquisas e aplicações no campo da otimização considera um único objetivo, embora a maioria dos problemas reais envolva mais de um objetivo. (COELLO, 2011; GAUTIER, 2020). A forma matemática mais simples de apresentar os problemas de otimização multiobjetivo está apresentada na Equação 7 é:

$$\min f_k(\mathbf{x}) \text{ ou } \max f_k(\mathbf{x}): k = 1,2,3 \dots K \quad \text{Equação 7}$$

Onde:  $f_k: R^n \rightarrow R$  são as funções objetivo que se desejam otimizar,  $\mathbf{x} = [x_1, x_2 \dots x_n]^T \in R^n$  é o vetor de decisão que contém as variáveis de decisão no espaço  $S \subseteq R^n$  e  $K$  é o número de funções objetivo. Se  $S = R^n$ , o problema é chamado sem restrições ou irrestrito, mas se  $S$  é um subconjunto de  $R^n$ , o problema é dito com restrições e sua expressão matemática é definida pela Equação 8:

$$\min f_k(\mathbf{x}) \text{ ou } \max f_k(\mathbf{x}): k = 1,2,3 \dots K \quad \text{Equação 8}$$

Sujeita a:

$$g_m(\mathbf{x}) \leq 0 \quad m = 1,2,3 \dots M \quad \text{Equação 9}$$

$$H_l(\mathbf{x}) = 0 \quad l = 1,2,3, \dots L \quad \text{Equação 10}$$

$$x_{\min} \leq \mathbf{x} \leq x_{\max} \quad \text{Equação 11}$$

onde  $g: R^n \rightarrow R^m$ , são as restrições de desigualdade,  $H: R^n \rightarrow R^l$  são as restrições de igualdade e  $x_{\min}$  e  $x_{\max}$  representam os limites inferior e superior de cada variável (COELLO, 2011; GAUTIER, 2020).

#### 2.4.1. ESPAÇO DE DECISÃO E ESPAÇO DE OBJETIVOS

Nos problemas de otimização multiobjetivo cada vetor de decisão está contido num espaço n-dimensional cujas coordenadas são as variáveis de problema. Este espaço é chamado *Espaço de Decisão* ( $S$ ), Equação 12.

$$S = \left\{ \mathbf{x}_j = [x_1, x_2, x_3 \dots x_{n_{var}}]^T / x_j \in R^{n_{var}} \right\} \quad \text{Equação 12}$$

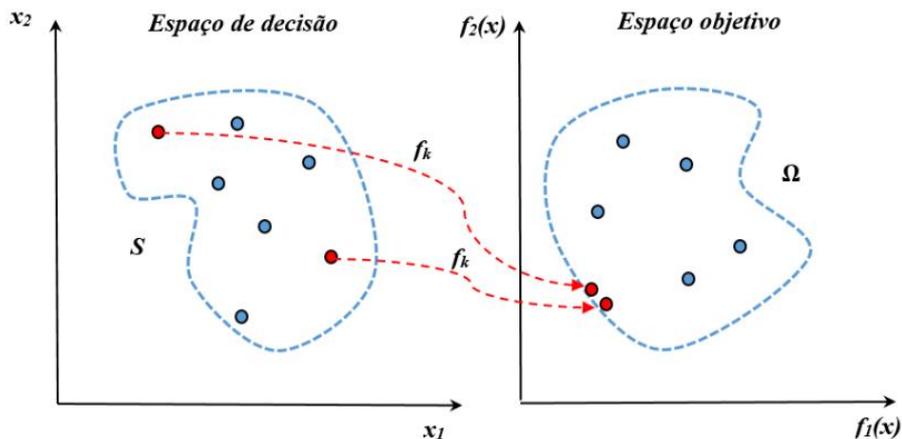
A característica principal dos problemas multiobjetivos é que estes possuem mais de uma função objetivo onde serão avaliadas as variáveis de decisão. Ao

considerar as funções-objetivo como  $f_1(x), f_2(x), f_3(x) \dots f_K(x)$  (onde  $k$  é o contador de funções objetivo), o vetor de objetivos pode ser expresso como  $\mathbf{f} = [f_1(x) \dots f_K(x)]^T \in R^K$ . Então, o *Espaço dos Objetivos* ( $\Omega$ ) é o conjunto de pontos  $\Omega \subseteq R^K$ , resultantes da avaliação dos pontos do *Espaço de Decisão*  $S$  em cada uma das  $K$  funções objetivo, Equação 13.

$$\Omega = \{\mathbf{f} = [f_1(x) \dots f_K(x)]^T / f_k \in R^K\} \quad \text{Equação 13}$$

Na Figura 14 estão representados os casos bidimensionais da definição de espaço de decisão e espaço de objetivos (COELLO, 2011; GAUTIER, 2020).

**Figura 14** - Espaço de decisão e espaço de objetivos  
Fonte: Gautier (2020)



Na maioria dos casos, nos problemas multiobjetivo é pouco provável que o resultado final seja um vetor objetivo ideal, que é o vetor que contém todas as soluções ótimas (mínimos ou máximos) de cada função. Portanto, é necessário introduzir nestes problemas um conceito que permita a comparação de vetores no espaço objetivo, no intuito de estabelecer o conjunto de melhores soluções do problema. Trata-se do conceito de dominância entre soluções. (DEB, 2002; GAUTIER, 2020)

### 2.4.2. CONCEITO DE DOMINÂNCIA DE SOLUÇÕES

O conceito de dominância é usado nos algoritmos de otimização multiobjetivo de forma equivalente ao uso das relações “maior que” e “menor que” nos algoritmos mono-objetivo, no intuito de comparar quando uma solução é melhor ou pior que outra,

já que no caso o espaço objetivo é multidimensional e não unidimensional. Esse conceito pode ser expresso segundo Deb (2002) (apenas minimização):

Uma solução  $x_i$  domina outra solução  $x_j$ , ( $x_i < x_j$ ), se as seguintes condições são satisfeitas:

- A solução  $x_i$ , não é pior que a solução  $x_j$  para todas as funções objetivo (Equação 14).

$$\forall k \in \{1, 2 \dots K\}: f_k(x_i) \leq f_k(x_j) \quad \text{Equação 14}$$

- A solução de  $x_i$ , é estritamente melhor que a solução de  $x_j$  em ao menos uma das funções objetivo (Equação 15).

$$\exists k \in \{1, 2, \dots K\}: f_k(x_i) < f_k(x_j) \quad \text{Equação 15}$$

Caso alguma dessas condições não seja satisfeita, dir-se-á que a solução  $x_i$  não domina a solução  $x_j$ , ou que a solução  $x_j$  não é dominada pela solução  $x_i$ .

### 2.4.3. CONJUNTO DE SOLUÇÕES E FRENTE DE PARETO

Segundo as definições apresentadas por Deb (2002):

- Dentre um conjunto de soluções  $P$ , o conjunto não dominado de soluções  $P'$  é aquele formado pelos membros não dominados por nenhum membro do conjunto  $P$ ;
- O conjunto não dominado de todo o espaço de decisão viável  $S$  é denominado conjunto ótimo de Pareto global. Sua imagem no espaço objetivo é denominada Frente ou Fronteira de Pareto.

Segundo Gautier (2020) definições alternativas de frente de Pareto global aparecem na literatura, como a de Reyes e Coelo (2006):

- Se  $f_k(x_i^*) \in F^*$  onde  $P^*$  é o conjunto de soluções não dominadas por outra solução em todo o espaço objetivo  $\Omega$ , o conjunto de vetores  $F^*$  é chamado frente de Pareto e o conjunto de suas respectivas contra imagens  $x_i^*$  é chamado de ótimo de Pareto (Equação 16).

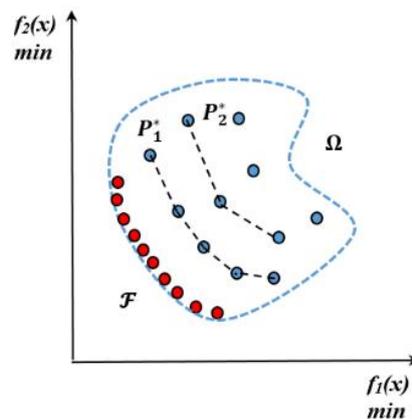
$$F^* = \{f_k(x_i^*) \in R^K / f_k(x_i^*) < f_k(x_i) \forall f_k(x_i) \in \Omega\}$$

Equação 16

Baseados no conceito de dominância de soluções apresentados, alguns algoritmos multiobjetivos são orientados ao longo do processo de otimização pela busca iterativa de um conjunto não dominado de pontos (soluções) o mais representativo possível. Essa busca naturalmente é discreta. Em cada iteração do processo, são aplicados os conceitos de dominância entre todos os pontos-solução avaliados e selecionados para busca, a fim de obter os pontos pertencentes ao conjunto não dominado da  $i$ -ésima iteração. O algoritmo então opera no sentido de selecionar e avaliar novos pontos, de modo a intensificar a busca na próxima iteração. Assim, sucessivamente, o conjunto não dominado resultante da última iteração prevista, ou quando se atinja um critério de convergência adotado, corresponderá a uma aproximação final do conjunto ótimo global, cuja imagem no espaço dos objetivos será então uma aproximação da Frente de Pareto global do problema (DEB, 2002; GAUTIER, 2020).

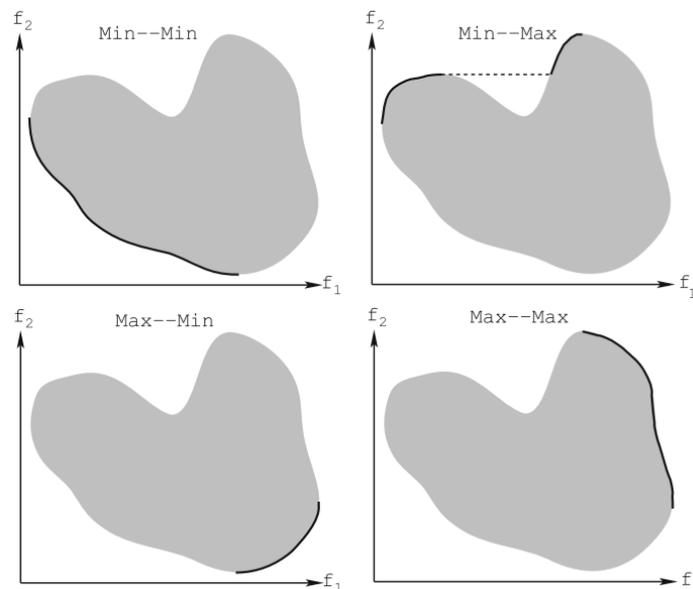
Na Figura 15 são apresentadas, para duas funções-objetivo  $f_1$  e  $f_2$ , as representações das imagens dos conjuntos não-dominados  $P_1^*$  e  $P_2^*$  e a Frente (fronteira) de Pareto  $\mathcal{F}$  no espaço dos objetivos  $\Omega$ . Ou seja, as funções  $f_1$  e  $f_2$  são funções que se deseja minimizar e o conjunto de pontos  $P_1^*$  e  $P_2^*$  representam soluções não-dominadas do problema nas iterações 1 e 2. Cada ponto do conjunto  $P_i^*$  possui valores das funções  $(f_1(x_i), f_2(x_i))$ . Após  $i$ -ésimas iterações, quando não for possível encontrar melhores soluções em relação à última iteração, o conjunto  $P_i^*$  será a fronteira de soluções não-dominadas ( $\mathcal{F}$ ).

**Figura 15** - Frente de Pareto e conjuntos não-dominados  
Fonte: Gautier (2020)



Devido à multiplicidade de funções dos problemas multiobjetivos, estes não costumam ser caracterizados somente como uma maximização ou minimização, mas também como uma combinação de minimização e maximização em cada função objetivo. Por exemplo, se o problema tem apenas duas funções objetivos, quatro combinações são possíveis: min-min, max-max, min-max e max-min. Na Figura 16, ilustram-se as Frentes de Pareto de cada uma destas combinações (DEB, 2014; GAUTIER, 2020).

**Figura 16** - Combinações de frente de Pareto para dois objetivos.  
Fonte: (BURKE; KENDALL, 2014)



## 2.5. ABORDAGEM DOS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

Em virtude da complexidade no tratamento de dois espaços possivelmente multidimensionais nos problemas de otimização multiobjetivo, é preciso estabelecer um método de abordagem que se ajuste ao problema estudado. Na literatura, encontram-se dois tipos de métodos de abordagem, os métodos clássicos e os métodos diretos.

### 2.5.1. MÉTODOS CLÁSSICOS – SOMA PONDERADA

De acordo com Deb (2014) o método de soma ponderada, como o próprio nome sugere, escala um conjunto de objetivos em um único objetivo pré-multiplicando cada objetivo com um peso fornecido pelo usuário. Este método é a abordagem mais simples e é provavelmente a abordagem clássica mais amplamente utilizada (BURKE; KENDALL, 2014), (Equação 17).

$$\min F(x) = \sum_{m=1}^M w_m f_m(x) \quad \text{Equação 17}$$

Sujeita a:

$$g_j(x) \geq 0 \quad j = 1, 2 \dots J. \quad \text{Equação 18}$$

$$h_k(x) = 0 \quad k = 1, 2 \dots K. \quad \text{Equação 19}$$

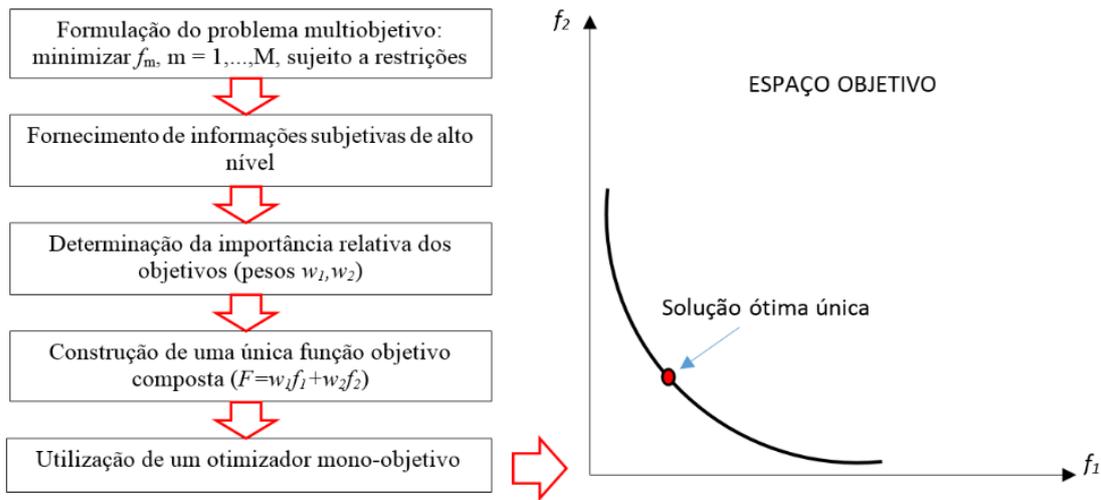
$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad \text{Equação 20}$$

Onde  $w_m \in [0,1]$  é o peso da m-ésima função objetivo.

Embora a ideia seja simples, ela introduz uma questão não tão simples. Quais valores de pesos devem ser usados? Não há uma resposta única para essa pergunta. A resposta depende da importância de cada objetivo no contexto do problema e um fator de escala. O efeito de escala pode ser evitado normalizando as funções objetivo. Depois que os objetivos são normalizados, um objetivo composto pode ser formado pela soma dos objetivos normalizados ponderados e o problema é então convertido para um problema de otimização de objetivo único (BURKE; KENDALL, 2014).

Nesse caso, o problema de otimização multiobjetivo seria reduzido a um problema de otimização mono-objetivo e a abordagem seguiria a sequência mostrada na Figura 17.

**Figura 17** - Abordagem clássica dos algoritmos de otimização multiobjetivo.  
Fonte: Gautier (2020)

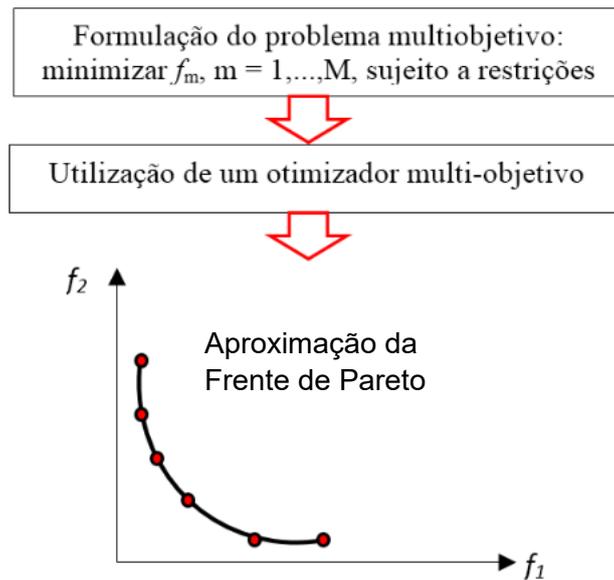


### 2.5.2. MÉTODOS DIRETOS

A principal desvantagem dos métodos clássicos é a dificuldade em se estabelecer o nível relativo de preferência entre os diversos objetivos. No método de somas ponderadas seria necessário realizar mais de um processo de otimização, variando-se os pesos atribuídos às funções objetivo, na esperança de se obter mais informações sobre o problema que está sendo analisado. Observa-se que os resultados do problema de otimização podem ser altamente sensíveis aos valores dos pesos. Muitas regiões do espaço objetivo podem inclusive ficar inacessíveis para qualquer combinação possível dos valores dos pesos atribuídos às funções objetivo. (DEB, 2014; GAUTIER, 2020)

Para contornar a limitação dos métodos clássicos foi desenvolvida outra forma de abordagem dos problemas de otimização multiobjetivo, chamada de abordagem direta. Neste caso, um procedimento considerado ideal para abordagem do problema de otimização multiobjetivo seria a obtenção direta da aproximação da Frente de Pareto ótima, conforme a sequência apresentada na Figura 18.

**Figura 18** - Abordagem direta dos algoritmos de otimização multiobjetivo.  
Fonte: Gautier (2020)



## 2.6. OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO APLICADA À PAVIMENTAÇÃO

Na literatura podem ser encontradas aplicações das técnicas de otimização multiobjetivo na engenharia de pavimentos, principalmente na área de gerência de pavimento. Dentre outros, conceitos de dominância e fronteira de Pareto são abordados em alguns trabalhos. A seguir, serão apresentados de forma mais detalhada alguns desses estudos.

Elhadidy *et al.* (2015), Yu *et al.* (2015), Al-Saadi *et al.* (2021), Sindi e Agbelie (2020) e Cao *et al.* (2020) aplicaram otimização multiobjetivo para desenvolver estratégias de manutenção, conservação e reabilitação de pavimentos. Como se tratam de trabalhos distintos, cada um possuía funções-objetivo diferentes entre si, entretanto, existiam objetivos em comum entre eles, como nos trabalhos de Yu, *et al.* (2015), Al-Saadi *et al.* (2021) e Cao *et al.* (2020), que procuraram minimizar, ao mesmo tempo, os custos de manutenção e a emissão de gases de efeito estufa (CO<sub>2</sub>).

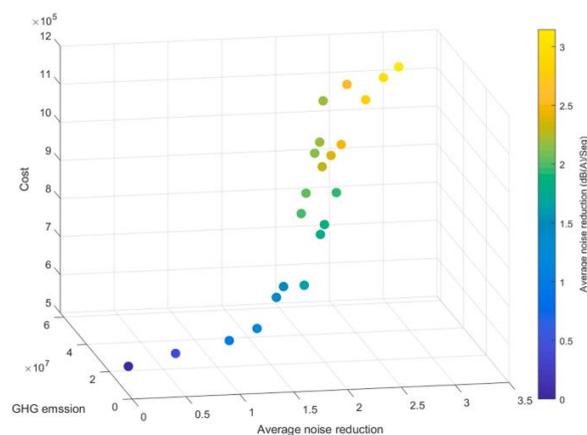
Elhadidy *et al.* (2015) concluíram que, de posse das soluções ótimas representadas pelo custo e condição do pavimento, um tomador de decisão pode facilmente obter as informações da manutenção e reabilitação para o planejamento e prática com custos mínimos de ações de manutenção e condições máximas de utilização da vida útil do pavimento. Yu *et al.* (2015) demonstraram que há uma

oportunidade de reduzir o custo e os impactos ambientais de 80,3% e 77,8%, respectivamente, e um aumento no desempenho do pavimento para 146,6% em relação ao caso base de referência.

Al-Saadi *et al.* (2021) e Sindi e Agbelie (2020) tinham objetivos semelhantes, o de otimizar o processo de intervenção no pavimento. Al-Saadi *et al.* (2021), no seu estudo de caso, demonstraram que a melhor estratégia seria aplicar a combinação de selagem de trincas e revestimento superficial na maioria dos segmentos da malha analisada e que as soluções ótimas são influenciadas principalmente pela limitação orçamentária, condições atuais do pavimento, tráfego pesado e limites aceitáveis de irregularidades na superfície. Sindi e Agbelie (2020), por sua vez, concluíram que o uso de algoritmo genético como método de otimização no processo de intervenção nos pavimentos é preciso e consistente, contudo, sugerem incorporar mais variáveis no processo como a localização de uma seção, o fluxo de tráfego e os custos do usuário.

Cao *et al.* (2020), que trabalharam no gerenciamento de uma rede de pavimentos de baixo ruído (pavimentos porosos) na cidade Hong Kong, afirmaram que estratégias de intervenção a serem executadas pelos tomadores de decisão são sensíveis às condições sociais específicas, limites orçamentários e restrições políticas. A Figura 19 ilustra a Fronteira Pareto obtida no trabalho de Cao *et al.* (2020), relacionando o nível de ruídos, emissão de gases e o custo.

**Figura 19** - Solução Pareto ótimo no espaço de objetivos  
Fonte: Cao *et al.* (2020)



Para buscar as melhores estratégias de intervenção, Cao *et al.* (2020) aplicaram o *NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm)*, desenvolvido por Deb *et al.* (2002). Nele, consta um algoritmo de busca multiobjetivo baseado no ordenamento de soluções não dominadas, denominado *FNDS (Fast Nondominated Sorting)*. O algoritmo realiza a busca discreta entre as alternativas existentes e as classificam dentro de fronteiras no espaço dos objetivos. A fronteira que constam os pontos cujas soluções não são dominadas por nenhum outro ponto é a fronteira de Pareto.

A presente pesquisa tem uma ideia semelhante no que tange ao processo de busca do trabalho de Cao *et al.* (2020), ou seja, realizar uma busca discreta das misturas asfálticas aplicando-se o conceito de dominância, em que a granulometria (tamanho das partículas) e teor de ligante são as variáveis de decisão e o problema de otimização é maximizar funções-objetivo que são as propriedades mecânicas e funcionais determinadas em laboratório.

Javid *et al.* (2021) utilizaram otimização multiobjetivo para determinar a proporção ideal dos insumos e do consumo de cimento da mistura de pavimento de concreto que melhore as suas características fundamentais como a resistência à flexão, resistência à abrasão, abatimento, retração por secagem e resistência ao congelamento-descongelamento e seu custo unitário. Em virtude da otimização multiobjetivo, a média de resistência à abrasão, contração por secagem, resistência ao congelamento e degelo, resistência à flexão e custo no modelo introduzido são melhorados em 18%, 12%, 5%, 4% e 1%, respectivamente. No entanto, a média do abatimento (slump) decresceu em 9%. Um dos objetivos específicos desta pesquisa se assemelha com a ideia do trabalho de Javid *et al.* (2021). Dentre as proporções de materiais que compõem as misturas asfálticas CPA projetadas, o objetivo é saber quais delas (proporções) oferece a melhor combinação, em termos de granulometria e teor de ligante, que maximizam as propriedades mecânicas e funcionais do revestimento poroso.

Pryke *et al.* (2006) e Park *et al.* (2010), por sua vez, utilizaram otimização multiobjetivos para finalidades diferentes. Pryke *et al.* (2006) para o projeto de dimensionamento de pavimentos flexíveis e Park *et al.* (2010) para a previsão de rigidez por meio de retroanálise dos módulos de resiliência das camadas do pavimento. Pryke *et al.* (2006) concluíram que a metodologia proposta para

dimensionar as camadas do pavimento pode ser considerada uma plataforma para construir modelos mais complexos, bem como outras funções objetivo ou funções multiobjetivo que podem ser utilizadas nos sistemas de gerência de pavimentos. Park *et al.* (2010) afirmaram que os resultados da validação do modelo demonstraram que o conjunto ótimo de parâmetros fornecido pelo mesmo, pode, efetivamente, estimar as características reais de rigidez dos materiais do pavimento (PARK; PARK; HWANG, 2010).

## **2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO**

A revisão da literatura evidenciou quão necessária e importante é a mudança de paradigma quando se trata da gestão das águas pluviais. A sua relação direta com as consequências da ação antrópica, tanto pela crescente urbanização, pela ocupação do uso do solo, principalmente nos países emergentes, e pelos efeitos potencializados pelas mudanças climáticas induziu a comunidade internacional à uma abordagem alternativa na tentativa de resolver o problema.

Pelo que proporcionam, as técnicas de LID são alternativas que buscam mitigar os impactos ambientais nas bacias hidrográficas antropizadas. Na China, por exemplo, o conceito de Cidades-Esponjas tornou mais próxima a relação entre a gestão das águas pluviais e os projetos e políticas de planejamento urbano. No sentido de aumentar a resiliência à ação das águas, esta abordagem alternativa ofereceu meios que potencializaram a coleta, infiltração, retenção e reutilização do excesso da água, principalmente àquelas provenientes de chuvas intensas e de curta duração.

Conforme discutido na revisão de literatura, os pavimentos permeáveis são classificados como uma das técnicas de LID. Dentre eles, os revestidos com misturas asfálticas porosas (OGFC, CPA, PA, etc.) são particularmente interessantes em virtude de seus variados atributos funcionais como a infiltração, permeabilidade e retenção de água, além de oferecer propriedades acústicas que reduzem o ruído causado pela interação pneu-pavimento, aumentando o nível de conforto para os usuários. Visto que os pavimentos permeáveis revestidos com misturas asfálticas porosas podem oferecer essas funcionalidades, a maior preocupação é otimizá-las da melhor forma possível. A ideia é obter a melhor configuração de distribuição e tamanhos de partículas, teores de ligantes, vazios comunicantes, macro e microtextura que possam melhorar suas propriedades funcionais sem negligenciar

critérios estruturais impostos em normativos técnicos como a durabilidade e estabilidade do pavimento durante sua vida útil.

Na maioria dos casos, o desafio de otimizar as propriedades mecânicas e funcionais da CPA é feito de forma exaustiva. Ensaios laboratoriais, validações com medidas de campo em escala real e o uso de modelos mecanísticos-empíricos são alguns dos exemplos encontrados na literatura.

Não obstante, sabendo que os múltiplos objetivos que o pavimento permeável oferece podem ser conflitantes entre si, o desafio de otimizá-los se torna mais difícil. Portanto, por que não diagnosticar o problema, tecnicamente, como um problema multiobjetivo de fato e resolvê-lo com os métodos adequados e reconhecidos internacionalmente? Problemas multiobjetivos devem ser resolvidos com métodos de otimização multiobjetivo.

Esta pesquisa se propôs a estudar esta problemática. Para atingir tal fim, foi utilizado um algoritmo de busca multiobjetivo para selecionar projetos de misturas asfálticas porosas dentro de um espaço de decisão disponível. As combinações entre faixas granulométricas e teores de ligante foram as variáveis de decisão dos problemas multiobjetivos que foram concebidos.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Este capítulo detalha a metodologia aplicada na pesquisa. Portanto, é apresentado o planejamento de todas as etapas, como os materiais utilizados, os métodos de ensaios mecânicos e funcionais e a concepção do modelo de otimização proposto.

#### **3.1. PLANEJAMENTO DA PESQUISA**

O planejamento das atividades foi organizado de acordo com o fluxograma da Figura 20. De forma sucinta, é descrita, a seguir, cada uma das etapas da pesquisa. Posteriormente são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais e os respectivos instrumentos normativos que os regulamentam. Os métodos de ensaio para a determinação das propriedades mecânicas e funcionais, cenários de duração e intensidade de precipitação e o método de otimização proposto para a solução do problema multiobjetivo formulado também são apresentados neste capítulo.

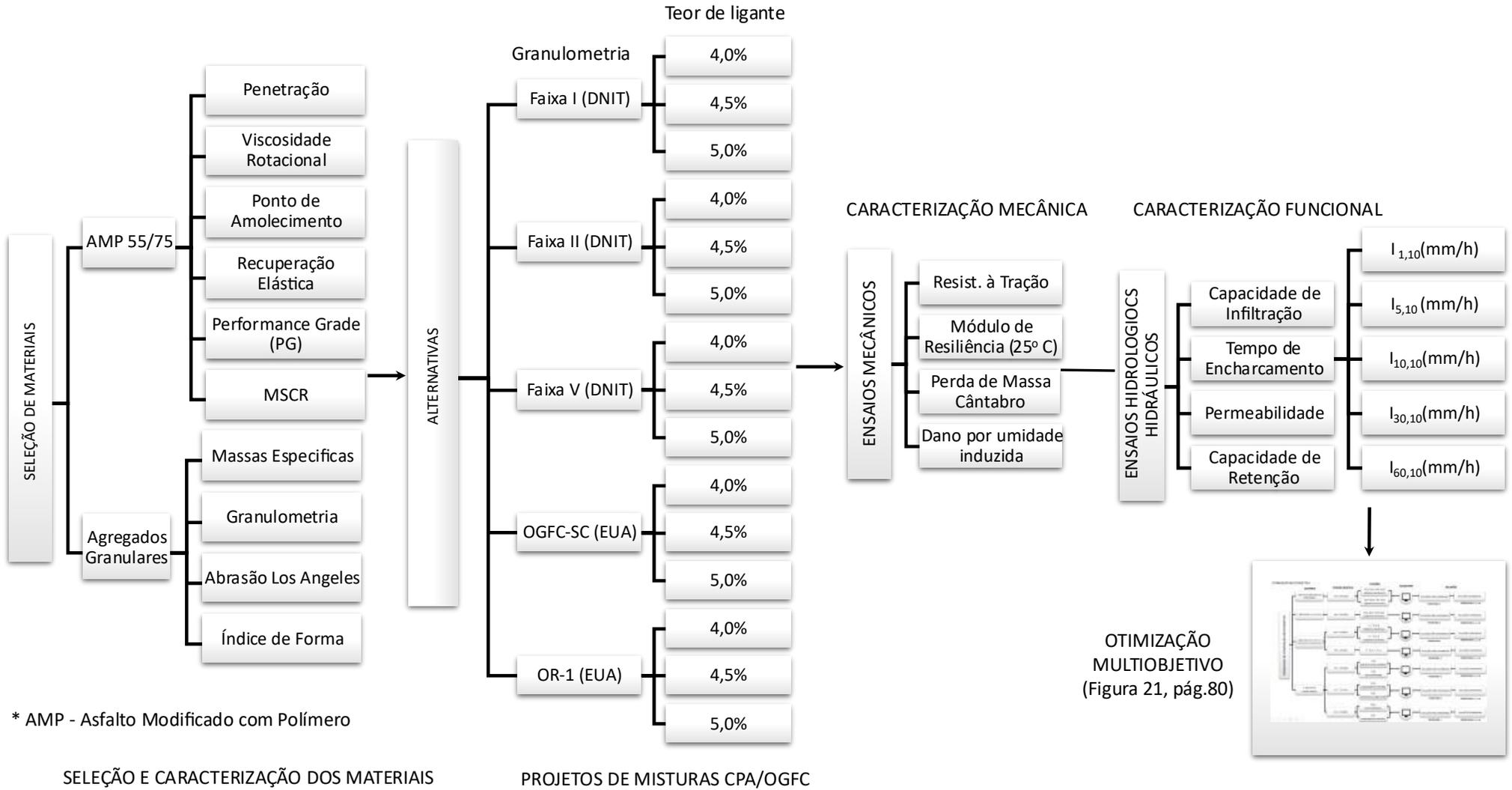
#### **1ª ETAPA - SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS**

A primeira etapa da pesquisa consistiu na seleção e caracterização dos materiais asfálticos e granulares utilizados na composição das misturas, de acordo com os normativos técnicos vigentes.

#### **2ª ETAPA – CURVAS GRANULOMÉTRICAS, TEORES DE LIGANTE E PROJETOS DE MISTURA**

Na segunda etapa foram obtidas curvas de granulometria que se enquadraram em faixas granulométricas constantes em especificações nacional e internacional. Ao combinar, para cada mistura de agregados, diferentes teores de ligantes, definiu-se o número de alternativas de projeto de misturas CPA.

**Figura 20 - Fluxograma da Pesquisa**



\* AMP - Asfalto Modificado com Polímero

### **3ª ETAPA – PROGRAMA DE ENSAIOS MECÂNICOS E FUNCIONAIS**

Na terceira etapa foi realizado o programa de ensaios para determinação das propriedades mecânicas e funcionais de cada mistura asfáltica porosa concebida.

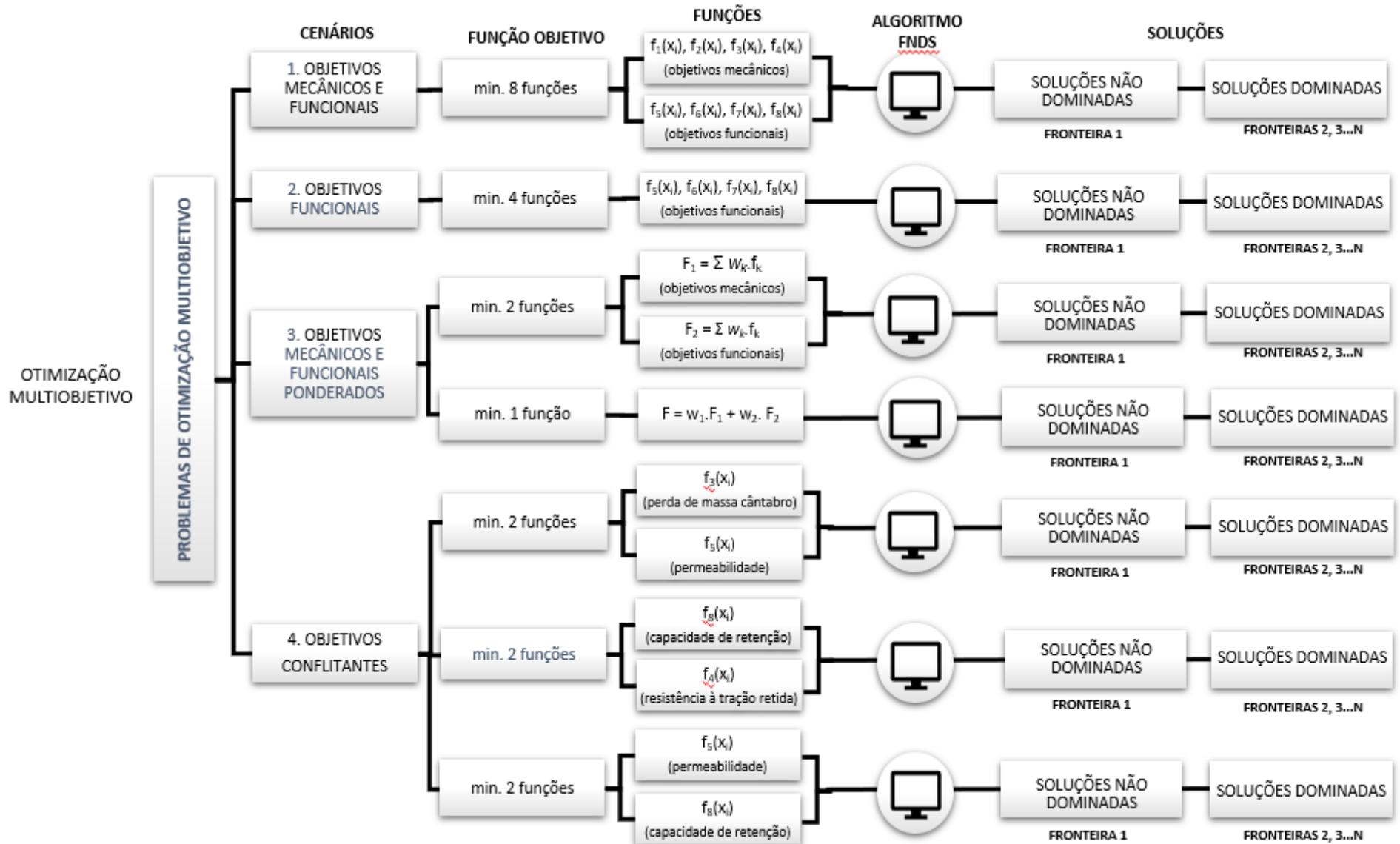
### **4ª ETAPA – CENÁRIOS DE DURAÇÃO E INTENSIDADE DE CHUVA**

A partir de diferentes durações e intensidades de chuva, foi avaliada a variação no tempo de encharcamento ( $t_p$ ) de pavimentos permeáveis simulados em escala reduzida por meio de modelos de estruturas de camadas sobrepostas. Para cada estrutura, procurou-se replicar as mesmas configurações das camadas inferiores (granulares), diferenciando-os entre si apenas pela camada de revestimento que foi composta por cada uma das misturas.

### **5ª ETAPA – OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO**

Na última etapa foi utilizado o algoritmo de busca multiobjetivo para ordenar e selecionar, por meio de fronteiras, as melhores soluções de projetos de misturas asfálticas porosas disponíveis no espaço de decisão utilizando o conceito de dominância para os cenários de problemas de otimização multiobjetivos concebidos, conforme detalhados no fluxograma da Figura 21.

Figura 21 - Otimização Multiobjetivo



## 3.2. MATERIAIS

### 3.2.1. LIGANTE ASFÁLTICO

O ligante utilizado no projeto das misturas foi o PG 64-XX (Asfalto Modificado com Polímero AMP 55/75), fornecido pela empresa Vanguarda Engenharia, contratada pelo DNIT para executar a restauração e manutenção de um trecho da BR-230 na Paraíba. Nesta pesquisa foram realizados os ensaios de caracterização física e reológica do ligante nas condições iniciais (sem envelhecimento) e após o envelhecimento de curto prazo com a estufa de filme fino rotativa (Rolling Thin Oven Test – RTFO). Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da UFCG. A Tabela 3 apresenta os resultados da caracterização do ligante e os normativos de referência para cada um deles.

**Tabela 3** - Resultados da caracterização física e reológica do ligante AMP 55/75

Ensaio	Unidade	Antes RTFOT	Após RTFOT	Especificação	Norma técnica
Penetração	0,1 mm	62		45 a 70	(ABNT NBR 6576, 2007)
Penetração Retida	%		71	≥ 60	
Viscosidade rotacional:					
135°C, SP 21, 20 rpm	cp	821,3	1118,6	>274	(ABNT NBR 15184, 2021)
150°C, SP 21, 50 rpm	cp	407	501	>112	(ABNT NBR 15184, 2021)
177°C, SP 21, 100 rpm	cp	153,7	177,3	57 a 285	(ABNT NBR 15184, 2021)
Ponto de amolecimento	°C	56	57	≥ 46	(ABNT NBR 6560, 2016)
Recuperação Elástica	%	85%		≥ 75	(ABNT NBR 15086, 2006)
Recuperação Elástica Retida	%		82,5%	≥ 80	
Performance Grade (PG)					
Temperatura	°C	70	64		(ASTM D6373, 2016)
MSCR	R <sub>0,1</sub> (%)		75		(ASTM D7405, 2015)
	R <sub>3,2</sub> (%)		62,03	≥ 35	
	R <sub>diff</sub> (%)		17,30		
	J <sub>nr (0,1)</sub> (KPa <sup>-1</sup> )		0,468		
	J <sub>nr (3,2)</sub> (KPa <sup>-1</sup> )		0,752	Tráfego muito pesado	

De acordo com a Tabela 3, o ligante AMP 55/75 atendeu às especificações das normas técnicas correspondentes a cada ensaio e, portanto, pôde ser aplicado para a produção de misturas asfálticas porosas, objeto da presente pesquisa. O motivo da escolha do AMP 55/75 foi devido à sua utilização recorrente em obras de pavimentação do DNIT na Paraíba e, durante o andamento da pesquisa, estava acessível em termos de disponibilidade, pois vinha sendo utilizado nas obras de restauração da rodovia BR-230/PB.

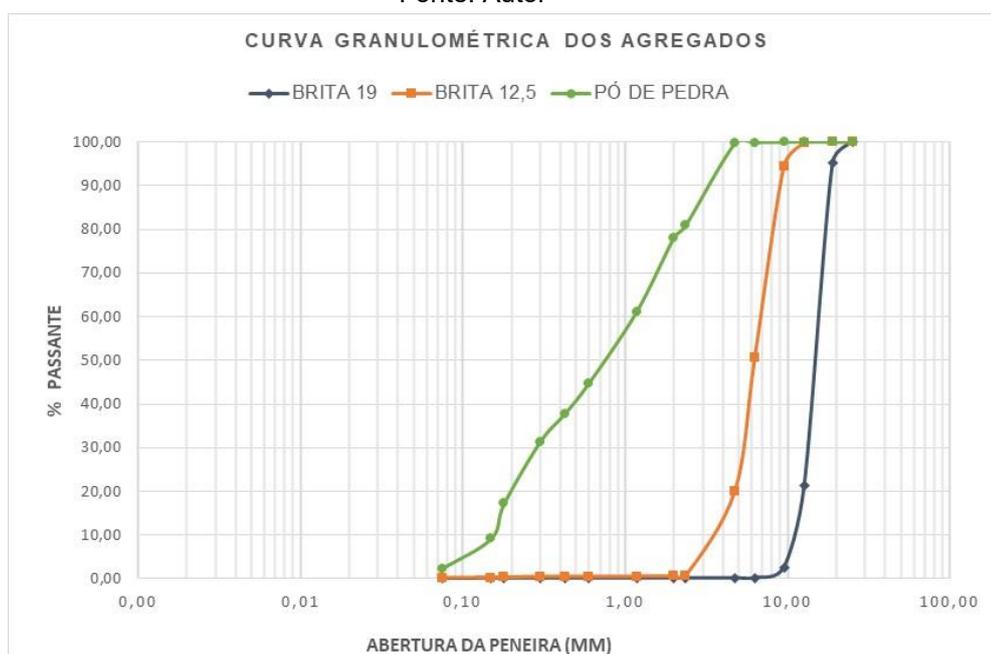
### 3.3.2. AGREGADOS

Os materiais granulares e o fíler selecionados para a pesquisa foram agregados pétreos de origem granítica, especificamente a Brita 19 mm, Brita 12,5mm, pó-de-pedra e a Cal Hidratada CH-1, respectivamente, utilizados nas obras rodoviárias da região. Todos os materiais granulares foram fornecidos pela empresa Rocha Cavalcante Ltda. e têm origem de uma pedreira própria com sede em Campina Grande. A cal foi obtida comercialmente.

Embora o ligante asfáltico utilizado na pesquisa tenha sido um ligante modificado com polímero, optou-se em utilizar a cal hidratada como fíler, pois, baseado em pesquisas anteriores, os agregados graníticos da região possuem problemas de adesividade de forma recorrente. Em misturas que utilizam ligantes convencionais, como o CAP 50/70, faz-se necessária a adição de dope para melhorar a adesividade do agregado graúdo com o ligante asfáltico.

Os agregados foram submetidos aos seguintes ensaios de caracterização: granulometria, massa específica real e aparente, absorção, abrasão Los Angeles e índice de forma. A Figura 22 apresenta as curvas granulométricas dos materiais. A Figura 22 indica uma graduação mais uniforme para os agregados mais graúdos como a Brita 19 mm e a Brita 12,5 mm em relação ao pó-de-pedra, que se apresenta mais bem graduado. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos nos demais ensaios de caracterização.

**Figura 22** - Caracterização granulométrica dos agregados  
Fonte: Autor



**Tabela 4** - Caracterização dos agregados

	Norma	Limites	Brita 19 mm	Brita 12,5 mm	Pó de pedra
Absorção (%)	DNIT ME 413/2019	$\leq 2$	0,13	0,29	0,73
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	DNIT ME 413/2019	-	2,76	2,75	2,65
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	DNIT ME 413/2019	-	2,77	2,77	2,71
Índice de forma	ASTM D4791/2023	$\geq 0,5$	0,653	0,649	-
Abrasão Los Angeles (%)	DNIT ME 035/1998	$\leq 30$	18,5	20,4	-

Os resultados da Tabela 4 indicam que os agregados são pouco porosos, visto que a percentagem de absorção foi inferior a 2%. Quanto ao desgaste por abrasão, a perda de massa foi menor do que o limite máximo aceitável de 55%. O índice de forma maior do que 0,5 é um indicativo que os agregados possuem formas predominantemente cúbicas e arredondadas, o que favorece o seu uso em misturas asfálticas.

### 3.4. MÉTODOS

Nesta seção é apresentada a metodologia utilizada para a concepção dos projetos das misturas asfálticas porosas, os programas de ensaios mecânicos e funcionais realizados e o método de otimização proposto.

#### 3.4.1. PROJETOS DE MISTURAS

As concepções de projetos das misturas foram definidas a partir de algumas variáveis, como as faixas de granulometria, os teores de ligantes, as temperaturas de mistura e de compactação, o método de compactação e os parâmetros volumétricos, conforme detalhados a seguir.

##### 3.4.1.1. FAIXAS GRANULOMÉTRICAS

Nesta pesquisa foram estudadas cinco faixas granulométricas cuja intenção foi diversificar o universo de misturas asfálticas porosas, sendo três pertencentes à especificação nacional e duas de especificações internacionais. As faixas granulométricas nacionais foram as Faixas I e II com diâmetro máximo de 12,5 mm e a Faixa V com diâmetro máximo de 19 mm, conforme a Norma DNIT-ES 386/99. As faixas internacionais foram a Faixa OGFC-SC do Departamento de Transportes do estado da Carolina do Sul/EUA (SCDOT) e a Faixa OGFC-OR-1 do Departamento de

Transportes do estado de Oregon/EUA (ORDOT), ambas com diâmetro máximo de 19 mm (PUTMAN, 2012). As Tabelas 5 e 6 detalham as informações sobre as faixas granulométricas selecionadas.

**Tabela 5** - Especificações Granulométricas CPA – Norma DNIT-ES 386/99

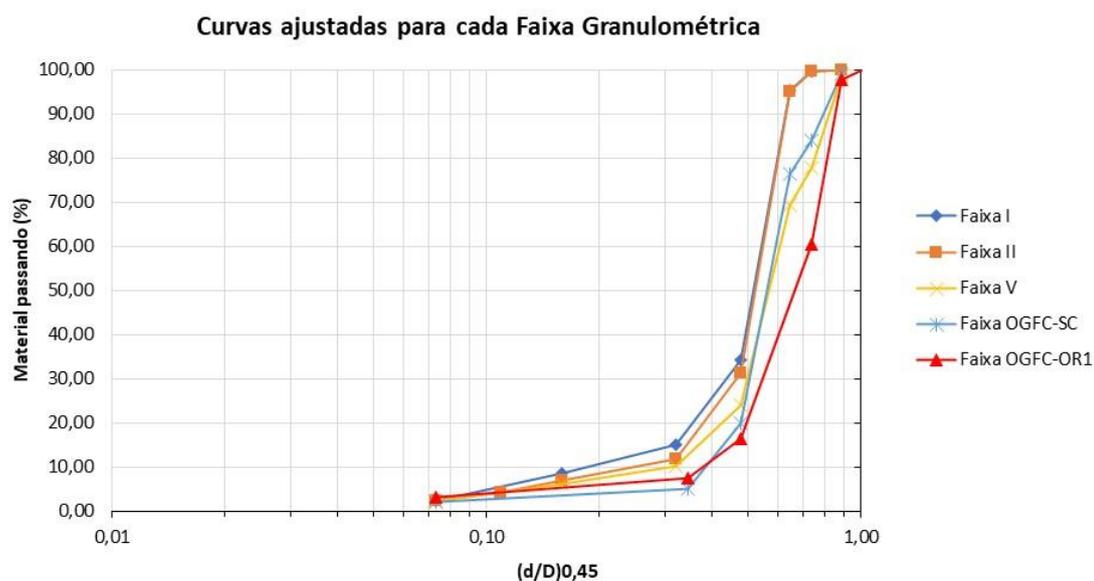
Peneira	Abertura (mm)	Percentagem passando, em peso		
		DNIT		
		Faixa I	Faixa II	Faixa V
3/4"	19,00	-	-	100
1/2"	12,50	100	100	70-100
3/8"	9,50	80-100	70-100	50-80
Nº 4	4,80	20-40	20-40	18-30
Nº 10	2,00	12-20	5-20	10-22
Nº 40	0,42	8-14	6-12	6-13
Nº 80	0,18	-	2-8	-
Nº 200	0,075	3-5	0-4	3-6

**Tabela 6** - Especificações granulométricas OGFC – SCDOT/ORDOT

Peneira	Abertura (mm)	Percentagem passando, em peso	
		OGFC-SC	OGFC-OR-1
		(EUA)	(EUA)
3/4"	19,00	100	85-96
1/2"	12,50	85-100	55-71
3/8"	9,50	55-75	-
Nº 4	4,75	15-25	10-24
Nº 8	2,36	5-10	6-16
Nº 16	1,18	-	-
Nº 30	0,60	-	-
Nº 200	0,075	2-4	1-6

A Figura 23 apresenta as curvas ajustadas para cada faixa granulométrica. Percebe-se uma graduação relativamente semelhante em todas as curvas, como era esperado, pois, em geral, as misturas de agregados da mistruas asfálticas porosas são mal graduadas e mais aberta (poucos finos) quando comparadas às misturas convencionais que possuem curvas bem graduadas. As proporções de agregados que deram origem a cada curva granulométrica estão apresentadas na Tabela 7.

**Figura 23** - Curvas ajustadas para cada faixa granulométrica - ESCALA LOGARÍTMICA  
Fonte Autor



**Tabela 7** - Proporção de agregados por curva granulométrica

Agregado	Faixa I	Faixa II	Faixa V	OGFC-SC	OGFC-OR-1
Brita 19 mm	0%	0%	28%	20%	50%
Brita 12,5 mm	82%	86%	60%	75%	42%
Pó de Pedra	16%	12%	10%	3%	5%
Cal (fíler)	2%	2%	2%	2%	3%

De acordo com a Tabela 7, percebe-se que a brita 12,5 mm foi o agregado com maior concentração na composição das misturas de todas as curvas granulométricas. A brita 19 mm esteve presente apenas em três misturas de agregados, das curvas granulométricas da Faixa V, Faixa OGFC-SC e Faixa OGFC-OR-1. O maior percentual de material fino, como o pó-de-pedra, foi de 16%, presente na mistura de agregados da Faixa I, que é relativamente baixo quando comparado aos dos agregados graúdos. Pode-se observar que as misturas de agregados das granulometrias nacionais possuem percentual de finos significativamente maior do que as misturas de agregados das granulometrias internacionais. Quanto ao percentual de cal hidratada (fíler), todas as misturas obtiveram proporções praticamente iguais.

Definidas as proporções de agregados para cada faixa granulométrica, o próximo passo foi definir o número de projetos de misturas CPA com base em cada faixa de granulometria e em diferentes teores de ligante.

### **3.4.1.2. TEORES DE LIGANTE INICIAIS**

Segundo a Norma DNIT 386/99, a faixa de teores de ligante aceitável está entre 4 e 6% em peso. Estimou-se um teor inicial de 4,5% e os demais teores foram obtidos variando as percentagens de  $\pm 0,5\%$  e  $\pm 1,0\%$ , portanto, testaram-se os teores de 3,5%, 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5%. Essas mesmas proporções de teores iniciais de ligante foram trabalhadas por Alves (2019) e Dresch (2016).

### **3.4.1.3. TEMPERATURAS DE MISTURA E DE COMPACTAÇÃO**

De acordo com a norma ASTM D7064/D7064M-21, para as misturas que utilizam ligantes modificados por polímero ou asfalto borracha, as temperaturas de mistura e de compactação a serem seguidas são aquelas sugeridas pelo fornecedor do ligante. Deste modo, em contato com o fornecedor do ligante AMP 55/75, as temperaturas de mistura e de compactação recomendadas nos projetos das misturas asfálticas porosas foram de 177° C e entre 145° e 150° C, respectivamente. Quanto aos agregados, procurou-se manter, no mínimo, uma temperatura de 10° C superior à temperatura do ligante.

### **3.4.1.4. MÉTODO DE COMPACTAÇÃO**

A norma ASTM D7064/D7064M-21, que regulamenta os procedimentos para projetos de misturas abertas nos EUA, sugere a utilização do uso do Compactador Giratório Superpave (CGS) com 50 giros, pressão vertical de 600 kPa, ângulo de giro de  $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$  e velocidade de giro de 30 rpm. Contudo, Corpos de Prova (CP<sub>s</sub>) compactados com percentual de 4,5% de ligante, na granulometria da Faixa I, não atenderam às exigências da Norma DNIT ES-386/99 quanto à resistência mínima à tração e à perda de massa cântabro. Portanto, seguiu-se o mesmo procedimento proposto por Sousa (2024), ou seja, utilizar 100 giros no CGS para compactar os corpos de prova, contudo, monitorando o atendimento aos parâmetros volumétricos exigidos para as misturas CPA.

A definição do número de giros para a compactação dos corpos de prova foi analisada por Sousa (2024) no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande. Para atender aos limites normativos de resistência à tração, a autora avaliou diferentes cenários, como a substituição do

ligante AMP 55/75 para o AMP 60/85, a mudança de faixa granulométrica (da Faixa V para a Faixa II) e a adição de novo agregado (brita 9,5mm) na composição da mistura. Para cada cenário, a autora experimentou o número de 50 e de 100 giros no compactador giratório.

Contudo, segundo a autora, o aumento na resistência à tração não foi tão significativo quando se comparou, para cada cenário, os resultados de resistência à tração correspondentes às compactações com 50 e com 100 giros. Não obstante, Sousa (2024), ao pesquisar outros estudos na literatura, confirmou a mesma dificuldade encontrada para se atingir a resistência mínima à tração por outros autores, como Motta *et al.* (2010) e Alecrim (2021). A decisão da autora, portanto, foi utilizar o número de giros de 100, em virtude da possibilidade de uma maior densificação da mistura e, conseqüentemente, um aumento da resistência.

Na presente pesquisa, também foi utilizado o número de 100 giros para compactação dos corpos de prova, conforme já mencionado.

Pela combinação de cinco teores iniciais de ligante (3,5%, 4,0%, 4,5% 5,0% e 5,5%) e cinco curvas de granulometria (Faixa I, II, V, OGFC-SC e OGFC-OR-1), totalizou-se 25 configurações de mistura para a fase de projeto (dosagem) das misturas. No CGS, foram moldados três corpos de prova por combinação, resultando na compactação de 75 cp<sub>s</sub> nesta etapa. A Figura 24 ilustra alguns dos corpos de prova compactados no CGS.

**Figura 24** - Corpos de prova moldados no CGS  
Fonte: Autor



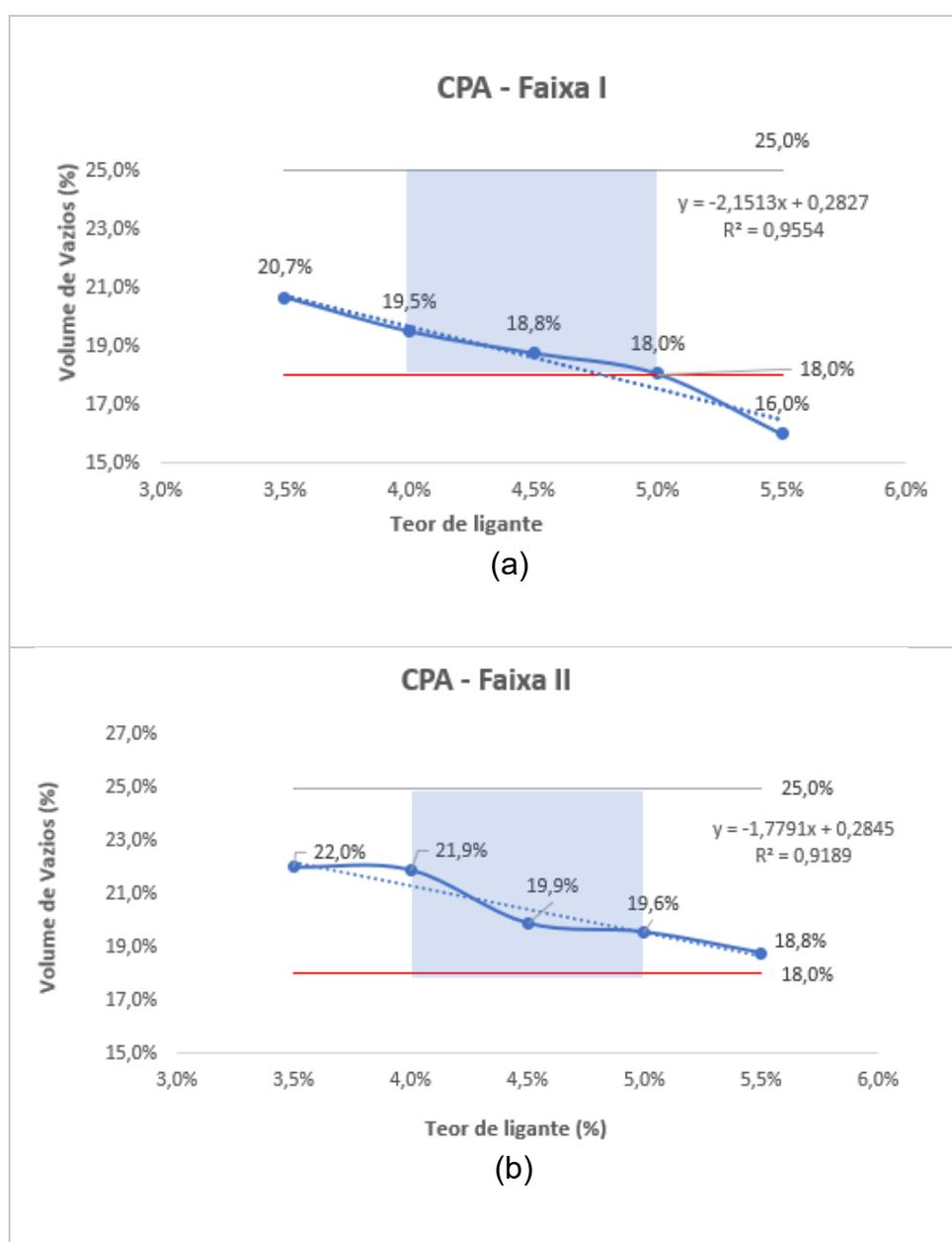
### 3.4.1.5. Parâmetros Volumétricos

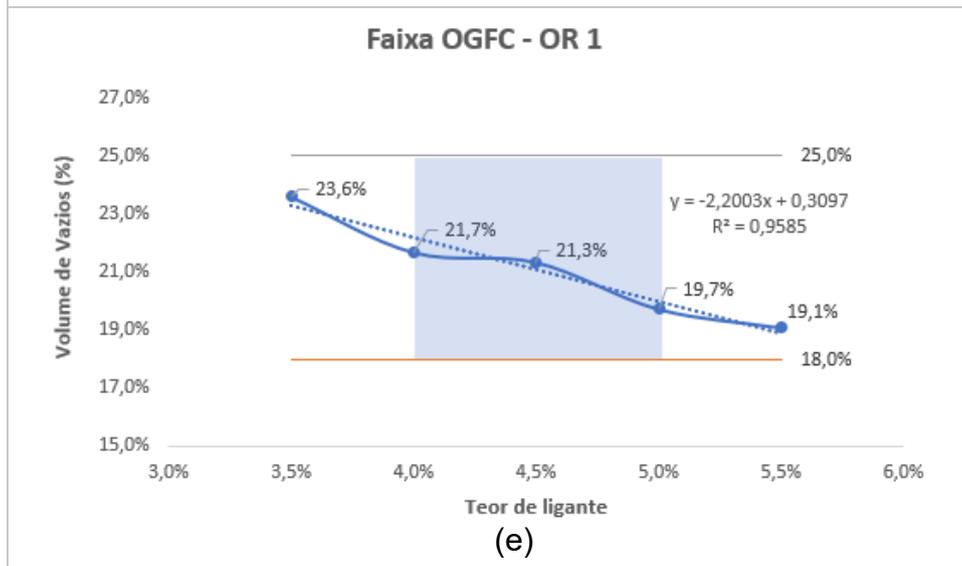
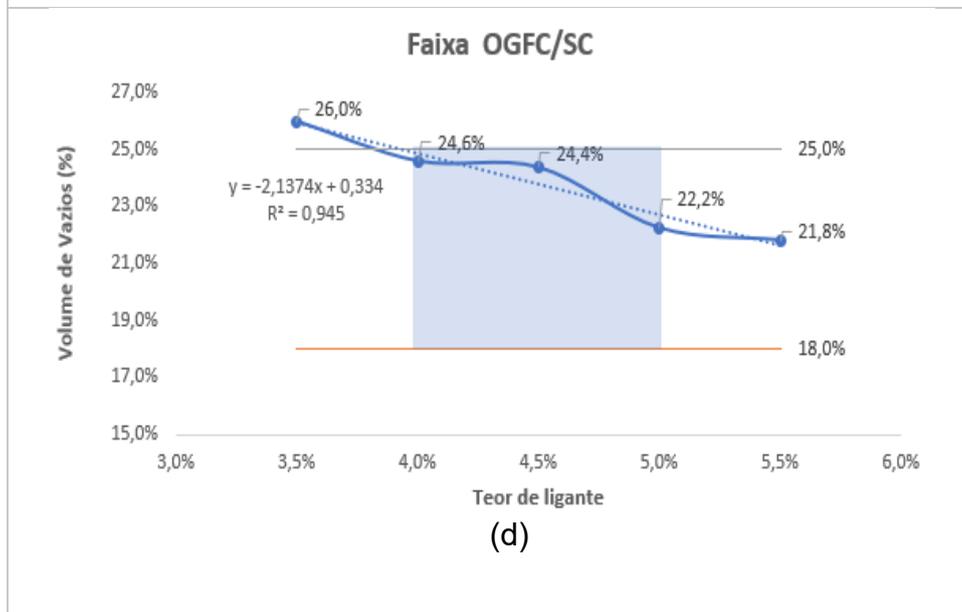
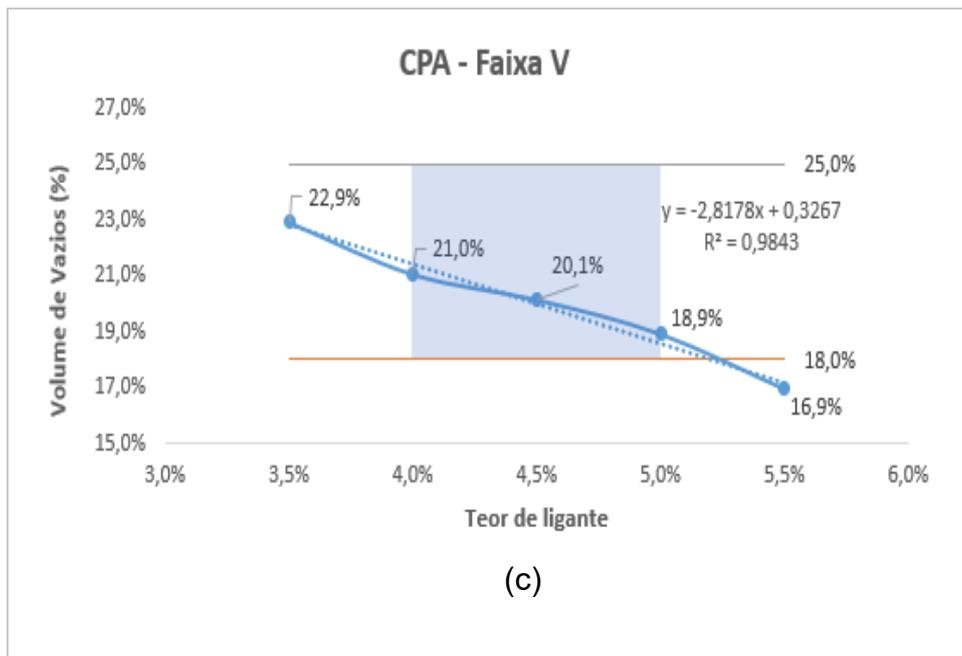
No caso de misturas drenantes (porosas), os parâmetros volumétricos determinantes são o volume de vazios e o volume de vazios comunicantes.

#### 3.4.1.5.1. Volume de Vazios

A Figura 25 apresenta a relação entre volume de vazios e teor de ligante para cada mistura CPA.

**Figura 25** - Volume de Vazios x Teor de Ligante (a), (b), (c), (d), (e)  
Fonte: Autor





Diante dos resultados das curvas volume de vazios versus teor de ligante, observa-se que, para algumas combinações de faixa e teores de ligante, não foram atendidos os limites de volume de vazios (18-25%) estabelecidos na Norma DNIT 386/99/ASTM 7064/7064M-21. Deste modo, o critério adotado para determinar os teores de ligante para projetar as demais misturas CPA que foram, posteriormente, submetidas aos ensaios mecânicos e funcionais, foi a escolha de teores de ligante que atendessem aos valores mínimos e máximos de vazios das normas supramencionadas. Portanto, os teores de ligante selecionados foram 4,0%, 4,5% e 5,0%. Ao combiná-los com as cinco faixas granulométricas, formam-se 15 combinações distintas para projetos de misturas CPA.

Nessa pesquisa não houve a intenção de fazer uma dosagem convencional de misturas asfálticas de graduação aberta conforme prescreve a norma ASTM 7064/7064M-21, onde o objetivo seria encontrar um teor ótimo de ligante a partir de uma granulometria pré-definida e de critérios estabelecidos de volume de vazios, perda de massa e escorrimento de ligante. Para o caso particular da presente pesquisa, de modo a alcançar o seu objetivo maior, selecionou-se mais de um teor de ligante e diferentes curvas granulométricas. Para isto foram concebidos diferentes projetos de misturas porosas, que foram candidatas para a seleção multiobjetivo realizada pelo método de otimização a ser proposto. Neste caso, o teor ótimo foi aquele que maximizou as funções-objetivo dos problemas de otimização concebidos. No caso de problemas multiobjetivos, mais de um teor de ligante pode ser considerado ótimo, visto não há uma solução única para este tipo de problema.

#### **3.4.1.5.2. Volume de Vazios Comunicantes**

A percentagem de volume de vazios comunicantes foi obtida de acordo com a especificação francesa, regulamentada pela Norma AFNOR NF-P98-254-2 (1993). Neste ensaio foi medida a quantidade de água que penetrou no interior de um corpo de prova pela sua face superior. As faces, lateral e a inferior, foram impermeabilizadas por fita adesiva e parafina. A água foi introduzida aos poucos, até quando se observou uma película de água constante na face superior do corpo de prova durante um intervalo de 10 minutos. A Figura 26 ilustra corpos de prova submetidos ao ensaio.

**Figura 26** - Corpos de prova submetidos ao ensaio de vazios comunicantes

Fonte: O Autor



A porcentagem de vazios comunicantes foi obtida por meio da Equação 21:

$$V_c = \frac{P_{ab}}{A_f \times h_{red}} \times 100 \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

$V_c$  : Porcentagem de vazios comunicantes;

$P_{ab}$  = Peso de água absorvida (g);

$A_f$  = área da face do corpo de prova (cm<sup>2</sup>);

$H_{red}$  = altura reduzida (cm);

A altura reduzida foi calculada a partir da Equação 22.

$$H_{red} = h_m - \left( \frac{D_{m\acute{a}x}}{20} \right) \quad \text{Equação 22}$$

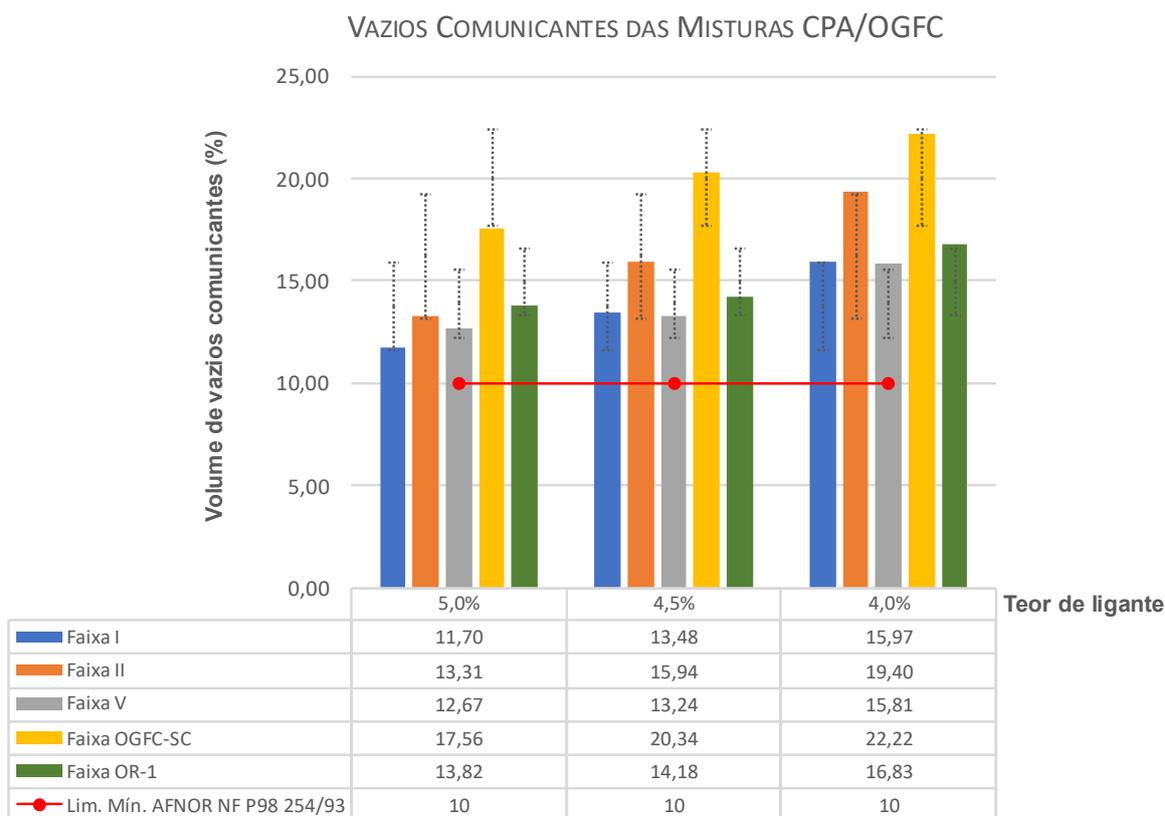
Onde:

$h_m$  = altura média do corpo de prova (cm);

$D_{m\acute{a}x}$ : Diâmetro máximo do agregado;

Os resultados dos volumes de vazios comunicantes estão apresentados na Figura 27.

**Figura 27 - Vazios Comunicantes das misturas CPA/OGFC**  
 Fonte: O Autor



Conforme apresentado na Figura 27, todas as misturas CPA concebidas atendem ao limite mínimo de percentual de vazios comunicantes estabelecido pela norma AFNOR NF P 98 254-2/1993, que é de 10%. Na Figura 27, percebe-se um comportamento padrão: as misturas com menores teores de ligante e de granulometrias com menor percentual de finos possuem maior percentual de vazios comunicantes, como era esperado. Esse mesmo padrão é observado nos trabalhos de Hammes (2022) e Alves (2019).

### 3.4.2. PROGRAMA DE ENSAIOS MECÂNICOS

O critério funcional é o mais relevante quando se trata de projetos de misturas asfálticas porosas. Entretanto, normativos técnicos, como a Norma DNIT ES 386/1999, determinam que essas misturas respeitem certos limites de alguns atributos mecânicos. Dentre eles citam-se a resistência à tração, o dano por umidade induzida e a perda de massa. Quanto melhores as propriedades mecânicas e funcionais, mais apta a mistura estará para ser selecionada durante o processo de otimização perante

às demais alternativas de soluções que possuem menor grau de dominância. Os ensaios mecânicos executados para cada projeto de mistura asfáltica porosa e as respectivas normas que os regulamentam estão apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5** – Propriedades mecânicas e normas correspondentes

Ensaio	Método
Resistência à Tração	DNIT 136 ME, 2018
Módulo de Resiliência	DNIT 135 ME, 2018 e ABNT NBR 16018, 2011
Deformação Permanente	DNIT 184 ME, 2018
Dano por umidade induzida	DNIT 180 ME, 2018
Perda de massa Cântabro	DNIT ME 383, 1999

### 3.4.2.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A determinação da RT seguiu a Norma DNIT 136/2018-ME. Os corpos de prova utilizados para a determinação da RT possuíam as mesmas dimensões utilizadas para o ensaio de MR. As amostras foram condicionadas por um período mínimo de quatro horas, a uma temperatura de 25°C, antes da realização do ensaio. O ensaio consistiu na aplicação de uma carga vertical de compressão, progressivamente, com uma velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s, até que ocorreu a ruptura completa, por separação das duas partes do corpo de prova, segundo o plano diametral vertical. Com o valor da carga de ruptura, calculou-se a resistência à tração indireta do corpo de prova rompido por compressão diametral utilizando a Equação 23.

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi.D.H} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:  $\sigma_R$  é a resistência à tração, à temperatura do ensaio, em MPa;

$F$  é a carga de ruptura, em N;

$D$  é o diâmetro do corpo de prova;

$H$  é a altura do corpo de prova, em mm;

Para misturas asfálticas porosas a Norma DNIT-ES 386/99 estabelece o valor mínimo de resistência à tração de 0,55 MPa.

### 3.4.2.2. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O ensaio de MR seguiu o estabelecido nas normas do DNIT 135/2018-ME e NBR 16018/2011. O objetivo do ensaio foi determinar a capacidade que um corpo elástico tem de armazenar energia quando solicitado por um carregamento após retornar ao seu estado inicial. O equipamento utilizado foi o Universal Testing Machine – UTM 25, do Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande.

Todos os corpos de provas apresentaram diâmetro de 101,6 mm ± 3,8 mm e altura entre 35 mm e 70 mm e foram submetidos ao carregamento na frequência de 1 Hz, a uma temperatura de 25°C e considerando um coeficiente de Poisson de 0,30.

A aplicação de carregamento dinâmico no plano diametral vertical das amostras cilíndricas equivale a um tempo de carregamento de 0,1 s e 0,9 s de repouso. A leitura de deformação é realizada por meio dos LVDTs (Linear Variable Differential Transformers) nas duas faces do corpo de prova. Esta frequência utilizada refere-se apenas ao pulso de carga, sendo que a frequência entre carregamentos é sempre 1 Hz, ou seja, entre ciclos de carga e descarga é sempre 1 Hz. Esta carga aplicada gera uma tensão na qual se pode medir o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão (DRESCH, 2016).

Segundo a Norma DNIT 135/2018-ME, o MR é obtido pela Equação 24.

$$MR = \frac{P}{|\Delta H|t} (0,2692 + 0,9976\mu) \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

MR é o Módulo de Resiliência expresso em MPa;

P é a carga cíclica, expressa em N;

$\Delta H$  é o deslocamento horizontal (elástico ou resiliente);

t é a espessura (altura) do corpo de prova, expressa em mm;

$\mu$  é o coeficiente de Poisson.

### 3.4.2.3. DANO POR UMIDADE INDUZIDA

O ensaio foi executado de acordo com a Norma DNIT 180/2018-ME, porém, com algumas modificações prevista na ASTM 7064/7064M-2021. Segundo a norma, o dano por umidade induzida é uma medida indireta da adesividade e coesão do par agregado-ligante asfáltico, por ação da água, e do seu efeito na resistência à tração indireta da mistura asfáltica por comparação entre duas condições de preparação e condicionamento de dois conjuntos de corpos de prova.

Para as misturas densas, a Norma DNIT 180/2018-ME exige que os corpos de prova tenham um percentagem de vazios em torno de 7%. Contudo, no caso das misturas asfálticas porosas, onde a percentagem mínima de vazios é de 18%, algumas modificações são recomendadas pela norma ASTM 7064/7064M-21 para compensar essa diferença de vazios:

- A aplicação de um vácuo de 87,8 KPa durante 10 minutos, para saturar as amostras compactadas independentemente do nível de saturação obtido;
- Submergir as amostras em água durante os ciclos de congelamento para manter a saturação;

As demais etapas do condicionamento seguiram o previsto na Norma DNIT 180/2018-ME para as misturas densas, ou seja, após o congelamento a  $-18^{\circ}\text{C}$  por um período de 16h, as amostras foram levadas a um banho a  $60^{\circ}\text{C}$  por um período de 24 h. Após esse tempo, as amostras foram imediatamente submersas em água à temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  durante um período de 2 a 3h, quando foi finalizado o condicionamento do primeiro conjunto de corpos de prova. O condicionamento é um procedimento térmico e de saturação para simular o efeito da umidade e é realizado em um dos dois conjuntos de corpos de prova. A Figura 28 ilustra parte do condicionamento do conjunto de corpos de prova.

Após o condicionamento, foi determinada a resistência à tração por compressão diametral, de acordo com a norma DNIT-ME 136/2018. Da mesma forma, para o segundo conjunto de corpos de prova (sem condicionamento), mediu-se resistência à tração por compressão diametral seguindo a mesma norma.

**Figura 28** - Condicionamento dos corpos de prova - Saturação e congelamento  
Fonte: Autor



Nesta pesquisa, seguiu-se o que a Norma DNIT 180/2018-ME e a NBR 15617/2015 preveem para as misturas convencionais, ou seja, um ciclo de condicionamento para o primeiro conjunto de corpos de prova. O dano por umidade induzida é definido como a razão entre a resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova condicionados ( $RT_c$ ) e não condicionados ( $RT$ ), denominada relação de resistência à tração retida (RRT) definida pela Equação 11.

$$RRT = \frac{RT_c}{RT} \times 100 \quad \text{Equação 11}$$

A relação mínima admissível para RRT é de 70%, segundo a NBR 15617/2015 e de 80% para a ASTM 7064/7064M-21.

#### **3.4.2.4. PERDA DE MASSA CÂNTABRO**

Segundo Dresch (2016) a metodologia Cântabro tem sido utilizado diretamente no projeto de misturas asfálticas porosas, definindo o teor mínimo de asfalto necessário, a fim de garantir uma perda aceitável por desgaste. Para misturas asfálticas porosas, segundo a Norma DNIT – ES 386/99, o desgaste máximo admitido é de 25% e o desgaste para cada teor de ligante deve ser realizado a partir de média aritmética de três corpos de prova.

O ensaio consistiu em submeter as amostras condicionadas de cada uma das misturas CPA à máquina de abrasão Los Angeles, sem as esferas metálicas a 300 revoluções. Antes do ensaio, todas as amostras foram condicionadas a 25°C num período de 12h. A perda de massa é calculada pela razão percentual entre a diferença de peso (antes e depois do ensaio) e o peso da amostra antes do ensaio, conforme a equação 11.

$$A = \left( \frac{P - P_f}{P} \right) \times 100$$

Equação 25

### 3.4.3. PROGRAMA DE ENSAIOS FUNCIONAIS

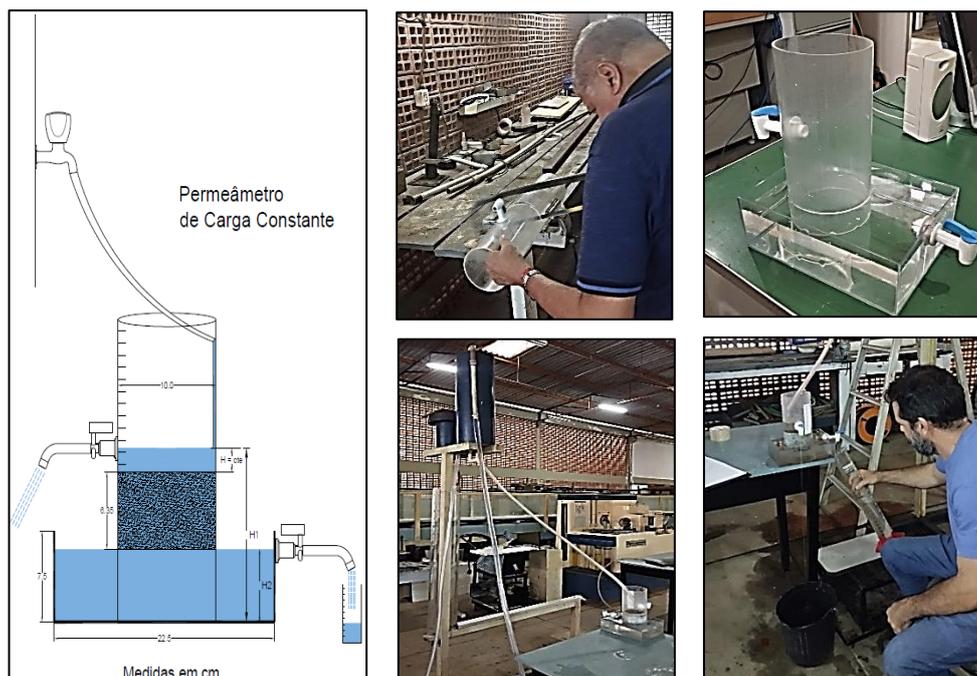
#### 3.4.3.1. PERMEABILIDADE

O procedimento clássico para a determinação da permeabilidade em solos são os ensaios de permeabilidade à carga constante e à carga variável com o uso de permeômetros. Para solos granulares, o procedimento recomendável é o ensaio de permeabilidade à carga constante sob baixíssima carga, regulamentado pela Norma ABNT NBR 13292/2021. As camadas porosas de atrito são misturas asfálticas com elevado volume de vazios, portanto seu comportamento drenante se assemelha ao dos solos granulares, e devido a isto foi utilizada a metodologia de ensaio à carga constante.

Zhang *et al.* (2020) e Wu, *et al.* (2020) ratificam este procedimento, afirmando que um dos métodos mais utilizados para determinar a permeabilidade em misturas de graduação aberta (OGFC/CPA) é a utilização de permeômetros à carga constante. Portanto, um permeômetro de carga constante foi montado e adaptado para os corpos de provas típicos utilizados nos ensaios mecânicos, com diâmetro de 100 mm (Figura 29). Os procedimentos do ensaio foram os previstos na NBR 13292/2021.

**Figura 29 - Permeâmetro de carga constante**

Fonte: (Autor)



Para garantir a ocorrência de fluxo laminar, de forma a utilizar a Equação de Darcy (Equação 1, pág.59), a norma supramencionada recomenda a imposição de gradientes hidráulicos iniciais ( $i$ , cm/cm) muito baixos, entre 0,2 e 0,3 para materiais fofos e 0,3 a 0,5 para materiais compactos. Contudo, devido ao pequeno comprimento de drenagem ( $L = H_{cp}$ ) em relação à diferença de carga ( $\Delta H = h_1 - h_2$ ), os gradientes iniciais ficaram próximos de 1,0, porém, o que foi determinante para garantir o fluxo laminar foram as baixas cargas hidráulicas ( $H$ ) utilizadas, conforme recomenda a NBR 13292/2021.

O ensaio consistiu em deixar as válvulas do permeâmetro abertas e aguardar que as cargas se estabilizassem. Nesta condição, anotou-se a carga  $H$  (diferenças entre o nível  $h_1$  e  $h_2$ ), a temperatura ( $T$ ), o tempo ( $t$ ) e o volume percolado ( $v_p$ ) pela seção transversal do corpo de prova ( $A_{cp}$ ) nesse tempo. Finalmente, calculou-se a velocidade ( $v$ ) pela equação 12, corrigindo-a, em seguida, pela multiplicação do seu valor pela relação entre a viscosidade da água à temperatura do ensaio e a temperatura de referência, 20° C, ( $\mu_T/\mu_{20}$ ). A relação entre as viscosidades da água à diversas temperaturas é fornecida pela norma.

$$v = \frac{V_p}{A_{cp} \cdot t}$$

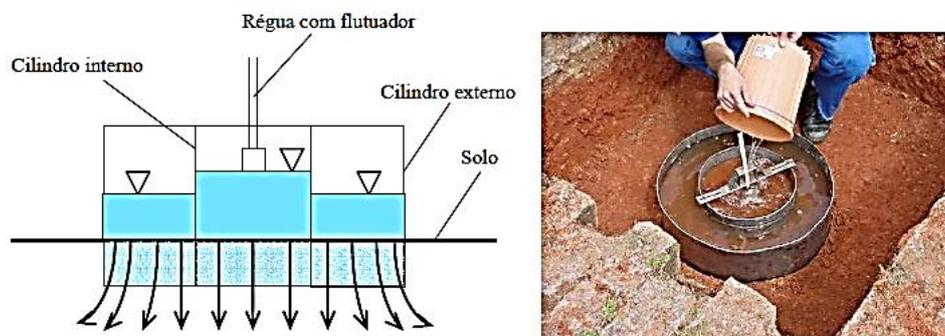
Equação 26

Para estabelecer adequadamente a região de fluxo laminar, a norma recomenda aumentar a carga hidráulica de 0,5 cm em 0,5 cm e repetir o procedimento do ensaio, calculando as velocidades e gradientes hidráulicos correspondentes. Com os todos os pontos de velocidades e gradientes hidráulicos disponíveis, traçou-se a reta originada pelas coordenadas cartesianas ( $v \times i$ ). Finalmente, calculou-se o coeficiente angular da reta que corresponde ao coeficiente de permeabilidade ( $K_{20^{\circ}C}$ )

### 3.4.3.2. CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO

O método tradicional para determinar a capacidade de infiltração em solos é um ensaio in situ denominado Método dos Anéis Concêntricos. A norma que regulamenta o ensaio é a norma ASTM D3385, 2003 - Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer. O ensaio consiste em dois cilindros (anéis) metálicos de diâmetro entre 30 e 60 cm e com altura próxima a 50 cm aos quais é adicionada água constantemente. A determinação da capacidade de infiltração é obtida por meio de leituras sucessivas da altura de água infiltrada no menor anel em tempos definidos. A Figura 30 apresenta uma ilustração do instrumento.

**Figura 30** - Infiltrômetro de anéis concêntricos para solo.

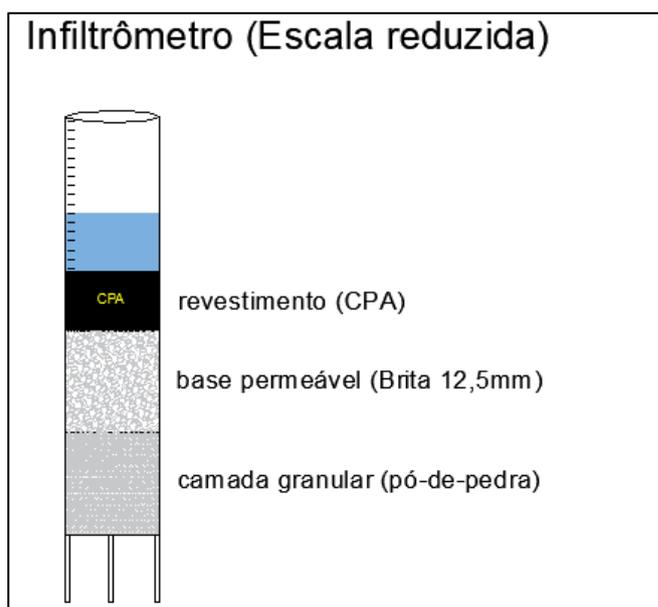


Para que o ensaio seja replicado em pavimentos permeáveis, uma alternativa é dispor de um trecho, segmento ou área experimental construídos com esse tipo de pavimento, como realizado no trabalho de Jabur *et al.* (2015). Nesta pesquisa estudaram-se 15 concepções de projeto de misturas asfálticas porosas e cada uma delas resulta em um tipo de revestimento diferente. Portanto, para realizar o ensaio de infiltração, seriam necessários 15 trechos ou segmentos experimentais construídos com pavimentos permeáveis, onde cada um deles seria revestido com uma das misturas asfálticas porosas projetadas na pesquisa.

Diante da dificuldade e da impossibilidade de construção de trechos experimentais para realização dos ensaios de infiltração, o desafio foi tentar simular o ensaio em laboratório. Portanto, construiu-se um modelo de infiltrômetro em escala reduzida na tentativa de simular o ensaio de infiltração dos anéis concêntricos. As paredes laterais do infiltrômetro, sendo impermeáveis, fizeram o papel do anel interno do infiltrômetro dos anéis concêntricos, garantindo o fluxo apenas na direção vertical através da seção dos corpos de prova, os quais foram devidamente impermeabilizados lateralmente com parafina. Para simular os pavimentos permeáveis, foram modelados protótipos de estruturas compostas por camadas sobrepostas, que permitissem a infiltração da água através de suas camadas, conforme o exemplo ilustrativo apresentado na Figura 3 (pág.37) da revisão bibliográfica. Convenientemente, o revestimento superficial de cada estrutura de camadas foi composto por cada uma das misturas asfálticas projetadas e as camadas inferiores das estruturas foram constituídas de materiais granulares utilizados na pesquisa.

Como houve a pretensão de se avaliar a influência de diferentes granulometrias e teores de ligante de misturas asfálticas porosas nas propriedades funcionais dos pavimentos permeáveis, e sendo uma dessas propriedades a capacidade de infiltração, cada estrutura de camadas foi montada no interior do infiltrômetro modelado em escala reduzida conforme ilustrado na Figura 31.

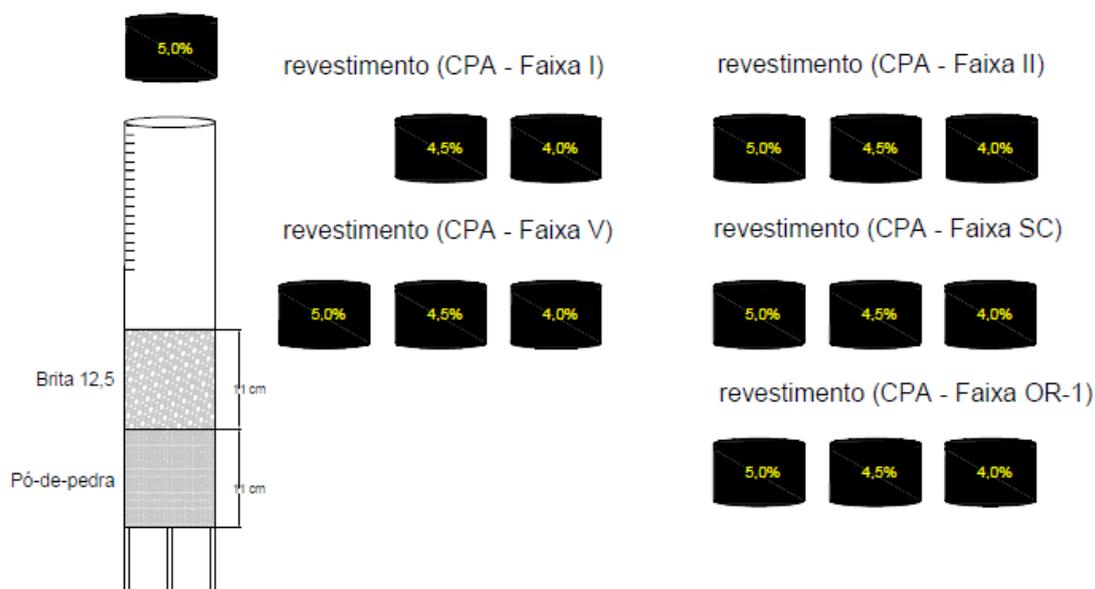
**Figura 31** - Infiltrômetro modelado com uma das estruturas de camadas sobrepostas  
Fonte: Autor



A primeira camada da estrutura, o revestimento poroso, foi constituída por cada uma das misturas disponíveis. Nas camadas inferiores, simularam-se duas camadas geralmente presentes nos pavimentos permeáveis: a camada de base permeável, também conhecida como camada reservatório e a camada subjacente, que simula a sub-base ou até mesmo o subleito de um pavimento. Utilizou-se a brita 12,5 mm e o pó-de-pedra como materiais constituintes das camadas inferiores da estrutura (Figura 31). Para cada estrutura modelada, procurou-se manter as espessuras e compactidade das camadas granulares, portanto, cada estrutura se diferenciava apenas pela sua camada de revestimento asfáltico.

O ensaio de infiltração dos anéis concêntricos foi simulado utilizando o infiltrômetro de escala reduzida para todas as estruturas modeladas. No total, 15 protótipos de estrutura de camadas foram montados, variando apenas a camada de revestimento, conforme ilustração apresentada na Figura 32.

**Figura 32** - Protótipos das estruturas de camadas sobrepostas  
Fonte: Autor



Essa metodologia não se propôs a simular, tampouco prever, os resultados de ensaios de infiltração que se obteriam em pavimentos permeáveis em escala real, contudo, na tentativa de replicar este ensaio, especificamente, foi necessário simular pavimentos permeáveis em escala reduzida para comportar cada corpo de prova de mistura asfáltica porosa como uma camada de revestimento superficial. Portanto, a solução encontrada foi a construção de protótipos de estruturas de camadas sobrepostas conforme apresentados na Figura 32.

Isto posto, procurou-se avaliar a influência de cada revestimento constituído das misturas CPA nas velocidades (taxas) e capacidades de infiltração das estruturas de camadas modeladas. Essa análise foi feita por meio do traçado das curvas características clássicas da infiltração, como a equação potencial de Kostiaikov e a equação de infiltração de Horton, estimando, dentre outros parâmetros, a velocidade de infiltração instantânea, a infiltração acumulada e a capacidade de infiltração final ( $f_c$ ) da equação de Horton.

Dentre os parâmetros supramencionados, a capacidade de infiltração final ( $f_c$ ) foi o parâmetro utilizado para caracterizar a infiltração das estruturas de camadas modeladas e foi uma das funções otimizadas durante a seleção multiobjetivo realizada pelo modelo de otimização proposto.

### 3.4.3.3. TEMPO DE ENCHARCAMENTO

O tempo de encharcamento ( $t_p$ ) depende, principalmente, das características do meio poroso, como a permeabilidade, velocidade e capacidade de infiltração como também da duração e intensidade da chuva. Pôde-se avaliar o impacto (influência) de cada revestimento de mistura asfáltica porosa no tempo de encharcamento das estruturas de camadas sobrepostas que simularam os pavimentos permeáveis, visto que se dispõe das curvas características da infiltração de cada uma delas, principalmente as curvas da equação de Horton, obtidas no ensaio de infiltração.

Para determinar o  $t_p$  analiticamente utilizou-se a Equação 27, que o relaciona com os parâmetros da equação de Horton (Equação 03, pág. 62) e com a intensidade da chuva  $i$  (mm/h):

$$t_p = \frac{1}{i \cdot k} \left[ f_o - i + f_c \cdot \ln \left( \frac{f_o - f_c}{i - f_c} \right) \right] \quad \text{Equação 27}$$

Onde:  $t_p$  é o tempo de encharcamento;

$i$  é a intensidade de chuva, em mm/h;

$k$  é a constante de decaimento da infiltração (1/T);

$f_o$  é a capacidade de infiltração inicial, em mm/h;

$f_c$  é a capacidade de infiltração final (constante), em mm/h.

O tempo de encharcamento, assim como a capacidade de infiltração final ( $f_c$ ), foi uma das funções que se buscou maximizar perante o modelo de otimização multiobjetivo utilizado durante a seleção das misturas asfálticas porosas.

#### **3.4.3.3.1. INTENSIDADE DE CHUVA PARA DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE ENCHARCAMENTO**

Para calcular o tempo de encharcamento pela Equação 27, são necessários os parâmetros da equação de Horton ( $f_o$ ,  $f_c$ ,  $k$ ), os quais foram determinados no ensaio de infiltração, e a simulação de uma chuva de projeto. Para tanto, utilizou-se a equação de chuvas intensas (Curva Intensidade-Duração-Frequência - IDF, Equação 28) da região de Campina Grande, calibrada por Aragão *et al.* (2024).

Para simular uma chuva de curta duração, típicas da região, foi considerada uma duração de 10 minutos. O período de retorno adotado foi de 10 anos, que é o tempo mínimo de chuvas de projeto utilizado no dimensionamento de pavimentos permeáveis previstos na norma ABNT 16416/2015.

$$i \text{ (mm/h)} = \frac{765,95.T^{0,137}}{(t+12,74)^{0,765}} \quad \text{Equação 28}$$

Onde  $T$  é o período de retorno, em anos;

$t$  é a duração da chuva, em minutos;

$i$  é a intensidade de chuva, em mm/h;

#### **3.4.3.3.2. IMPACTO NO TEMPO DE ENCHARCAMENTO DEVIDO À VARIAÇÃO DA DURAÇÃO E INTENSIDADE DE CHUVA**

Outra simulação realizada na pesquisa para responder a um de seus objetivos específicos foi avaliar o impacto de alguns cenários de duração e intensidade de chuvas nos tempos de encharcamento das estruturas de camadas revestidas com as misturas CPA projetadas. Fixado o período de retorno (recorrência) em 10 anos, simulou-se diferentes intensidades de chuva com a Equação 28 variando apenas a duração da chuva nos intervalos de 1 min., 5 min., 10 min., 15min., 30 min. e 60 min. Cada cenário foi identificado da seguinte forma:  $I_{\text{duração}, TR}$ . Por exemplo,  $I_{5,10}$  significa uma chuva com duração de 5 minutos e período de retorno de 10 anos. Portanto, os cenários simulados foram  $I_{1,10}$ ,  $I_{5,10}$ ,  $I_{10,10}$ ,  $I_{15,10}$ ,  $I_{30,10}$  e  $I_{60,10}$ .

### 3.4.3.4. CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE ÁGUA

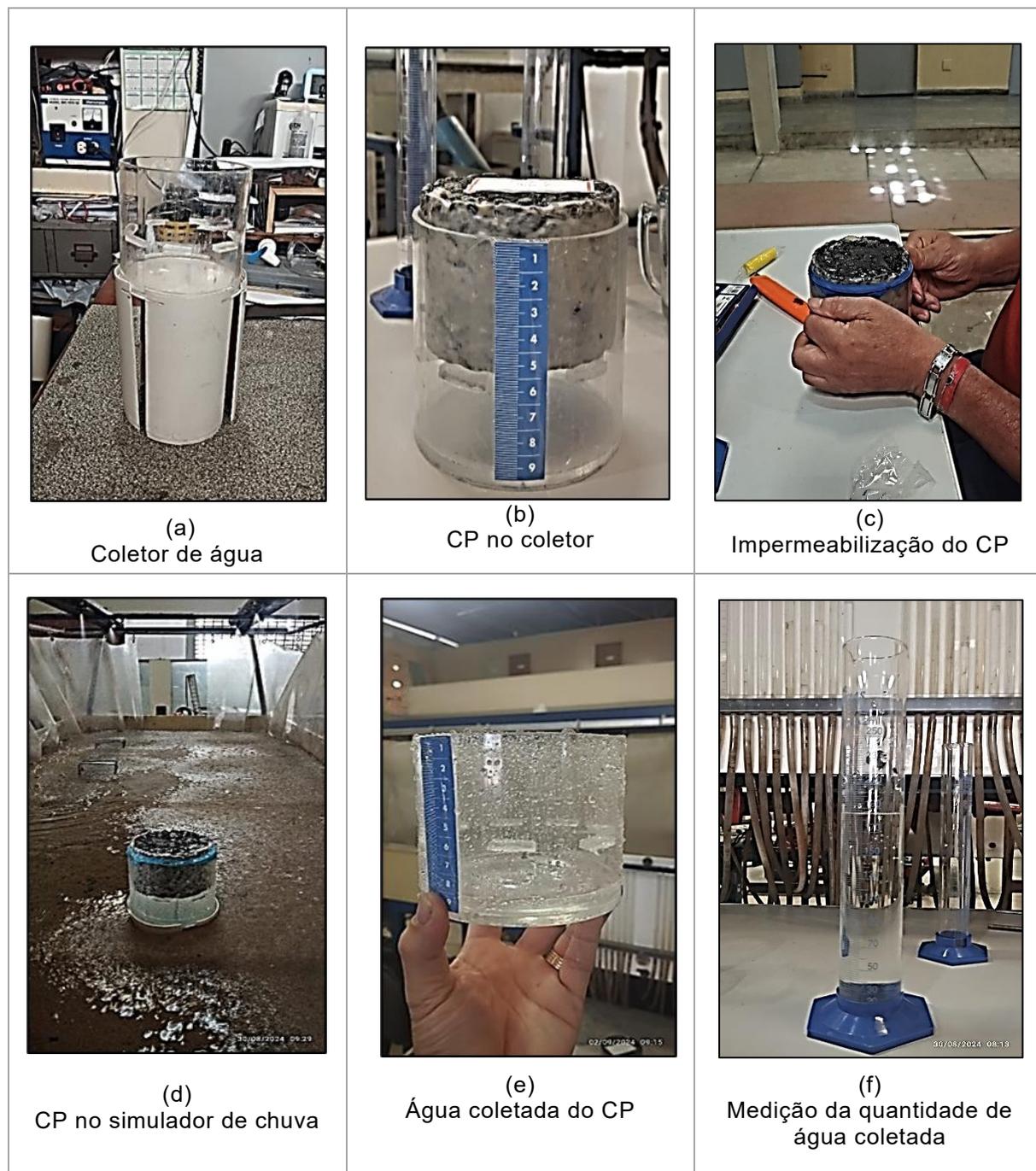
Para determinar a capacidade de retenção de água das misturas porosas, utilizou-se o simulador de chuvas do Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Campina Grande (Figura 33). Para calibrá-lo, foram feitos testes simulando intensidades de chuva constantes durante um período de 15 minutos até que o sistema se estabilizasse. Para cada tentativa foi realizado o seguinte procedimento: a quantidade de água era coletada num recipiente de volume conhecido e medida ao final do processo. O procedimento foi repetido por três vezes para cada intensidade de chuva. Quando se percebeu, nas três repetições, e no intervalo de tempo estabelecido, a mesma quantidade de água coletada no recipiente, o sistema foi considerado estável e a intensidade de chuva, correspondente ao volume coletado, foi calculada.

**Figura 33** – Simulador de Chuva  
Fonte Autor



Após a calibração do simulador, os corpos de prova (CP) de cada mistura foram submetidos à intensidade de chuva estimada. Ao longo do tempo, a taxa de descarga do corpo de prova  $q(t)$  tendeu a se estabilizar, mantendo-se constante. Em média, a taxa de descarga se estabilizava em 30 min. Neste momento, a diferença  $I - q$  representava a quantidade de água retida pelo sistema. A diferença, em peso ou em litros de água, foi a quantidade retida. A percentagem de água retida foi obtida pela relação entre a quantidade de água retida e a quantidade de água total infiltrada. Esta, por sua vez, foi a soma da quantidade de água coletada no recipiente (Figura 34e) com a quantidade retida no corpo de prova.

**Figura 34** - Procedimentos para obtenção da Capacidade de infiltração  
Fonte: Autor



A porcentagem de água retida foi a variável considerada para caracterizar a capacidade de retenção de cada mistura CPA/OGFC e foi uma das funções maximizadas durante o processo de seleção aplicado posteriormente.

### 3.4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Para avaliar a significância estatística dos resultados foi realizada a *Análise de Variância (ANOVA)*, que é um teste paramétrico que permite analisar dados que são afetados por várias condições externas (fatores). Os dados analisados e comparados foram as médias das variáveis dependentes de três ou mais grupos independentes. Contudo, para ser aplicada, a *ANOVA* exige que alguns pressupostos sejam atendidos, como o de normalidade dos dados e o de homogeneidade das variâncias. Para tanto, são utilizados os *Testes de Kolmogorov-Smirnov* ou de *Shapiro-Wilk* e o *Teste de Levene*, respectivamente. Quando não se verifica nenhum dos pressupostos acima, a alternativa é realizar a transformação logarítmica dos dados ou utilizar-se de testes não-paramétricos como o *Teste de Kruskal-Wallis* (AFONSO, A.; NUNES, 2019).

O tipo de *ANOVA* aplicada nesta pesquisa foi a de fator duplo, visto que os dados foram agrupados considerando dois fatores: a faixa granulométrica e o teor de ligante, que são as variáveis independentes. As variáveis dependentes são as propriedades mecânicas e funcionais das misturas concebidas e ensaiadas ao longo na pesquisa. Os pressupostos de normalidade de dados e homogeneidade de variâncias foram verificados pelos testes de Shapiro-Wilk e de Levene, respectivamente.

Os resultados foram considerados significativos para um nível de significância de 5%, ou seja, quando o *valor-p*  $\leq 0,05$ , que é o valor a partir do qual a *Hipótese Nula* ( $H_0$ ) é rejeitada, portanto, quando há diferenças estatisticamente significativas entre as médias das variáveis dependentes dos grupos avaliados.

A *ANOVA* permite detectar se há diferenças estatisticamente significativas entre os grupos mas não especifica quais grupos se diferem entre si. Esta informação é particularmente relevante em problemas de otimização multiobjetivo que avaliam soluções por meio do conceito de dominância. Geralmente, modelos de otimização determinísticos não consideram uma tolerância estatística na escolha de uma solução em detrimento de outra, por mais insignificante que seja a diferença entre elas, apenas avaliam a condição se  $x_i$  domina  $x_j$ . Ao considerar a significância estatística, soluções, a princípio dominadas, podem, eventualmente, não o serem quando se leva em conta valores estatisticamente significativos. Portanto, é importante conhecer quais grupos de variáveis independentes são diferentes estatisticamente entre si. Para tanto, um

teste *post-hoc* de comparação múltipla se faz necessário. Dentre eles, o *Teste de Tukey* é o mais indicado quando os grupos possuem mesma dimensão no número de amostras (AFONSO, A.; NUNES, 2019).

O Teste de Tukey utiliza a métrica *HDS (Honestly Significant Difference)*. É geralmente utilizada para comparar médias dos grupos, identificar diferenças significativas entre os grupos e controlar erros do Tipo I (falsos positivos). Quando o *valor-p* do teste é menor do que 5%, rejeita-se a hipótese nula. Neste caso, a *HDS* é positiva, indicando diferença significativa entre os grupos avaliados. Em contrapartida, quando o *valor-p* é maior do que 5%, aceita-se a hipótese nula e, portanto, a *HDS* é negativa, indicando que não há diferença significativa entre os grupos (AFONSO, A.; NUNES, 2019). O Teste de Tukey foi utilizado nesta pesquisa quando se constatavam, pela *ANOVA*, diferenças estatisticamente significativas entre as médias das propriedades mecânicas e funcionais dos grupos de misturas CPA avaliados. Para a análise estatística utilizou-se o software IBM SPSS Statistics 20.

### **3.4.5. MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO**

A otimização foi classificada como multiobjetivo pois, de uma forma geral, houve mais de uma função-objetivo em cada cenário de otimização proposto. As propriedades mecânicas das misturas asfálticas porosas foram as funções otimizadas assim como as propriedades funcionais das misturas e das estruturas de camadas sobrepostas concebidas. As variáveis de decisão foram os teores de ligante e a distribuição e tamanho das partículas dos agregados da mistura, representado pela faixa granulométrica.

#### **3.4.5.1. VARIÁVEIS DE DECISÃO**

A ideia inicial da pesquisa era trabalhar com um número razoável de variáveis de decisão (teores de ligante e faixa granulométrica) e correlacioná-las com as variáveis dependentes (propriedades mecânicas e funcionais) de forma a ajustar funções do tipo  $f_k(x_j)$ . Caso as funções demonstrassem que suas soluções ótimas ( $x_j$ ) seriam soluções diferentes dos valores amostrais (experimentais), um algoritmo de otimização seria utilizado para encontrá-las, dentro do espaço de decisão.

Entretanto, resultados experimentais das propriedades mecânicas e funcionais

das misturas com os três teores de ligantes (4,0%, 4,5% e 5,0%) demonstravam que as funções teriam comportamento crescente ou decrescente e a solução ótima de cada função, invariavelmente, recairia em valores extremos experimentais, portanto, não seria necessário utilizar qualquer método de otimização para encontrar a solução ótima de um determinado problema. Deste modo, um ordenamento utilizando o conceito de dominância para todas as combinações de teores de ligante e faixas granulométricas experimentais, dentro do espaço de decisão disponível, foi suficiente para selecionar as combinações que otimizaram os objetivos desejados.

Cada solução do *Espaço de Decisão S* é uma mistura asfáltica porosa e cada uma delas é representada por um vetor ( $x_j$ ) que contém uma combinação de faixa granulométrica ( $\rho_{\#}$ ) e de teor de ligante utilizados para projetar uma mistura asfáltica correspondente. Como foram concebidas 15 misturas durante a pesquisa, cada uma delas representou uma solução ( $x_j$ ) do *Espaço de Decisão S* candidatas a soluções ótimas, conforme identificadas no Quadro 2.

$$S = \{x_j = [\rho_{\#}, t_{\text{teor de ligante}}]^T / x_j \in R^2\} \quad \text{Equação 29}$$

**Quadro 2** - Identificação das Soluções do Espaço de Decisão *S*

<i>j</i>	Solução ( $x_j$ )	ID Solução ( $x_j$ )
1	$x_1(\rho_{\#}, t_{\text{teor ligante}})$	$x_1$ (Faixa I, 5,0%)
2	$x_2(\rho_{\#}, t_{\text{teor ligante}})$	$x_2$ (Faixa I, 4,5%)
3	$x_3(\rho_{\#}, t_{\text{teor ligante}})$	$x_3$ (Faixa I, 4,0%)
4	$x_4(\rho_{\#}, t_{\text{teor ligante}})$	$x_4$ (Faixa II, 5,0%)
5	$x_5(\rho_{\#}, t_{\text{teor ligante}})$	$x_5$ (Faixa II, 4,5%)
6	$x_6(\rho_{\#}, t_{\text{teor ligante}})$	$x_6$ (Faixa II, 4,0%)
7	$x_7(\rho_{\#}, t_{\text{teor ligante}})$	$x_7$ (Faixa V, 5,0%)
8	$x_8(\rho_{\#}, t_{\text{teor ligante}})$	$x_8$ (Faixa V, 4,5%)
9	$x_9(\rho_{\#}, t_{\text{teor ligante}})$	$x_9$ (Faixa V, 4,0%)
10	$x_{10}(\rho_{\#}, t_{\text{teor ligante}})$	$x_{10}$ (Faixa SC, 5,0%)
11	$x_{11}(\rho_{\#}, t_{\text{teor ligante}})$	$x_{11}$ (Faixa SC, 4,5%)
12	$x_{12}(\rho_{\#}, t_{\text{teor ligante}})$	$x_{12}$ (Faixa SC, 4,0%)
13	$x_{13}(\rho_{\#}, t_{\text{teor ligante}})$	$x_{13}$ (Faixa OR-1, 5,0%)
14	$x_{14}(\rho_{\#}, t_{\text{teor ligante}})$	$x_{14}$ (Faixa OR-1, 4,5%)
15	$x_{15}(\rho_{\#}, t_{\text{teor ligante}})$	$x_{15}$ (Faixa OR-1, 4,0%)

O teor de ligante é classificado como a variável quantitativa e a faixa granulométrica como a variável qualitativa. A variável qualitativa, por sua vez, é

classificada como uma variável ordinal pois seus resultados são alocados em categorias, no caso, as faixas granulométricas (Faixa I, Faixa III, Faixa V, OGFC-SC e OGFC-OR-1).

### 3.4.5.2. PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO

Na tentativa de abordar diferentes situações possíveis para otimizar propriedades mecânicas e funcionais dos pavimentos permeáveis, alguns cenários foram criados para simular problemas de otimização multiobjetivo distintos no sentido de encontrar as respectivas soluções não-dominadas dentro do *Espaço de Decisão S* disponível.

#### 3.4.5.2.1. CENÁRIO 1 – OBJETIVOS MECÂNICOS E FUNCIONAIS

Neste cenário, cada função otimizada correspondeu a um atributo mecânico e funcional da mistura asfáltica porosa. Essas funções foram as funções-objetivo do problema de otimização, representadas por  $f_k(x_j)$ . O vetor dos objetivos  $f = [f_1(x_j) \dots f_k] ^T$  formou o *Espaço dos Objetivos  $\Omega$* , conforme representado pela Equação 30.

$$\Omega = \{f = [f_1(x_j), f_2(x_j), f_3(x_j) \dots f_8(x_j)] ^T / f_k \in R^8\} \quad \text{Equação 30}$$

Para cada mistura/estrutura concebida foram determinados 8 atributos, sendo 4 atributos mecânicos e 4 atributos funcionais, portanto, este cenário avaliou as soluções ( $x_j$ ) do *Espaço de Decisão S* que dominaram as demais soluções em todos esses atributos, simultaneamente. Cada função  $f_k$  para este cenário está identificada na coluna (c) do Quadro 3.

Quando se trata de problemas de otimização com múltiplos objetivos, é comum que haja objetivos conflitantes entre si e as soluções do problema podem envolver a maximização e minimização de funções simultaneamente. De uma forma geral, os algoritmos de otimização são desenvolvidos para resolver problemas de minimização de funções. De acordo com as colunas (a), (b) e (c) do Quadro 3, a única função que se deseja minimizar nos pavimentos permeáveis é a  $f_3(x_j)$ , que corresponde à Perda de Massa. As demais são funções que sempre se deseja maximizar.

Convencionalmente, para transformar todo o problema em um problema de minimização, basta, para aquelas funções que se deseja maximizar, minimizá-las com o sinal negativo. Ou seja, as funções-objetivo para o modelo de otimização, neste caso, seriam do tipo *minimizar*  $-f_k(x_j)$ , conforme demonstram as colunas (d) e (e) do Quadro 3.

**Quadro 3** – Identificação das funções e funções-objetivo do Cenário 1

PAVIMENTO PERMEÁVEL		ID Função $f_k$ (c)	MODELO DE OTIMIZAÇÃO	
Objetivo (a)	Função $f_k(x_j)$ (b)		Função-Objetivo (d)	Função $f_k(x_j)$ (e)
<i>Maximizar</i>	$f_1(x_j)$	Módulo de Resiliência	<i>Minimizar</i>	$-f_1(x_j)$
<i>Maximizar</i>	$f_2(x_j)$	Resistência à tração	<i>Minimizar</i>	$-f_2(x_j)$
<i>Minimizar</i>	$f_3(x_j)$	Perda de Massa	<i>Minimizar</i>	$f_3(x_j)$
<i>Maximizar</i>	$f_4(x_j)$	Dano por Umidade Induzida	<i>Minimizar</i>	$-f_4(x_j)$
<i>Maximizar</i>	$f_5(x_j)$	Permeabilidade	<i>Minimizar</i>	$-f_5(x_j)$
<i>Maximizar</i>	$f_6(x_j)$	Capacidade de Infiltração	<i>Minimizar</i>	$-f_6(x_j)$
<i>Maximizar</i>	$f_7(x_j)$	Tempo de Encharcamento	<i>Minimizar</i>	$-f_7(x_j)$
<i>Maximizar</i>	$f_8(x_j)$	Capacidade de Retenção	<i>Minimizar</i>	$-f_8(x_j)$

Portanto, o problema de otimização proposto para este cenário, representado pela Equação 31, foi encontrar as soluções não-dominadas  $(x_j)$ , no *Espaço de Decisão*  $S$ , que otimizassem, simultaneamente, as funções apresentadas na coluna (e) do Quadro 3.

Função-objetivo:

$$\text{minimizar } \mathbf{f}_k(x_i) = \left\{ \begin{array}{l} -f_1(x_j), -f_2(x_j), f_3(x_j), -f_4(x_j), \dots \\ -f_5(x_j), -f_6(x_j), -f_7(x_j), -f_8(x_j) \end{array} \right\} \quad \text{Equação 31}$$

### 3.4.5.2.2. CENÁRIO 2 – OBJETIVOS FUNCIONAIS

De forma a avaliar apenas os atributos funcionais, este cenário utiliza as propriedades hidráulicas e hidrológicas das misturas asfálticas e das estruturas de camadas sobrepostas como funções-objetivo do problema, tratando os atributos mecânicos da camada porosa de atrito como restrições operacionais. Isto posto, o espaço dos objetivos  $\Omega$  fica reduzido, conforme demonstrado pela Equação 32.

$$\Omega = \{ \mathbf{f} = [f_5(x_j), f_6(x_j), f_7(x_j), f_8(x_j)]^T / \mathbf{f}_k \in R^5 \} \quad \text{Equação 32}$$

O Quadro 4 apresenta as funções otimizadas neste cenário.

**Quadro 4** – Funções do Cenário 2

FUNÇÃO-OBJETIVO		ID Função
Objetivo	Função $f_k(x_j)$	
Minimizar	$-f_5(x_j)$	Permeabilidade
Minimizar	$-f_6(x_j)$	Capacidade de Infiltração
Minimizar	$-f_7(x_j)$	Tempo de Encharcamento
Minimizar	$-f_8(x_j)$	Capacidade de Retenção

Portanto, o problema foi encontrar as soluções não-dominadas, dentro do espaço de soluções disponível, que otimizassem as propriedades funcionais apresentadas no Quadro 4. O problema de otimização para este cenário é formulado segundo a Equação 33.

$$\text{minimizar } f_k(x_i) = \{-f_5(x_j), -f_6(x_j), -f_7(x_j), -f_8(x_j)\} \quad \text{Equação 33}$$

### 3.4.5.2.3. CENÁRIO 3 – OBJETIVOS MECÂNICOS E FUNCIONAIS PONDERADOS

Para o terceiro cenário foi utilizada a abordagem clássica, tradicionalmente utilizada em problemas de otimização multiobjetivo, conforme discutido na revisão de literatura (pág.62). Contudo, este cenário foi subdividido em três situações, as quais foram denominadas de *Cenário 3.1*, *Cenário 3.2*. e *Cenário 3.3*.

No Cenário 3.1, reduziu-se o número inicial de 8 funções individuais para 2 funções compostas ( $F_1$  e  $F_2$ ), sendo  $F_1$  a função que representa os objetivos mecânicos e  $F_2$  a que representa os objetivos funcionais. A função  $F_1$ , apresentada na Equação 36, é uma função composta pela soma ponderada dos quatro objetivos mecânicos normalizados. De forma análoga, a função  $F_2$  (Equação 37) é a soma ponderada dos quatro objetivos funcionais normalizados. A normalização dos valores das funções-objetivo foi necessária para contornar o efeito de escala entre as funções (Equação 34).

$$Z = \frac{x - x_{min}}{x_{máx} - x_{min}} \quad \text{Equação 34}$$

Na abordagem clássica, a ponderação de pesos em problemas de otimização multiojetivo é, geralmente, subjetiva. Esta flexibilidade da abordagem permite ao tomador de decisão (projetista/consultor) priorizar um ou mais objetivos em detrimento dos demais, a depender dos objetivos do projeto.

No Cenário 3.1. considerou-se pesos iguais (25%) entre as funções de cada função composta  $F_1$  e  $F_2$ , conforme a Tabela 6. Esta condição buscou soluções pragmáticas para o problema, da forma como se apresentam, de tal forma que o modelo de otimização não favoreça uma ou outra solução. O cenário procurou saber como cada solução ( $x_j$ ) disponível no *Espaço de Decisão*  $S$  contribui para o valor de cada função composta ( $F_1$  e  $F_2$ ). O espaço dos objetivos  $\Omega$  e as funções compostas ( $F_1$  e  $F_2$ ) estão representados pelas equações 35, 36 e 37, respectivamente.

$$\Omega = \{f = [F_1(x_j), F_2(x_j)]^T / f_k \in R^2\} \quad \text{Equação 35}$$

$$F_1 = \sum_{k=1}^4 w_k \cdot f_k(x_j) = w_1 \cdot (-f_1(x_j)) + w_2 \cdot (-f_2(x_j)) + w_3 \cdot f_3(x_j) + w_4 \cdot (-f_4(x_j)) \quad \text{Equação 36}$$

$$F_2 = \sum_{k=5}^8 w_k \cdot f_k(x_j) = w_5 \cdot (-f_5(x_j)) + w_6 \cdot (-f_6(x_j)) + w_7 \cdot (-f_7(x_j)) + w_8 \cdot (-f_8(x_j)) \quad \text{Equação 37}$$

**Tabela 6** - Ponderação dos objetivos – Cenário 3.1

Função $F_1$	Peso $w_k$	Função $F_2$	Peso $w_k$
$-f_1(x_j)$	0,25	$-f_5(x_j)$	0,25
$-f_2(x_j)$	0,25	$-f_6(x_j)$	0,25
$f_3(x_j)$	0,25	$-f_7(x_j)$	0,25
$-f_4(x_j)$	0,25	$-f_8(x_j)$	0,25
<b>Soma</b>	<b>1,00</b>	<b>Soma</b>	<b>1,00</b>

No Cenário 3.2, também reduziu-se o número inicial de funções, de 8 funções individuais para 2 funções compostas ( $F_1$  e  $F_2$ ), sendo que os pesos entre as funções individuais foram diferenciados. Os pesos estão apresentados na Tabela 7 e seus valores foram definidos após a determinação e a análise dos resultados dos ensaios mecânicos e funcionais e da análise estatística dos mesmos. As justificativas para a definição dos valores específicos dos pesos de cada objetivo foram apresentadas

durante a análise dos resultados do cenário em tela, no item 4.3.2.2.

**Tabela 7 - Ponderação de Pesos - Cenário 3.2**

<b>Função <math>F_1</math></b>	<b>Peso <math>w_1</math></b>	<b>Função <math>F_2</math></b>	<b>Peso <math>w_2</math></b>
$-f_1(x_j)$	0,40	$-f_5(x_j)$	0,10
$-f_2(x_j)$	0,10	$-f_6(x_j)$	0,30
$f_3(x_j)$	0,40	$-f_7(x_j)$	0,30
$-f_4(x_j)$	0,10	$-f_8(x_j)$	0,30
<b>Soma</b>	<b>1,00</b>	<b>Soma</b>	<b>1,00</b>

Neste cenário, o espaço dos objetivos  $\Omega$  e as funções compostas ( $F_1$  e  $F_2$ ) têm a mesma configuração do Cenário 3.1, representados pelas Equações 35, 36 e 37, respectivamente.

Por fim, no Cenário 3.3, foi adotada a abordagem clássica para problemas de otimização multiobjetivo, que reduz o problema a um objetivo único (monobjetivo). A função minimizada ( $F$ ), foi a da forma apresentada na Equação 38, representando a soma ponderada das funções compostas  $F_1$  e  $F_2$  do Cenário 3.1.

$$\min F = w_1 \cdot F_1 + w_2 \cdot F_2 \quad \text{Equação 38}$$

Neste caso, ponderou-se os objetivos mecânicos e funcionais em 30% e 70%, respectivamente. Buscou-se, portanto, priorizar as propriedades funcionais da mistura asfáltica porosa.

#### **3.4.5.2.4. CENÁRIO 4 – SITUAÇÕES ESPECÍFICAS DE OTIMIZAÇÃO – OBJETIVOS CONFLITANTES**

Conforme já mencionado, quando se trata de problemas de otimização com múltiplos objetivos, é comum que haja objetivos conflitantes entre si. No caso de pavimentos asfálticos porosos, os objetivos conflitantes podem envolver os objetivos mecânicos entre si, os funcionais entre si ou conflitos entre ambos, simultaneamente.

O Cenário 4 procurou encontrar as soluções, dentro do espaço de decisão disponível, que otimizassem objetivos conflitantes notáveis da camada porosa de atrito e dos pavimentos asfálticos porosos considerando algumas condições de contorno do problema, como a durabilidade e a condutividade hidráulica, o clima da região

(umidade/temperatura) e as condições de drenagem superficial da rodovia. Para tanto, o cenário foi subdividido nos Cenários 4.1, 4.2 e 4.3.

O Cenário 4.1 procurou simular uma condição na qual a permeabilidade e a durabilidade do revestimento asfáltico fossem consideradas. No contexto das misturas asfálticas porosas, os parâmetros mais usuais para representar tal condição é a perda de massa cântabro, o dano por umidade e a resistência à deformação permanente (ZHANG et al, 2020). Pretendeu-se encontrar uma solução que respondesse razoavelmente às solicitações do tráfego porém atendendo satisfatoriamente aos requisitos de funcionalidade, portanto, se está diante de dois objetivos notoriamente conflitantes. As funções-objetivos escolhidas para representar a situação deste cenário foram o desgaste por abrasão, caracterizado pela perda de massa Cântabro, e a permeabilidade, representada pelo coeficiente de permeabilidade da mistura asfáltica.

O Cenário 4.2 teve como fator limitante a variabilidade climática da região, principalmente em relação às condições de umidade e temperatura. A suscetibilidade à umidade e aos efeitos das altas temperaturas na mistura asfáltica são determinantes para a escolha de soluções que respondam de forma satisfatória à variabilidade climática. Misturas abertas e com grande volume de vazios (como a CPA) são mais suscetíveis aos efeitos dessa variabilidade. Em regiões em que os períodos chuvosos são mais frequentes, a variação de umidade é mais evidente e a presença de água no interior da mistura pode comprometer a adesão entre ligante e agregado. Por outro lado, em regiões de clima seco, as altas temperaturas incidentes sobre uma mistura aberta pode oxidar precocemente o ligante asfáltico devido à exposição ao ambiente e à radiação ultravioleta, acelerando o seu processo de envelhecimento.

As misturas asfálticas porosas, sendo mais abertas e com maior quantidade de vazios, são mais suscetíveis aos efeitos das altas temperaturas e, caso possibilitem, também, uma maior retenção de água, ficam igualmente suscetíveis aos efeitos da umidade. Portanto, misturas que respondem razoavelmente a estes efeitos são soluções em potencial para este cenário. Os dois objetivos conflitantes que o representaram foram a retenção de água, caracterizada pela capacidade de retenção da mistura asfáltica e a suscetibilidade à umidade ou dano por umidade induzida, representados pela relação da resistência à tração retida.

Por último, o Cenário 4.3 procurou encontrar soluções ótimas, dentro do espaço

de decisão, onde as condições de drenagem superficial da rodovia seriam os fatores limitantes do problema. Isto posto, e considerando a situação dos dispositivos de drenagem de águas pluviais da rodovia, o revestimento poroso adequado seria aquele capaz de responder satisfatoriamente aos requisitos de condutividade hidráulica e de retenção de água, simultaneamente. Convenientemente, as funções objetivos a otimizar foram a permeabilidade e a capacidade de retenção de água da CPA, que são dois objetivos conflitantes.

De forma a representar cada cenário, as Equações 39, 40 e 41 formulam os problemas de otimização a solucionar para cada um deles, respectivamente.

#### 1. Cenário 4.1 – Perda de Massa Cântabro x Permeabilidade

$$\Omega = \{f = [f_3(x_j), f_5(x_j)]^T / f_k \in R^2\}$$

$$\text{minimizar } f_k(x_i) = \{-f_3(x_j), -f_5(x_j)\} \quad \text{Equação 39}$$

#### 2. Cenário 4.2 – Capacidade de Retenção x Relação de Resistência à Tração Retida

$$\Omega = \{f = [f_8(x_j), f_4(x_j)]^T / f_k \in R^2\}$$

$$\text{minimizar } f_k(x_i) = \{-f_8(x_j), -f_4(x_j)\} \quad \text{Equação 40}$$

#### 3. Cenário 4.3 – Permeabilidade x Capacidade de Retenção

$$\Omega = \{f = [f_5(x_j), f_8(x_j)]^T / f_k \in R^2\}$$

$$\text{minimizar } f_k(x_i) = \{-f_5(x_j), -f_8(x_j)\} \quad \text{Equação 41}$$

### 3.4.4.3. ALGORITMO DE BUSCA MULTIOBJETIVO

Durante o tratamento de dados dos resultados obtidos em laboratório das propriedades mecânicas e funcionais das misturas asfálticas porosas, observou-se

que as funções que se obteriam entre as variáveis dependentes e independentes, ajustando-se os pontos experimentais, teriam comportamento crescente ou decrescente. Portanto, a solução ótima recairia em pontos extremos dessas funções, que seriam, invariavelmente, valores extremos experimentais. Neste caso, não foi necessário aplicar métodos de otimização para encontrar a solução ótima de um problema pois qualquer um deles resultaria como solução os valores extremos experimentais já conhecidos.

Portanto, diante da situação acima, um ordenamento, por meio fronteiras de dominância, foi realizado para selecionar as combinações entre teores de ligante e faixas de granulometria que otimizarão os objetivos desejados dentro do espaço de decisão disponível. Para tanto, utilizou-se o algoritmo denominado *FNDS - Fast Non-Dominated Sorting* (DEB, 2002; BURKE e KENDALL, 2014) que, numa tradução literal significa ordenamento não-dominado rápido. O *FNDS* é uma das rotinas presentes no modelo de algoritmo genético denominado *NSGA-II (Non-Dominated Genetic Algorithm)* proposto por Deb (2002) para resolução de problemas de otimização multiobjetivo por meio do conceito de dominância de soluções.

Este algoritmo separa as soluções por meio de fronteiras de dominância onde as soluções presentes numa mesma fronteira não dominam e nem são dominados pelas demais soluções pertencentes a esta fronteira. Contudo, essas soluções podem ou não dominar ou serem dominadas por soluções pertencentes às demais fronteiras que possuem menor ou maior grau de dominância em relação à fronteira a que pertencem.

#### **3.4.4.3.1. FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO *FNDS***

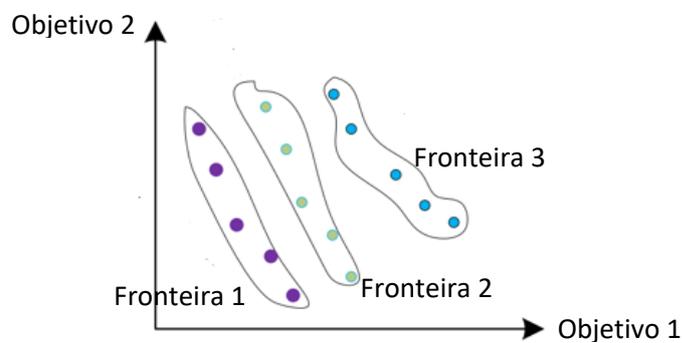
O algoritmo foi organizado da seguinte forma: a primeira parte objetivou encontrar a primeira fronteira (Fronteira Pareto), ou seja, as soluções não-dominadas, enquanto a segunda parte encontrou as fronteiras subsequentes. Inicialmente, para cada solução  $p$  pertencente a um conjunto  $P$ , foram atribuídos dois indicadores: O número de vezes que a solução  $p$  foi dominada ( $n_p$ ) e o conjunto de soluções ( $S_p$ ) que a solução  $p$  dominou. Este procedimento requereu a comparação entre todas as soluções pertencentes ao conjunto  $P$  para todas as funções existentes do problema. No final do procedimento todas as soluções que conservaram  $n_p = 0$  pertenceram ao conjunto  $F_1$ , que representou a primeira fronteira, ou seja, foram soluções não-

dominadas.

Para encontrar as demais fronteiras, o procedimento foi o seguinte: enquanto o conjunto  $F_1 \neq \emptyset$ , para cada solução  $q$  diferente de  $p$ , pertencente ao conjunto  $S_p$ , reduzia-se em uma unidade seu contador de dominância ( $n_q = n_q - 1$ ). Após isso, se para qualquer solução  $q$ ,  $n_q$  se tornasse igual a zero, separava-se essa solução em um conjunto  $Q$ . Se, após cada comparação de todas as soluções  $q \in S_p$  com cada solução  $p \in S_p$ ,  $n_q$  fosse igual a zero, todas as soluções  $q$ , nessa condição, pertenceriam ao conjunto  $Q$  e se tornariam membro da segunda fronteira.

O procedimento acima foi repetido para todas as soluções do conjunto  $Q$  para determinar a terceira fronteira e assim sucessivamente. Este processo continuou até que todas as soluções do conjunto  $P$  fossem classificadas em suas respectivas fronteiras. De forma a facilitar o entendimento do algoritmo, a Figura 35 apresenta um exemplo ilustrativo da separação de soluções em fronteiras de dominância para dois objetivos e o Quadro 5 apresenta o pseudocódigo do algoritmo *FNDS*.

**Figura 35** - Exemplo ilustrativo das fronteiras de dominância



**Quadro 5** – Pseudocódigo do Algoritmo *FNDS*

FNDS – FAST NON-DOMINATED SORTING	
<b># Parte 1 - Encontrando a primeira fronteira</b>	
para cada $p \in P$	
$n_p = 0$	$n_p$ : número de vezes que $p$ é dominado;
$S_p = \{ \}$ ;	$S_p$ : conjunto de pontos dominados por $p$ ;
$\forall q \neq p \text{ e } q \in P$	
se $p < q$ então	
$S_p = S_p \cup \{q\}$ ;	
senão se $q < p$ então	
$n_p = n_p + 1$ ;	
se $n_p = 0$ então	
$p.\text{rank} = 1$ ;	
$F_1 = F_1 \cup \{p\}$ ;	$F_1$ é a 1ª fronteira (soluções não-dominadas)
<b># Parte 2 - Encontrando as demais fronteiras</b>	
$i = 1$	$i$ : contador de fronteiras
enquanto $F_i \neq \{ \}$ ;	
$Q = \{ \}$ ;	$Q$ armazena membros da próxima fronteira;
para cada $p \in F_i$	
para cada $q \in S_p$	
$n_q = n_q - 1$ ;	
se $n_q = 0$ então	$q$ se torna membro da próxima fronteira;
$q.\text{rank} = i + 1$ ;	
$Q = Q \cup \{q\}$ ;	
$i = i + 1$ ;	
$F_i = Q$ ;	

O algoritmo *FNDS* foi aplicado a cada cenário proposto anteriormente, onde todas as soluções ( $x_j$ ) do *Espaço de Decisão S* foram comparadas entre si em todas as funções a serem otimizadas. O objetivo, portanto, foi obter, principalmente, as soluções não-dominadas do problema, ou seja, as soluções pertencentes à primeira fronteira (Fronteira de Pareto).

Para codificá-lo, uma adaptação do algoritmo presente no código do *NSGA-II*, elaborado por Aravind (2024), foi realizada. O código foi escrito na linguagem de programação do *MATLAB R16* e pode ser visualizado no Apêndice D.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

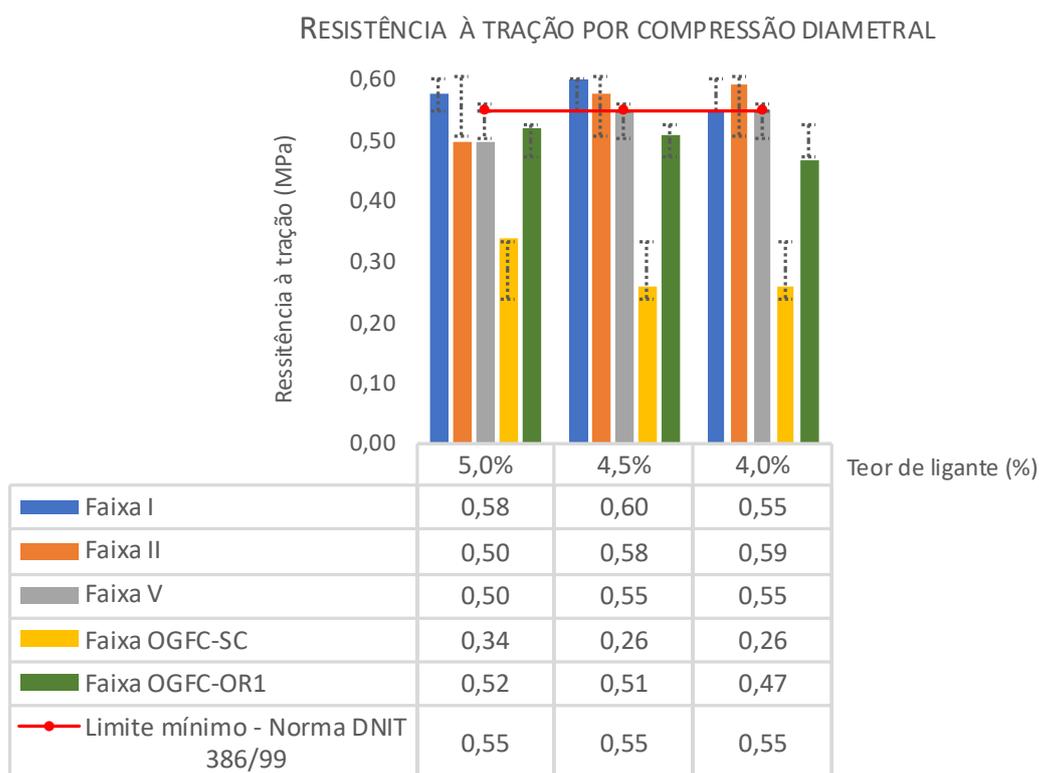
Neste capítulo são apresentados e comentados os resultados dos ensaios mecânicos e funcionais, da análise estatística dos resultados e do modelo de otimização aplicado.

### 4.1. ENSAIOS MECÂNICOS

#### 4.1.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados da resistência à tração estão apresentados na Figura 36. Percebe-se que apenas a mistura projetada com a curva granulométrica da Faixa I atinge o valor mínimo do RT previsto na Norma DNIT 386/99 em todos os teores de ligantes testados. O limite mínimo de RT para misturas densas, que possuem função estrutural, é de 0,65 MPa (Quadro 1, pág 43), ou seja, apenas 0,1 MPa acima do limite de RT para a CPA, que não possui essa atribuição. Portanto, nota-se uma imposição conservadora da Norma DNIT-ES 386/99 com relação a este atributo mecânico para misturas que possuem, em tese, apenas caráter funcional.

**Figura 36** - Resultados da Resistência à Tração por Compressão Diametral  
(Fonte: O Autor)



Na literatura verifica-se que outros autores apresentaram a mesma dificuldade de atingir o valor mínimo de resistência à tração. Motta *et al.* (2010), utilizando o AMP 65/90 e o AMP 55 e variando os métodos e energia de compactação, entre Marshall e Superpave, não obtiveram valores satisfatórios para este parâmetro. Os autores utilizaram teores de ligante variando entre 4,0 e 5,5% e quatro combinações entre método e energia de compactação, totalizando-se 16 combinações de misturas. Dessas, apenas uma atingiu um valor de 0,88 MPa. As outras misturas apresentaram o RT entre 0,30 e 0,48 MPa.

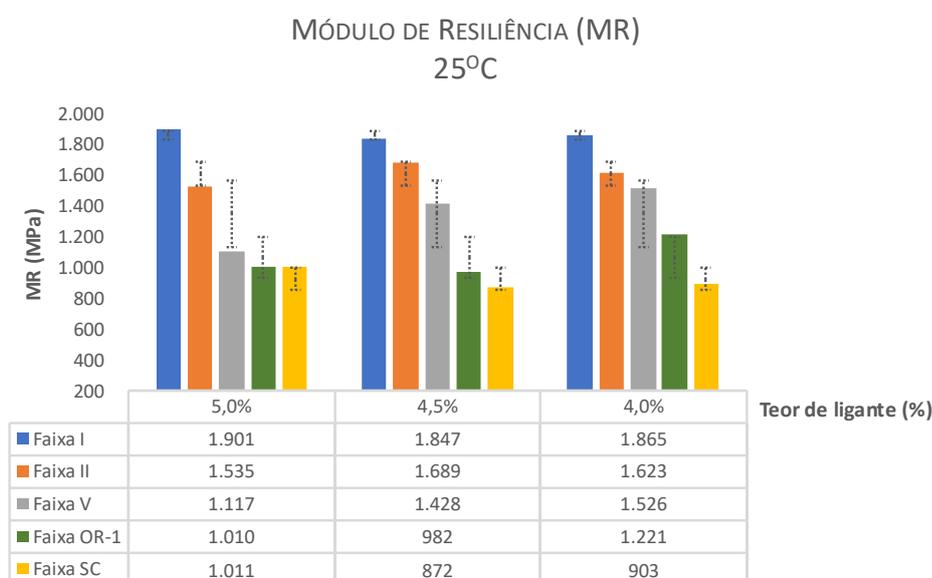
Alecrim (2021) trabalhou com o AMP 55/75 e com três configurações de mistura, sendo a primeira uma CPA convencional, a segunda com uma adição de 15% de resíduo asfáltico reciclado e outra confeccionada em usina (campo). A autora conseguiu atingir o valor mínimo de RT apenas na mistura confeccionada em campo, atingindo um valor de 0,59 MPa. Sousa (2024), trabalhando com o mesmo ligante AMP 55/75, utilizou uma curva granulométrica da Faixa V da Norma DNIT 386/99 e atingiu um valor de RT de referência de apenas 0,37 MPa.

Isto posto, e restringindo-se à análise do impacto dos teores de ligante e das diferentes curvas granulométricas utilizados nessa pesquisa, percebe-se que as misturas CPA projetadas com maior teor de finos, ou seja, com as curvas granulométricas das Faixas I, II e V, se sobressaem àquelas confeccionadas com misturas com curvas granulométricas das Faixas OGFC-SC e OGFC-OR-1. Nenhuma mistura com teor de ligante 4,0, 4,5 % ou 5,0% das faixas OGFC-SC e OGFC-OR-1 atingiu o valor mínimo de resistência à tração da Norma DNIT 386/99.

### 4.1.2. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Na Figura 37 são apresentados os resultados dos ensaios de Módulos de Resiliência (MR) para cada combinação de mistura de teores de ligante e curvas granulométricas.

**Figura 37** - Resultados dos Módulos de Resiliência  
Fonte: Autor



Pela ordem de grandeza dos valores obtidos de MR, independente da combinação, percebe-se que são consideravelmente menores do que os valores de obtidos por Alves (2019), Dresch (2016) e Kolodziej (2016), apresentados na Tabela 2 (pág.53). De acordo com a Figura 37 o maior valor obtido é aproximadamente 1.900 MPa, enquanto o menor valor observado na Tabela 2 (pág.53) foi de 2.938 MPa. Entretanto, a razão para esta discrepância de valores pode estar associada ao tipo de ligante utilizado. Os autores supramencionados utilizaram o AMP 60/85, que possui 4% de polímero SBS, enquanto esta pesquisa utilizou o ligante AMP 55/75 que possui apenas 3% do polímero.

Hammes (2022) obteve valores de MR médios de 2.764 MPa utilizando o CAP 50/70 modificado com adição de 7% do polímero elastomérico POLIFLEX HiMA. Sousa (2024), que utilizou o mesmo ligante utilizado nesta pesquisa, obteve o valor máximo de referência de MR em torno de 1.878 MPa, próximo ao valor máximo apresentado na Figura 37. Da mesma forma, Motta *et al.* (2010) encontraram um valor médio de MR de 1805 MPa para misturas CPA constituídas de AMP (FlexPave 65/90) com teor de ligante de 4,5% cuja granulometria possuía um diâmetro máximo de

9,5mm (Faixa Arizona 9,5mm). Alecrim (2021), utilizando o ligante AMP 55/75, na Faixa II e com teor de ligante de 4,5% produziu CPA com valores médios de MR em torno de 2.900 MPa.

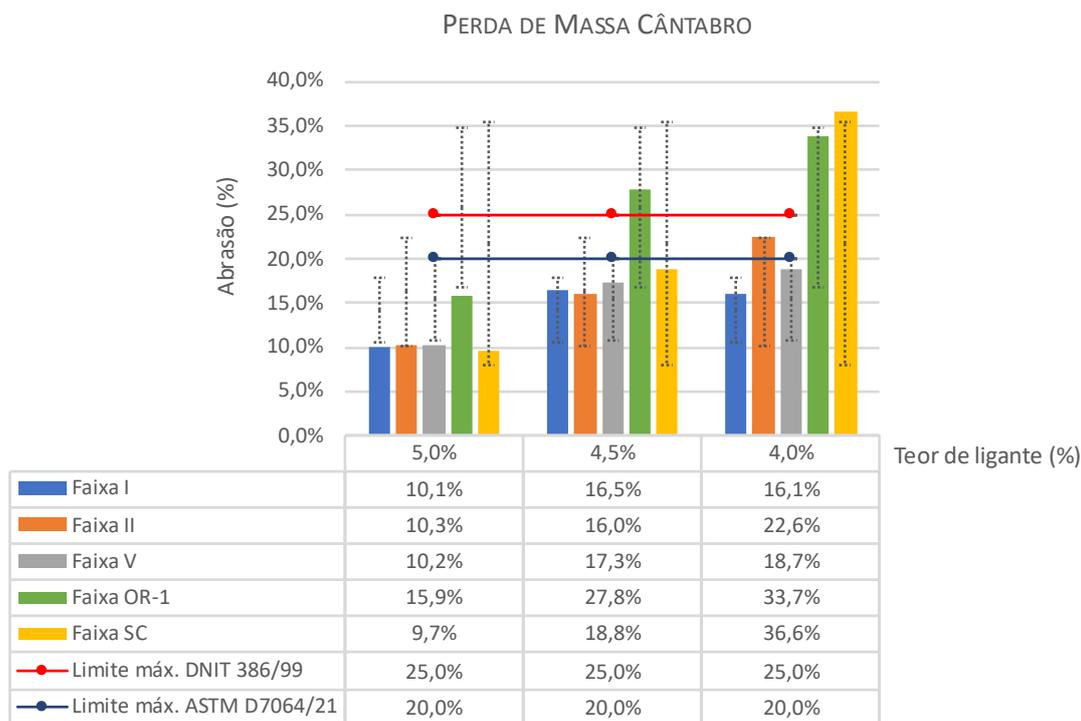
Alves (2019) refutou a afirmação que a CPA não tem função estrutural devido aos elevados valores de MR obtidos em sua pesquisa e em trabalhos de outros autores como Dresch (2016) e Kolodziej (2016). Entretanto, Alecrim (2021) foi mais cautelosa, afirmando que esta condição não poderia ser negligenciada em virtude da CPA ter contribuído indiretamente na vida útil do pavimento após a análise mecanicista realizada pela autora. Em seu estudo, Alecrim (2021) observou reduções nas deformações de tração na fibra inferior da camada subjacente à CPA e nas do topo do subleito de 26% e de 22%, respectivamente.

Não foi objetivo da pesquisa em tela realizar a análise mecanicista com as camadas porosas de atrito projetadas para se verificar as conclusões de Alecrim (2021). Entretanto, a ordem de grandeza dos valores de MR reflete que as misturas CPA/OGFC concebidas nesta pesquisa não possuem rigidez que as caracterizem, diretamente, como um revestimento com função estrutural. Contudo, essa condição (baixa rigidez) não invalida as conclusões do trabalho de Alecrim (2021) nem excluem a aplicação dessas misturas por possuírem tal escala de rigidez. As misturas porosas podem aumentar a vida útil do pavimento quando aplicadas como uma camada de sobreposição à camada sobrejacente convencional.

### 4.1.3. PERDA DE MASSA CÂNTABRO

Os resultados da perda de massa estão apresentados na Figura 38. Eles correspondem à média das perdas de massa de três corpos de prova de cada combinação de mistura CPA.

**Figura 38** - Resultados da Perda de Massa Cântabro  
Fonte: Autor



Nota-se um padrão de comportamento das misturas com relação à perda de massa: quanto menor o teor de ligante maior a percentagem de perda de massa correspondente. Esse mesmo padrão é evidenciado por Hammes (2022), Alves (2019), Kolodziej (2016) e Dresch (2016). Os limites de perda admitidos pela Norma DNIT 386/99 e ASTM D7064/2021 são de 25% e 20%, respectivamente. Algumas misturas CPA tiveram perdas acima dos limites, notoriamente aquelas com teores de ligante de 4%. Para este teor de ligante, as misturas das Faixas OGFC-SC e OGFC-OR-1 não atenderam aos limites das duas normas de referência, enquanto a mistura da Faixa II não atendeu ao limite da norma ASTM D7064/2021. Entretanto, aumentando em 0,5% o teor de ligante, as misturas das Faixas I, II e V e da Faixa OGFC-SC satisfazem aos limites máximos das duas normas. Apenas com o teor de ligante de 5%, todas as misturas, de todas as faixas, atendem aos limites das normas

supramencionadas. Observa-se, também, que apenas as misturas CPA das Faixas I e V, independentemente do teor de ligante da mistura, atenderam aos limites máximos estabelecidos.

Verifica-se uma maior perda de massa nas misturas das faixas OGFC-SC e OGFC-OR-1, pois possuem graduação mais aberta, ou seja, maior quantidade de vazios. Ao somar os efeitos do aumento de vazios com os de menores teores de ligante, misturas projetadas nessas condições são mais aptas a sofrerem maior desgaste à abrasão devido à desagregação e falta de coesão entre as partículas.

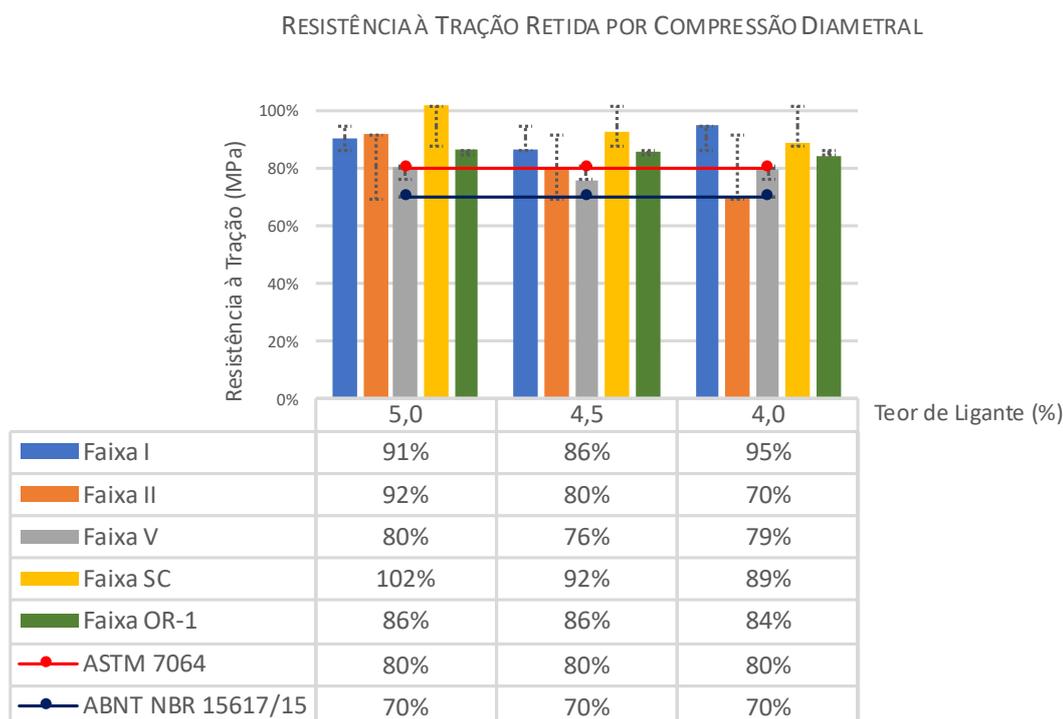
Se, por outro lado, compara-se as perdas de massa apenas entre as misturas CPA das Faixas I, II e V, para um mesmo teor de ligante, não há diferença significativa entre essas misturas, ou seja, a faixa granulométrica não é determinante para uma maior ou menor perda de massa nas misturas CPA. Uma diferença sutil pode ser percebida quando se compara as perdas de massa entre misturas com teores de ligante diferentes, contudo, essa alteração não ultrapassa os limites admitidos das normas técnicas de referência.

#### **4.1.4. DANO POR UMIDADE INDUZIDA**

Os resultados dos ensaios foram comparados com o limite máximo permitido pela norma ASTM D7064/7064M-2021. A mesma determina que o critério de suscetibilidade à umidade de uma mistura seja, no mínimo, 80% de RRT (Relação de Resistência à Tração Retida), ou seja, a perda de resistência à tração deve ser, no máximo, 20% após o condicionamento, em relação ao valor de referência.

Em contrapartida, para as misturas convencionais (densas), a norma ABNT NBR 15617/15 exige o valor mínimo de RRT de 70%. Portanto, a norma ASTM D7064/7064M - 2021 para projeto de misturas de graduação aberta (OGFC) é mais conservadora (restritiva) nesse quesito do que a NBR 15617/15 para misturas convencionais. Os resultados deste ensaio estão apresentados na Figura 39.

**Figura 39** - Resultados da Relação de Resistência à Tração Retida  
 Fonte: (O Autor)



Percebe-se que, para o teor de ligante de 5,0%, todas as misturas atenderam ao limite de RRT de 80% estabelecido na norma ASTM D7064/7064M – 2021. Contudo, apenas as misturas das faixas OGFC-SC, OGFC-OR-1 e da Faixa I atenderam a este limite em todos os teores de ligante. Observa-se que todos os valores de RRT foram maiores que 70% que é o limite estabelecido pela norma ABNT NBR 15617/15 para misturas convencionais. Um aumento de 2% na resistência foi observado na mistura da faixa OGFC-SC com teor de ligante de 5% em relação à resistência de referência pois a RRT obtida foi de 102%. Uma possibilidade para esse aumento de resistência pode ser explicado por um incremento na rigidez dos corpos de prova condicionados para essa mistura, adquirido no intervalo de tempo entre o término do ciclo de condicionamento e o rompimento das amostras.

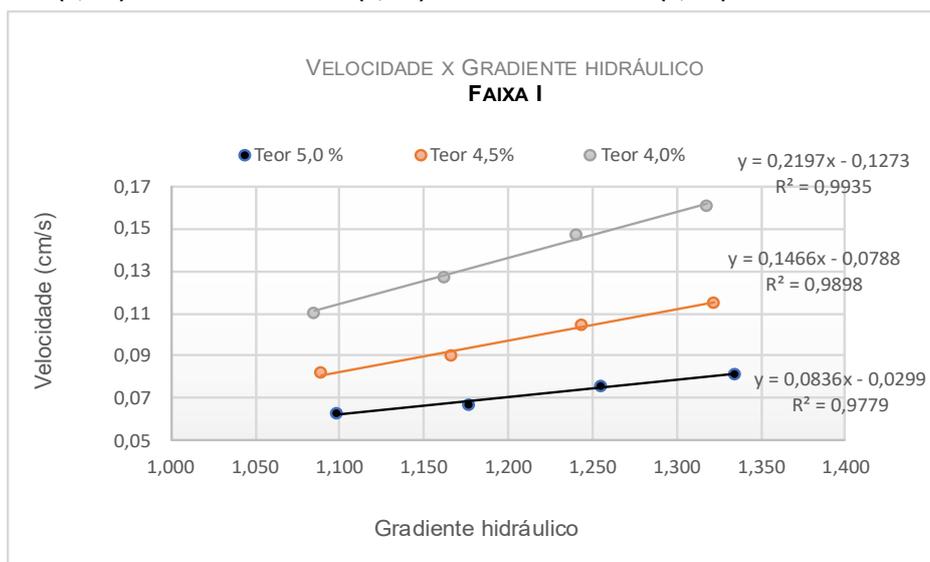
## 4.2. ENSAIOS FUNCIONAIS

### 4.2.1. PERMEABILIDADE

A permeabilidade das misturas CPA é caracterizada pelo coeficiente angular das retas obtidas com os dados experimentais do ensaio de permeômetro de carga constante. A norma ABNT NBR 13292/21 recomenda a aplicação de pequenos valores de carga hidráulica de forma a garantir a condição de fluxo no regime laminar, notoriamente percebida pela relação linear da velocidade com o gradiente hidráulico, demonstrada nas Figuras 40 à 44. Os coeficientes angulares das retas são os valores do Coeficiente de Permeabilidade ( $K$ , cm/s). Os dados de todos os ensaios de permeabilidade realizados estão no Apêndice A.

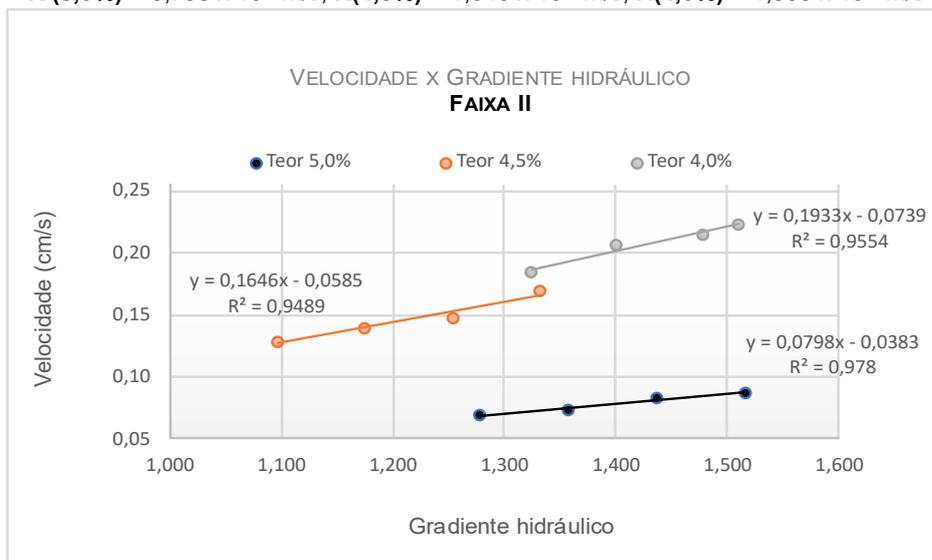
**Figura 40** - Velocidade x Gradiente Hidráulico - Faixa I  
Fonte: Autor

$K(5,0\%) = 0,836 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ,  $K(4,5\%) = 1,466 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ,  $K(4,0\%) = 2,197 \times 10^{-3} \text{ m/s}$



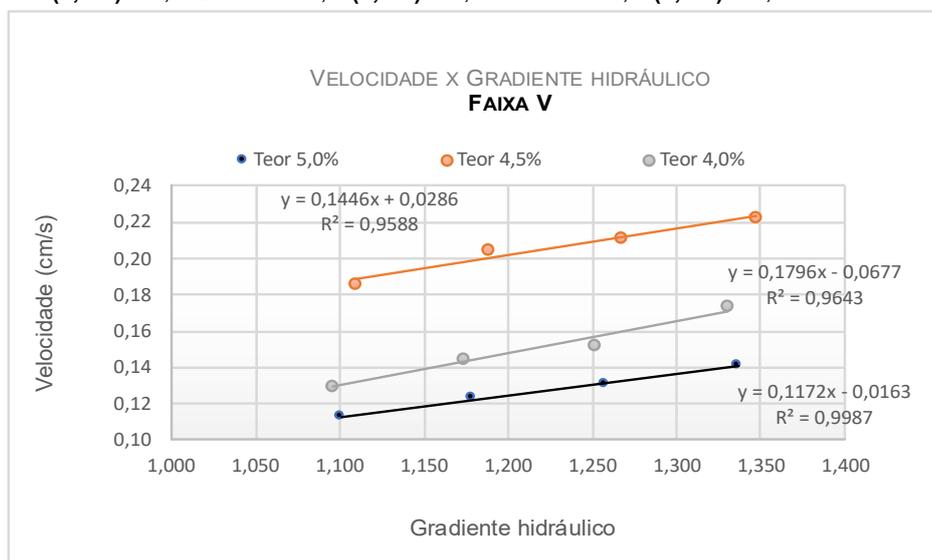
**Figura 41 - Velocidade x Gradiente Hidráulico - Faixa II**  
 Fonte: Autor

$K(5,0\%) = 0,798 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ,  $K(4,5\%) = 1,646 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ,  $K(4,0\%) = 1,933 \times 10^{-3} \text{ m/s}$



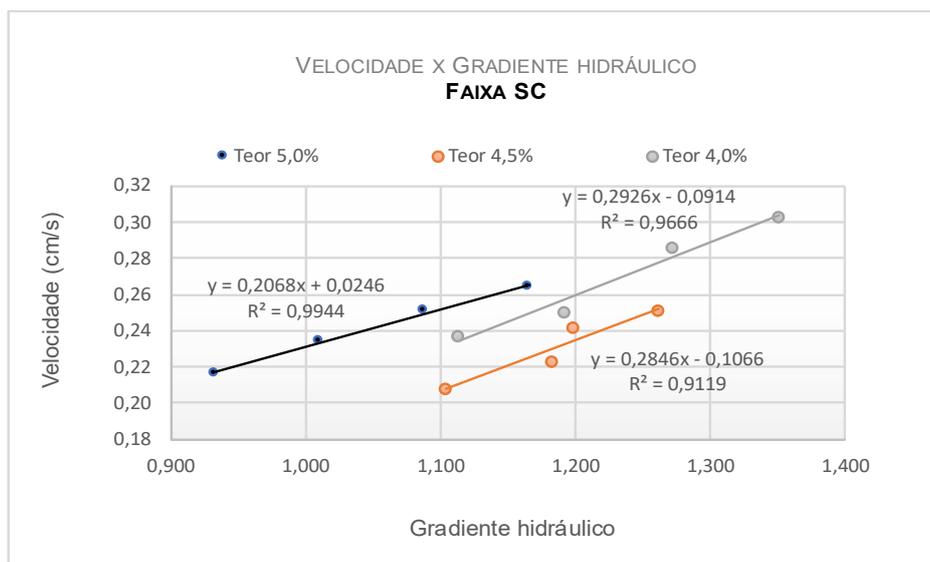
**Figura 42 - Velocidade x Gradiente Hidráulico - Faixa V**  
 Fonte: Autor

$K(5,0\%) = 1,172 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ,  $K(4,5\%) = 1,446 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ,  $K(4,0\%) = 1,796 \times 10^{-3} \text{ m/s}$



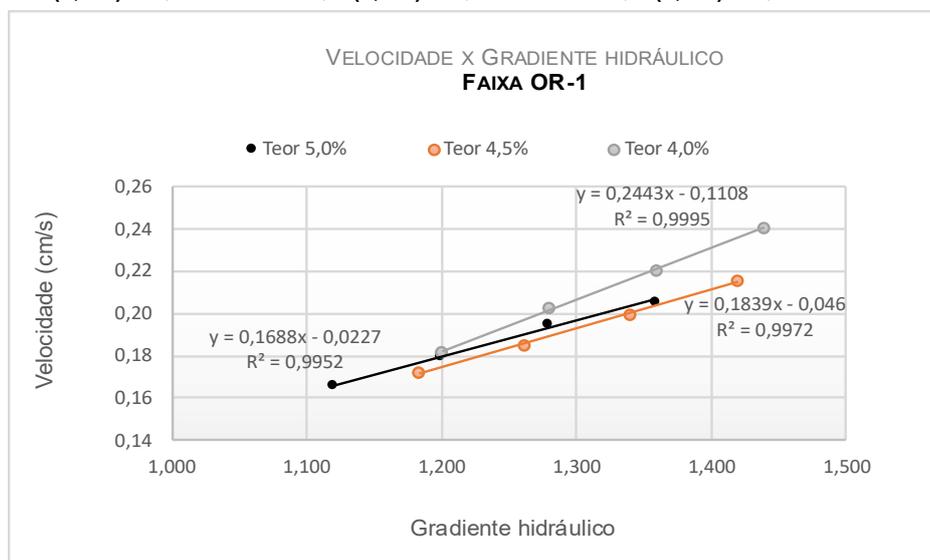
**Figura 43 - Velocidade x Gradiente Hidráulico - Faixa SC**  
 Fonte: Autor

$K(5,0\%) = 2,0868 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ,  $K(4,5\%) = 2,846 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ,  $K(4,0\%) = 2,926 \times 10^{-3} \text{ m/s}$



**Figura 44 - Velocidade x Gradiente Hidráulico - Faixa OR-1**  
 Fonte: Autor

$K(5,0\%) = 1,688 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ,  $K(4,5\%) = 1,839 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ,  $K(4,0\%) = 2,443 \times 10^{-3} \text{ m/s}$



Pela ordem de grandeza dos coeficientes de permeabilidade, todas as misturas, exceto duas, foram classificadas como de elevada permeabilidade segundo a classificação da norma ABNT NBR 16416/2015 para solos (Tabela 8), pois obtiveram valores de K superiores a  $10^{-3} \text{ m/s}$ . As misturas da Faixa I e II com teor de ligante de 5,0% podem ser classificadas como de média permeabilidade pois seus valores de K

foram ligeiramente menores que  $10^{-3}$  m/s. Devido estas misturas possuírem maiores teores de ligante e, conseqüentemente, menores volume de vazios, a probabilidade de obterem menores vazios comunicantes (porosidade efetiva) em relação às demais misturas é maior, como foi confirmado nos resultados dos parâmetros volumétricos.

**Tabela 8** - Classificação de solos segundo a permeabilidade  
Fonte: ABNT NBR 16416/2015

Grau de permeabilidade	K (m/s)
Elevada	$> 10^{-3}$
Média	$10^{-3}$ a $10^{-5}$
Baixa	$10^{-5}$ a $10^{-7}$
Muito Baixa	$10^{-7}$ a $10^{-9}$
Praticamente impermeável	$< 10^{-9}$

O padrão de comportamento da permeabilidade em função do teor de ligante corresponde ao padrão observado na literatura, como em Kolodziej (2016), Dresch (2016), Alves (2019), Souza (2008), dentre outros, em que, misturas com menores teores de ligante possuem maior permeabilidade. O mesmo padrão é percebido com o volume de vazios comunicantes, ou seja, quanto maior este, maior a permeabilidade da mistura, conforme se observa na Figura 27.

Percebe-se que os gráficos das Figuras 40 e 41 se apresentaram de forma análoga com relação à posição relativa das curvas de velocidade x gradiente hidráulico. Por exemplo, a curva do teor de ligante de 4,0% está posicionada acima da curva do teor de ligante de 4,5% que, por sua vez, está acima da curva do teor de ligante de 5,0%.

Contudo, a configuração acima não se repetiu entre as Figuras 42 e 44. Isso se deve às particularidades do ensaio. Não raro, a diferença de carga ( $h_1-h_2$ ), que, em tese, deveria ser constante, variava ligeiramente entre um ensaio e outro, devido a pequenas variações no valor de  $h_2$  provocado por instabilidades eventuais observadas no bombeamento de água para o reservatório. Conseqüentemente, o gradiente hidráulico, sutilmente, variava entre os ensaios para uma mesma carga hidráulica. Devido a esta instabilidade, a vazão de abastecimento também sofria pequenas variações e, por conseguinte, a velocidade calculada. Contudo, essas pequenas variações não comprometeram a condição do fluxo laminar, que foi confirmada pelo comportamento linear da relação velocidade x gradiente hidráulico para todas as

misturas ensaiadas.

Entretanto, o mais importante a se observar é que o coeficiente de permeabilidade não é determinado pela posição relativa entre as retas de velocidade x gradiente hidráulico, mas sim pela inclinação de cada um delas, ou seja, os seus coeficientes angulares. Neste sentido, o padrão de inclinação das retas de cada teor de ligante foi rigorosamente seguido em todas as figuras (40 a 44). As inclinações das retas, ou seja, os coeficientes de permeabilidade das misturas com teores de ligante de 4,0% foram maiores do que a coeficientes de permeabilidade das misturas com teores de ligante de 4,5% que, por sua vez, foram maiores do que os coeficientes de permeabilidade das misturas com 5,0% de teor de ligante.

A permeabilidade é o atributo funcional mais evidente para caracterizar misturas drenantes, especialmente para as camadas porosas de atrito, daí a importância em determiná-la. Portanto, os coeficientes de permeabilidade das misturas projetadas nesta pesquisa foram utilizados para caracterizá-la. Devido ao seu protagonismo perante outras funcionalidades da CPA, a permeabilidade foi uma das funções a se maximizar na maioria dos cenários de otimização multiobjetivo propostos para selecionar as misturas CPA de acordo com o critério de dominância de soluções.

#### **4.2.2. INFILTRAÇÃO**

Conforme discutido no item 2.3, Pavimentos Permeáveis, e ilustrado na Figura 3 da revisão bibliográfica, a mistura asfáltica porosa pode ser aplicada em pavimentos permeáveis que permitem a infiltração da água por entre suas camadas. Portanto, é importante avaliar a influência desse tipo de revestimento nas velocidades e capacidades de infiltração das camadas subjacentes (granulares) do pavimento permeável. A infiltração pode ser caracterizada por curvas representativas como a curva da infiltração acumulada (equação de Kostiaikov), a velocidade de infiltração e a capacidade de infiltração representada pela equação de Horton.

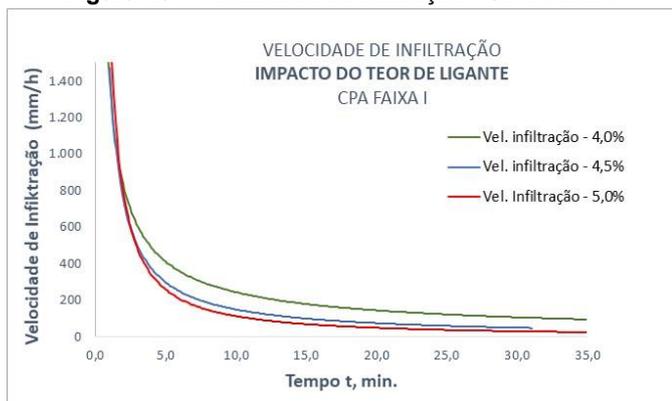
##### **4.2.2.1. VELOCIDADES DE INFILTRAÇÃO E INFILTRAÇÃO ACUMULADA**

Durante o ensaio de infiltração coletaram-se os dados das lâminas infiltradas em intervalos de tempo pré-estabelecidos. De posse desses dados, foi possível ajustar

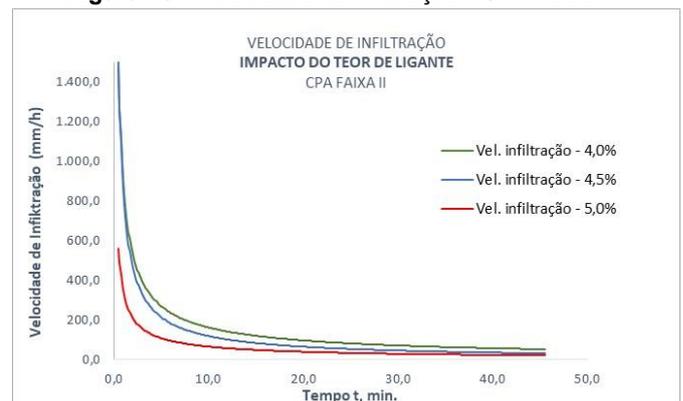
as curvas características de infiltração de cada estrutura de camadas modelada. Analisando o comportamento inicial das curvas de velocidades de infiltração entre as Figuras 45 e 52, percebe-se valores, sistematicamente, muito altos das velocidades de infiltração inicial. Isso pode ser explicado pelas limitações e condições iniciais do ensaio. Para todas as estruturas, o ensaio foi iniciado com as camadas granulares totalmente secas, sem umidade. Esta condição, aliada à incerteza da manutenção da mesma compactação das camadas granulares, entre um ensaio e outro, muito provavelmente, contribuiu para as altas velocidades de infiltração inicial, como também, para uma falta de padrão nas sobreposições das curvas de infiltração no início do ensaio, respectivamente. A estabilidade era atingida apenas no final do ensaio, com a confirmação da repetição das três últimas leituras das lâminas de água infiltradas, quando o meio já se encontrava saturado, possibilitando, portanto, determinar a capacidade de infiltração final ( $f_c$ ) de cada estrutura de camada modelada.

Os dados dos ensaios e as curvas características de velocidade de infiltração e infiltração acumulada (função potencial de Kostiaikov) estão disponíveis nos Apêndices B e C, respectivamente. O impacto dos teores de ligante nas velocidades de infiltração de cada estrutura de camadas está ilustrado entre as Figuras 45 e 49, enquanto o impacto da granulometria (faixas) é apresentado entre as Figuras 50 e 52.

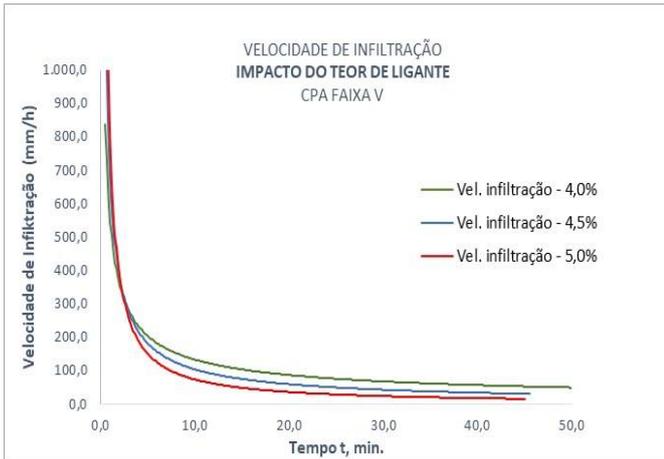
**Figura 45** - Velocidade de Infiltração - CPA Faixa I



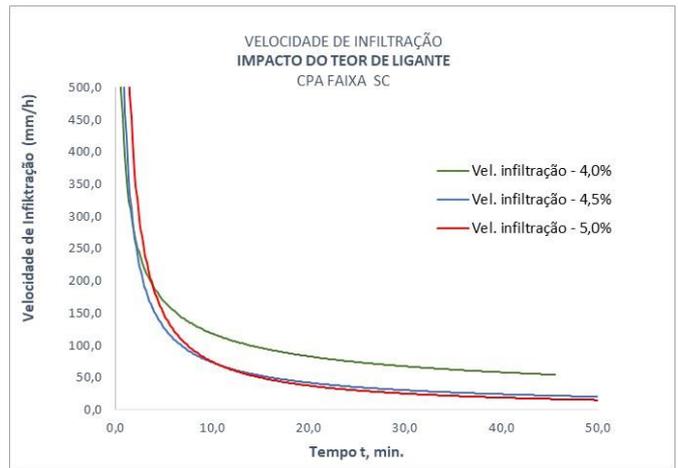
**Figura 46** - Velocidade de Infiltração - CPA Faixa II



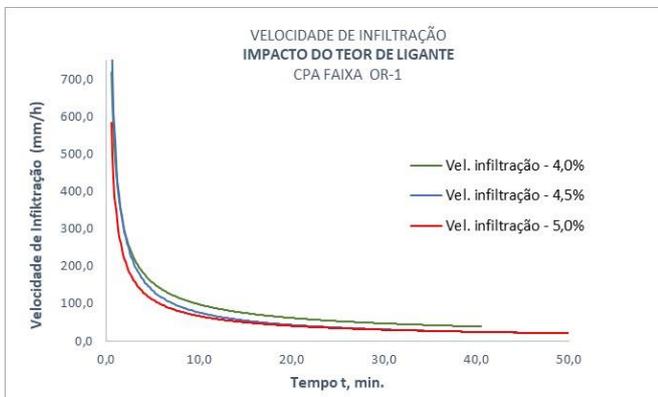
**Figura 47 - Velocidade de Infiltração - CPA Faixa V**



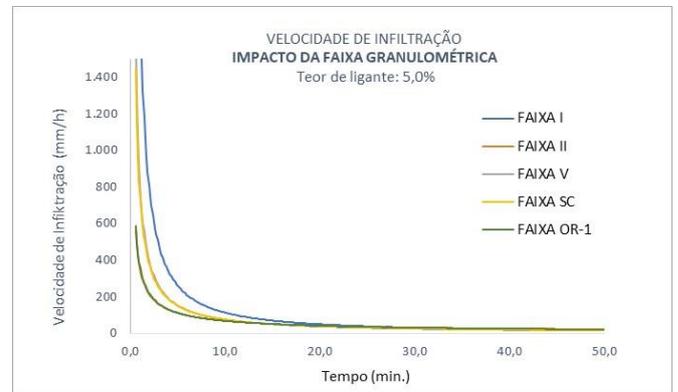
**Figura 48 - Velocidade de Infiltração - CPA Faixa SC**



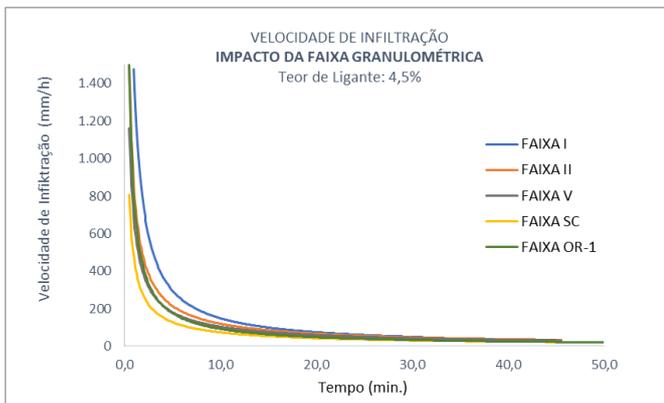
**Figura 49 - Velocidade de Infiltração - CPA Faixa OR-1**



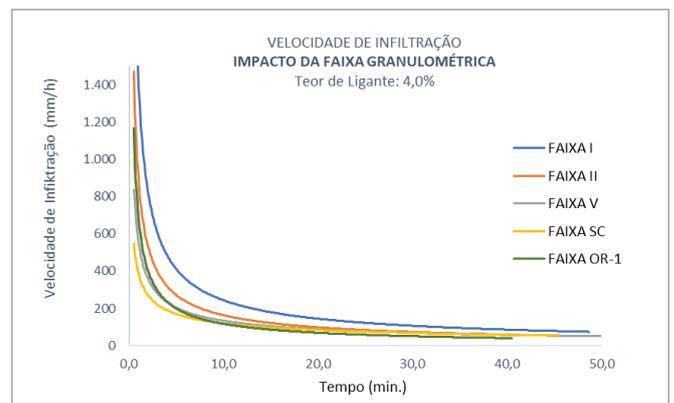
**Figura 50 - Velocidade de Infiltração – T.Ligante: 5,0%**



**Figura 51 - Velocidade de Infiltração – T.Ligante: 4,5%**



**Figura 52- Velocidade de Infiltração – T.Ligante: 4,0%**



É perceptível o impacto nas velocidades de infiltração final em misturas com teores de ligantes diferentes de uma mesma granulometria do que misturas com o mesmo teor de ligante e granulometrias diferentes. As velocidades de infiltração são maiores para aquelas estruturas de camadas cujos revestimentos superficiais (CPA/OGFC) possuem menores teores ligante, conforme se observa entre as Figuras 45 e 49. Quanto ao impacto da granulometria, de uma forma geral, é possível observar entre as Figuras 50 e 52 o decaimento mais rápido da curva de velocidade de

infiltração das misturas com granulometrias mais abertas, ou seja, com maiores volumes de vazios comunicantes, como era esperado.

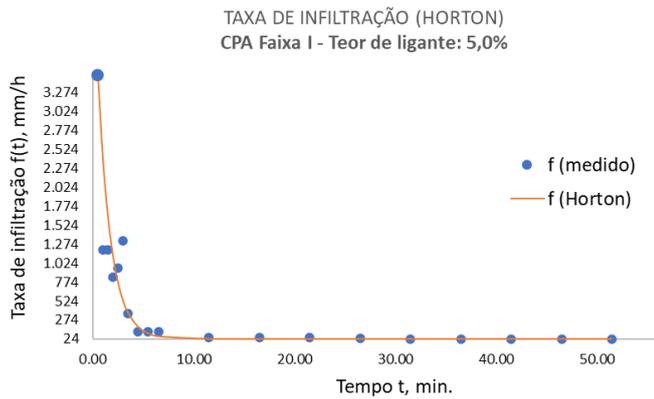
#### 4.2.2.2. CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO

Outra importante curva característica determinada para cada uma das estruturas de camadas modeladas com as misturas porosas foi a curva das taxas ou capacidade de infiltração de Horton. As curvas das taxas de infiltração de Horton foram traçadas a partir dos resultados experimentais obtidos nos ensaios com o infiltrômetro de escala reduzida. Nesta análise, foi utilizado o software Matlab, mais precisamente o aplicativo *Curve Fitting Tool*. Os parâmetros ajustados são aqueles constantes na Equação 3 (pág.62) apresentada na revisão bibliográfica. A Tabela 9 apresenta os parâmetros calibrados da Equação de Horton para cada estrutura de camadas modelada. As Figuras 53 a 67 ilustram as curvas de Horton ajustadas para cada estrutura modelada com as misturas CPA.

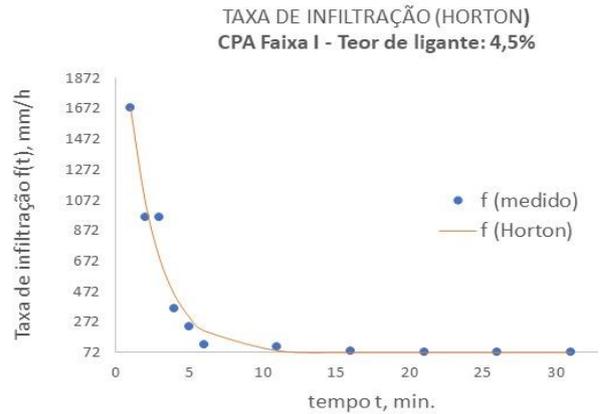
**Tabela 9** - Parâmetros ajustados da Equação de Horton

Estrutura de camadas	Faixa	Teor de ligante	$(f_o - f_c)$	$f_c$	$f_o$	$k$	$t_o$	Equação de Horton	$R^2$
1	I	5,0%	5.136	24	5.160	0,777	0	$f(t) = f_c + (f_o - f_c).e^{-k(t-t_o)}$	0,8016
2	I	4,5%	1.608	72	1.680	0,482	1	$f(t) = f_c + (f_o - f_c).e^{-k(t-t_o)}$	0,9620
3	I	4,0%	3.516	84	3.600	0,801	0,5	$f(t) = f_c + (f_o - f_c).e^{-k(t-t_o)}$	0,9321
4	II	5,0%	5.964	36	6.000	0,969	0,5	$f(t) = f_c + (f_o - f_c).e^{-k(t-t_o)}$	0,9989
5	II	4,5%	3.780	60	3.840	0,853	0,5	$f(t) = f_c + (f_o - f_c).e^{-k(t-t_o)}$	0,8628
6	II	4,0%	3.984	96	4.080	1,115	0,5	$f(t) = f_c + (f_o - f_c).e^{-k(t-t_o)}$	0,9833
7	V	5,0%	3.936	24	3.960	1,390	0,5	$f(t) = f_c + (f_o - f_c).e^{-k(t-t_o)}$	0,9518
8	V	4,5%	4.140	60	4.200	1,809	0,5	$f(t) = f_c + (f_o - f_c).e^{-k(t-t_o)}$	0,9758
9	V	4,0%	4.716	84	4.800	2,199	0,5	$f(t) = f_c + (f_o - f_c).e^{-k(t-t_o)}$	0,9949
10	SC	5,0%	7.176	24	7.200	1,416	0,5	$f(t) = f_c + (f_o - f_c).e^{-k(t-t_o)}$	0,9999
11	SC	4,5%	9.564	36	9.600	3,772	0,5	$f(t) = f_c + (f_o - f_c).e^{-k(t-t_o)}$	0,9997
12	SC	4,0%	7,80E+03	84	7.884	7,824	0,5	$f(t) = f_c + (f_o - f_c).e^{-k(t-t_o)}$	0,9994
13	OR-1	5,0%	7,80E+03	30	7.830	6,326	0,5	$f(t) = f_c + (f_o - f_c).e^{-k(t-t_o)}$	0,9998
14	OR-1	4,5%	6.324	36	6.360	3,806	0,5	$f(t) = f_c + (f_o - f_c).e^{-k(t-t_o)}$	0,9996
15	OR-1	4,0%	5.196	84	5.280	4,053	0,5	$f(t) = f_c + (f_o - f_c).e^{-k(t-t_o)}$	0,9998

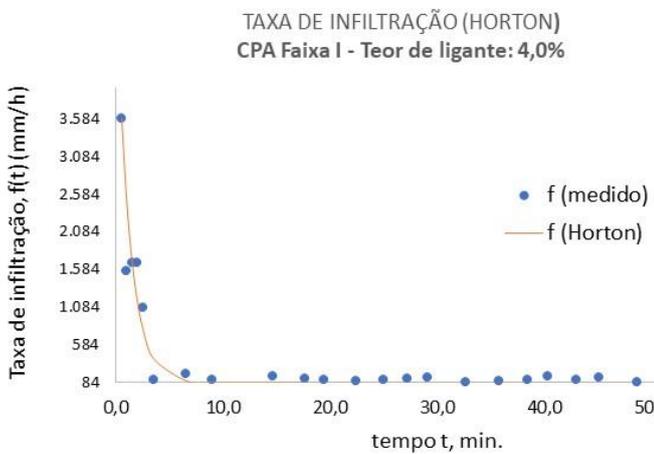
**Figura 53** – Taxa de Infiltração (Horton) – CPA Faixa I – Teor de Ligante 5,0%



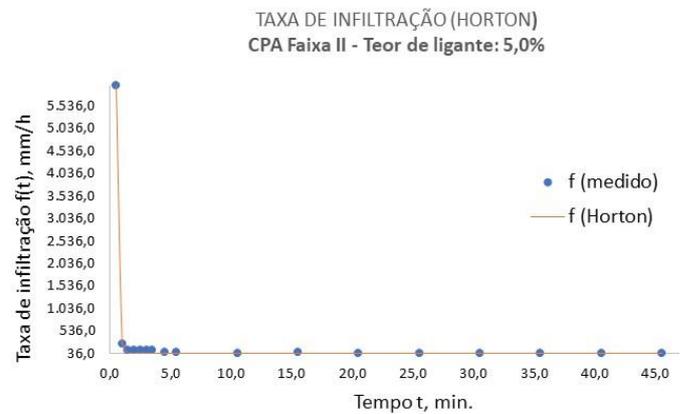
**Figura 54** – Taxa de Infiltração (Horton) – CPA Faixa I – Teor de Ligante 4,5%



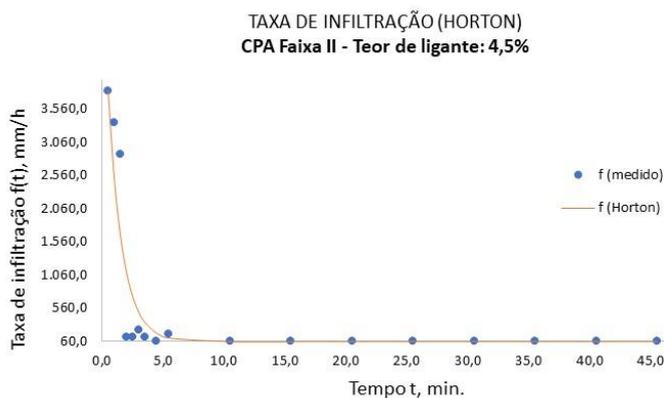
**Figura 55** - Taxa de Infiltração (Horton) – CPA Faixa I – Teor de Ligante 4,0%



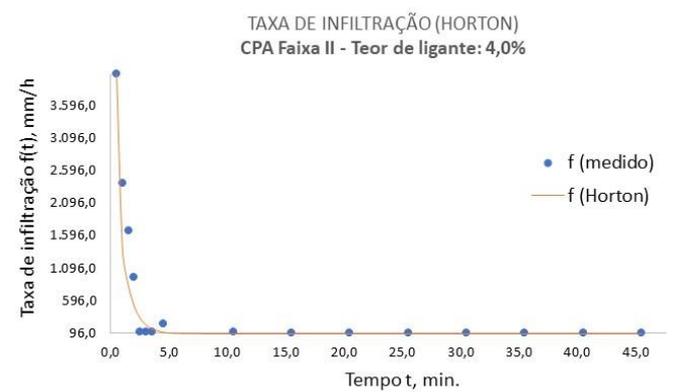
**Figura 56** – Taxa de Infiltração (Horton) – CPA Faixa II – Teor de Ligante 5,0%



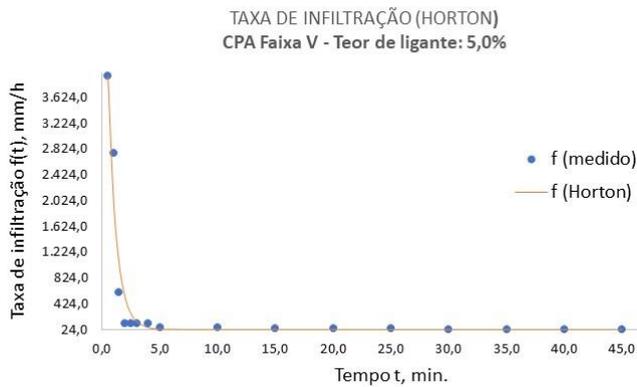
**Figura 57** - Taxa de Infiltração (Horton) – CPA Faixa II – Teor de Ligante 4,5%



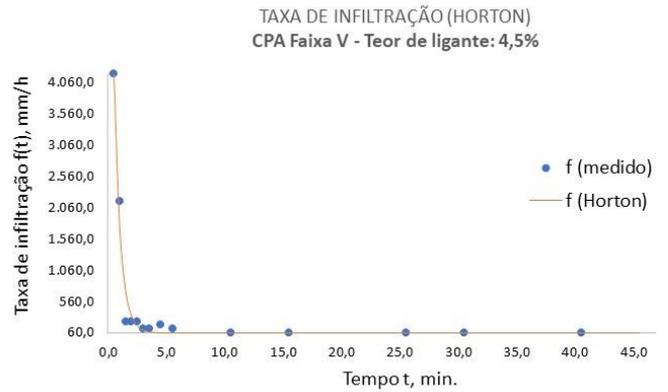
**Figura 58** - Taxa de Infiltração (Horton) – CPA Faixa II – Teor de Ligante 4,0%



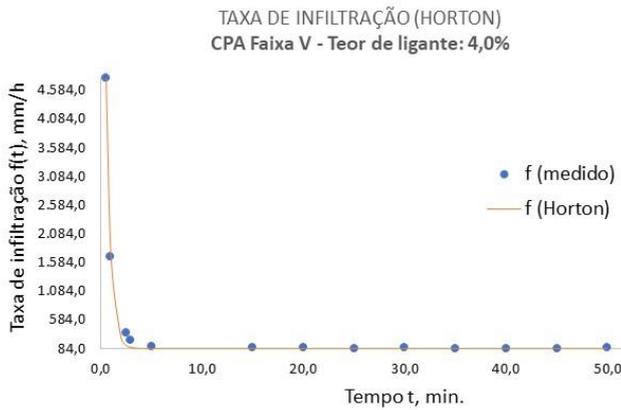
**Figura 59 - Taxa de Infiltração (Horton) – CPA Faixa V – Teor de Ligante 5,0%**



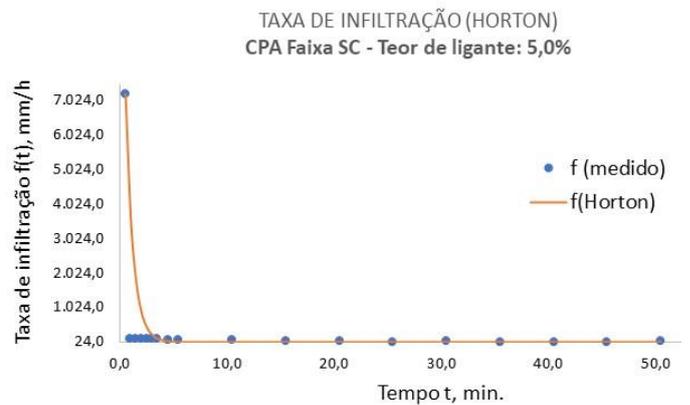
**Figura 60 - Taxa de Infiltração (Horton) – CPA Faixa V – Teor de Ligante 4,5%**



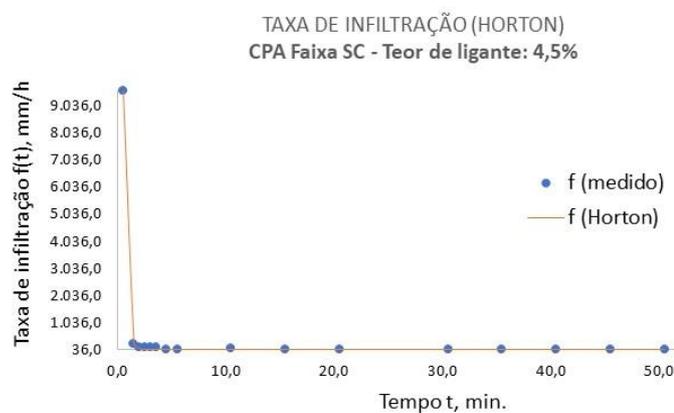
**Figura 61 - Taxa de Infiltração (Horton) – CPA Faixa V – Teor de Ligante 4,0%**



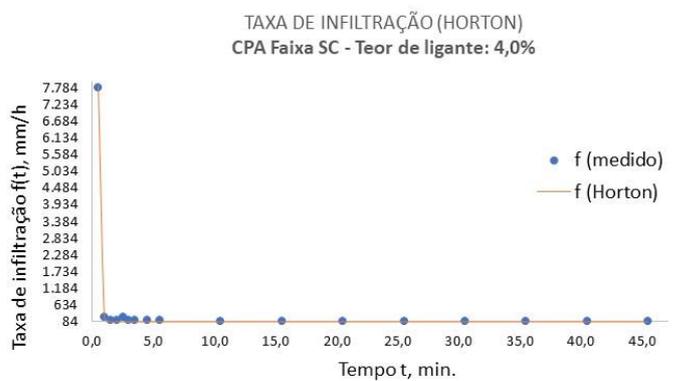
**Figura 62 - Taxa de Infiltração (Horton) – CPA Faixa SC – Teor de Ligante 5,0%**



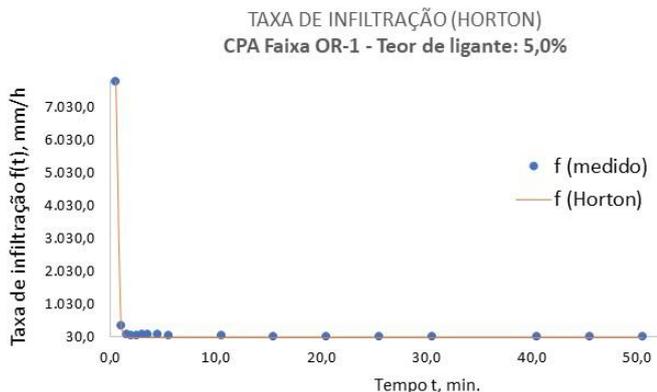
**Figura 63 - Taxa de Infiltração (Horton) – CPA Faixa SC – Teor de Ligante 4,5%**



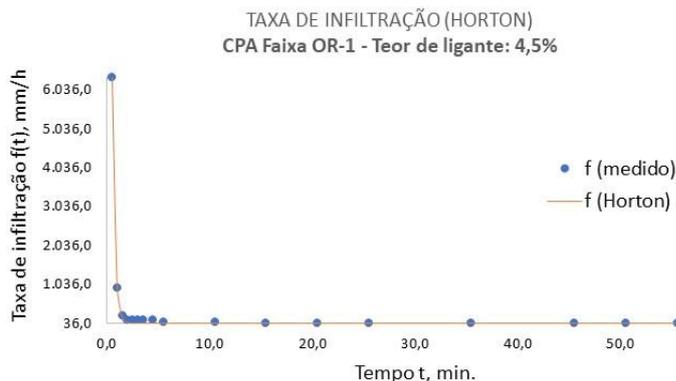
**Figura 64 - Taxa de Infiltração (Horton) – CPA Faixa SC – Teor de Ligante 4,0%**



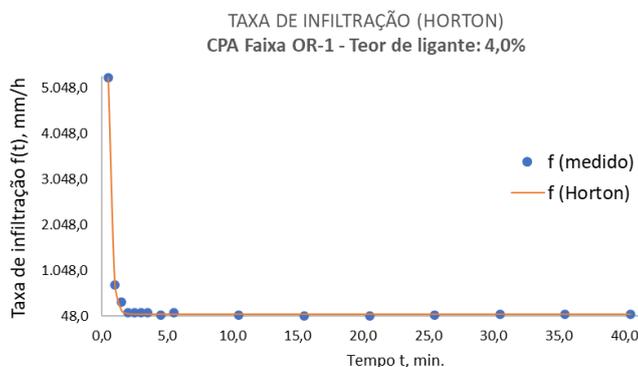
**Figura 65** - Taxa de Infiltração (Horton) – CPA Faixa OR-1 – Teor de Ligante 5,0%



**Figura 66** - Taxa de Infiltração (Horton) – CPA Faixa OR-1 – Teor de Ligante 4,5%

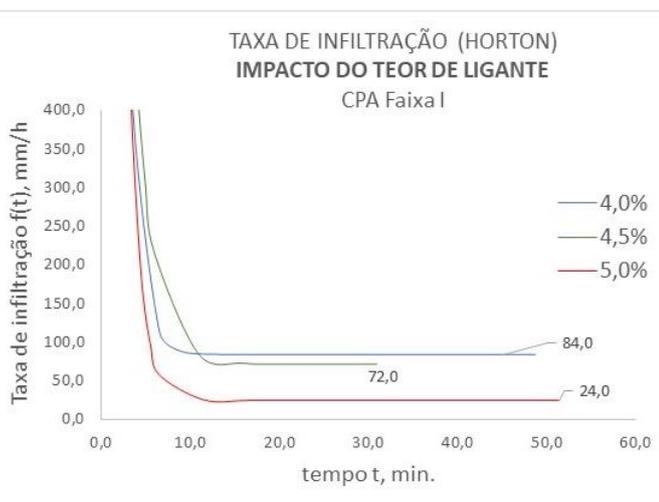


**Figura 67** - Taxa de Infiltração (Horton) – CPA Faixa OR-1 - Teor de Ligante 4,0%

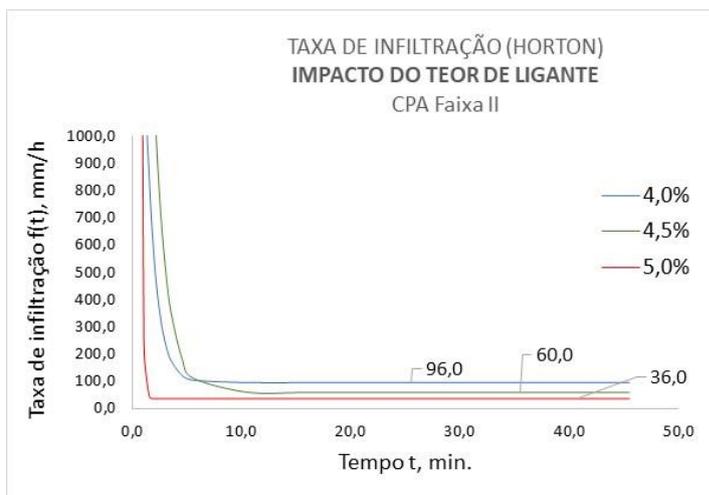


Dentre os parâmetros ajustados da Equação de Horton, a capacidade de infiltração final ( $f_c$ ) é a taxa que se mantém constante no final do ensaio de infiltração, após um longo período de tempo. Ela também é conhecida como VIB (Velocidade de Infiltração Básica). Um dos objetivos foi verificar a influência/impacto que cada revestimento de mistura CPA tem na capacidade de infiltração final de cada uma das estruturas de camadas modelada. As Figuras 68 a 72 indicam o impacto do teor de ligante nas capacidades de infiltração de cada estrutura.

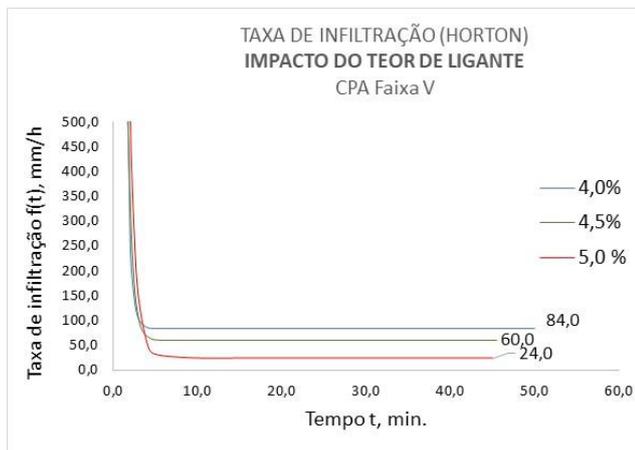
**Figura 68 - Impacto do Teor de Ligante na Taxa de Infiltração – CPA Faixa I**



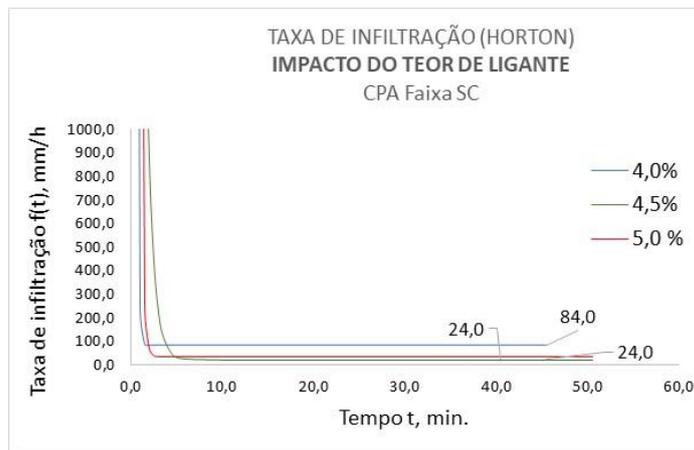
**Figura 69 - Impacto do Teor de Ligante na Taxa de Infiltração – CPA Faixa II**



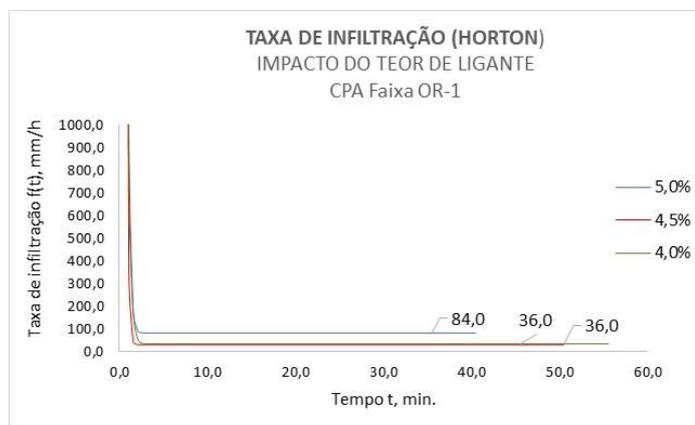
**Figura 70 - Impacto do Teor de Ligante na Taxa de Infiltração – CPA Faixa V**



**Figura 71 - Impacto do Teor de Ligante na Taxa de Infiltração – CPA Faixa SC**



**Figura 72 - Impacto do Teor de Ligante na Taxa de Infiltração – CPA Faixa OR-1**



Os valores numéricos em evidência são as capacidades de infiltração final ( $f_c$ ). Apesar do ensaio ter sido realizado num infiltrômetro em escala reduzida, a ordem de grandeza de  $f_c$  é semelhante à dos valores de  $f_c$  obtido por Jabour *et al.* (2015) e Bazzo e Horn (2017), que realizaram o ensaio de infiltração em pavimentos permeáveis na escala real.

De forma sistemática, percebe-se que menores teores de ligante na camada de revestimento das estruturas e, conseqüentemente, mais vazios comunicantes, contribuem para maiores velocidades de infiltração. Fisicamente, significa dizer que uma maior quantidade de água pode se infiltrar no meio poroso em um dado intervalo de tempo até que se atinja a sua capacidade de infiltração final, que é a taxa de infiltração potencial do meio poroso, na sua condição saturada. Portanto,  $f_c$  foi o parâmetro utilizado para caracterizar a capacidade de infiltração de cada estrutura de camadas modelada com as misturas CPA/OGFC e foi uma das funções-objetivo a maximizar pelo método de otimização a ser proposto posteriormente.

#### 4.2.3. TEMPO DE ENCHARCAMENTO

O tempo de encharcamento ( $t_p$ ) de cada pavimento permeável simulado por meio das estruturas de camadas foi obtido analiticamente por meio da Equação 27. Segundo esta equação, o  $t_p$  depende dos parâmetros da Equação de Horton ( $f_o$ ,  $f_c$ ,  $k$ ) e da intensidade de chuva  $i$  (mm/h) que satisfaça a seguinte condição:  $f_c < i$  (mm/h)  $< f_o$ . Esta é a condição exigida para a utilização da Equação 27. Para simular a intensidade de chuva na condição acima, utilizou-se a curva IDF (Equação 28) com duração de 10 minutos e período de retorno de 10 anos. Pela Equação 28 obteve-se uma intensidade de chuva de 96,2 mm/h. De posse dos parâmetros de Horton obtidos do ensaio de infiltração, calculou-se o tempo de encharcamento para cada estrutura de camadas. Os resultados estão apresentados na Tabela 10.

Com os resultados do tempo de encharcamento, procurou-se obter o tempo de retorno (TR ( $t_p$ )) correspondente à intensidade de chuva simulada cuja duração fosse, exatamente, o tempo de encharcamento de cada pavimento permeável modelado.

De acordo com a Tabela 10, os resultados dos tempos de retorno da intensidade de chuva simulada para durações correspondentes a cada tempo de encharcamento encontrado, demonstraram que a probabilidade de ocorrer uma chuva igual ou maior do que a chuva de projeto simulada aumenta para maiores durações,

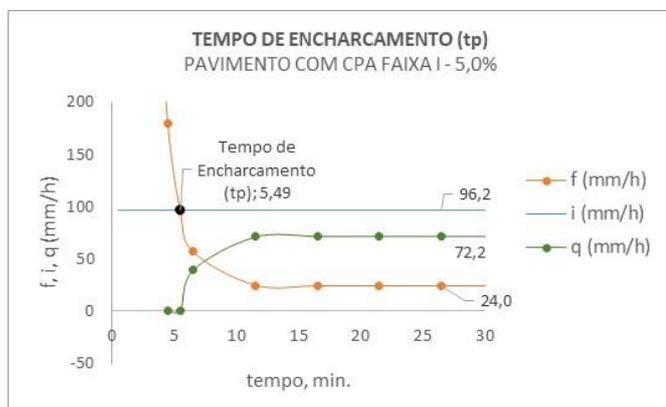
pois, segundo os resultados de TR (tp), quanto maior a duração da chuva, maior é o tempo de retorno correspondente.

**Tabela 10** – Tempos de encharcamento de cada estrutura de camadas

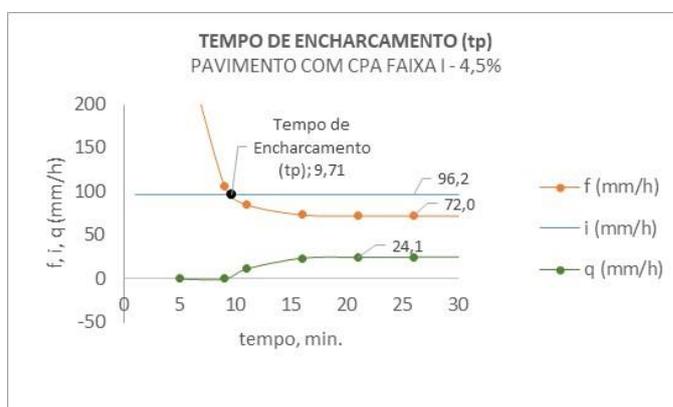
Estrutura de camadas	Faixa	Teor de ligante	$f_o - f_c$	$f_c$	$f_o$	k	$t_o$	TR (anos)	Duração (min.)	i (mm/h)	Tempo de Encharcamento (tp. min.)	TR (tp) (anos)
1	I	5,0%	5.136,0	24,0	5.160	0,7769	0,0	10	10	96,2	5,49	8,4
2	I	4,5%	1.608,0	72	1.680	0,4817	1,0	10	10	96,2	9,71	9,9
3	I	4,0%	3.515,9	84	3.600	0,8009	0,5	10	10	96,2	7,57	9,2
4	II	5,0%	5.964,0	36,0	6.000	0,9695	0,5	10	10	96,2	5,24	8,4
5	II	4,5%	3.780,0	60,0	3.840	0,8528	0,5	10	10	96,2	5,95	8,6
6	II	4,0%	3.984,0	96,0	4.080	1,1150	0,5	10	10	96,2	9,30	9,8
7	V	5,0%	3.936,0	24,0	3.960	1,3900	0,5	10	10	96,2	3,38	7,7
8	V	4,5%	4.140,0	60,0	4.200	1,8090	0,5	10	10	96,2	3,12	7,6
9	V	4,0%	4.716,0	84,0	4.800	2,1990	0,5	10	10	96,2	3,21	7,6
10	SC	5,0%	7.176,0	24,0	7.200	1,4160	0,5	10	10	96,2	3,75	7,8
11	SC	4,5%	9.564,0	36,0	9.600	3,7720	0,5	10	10	96,2	1,84	7,1
12	SC	4,0%	7.800,0	84,0	7.884	7,8240	0,5	10	10	96,2	1,33	6,9
13	OR-1	5,0%	7.800,0	30,0	7.830	6,3260	0,5	10	10	96,2	1,25	6,9
14	OR-1	4,5%	6.324,0	36,0	6.360	3,8060	0,5	10	10	96,2	1,72	7,1
15	OR-1	4,0%	5.196,0	84,0	5.280	4,0530	0,5	10	10	96,2	1,99	7,2

A partir dos valores da capacidade de infiltração ( $f_c$ ) de cada estrutura e simulando uma intensidade de precipitação constante de 96,2 mm/h, foi possível traçar o decaimento da taxa de infiltração pela Equação de Horton até atingir o tempo de encharcamento ( $t_p$ ) e, a partir deste, simular a lâmina escoada superficialmente ( $q$ , mm/h) ao longo do tempo (Figuras 73 a 87). O impacto do teor de ligante e da granulometria no tempo de encharcamento está demonstrado na Figura 88.

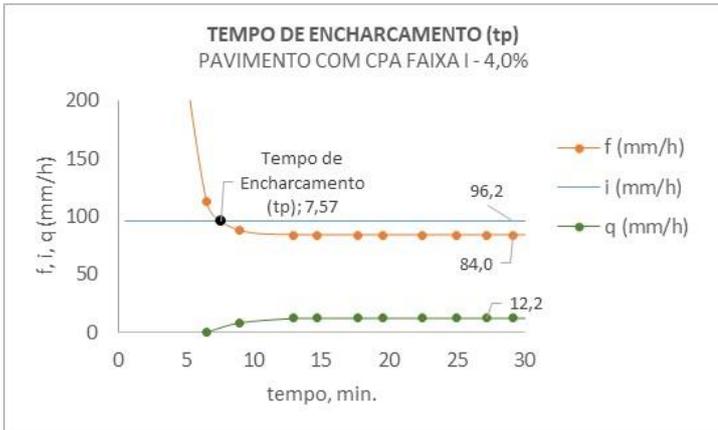
**Figura 73** – Tempo de Encharcamento – CPA Faixa I – 5,0%



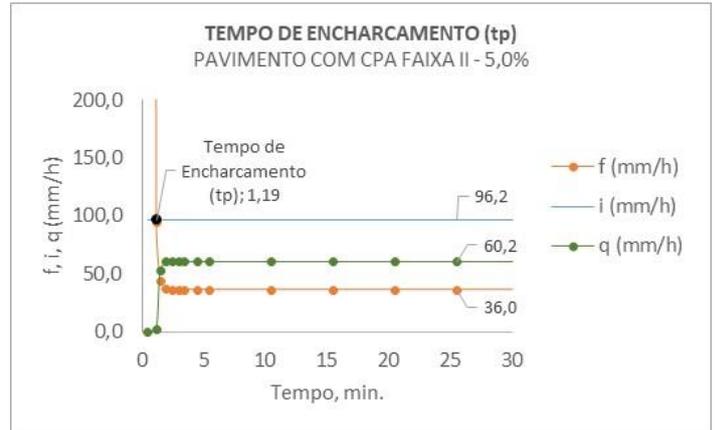
**Figura 74** - Tempo de Encharcamento – CPA Faixa I – 4,5%



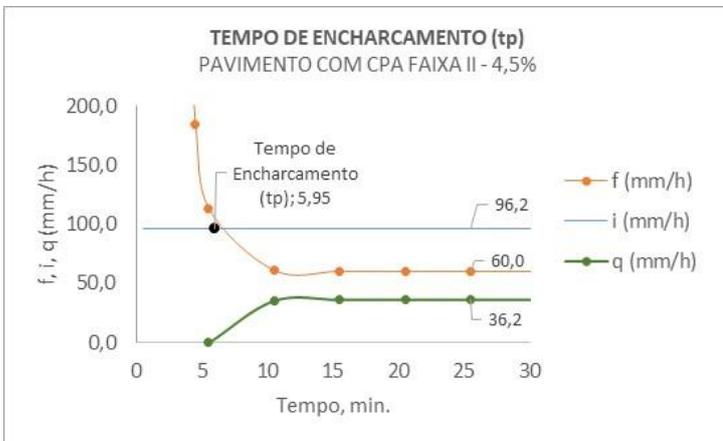
**Figura 75 - Tempo de Encharcamento – CPA Faixa I – 4,0%**



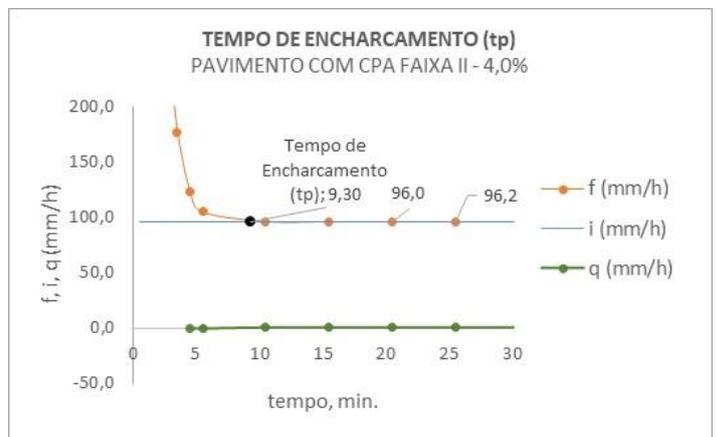
**Figura 76 Tempo de Encharcamento – CPA Faixa II – 5,0%**



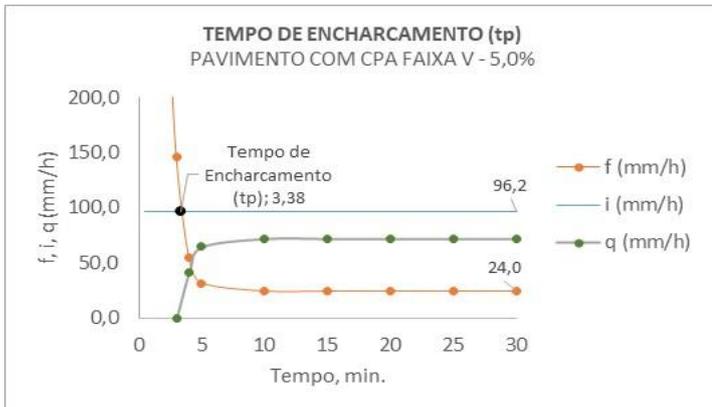
**Figura 77 - Tempo de Encharcamento – CPA Faixa II – 4,5%**



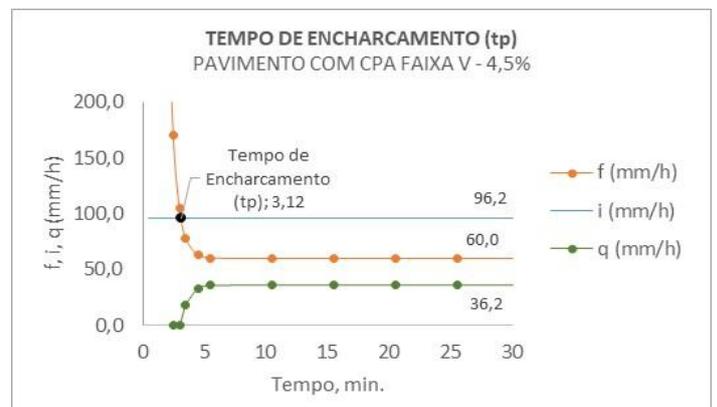
**Figura 78 - Tempo de Encharcamento – CPA Faixa II – 4,0%**



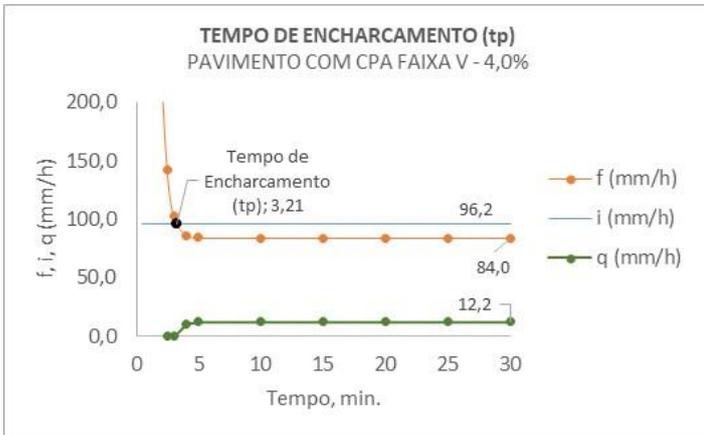
**Figura 79 - Tempo de Encharcamento – CPA Faixa V – 5,0%**



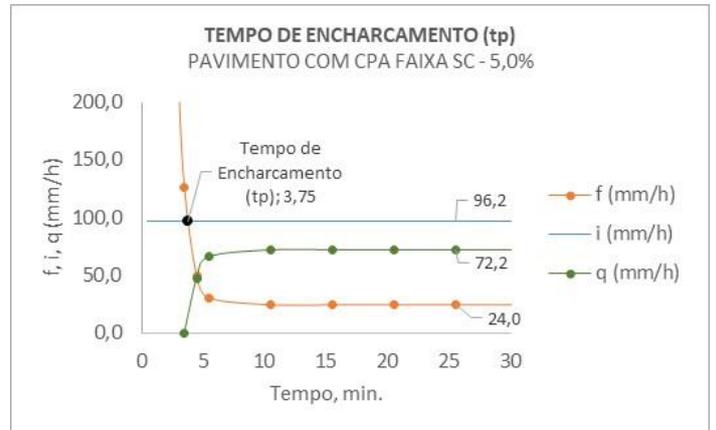
**Figura 80 - Tempo de Encharcamento – CPA Faixa V – 4,5%**



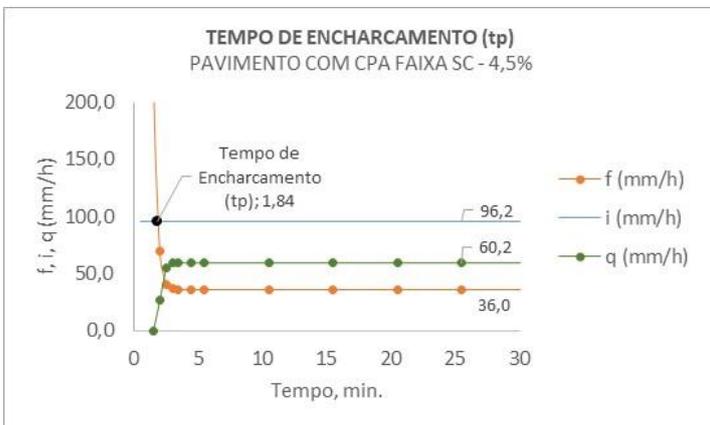
**Figura 81** - Tempo de Encharcamento – CPA Faixa V – 4,0%



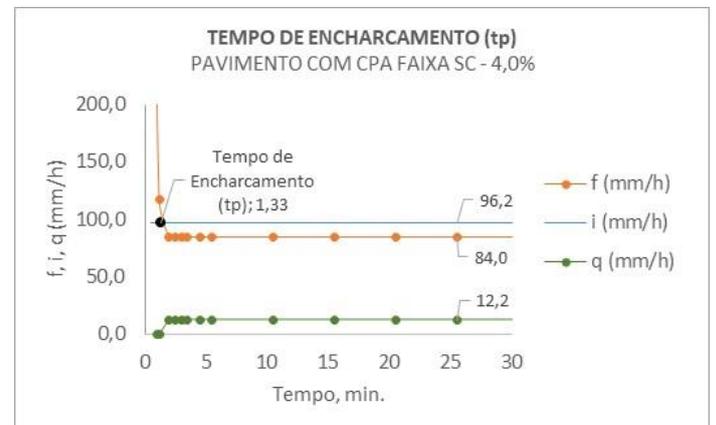
**Figura 82** - Tempo de Encharcamento – CPA Faixa SC – 5,0%



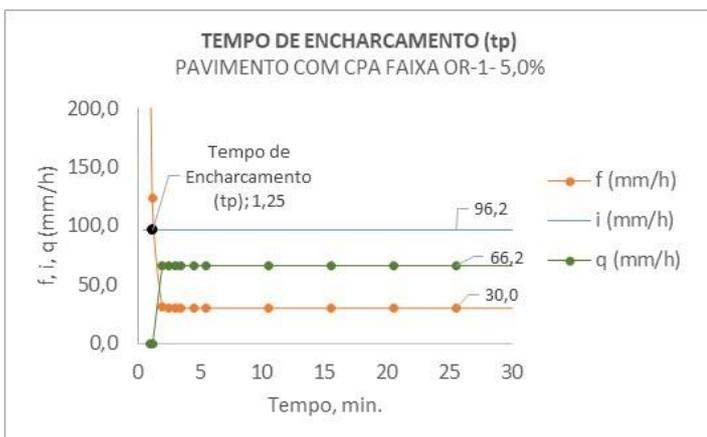
**Figura 83** - Tempo de Encharcamento – CPA Faixa SC – 4,5%



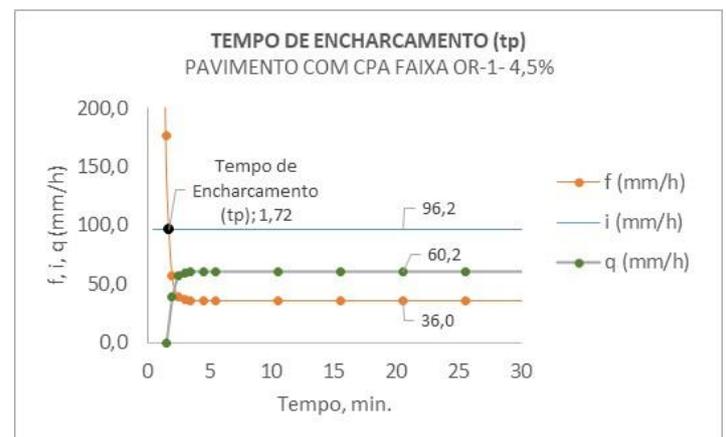
**Figura 84** - Tempo de Encharcamento – CPA Faixa SC – 4,0%



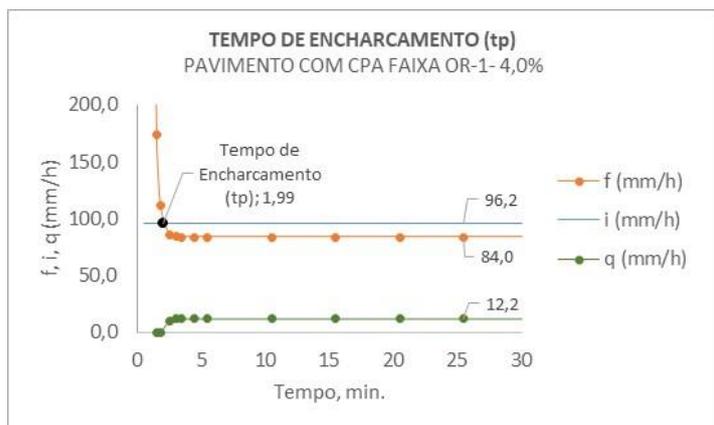
**Figura 85** - Tempo de Encharcamento – CPA Faixa OR-1 – 5,0%



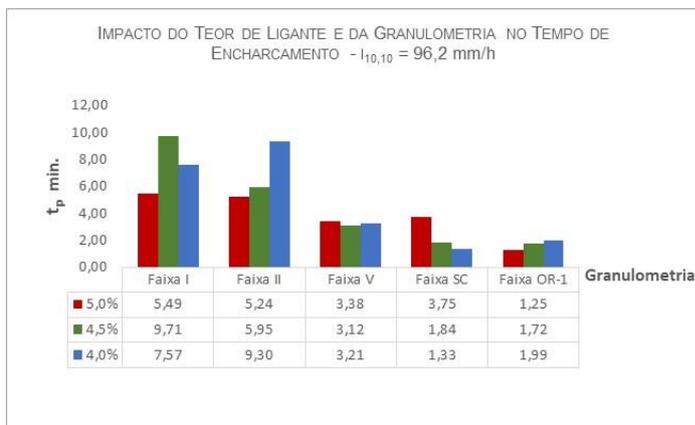
**Figura 86** - Tempo de Encharcamento – CPA Faixa OR-1 – 4,5%



**Figura 87** - Tempo de Encharcamento – CPA Faixa OR-1 – 4,0%



**Figura 88** - Impacto do Teor de Ligante e da Granulometria no Tempo de Encharcamento



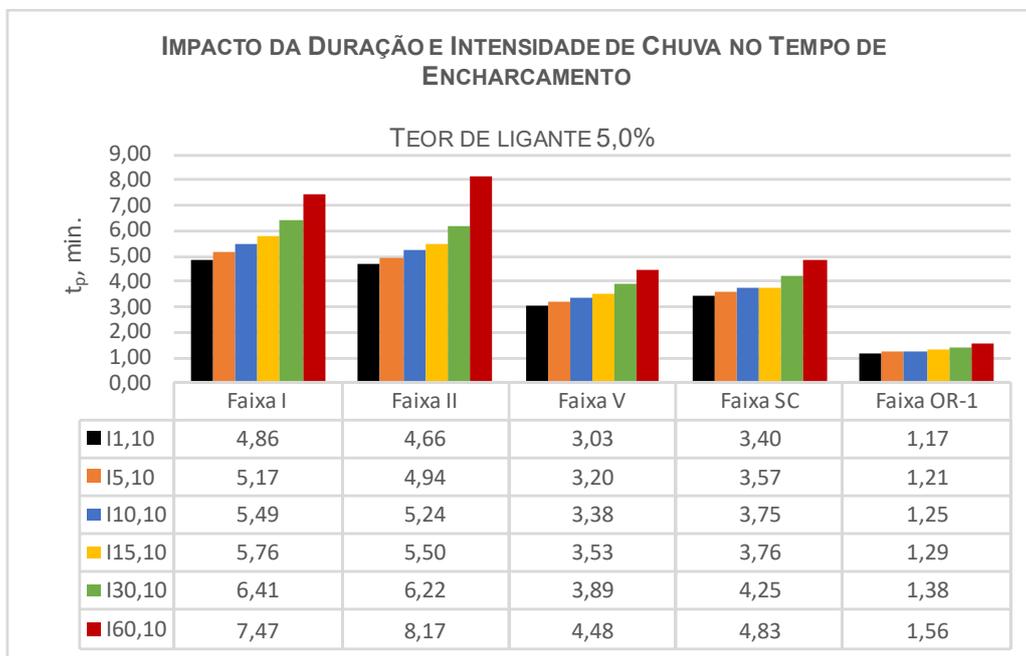
Percebe-se que as estruturas que geraram menores lâminas escoadas foram aquelas cujo revestimento superficial são compostos de misturas CPA com granulometrias da Faixa I, V, SC e OR-1 com teor de ligante de 4,0%, gerando uma lâmina de 12,2 mm/h. Apesar de gerarem a mesma lâmina, o tempo de encharcamento entre essas misturas são diferentes (7,57 min, 3,21 min., 1,33 min. e 1,99 min., respectivamente, de acordo com a Figura 88), pois a granulometria e os vazios comunicantes são determinantes para esta variável, o que explica o menor valor de tempo de encharcamento para a estrutura com CPA da granulometria da Faixa SC, que possui a granulometria mais aberta e o maior volume de vazios comunicantes em relação às demais misturas projetadas, conforme demonstrado na Figura 23 (pág.85). Essa condição contribui para uma maior constante de decaimento da curva de infiltração (k) como também favorece a permeabilidade e a saturação mais rápida do meio poroso, diminuindo, portanto, o tempo para o surgimento da lâmina d'água na superfície. O tempo de encharcamento, portanto, foi mais uma função maximizada durante a otimização multiobjetivo para a seleção dos melhores projetos de CPA baseado no conceito de dominância de soluções.

#### 4.2.3.1. IMPACTO DA DURAÇÃO E INTENSIDADE DE CHUVA NO TEMPO DE ENCHARCAMENTO

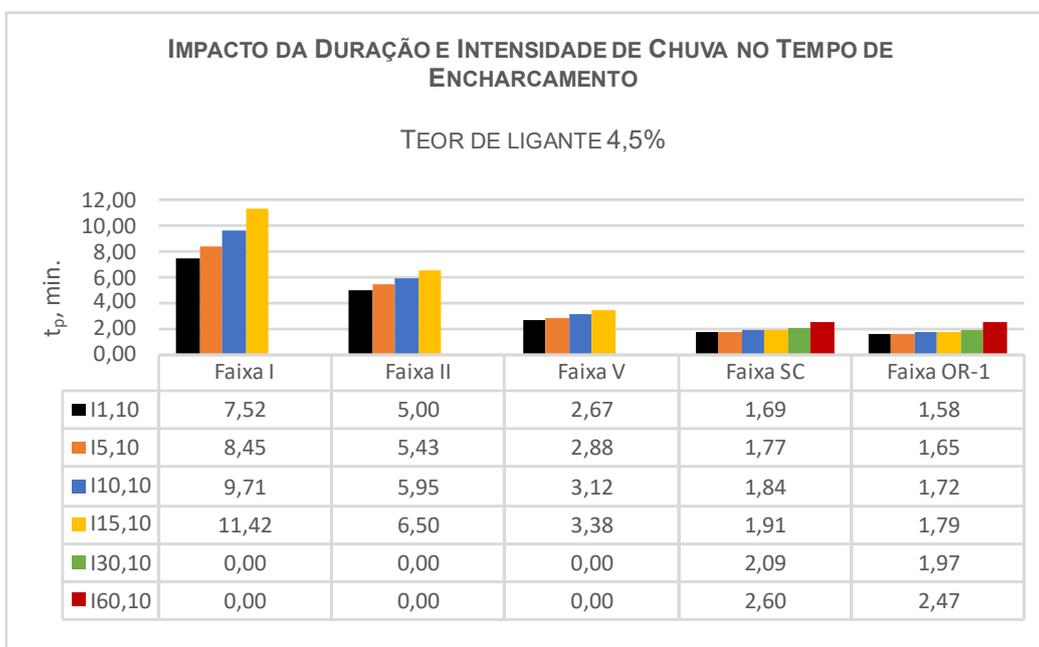
O impacto da duração e intensidade de chuva ( $I_{1,10}$ ,  $I_{5,10}$ ,  $I_{10,10}$ ,  $I_{15,10}$ ,  $I_{30,10}$  e  $I_{60,10}$ ) no tempo de encharcamento das estruturas de camadas sobrepostas estão apresentados nas Figuras 89, 90 e 91. O procedimento de cálculo gerou tabelas

similares à Tabela 10, diferenciando-se entre si apenas nos valores de duração e intensidade de chuva e, conseqüentemente, nos valores de  $t_p$ . Com isso, foi possível gerar os gráficos das Figuras 89 a 91.

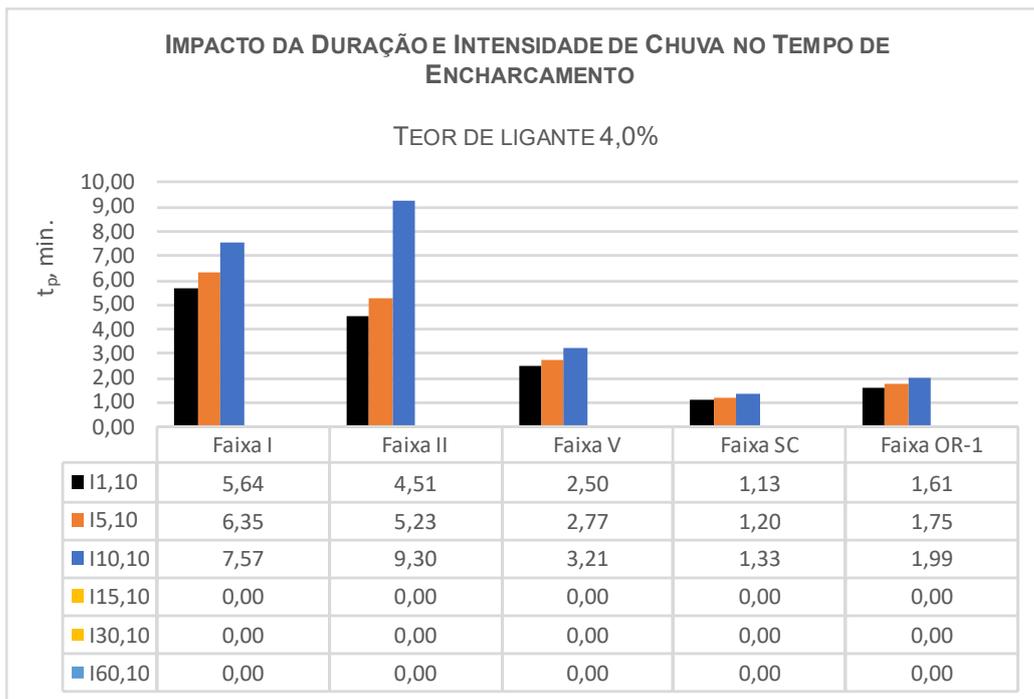
**Figura 89** - Impacto da duração e intensidade de chuva no tempo de encharcamento - Teor de Ligante 5,0%



**Figura 90** - Impacto da duração e intensidade de chuva no tempo de encharcamento - Teor de Ligante 4,5%



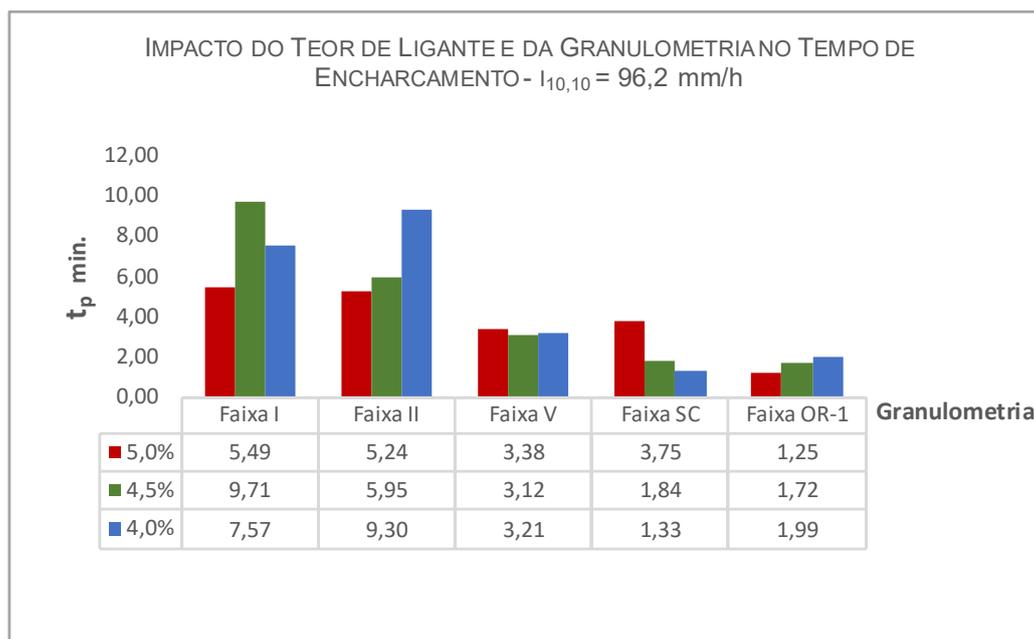
**Figura 91** - Impacto da duração e intensidade de chuva no tempo de encharcamento - Teor de Ligante 4,0%



As figuras apresentam os valores de tempo de encharcamento nos diferentes cenários de duração e intensidade de chuva para cinco estruturas diferentes, que se diferenciam apenas pela granulometria e teor de ligante do revestimento superficial. Por exemplo, a Figura 89 apresenta os valores de  $t_p$  de cinco estruturas de camadas que se diferenciam entre si apenas pela granulometria da mistura CPA que constitui a camada de revestimento superficial, mantendo o teor de ligante de 5,0% no revestimento CPA das cinco estruturas. O mesmo entendimento se aplica às Figuras 90 e 91, diferenciando-se apenas pelo teor de ligante do revestimento, que são de 4,5 e 4,0%, respectivamente.

Pelas figuras supramencionadas, percebe-se que, quanto maior a duração da chuva, maior o tempo de encharcamento da estrutura, visto que a intensidade da chuva diminui, e vice-versa, ou seja, menores durações de chuva oferecem maior intensidade e conseqüentemente menores valores de  $t_p$ . De forma a verificar uma das hipóteses da pesquisa, no que tange aos fatores que mais impactam o tempo de encharcamento, comparou-se os gráficos das Figuras 89 a 91 com o gráfico da Figura 92, que trata da influência do teor de ligante e da faixa granulométrica, considerando a intensidade de chuva constante.

**Figura 92** - Impacto do Teor de Ligante e da Granulometria no Tempo de encharcamento,  $i = 96,2 \text{ mm/h}$



Baseado na Figura 92, a média do tempo de encharcamento ( $t_p$ ) dentre todas as faixas e todos os teores de ligante de todas as estruturas, é de 4,32 min. Com esse mesmo procedimento, para as Figuras 89 a 91, encontra-se um  $t_p$  (médio) de 4,07 min., que equivale a uma diferença percentual de apenas 6%. Portanto, o impacto da variação da duração e intensidade de chuva comparado com o impacto da variação de teores de ligantes e das granulometrias tempo de encharcamento foi praticamente o mesmo, ou seja, os dois fatores impactam da mesma forma o tempo de encharcamento.

Neste caso, deve-se considerar a diferença das espessuras do revestimento CPA e das camadas granulares subjacentes a ela, como também a anisotropia dessas camadas, pois, juntas, têm influências importantes para o tempo de encharcamento. Em todas as estruturas de camadas modeladas, a espessura da camada de revestimento superficial (6,35 cm, em média) é significativamente menor comparada com a espessura total das camadas granulares do modelo reduzido (25 cm, em média).

A condição para a modelagem das estruturas de camadas sobrepostas para simular o pavimento permeável foi a tentativa de manter constantes as espessuras das camadas granulares, a compactação e o tipo de material em cada camada, ou seja, a anisotropia nas camadas subjacentes à CPA, em tese, foi mantida constante. Como demonstrado, não houve variação entre os impactos da variação da duração e

da intensidade de chuva e da variação dos teores de ligantes e das granulometrias das misturas no tempo de encharcamento das estruturas de camadas; portanto, pode-se inferir que, no caso em tela, os fatores que governariam uma variação do tempo de encharcamento seriam, principalmente, as espessuras e a anisotropia das camadas granulares do pavimento permeável.

#### **4.2.4. CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE ÁGUA**

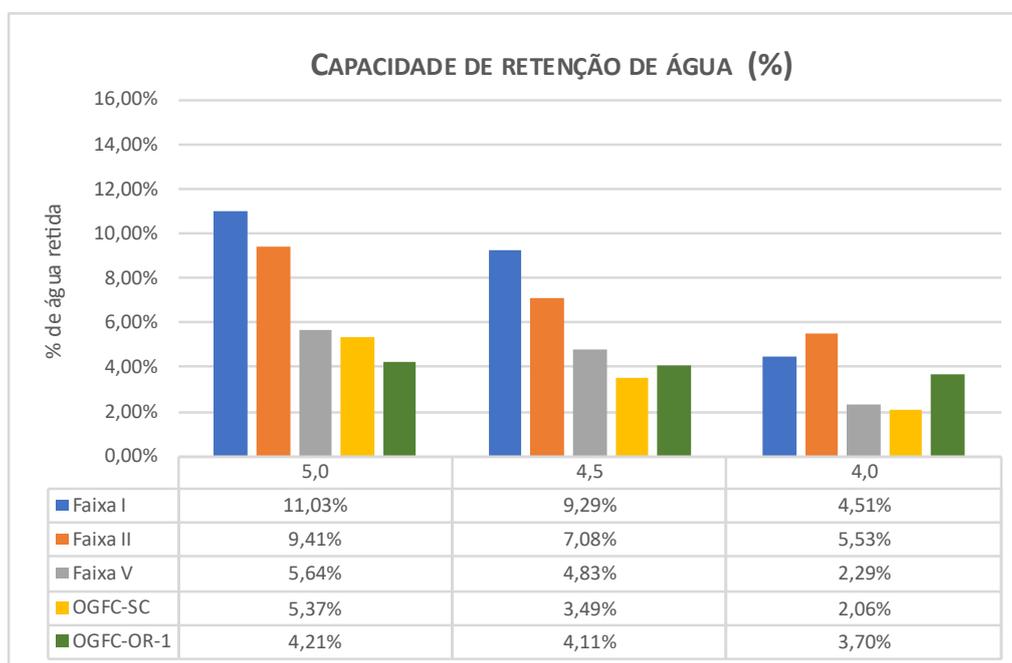
Após submeter-se cada corpo de prova ao simulador de chuva durante 30 minutos, foi possível estimar a quantidade de água retida em cada um deles. Por conta da instabilidade do simulador de chuva, nem sempre foi possível calibrar a mesma intensidade de chuva para os corpos de prova ensaiados. Por esta razão, os resultados foram obtidos em termos de porcentagem de água retida ao invés de volume de água retido.

Os resultados do simulador de chuva estão consolidados na Tabela 11 e na Figura 93. Como era esperado, as misturas das Faixas OGFC-SC e OGFC-OR-1, de granulometrias mais abertas e com maiores volumes de vazios comunicantes, possuem menor capacidade de reter água em relação às misturas de Faixas I e II. Enquanto a relação da capacidade de retenção e vazios comunicantes é inversamente proporcional, a relação da capacidade de retenção e teor de ligante é diretamente proporcional, o que já era esperado, pois observa-se que, quanto maior a concentração de ligante na mistura maior sua capacidade de reter água

**Tabela 11 – Resultados da capacidade de retenção de água**

Faixa	teor de ligante (%)	peso CP Seco (g)	chuva simulada (mm/h)	tempo (min.)	volume Coletado (ml)	Peso CP Úmido (g)	massa água retida (g)	volume retido (ml)	volume infiltrado (ml)	% água retida
I	5,0	1058	119,5	30	250	1089	31,0	31,00	281,00	11,03%
I	4,5	1074	119,5	30	244	1099	25,0	25,00	269,00	9,29%
I	4,0	1055	119,5	30	254	1067	12,0	12,00	266,00	4,51%
II	5,0	1027	112,0	30	154	1043	16,0	16,00	170,00	9,41%
II	4,5	1040	112,0	30	210	1056	16,0	16,00	226,00	7,08%
II	4,0	1045	112,0	30	188	1056	11,0	11,00	199,00	5,53%
V	5,0	1043	124,3	30	368	1065	22,0	22,00	390,00	5,64%
V	4,5	1024	124,3	30	355	1042	18,0	18,00	373,00	4,83%
V	4,0	1036	124,3	30	341	1044	8,0	8,00	349,00	2,29%
SC	5,0	1027	122,2	30	370	1048	21,0	21,00	391,00	5,37%
SC	4,5	972	122,2	30	360	985	13,0	13,00	373,00	3,49%
SC	4,0	1001	122,2	30	380	1009	8,0	8,00	388,00	2,06%
OR-1	5,0	1005	124,3	30	250	1016	11,0	11,00	261,00	4,21%
OR-1	4,5	997	124,3	30	280	1009	12,0	12,00	292,00	4,11%
OR-1	4,0	1015	124,3	30	260	1025	10,0	10,00	270,00	3,70%

**Figura 93 - Capacidade de retenção de água**



### 4.3. RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados da ANOVA (análise de variância) e dos testes de comparação múltipla (*Teste de Tukey*) referente a todos os resultados dos ensaios mecânicos e funcionais de todas as misturas asfálticas concebidas na pesquisa.

#### 4.3.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A análise de variância, apresentada na Tabela 12, resume o efeito dos dois fatores avaliados (faixa granulométrica e teor de ligante) na média dos valores de resistência à tração (RT). Devido ao pressuposto de homogeneidade de variâncias ter sido atendido pelo teste de Levene, obtendo  $valor-p > 0,05$ , foi possível realizar a análise de variância. Segundo a Tabela 12, percebe-se que, pela estatística F, a faixa granulométrica obteve o valor do  $F_{obs}$  (observado) maior do que o  $F_{crítico}$ , portanto, a opção foi rejeitar a Hipótese Nula ( $H_0$ ), a qual considera médias de RT iguais entre os níveis dos fatores de cada grupo. Deste modo, há diferenças estatisticamente significativas, ao nível de significância de 5%, nos resultados de RT quando se considera a variação da faixa de granulometria da mistura. A mesma conclusão acima pode ser evidenciada analisando o  $valor-p$ , que é menor do que 5%, levando-se a optar pela rejeição da hipótese nula.

Quando a fonte de variação é o teor de ligante, as conclusões são diferentes às da faixa granulométrica. Não houve diferenças estatisticamente significativas na RT, ao nível de significância de 5%, quando se considera apenas o efeito do teor de ligante, pois  $F_{obs} < F_{crítico}$  e o  $valor-p > 0,05$ .

A ANOVA permite identificar se há diferenças estatisticamente significativas entre os grupos mas não especifica quais grupos se diferem entre si. Para identificar quais grupos são estatisticamente diferentes, o Teste de Tukey foi aplicado para os resultados de RT. As Tabelas 13 e 14 consolidam os resultados do teste.

**Tabela 12** - ANOVA dos resultados da Resistência à Tração

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	$F_{obs}$	$valor-p$	$F_{crítico}$
Faixa granulométrica	0,16583	4	0,04146	25,96451	0,000123	3,837853
Teor de ligante	0,00069	2	0,00035	0,217119	0,809425	4,45897
Erro	0,01277	8	0,00160			
Total	0,17929	14				

SQ: Soma dos quadrados; gl: Graus de liberdade; MQ: Média dos quadrados

**Tabela 13 - Teste de Tukey para os resultados de RT**

(I) Faixa	(J) Faixa	Diferença de média (I-J)	Desvio padrão	valor-p	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Faixa I	Faixa II	0,020	0,032	0,96	-0,092	0,130
	Faixa V	0,043	0,032	0,68	-0,069	0,156
	Faixa SC	0,290	0,032	0,00	0,177	0,402
	Faixa OR-1	0,076	0,032	0,22	-0,036	0,189
Faixa II	Faixa I	-0,020	0,032	0,96	-0,132	0,092
	Faixa V	0,023	0,032	0,94	-0,089	0,136
	Faixa SC	0,270	0,032	0,00	0,157	0,382
	Faixa OR-1	0,056	0,032	0,46	-0,056	0,169
Faixa V	Faixa I	-0,043	0,032	0,68	-0,156	0,069
	Faixa II	-0,023	0,032	0,94	-0,136	0,089
	Faixa SC	,2467*	0,032	0,00	0,134	0,359
	Faixa OR-1	0,033	0,032	0,83	-0,079	0,146
Faixa SC	Faixa I	-0,290	0,032	0,00	-0,402	-0,177
	Faixa II	-0,270	0,032	0,00	-0,382	-0,157
	Faixa V	-0,246	0,032	0,00	-0,359	-0,134
	Faixa OR-1	-0,213	0,032	0,00	-0,326	-0,100
Faixa OR-1	Faixa I	-0,076	0,032	0,22	-0,189	0,036
	Faixa II	-0,056	0,032	0,46	-0,169	0,056
	Faixa V	-0,033	0,032	0,83	-0,146	0,079
	Faixa SC	0,213	0,032	0,00	0,100	0,326

**Tabela 14 - Médias da RT para os grupos de faixas granulométricas**

Grupo	N	Subconjuntos homogêneos	
		1	2
Faixa SC	3	0,29	
Faixa OR-1	3		0,50
Faixa V	3		0,53
Faixa II	3		0,55
Faixa I	3		0,58
	valor-p	1,000	0,223

Baseado nos resultados da Tabela 13, ao separar os grupos em subconjuntos homogêneos, dois subconjuntos foram criados: o primeiro com apenas o grupo de misturas da Faixa SC e o segundo subconjunto com os demais grupos de faixas granulométricas. De acordo com a Tabela 14, em média, não há diferenças estatisticamente significativas na resistência à tração entre misturas projetadas com curvas granulométricas pertencentes às Faixas OR-1, V, II, e I em um nível de

significância de 5%. Apenas com relação às misturas da Faixa SC que a diferença é significativa.

#### 4.3.2. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

A análise de variância dos módulos de resiliência (MR), apresentada na Tabela 15, resume o efeito dos dois fatores avaliados (faixa granulométrica e teor de ligante) na média dos valores do MR encontrados nesta pesquisa. Foi possível realizar a ANOVA para os resultados do MR devido aos pressupostos de normalidade dos dados e homogeneidade de variâncias terem sido atendidos pelos testes de Shapiro-Wilk e de Levene, respectivamente, obtendo *valor-p* > 0,05 para ambos os testes.

Segundo a Tabela 15, percebe-se que, pela estatística F do teste, a faixa granulométrica obteve o valor do  $F_{obs}$  (observado) maior do que o  $F_{crítico}$  (crítico). Nesta condição, a opção foi rejeitar a Hipótese Nula ( $H_0$ ), a qual considera médias de MR iguais entre os níveis dos fatores de cada grupo. Portanto, há diferenças estatisticamente significativas, ao nível de significância de 5%, nos resultados de MR quando se considera a variação da faixa de granulometria da mistura. A mesma conclusão acima pode ser evidenciada analisando o *valor-p*, que é menor do que 5%. Nesta condição, a opção, forçosamente, foi rejeitar a hipótese nula.

Da mesma forma que ocorreu com a análise de variância da RT, quando a fonte de variação foi o teor de ligante, as conclusões são contrárias às da faixa granulométrica. Não houve diferenças estatisticamente significativas no MR, ao nível de significância de 5%, quando se considera apenas o efeito do teor de ligante, pois  $F_{obs} < F_{crítico}$  e o *valor-p* > 5%.

**Tabela 15** - ANOVA dos resultados de Módulos de Resiliência

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	$F_{obs}$	<i>valor-p</i>	$F_{crítico}$
Faixa granulométrica	1787068,00	4	446767	30,43341	6,87E-05	3,83785
Teor de ligante	32002,1333	2	16001,07	1,08998	0,381396	4,45897
Erro	117441,20	8	14680,15			
Total	1936511,33	14				

SQ: Soma dos quadrados; gl: Graus de liberdade; MQ: Média dos quadrados

Portanto, percebe-se que a granulometria teve mais impacto do que os teores de ligante na variação do módulo de resiliência, conforme demonstrado na Figura 37 e na análise de variância apresentada na Tabela 15. As misturas mais abertas (Faixas

OGFC-SC e OGFC-OR-1), que possuem maiores volume de vazios, apresentaram menores módulos de resiliência do que as misturas projetadas com curvas granulométricas de faixas nacionais (Faixa I, II e V). Este fato indica que a granulometria responde mais pelo comportamento elástico da mistura, pois o ensaio de MR trabalha nesse regime de deformação.

Da mesma forma utilizada para os resultados de RT, para identificar quais grupos são estatisticamente diferentes, o Teste de Tukey foi aplicado para os resultados do MR. A Tabela 16 mostra os resultados do teste. Pela Tabela 16, quando todos os grupos de faixas granulométricas são comparados entre si, a maior diferença entre médias de valores de MR se verifica quando o *valor-p* < 0,05, rejeitando-se, portanto, a Hipótese Nula ( $H_0$ ) e concluindo que, em média, há diferenças estatisticamente significativas do módulo de resiliência entre os grupos comparados.

**Tabela 16** - Teste de Tukey para os resultados de MR

(I) Faixa	(J) Faixa	Diferença de média (I-J)	Desvio padrão	<i>valor-p</i>	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Faixa I	Faixa II	255	98,9	0,16	-86,43	597,10
	Faixa V	514	98,9	0,00	172,22	855,77
	Faixa SC	942	98,9	0,00	600,56	1284,10
	Faixa OR-1	800	98,9	0,00	458,22	1141,77
Faixa II	Faixa I	-255	98,9	0,16	-597,10	86,43
	Faixa V	258	98,9	0,15	-83,10	600,43
	Faixa SC	687	98,9	0,00	345,22	1028,77
	Faixa OR-1	544	98,9	0,00	202,89	886,43
Faixa V	Faixa I	514	98,9	0,00	-855,77	-172,22
	Faixa II	-258	98,9	0,15	-600,43	83,10
	Faixa SC	428	98,9	0,01	86,56	770,10
	Faixa OR-1	286	98,9	0,10	-55,77	627,77
Faixa SC	Faixa I	942	98,9	0,00	-1284,10	-600,56
	Faixa II	687	98,9	0,00	-1028,77	-345,22
	Faixa V	428	98,9	0,01	-770,10	-86,56
	Faixa OR-1	-142	98,9	0,62	-484,10	199,43
Faixa OR-1	Faixa I	800	98,9	0,00	-1141,77	-458,22
	Faixa II	544	98,9	0,00	-886,43	-202,89
	Faixa V	-286	98,9	0,10	-627,77	55,77
	Faixa SC	142	98,9	0,62	-199,43	484,10

Pelos resultados do Teste de Tukey foi possível separar os grupos em subconjuntos homogêneos, em que cada subconjunto contém os grupos que não possuem diferenças estatisticamente significativas entre si, enquanto grupos pertencentes a subconjuntos diferentes possuem diferenças estatisticamente significativas. De acordo com a Tabela 17, quatro subconjuntos homogêneos puderam ser criados, cada um com dois grupos de faixas granulométricas.

**Tabela 17** - Médias do MR para os grupos de faixa granulométrica

Grupo	N	Subconjuntos homogêneos			
		1	2	3	4
Faixa SC	3	928			
Faixa OR-1	3	1071	1071		
Faixa V	3		1357	1357	
Faixa II	3			1616	1616
Faixa I	3				1871
<i>valor-p</i>		0,623	0,108	0,157	0,164

Pela Tabela 17 pode-se fazer as seguintes observações: há grupos pertencentes a apenas um subconjunto e grupos pertencentes a dois subconjuntos homogêneos, simultaneamente. Uma interpretação para a primeira observação é a seguinte: em média, as misturas com granulometrias da Faixa SC possuem diferenças significativas nas médias dos valores de módulos de resiliência das misturas com granulometrias das Faixas V, II e I. Entretanto, essa diferença não se verifica quando são comparadas com as misturas da Faixa OR-1. Da mesma forma, as misturas com granulometrias da Faixa I possuem diferenças significativas nas médias dos módulos de resiliência das misturas com granulometrias das Faixas V, OR-1 e SC, entretanto, essa diferença não se confirma quando são comparadas com as misturas da Faixa II.

Com relação aos grupos pertencentes a dois subconjuntos simultaneamente, pode-se interpretar os resultados da seguinte forma: em média, os módulos de resiliência das misturas com a granulometria da Faixa OR-1, pertencente aos subconjuntos 1 e 2, não diferem significativamente dos módulos das misturas de granulometrias das Faixas SC e V, considerando um nível de significância de 5%. Analogamente, a média dos módulos de resiliência das misturas com a granulometria da Faixa V, que pertencem aos subconjuntos homogêneos 2 e 3, não diferem significativamente dos módulos das misturas de granulometrias das Faixas OR-1 e II. Da mesma forma, a média dos módulos de resiliência das misturas com a

granulometria da Faixa II, dos subconjuntos 3 e 4, não diferem significativamente dos módulos das misturas de granulometrias das Faixas V e da Faixa I.

#### 4.3.3. PERDA DE MASSA CÂNTABRO

A Tabela 18 resume o efeito dos dois fatores avaliados (faixa granulométrica e teor de ligante) na média dos valores da perda de massa após a análise de variância realizada com os resultados dos ensaios em laboratório. O pressuposto de homogeneidade de variâncias foi atendido segundo os resultados do teste de Levene, obtendo *valor-p* > 0,05. Com isso, foi possível realizar a ANOVA para os resultados dos ensaios de perda de massa. Segundo a Tabela 18, percebe-se, pela estatística F, que a faixa granulométrica obteve o valor do  $F_{obs}$  menor do que o  $F_{crítico}$ , impondo, portanto, a aceitação da Hipótese Nula ( $H_0$ ), a qual considera médias de perdas de massa iguais entre os níveis dos fatores de cada grupo. Deste modo, não há diferenças estatisticamente significativas, ao nível de significância de 5%, nos resultados de perdas de massa quando se considera a variação da faixa de granulometria da mistura. A mesma conclusão acima pode ser evidenciada analisando o *valor-p*, que é maior do que 5%, levando-se a optar pela aceitação da hipótese nula.

Entretanto, quando a fonte de variação é o teor de ligante, houve diferenças estatisticamente significativas na perda de massa entre os grupos de misturas, ao nível de significância de 5%, pois  $F_{obs} > F_{crítico}$  e o *valor-p* < 0,05. O Teste de Tukey também foi aplicado para os resultados de perdas de massa. A Tabela 19 e 20 consolidam os resultados do teste.

**Tabela 18** – ANOVA para os resultados de Perda de Massa

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	$F_{obs}$	<i>valor-p</i>	$F_{crítico}$
Faixa granulométrica	288,0307	4	72,00767	3,428909	0,064953	3,837853
Teor de ligante	513,8653	2	256,93267	12,23479	0,003685	4,45897
Erro	168,0013	8	21,00017			
Total	969,8973	14				

SQ: Soma dos quadrados; gl: Graus de liberdade; MQ: Média dos quadrados

**Tabela 19** – Teste de Tukey para a Perda de Massa

(I) Teor de Ligante	(J) Teor de Ligante	Diferença de média (I-J)	Desvio padrão	valor-p	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Teor 4,0%	Teor 4,5%	-8,04	2,89	0,05	-16,32	0,24
	Teor 5,0%	-14,30	2,89	0,00	-22,58	-6,01
Teor 4,5%	Teor 4,0%	8,04	2,89	0,05	-0,24	16,32
	Teor 5,0%	-6,26	2,89	0,13	-14,54	2,02
Teor 5,0%	Teor 4,0%	14,30	2,89	0,00	6,01	22,58
	Teor 4,5%	6,26	2,89	0,13	-2,02	14,54

**Tabela 20** – Médias da Perda de massa para os grupos de teores de ligante

Grupo	N	Subconjuntos homogêneos	
		1	2
Teor 4,0%	5	11,24	
Teor 4,5%	5	19,28	19,28
Teor 5,0%	5		25,54
valor-p		0,05	0,14

De acordo com os resultados da Tabela 19, foi possível obter dois subconjuntos homogêneos, cada um com dois grupos de misturas, conforme apresentado na Tabela 20. O primeiro subconjunto com os teores de ligante de 4,0% e 4,5% e o segundo com o grupo de misturas de teores de 4,5% e 5,0%. Percebe-se, para o nível de significância de 5%, diferenças estatisticamente significativas na perda de massa apenas entre as misturas projetadas com teores de ligante de 4,0% e 5,0%. Segundo a Tabela 20, não se evidenciam diferenças significativas de perdas de massa das misturas com teor de ligante de 4,5% em relação às demais, visto que estas misturas estão presentes, simultaneamente, nos dois subconjuntos homogêneos, 1 e 2.

#### 4.3.4. DANO POR UMIDADE INDUZIDA

Quanto à análise de variância, a Tabela 21 apresenta os resultados obtidos para a Relação de Resistência à Tração Retida (RRT). A condição de normalidade dos dados e homogeneidade de variâncias foram atendidos após a aplicação dos testes de Shapiro-Wilk e de Levene, respectivamente, obtendo  $valor-p > 0,05$  para ambos os casos. Portanto, foi possível realizar a ANOVA para os resultados do ensaio.

Segundo a Tabela 21, o  $F_{obs}$  (observado) foi maior do que o  $F_{crítico}$  quando a

fonte de variação é a faixa granulométrica, levando à rejeição da Hipótese Nula ( $H_0$ ), a qual considera médias iguais de RRT entre os níveis dos fatores do grupo. Da mesma forma, o *valor-p* < 5% ratifica a rejeição a hipótese nula. Portanto, há diferenças estatisticamente significativas, ao nível de significância de 5%, nos resultados de RRT quando se considera como fonte de variação a faixa de granulometria das misturas. Entretanto, quando a fonte de variação é o teor de ligante, não houve diferenças estatisticamente significativas na RRT entre os grupos de misturas, ao nível de significância de 5%, pois  $F_{obs} < F_{crítico}$  e o *valor-p* > 0,05.

**Tabela 21** – ANOVA para os resultados da Relação de Resistência à Tração Retida (RRT)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	$F_{obs}$	<i>valor-p</i>	$F_{crítico}$
Faixa granulométrica	788,40	4	197,100	7,1934	0,0092	3,8378
Teor de ligante	106,13	2	53,066	1,936	0,2060	4,458
Erro	219,20	8	27,400			
Total	1113,7333	14				

Os resultados do Teste de Tukey aplicado para os resultados de RRT para o fator Faixa de Granulometria estão apresentados nas Tabela 22 e 23. De posse dos resultados do teste, apresentados na Tabela 22, foi possível separar dois subconjuntos homogêneos quanto às médias da RRT, conforme apresentados na Tabela 23. O primeiro subconjunto informa que, em média, as misturas das Faixas V, II, OR-1 e I não possuem diferenças significativas de RRT, enquanto o subconjunto 2, mostra que, da mesma forma, as misturas das Faixas OR-1 e I não são estatisticamente diferentes às misturas da Faixa SC, quanto às médias de RRT. As únicas diferenças estatisticamente significativas na média de RRT estão entre as misturas das Faixas V e SC e entre as misturas da Faixas II e SC.

**Tabela 22 – Teste de Tukey para os resultados de RRT**

(I) Faixa	(J) Faixa)	Diferença de média (I-J)	Desvio padrão	valor-p	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Faixa I	Faixa II	10,00	4,27	0,22	-4,76	24,76
	Faixa V	12,333	4,27	0,10	-2,43	27,09
	Faixa SC	-7,666	4,27	0,43	-22,43	7,09
	Faixa OR-1	6,3333	4,27	0,59	-8,43	21,09
Faixa II	Faixa I	-10,00	4,27	0,22	-24,76	4,76
	Faixa V	2,33	4,27	0,97	-12,43	17,09
	Faixa SC	-17,66	4,27	0,02	-32,43	-2,90
	Faixa OR-1	-3,666	4,27	0,90	-18,43	11,09
Faixa V	Faixa I	-12,33	4,27	0,10	-27,09	2,43
	Faixa II	-2,33	4,27	0,97	-17,09	12,43
	Faixa SC	-20,00	4,27	0,01	-34,76	-5,23
	Faixa OR-1	-6,00	4,27	0,64	-20,76	8,76
Faixa SC	Faixa I	7,66	4,27	0,43	-7,09	22,43
	Faixa II	17,66	4,27	0,02	2,90	32,43
	Faixa V	20,00	4,27	0,01	5,23	34,76
	Faixa OR-1	14,00	4,27	0,06	-0,76	28,76
Faixa OR-1	Faixa I	-6,333	4,27	0,59	-21,09	8,43
	Faixa II	3,6666	4,27	0,90	-11,09	18,43
	Faixa V	6,00	4,27	0,64	-8,76	20,76
	Faixa SC	-14,00	4,27	0,06	-28,76	0,76

**Tabela 23 – Médias da RRT para os grupos de faixa granulométrica**

Grupo	N	Subconjuntos homogêneos	
		1	2
Faixa V	3	78,33	
Faixa II	3	80,66	
Faixa OR-1	3	84,33	84,33
Faixa I	3	90,66	90,66
Faixa SC	3		98,33
valor-p		0,11	0,06

#### 4.3.5. PERMEABILIDADE

Os resultados da ANOVA para o ensaio de permeabilidade estão apresentados na Tabela 24 visto que os pressupostos de normalidade dos dados e homogeneidade de variâncias foram confirmados pelos testes de Shapiro-Wilk e de Levene, respectivamente. Segundo a Tabela 24, percebe-se que houve diferenças estatisticamente significativas, para o nível de significância de 5%, entre as médias dos coeficientes de permeabilidade (K) dos grupos para as duas fontes de variação, a faixa granulométrica e o teor de ligante. Os valores da estatística  $F_{obs}$  para ambas as fontes foram maiores do que o  $F_{crítico}$  assim como os valores-p foram menores do que 5%, indicando, portanto, a rejeição da Hipótese Nula ( $H_0$ ).

**Tabela 24** – ANOVA para os resultados de permeabilidade

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	$F_{obs}$	valor-p	$F_{crítico}$
Faixa granulométrica	3,03	4	0,758	18,11	0,0004	3,84
Teor de ligante	2,25	2	1,126	26,89	0,00028	4,46
Erro	0,33	8	0,041			
Total	5,62	14				

Como houve diferença estatisticamente significativa para ambas as fontes de variação, a comparação múltipla do Teste de Tukey foi aplicada tanto para o fator faixa granulométrica como para fator teor de ligante. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 25 e 26. Os resultados das Tabelas 25 e 26 permitiram classificar os respectivos grupos em subconjuntos homogêneos, de acordo com as Tabelas 27 e 28.

**Tabela 25** – Teste de Tukey para a permeabilidade (K) – Grupo Faixa Granulométrica

(I) Faixa	(J) Faixa)	Diferença de média (I-J)	Desvio padrão	valor-p	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Faixa I	Faixa II	0,04	0,17	0,99	-0,53	0,61
	Faixa V	0,028	0,17	1,00	-0,54	0,60
	Faixa SC	-1,11	0,17	0,00	-1,69	-0,53
	Faixa OR-1	-0,49	0,17	0,10	-1,06	0,08
Faixa II	Faixa I	-0,04	0,17	0,99	-0,61	0,53
	Faixa V	-0,01	0,17	1,00	-0,58	0,56
	Faixa SC	-1,15	0,17	0,00	-1,73	-0,57
	Faixa OR-1	-0,5	0,17	0,07	-1,10	0,04
Faixa V	Faixa I	-0,028	0,17	1,00	-0,60	0,54
	Faixa II	0,01	0,17	1,00	-0,56	0,58
	Faixa SC	-1,14	0,17	0,00	-1,71	-0,56
	Faixa OR-1	-0,51	0,17	0,08	-1,09	0,05
Faixa SC	Faixa I	1,11	0,17	0,00	0,53	1,69
	Faixa II	1,15	0,17	0,00	0,57	1,73
	Faixa V	1,14	0,17	0,00	0,56	1,71
	Faixa OR-1	0,62	0,17	0,03	0,04	1,20
Faixa OR-1	Faixa I	0,49	0,17	0,10	-0,08	1,06
	Faixa II	0,53	0,17	0,07	-0,04	1,11
	Faixa V	0,51	0,17	0,08	-0,05	1,09
	Faixa SC	-0,62	0,17	0,03	-1,20	-0,046

**Tabela 26** – Teste de Tukey para a permeabilidade (K) – Grupo Teor de Ligante

(I) Teor de Ligante	(J) Teor de Ligante	Diferença de média (I-J)	Desvio padrão	valor-p	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Teor 4,0%	Teor 4,5%	-0,53	0,13	0,00	-0,90	-0,16
	Teor 5,0%	-0,94	0,13	0,00	-1,31	-0,57
Teor 4,5%	Teor 4,0%	0,53	0,13	0,00	0,16	0,90
	Teor 5,0%	-0,41	0,13	0,03	-0,78	-0,04
Teor 5,0%	Teor 4,0%	0,94	0,13	0,00	0,57	1,31
	Teor 4,5%	0,41	0,13	0,03	0,04	0,78

**Tabela 27-** Médias de K para os grupos de faixas granulométricas

Grupo	N	Subconjuntos homogêneos	
		1	2
Faixa II	3	1,46	
Faixa V	3	1,47	
Faixa I	3	1,50	
Faixa OR-1	3	1,99	
Faixa SC	3		2,61
<i>valor-p</i>		0,073	1,00

**Tabela 28 –** Médias de K para os grupos de teores de ligante

Grupo	N	Subconjuntos homogêneos		
		1	2	3
Teor 4,0%	5	1,31		
Teor 4,5%	5		1,85	
Teor 5,0%	5			2,26
<i>valor-p</i>		1,00	1,00	1,00

A Tabela 27 demonstra que não há diferenças estatisticamente significativas para as médias dos coeficientes de permeabilidade entre as misturas dos grupos das Faixas II, V, I e OR-1, pois todas estão presentes no mesmo subconjunto homogêneo. Apenas as misturas do grupo da Faixa SC, pertencente ao subconjunto 2, possui coeficiente de permeabilidade significativamente diferente das misturas das outras faixas granulométricas, ao nível de significância de 5%. Com relação à Tabela 28, cada grupo de teor de ligante foi colocado em subconjuntos diferentes entre si, indicando que as misturas com concentrações de ligante diferentes possuem coeficientes de permeabilidade significativamente diferentes, ao nível de significância de 5%.

#### 4.3.6. CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO

Os resultados da análise de variância para a capacidade de infiltração estão apresentados na Tabela 29 devido ao pressuposto de homogeneidade de variâncias ter sido confirmado pelo Teste de Levene. Pelos resultados, apenas o fator teor de ligante contribuiu para variações estatisticamente significativas nas médias dos valores do coeficientes de infiltração, para um nível de significância de 5%. Tal afirmação é confirmada pelos resultados da estatística F, onde o  $F_{obs} > F_{crítico}$  e pelo

$valor-p < 0,05$ .

**Tabela 29** – ANOVA dos resultados de capacidade de infiltração ( $f_c$ )

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F <sub>obs</sub>	valor-p	F <sub>crítico</sub>
Faixa granulométrica	537,6	4	134,4	1,473	0,296	3,837
Teor de ligante	8702,4	2	4351,2	47,710	3,58E-05	4,458
Erro	729,6	8	91,2			
Total	9969,6	14				

Como houve diferenças estatisticamente significativas das médias dos coeficientes de infiltração para o teor de ligante, o Teste de Tukey foi aplicado aos resultados de forma a determinar os grupos que se diferenciam entre si. Os resultados estão apresentados na Tabelas 30 e 31. A comparação múltipla entre os grupos de teores de ligante apresentados na Tabela 30 demonstra que os grupos possuem, em média, diferenças estatisticamente significativas, para o nível de significância de 5%, nas capacidades de infiltração. Cada grupo é alocado em subconjuntos homogêneos diferentes (Tabela 31), o que indica que nenhum nível do fator teor de ligante possui semelhanças entre si de valores médios da capacidade de infiltração.

**Tabela 30** – Teste de Tukey para a capacidade de infiltração

(I) Teor de Ligante	(J) Teor de Ligante	Diferença de média (I-J)	Desvio padrão	valor-p	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Teor 4,0%	Teor 4,5%	-25,2	6,04	0,00	-42,45	-7,94
	Teor 5,0%	-58,8	6,04	0,00	-76,05	-41,54
Teor 4,5%	Teor 4,0%	25,2	6,04	0,00	7,94	42,45
	Teor 5,0%	-33,6	6,04	0,00	-50,85	-16,34
Teor 5,0%	Teor 4,0%	58,8	6,04	0,00	41,54	76,05
	Teor 4,5%	33,6	6,04	0,00	16,34	50,85

**Tabela 31** – Médias da capacidade de infiltração para os grupos de teores de ligante

Grupo	N	Subconjuntos homogêneos		
		1	2	3
Teor 4,0%	5	27,60		
Teor 4,5%	5		52,80	
Teor 5,0%	5			86,40
valor-p		1,00	1,00	1,00

#### 4.3.7. TEMPO DE ENCHARCAMENTO

Os resultados da análise de variância para o tempo de encharcamento estão apresentados na Tabela 32. Os pressupostos de normalidade de dados e homogeneidade de variâncias foram confirmados pelos Testes de Shapiro-Wilk e de Levene, respectivamente, com *valor-p* > 0,05 para ambos os testes.

**Tabela 32** – ANOVA para os resultados de tempo de encharcamento

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F <sub>obs</sub>	<i>valor-p</i>	F <sub>crítico</sub>
Faixa granulométrica	71,21	4	17,80	5,693	0,018	3,837
Teor de ligante	8,22	2	4,11	1,314	0,320	4,459
Erro	25,01	8	3,12			
Total	104,46	14				

Pela estatística F da ANOVA, em média, os tempos de encharcamento foram estatisticamente diferentes, para o nível de significância de 5%, quando a fonte de variação foi a granulometria, pois  $F_{obs} > F_{crítico}$ . O *valor-p* confirma tal afirmação, pois foi menor do que 0,05. Portanto, as duas métricas impõem a rejeição da Hipótese Nula ( $H_0$ ). Entretanto, quando a fonte de variação é o teor de ligante, não há, em média, diferenças estatisticamente significativas nos tempos de encharcamento. Os resultados do Teste de Tukey para o grupo Faixa Granulométrica estão apresentados nas Tabelas 33 e 34.

**Tabela 33** – Teste de Tukey para o grupo Faixa Granulométrica

(I) Faixa	(J) Faixa)	Diferença de média (I-J)	Desvio padrão	valor-p	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Faixa I	Faixa II	5,31	1,44	0,03	0,32	10,30
	Faixa V	4,44	1,44	0,08	-0,54	9,42
	Faixa SC	5,39	1,44	0,03	0,40	10,38
	Faixa OR-1	6,04	1,44	0,01	1,05	11,02
Faixa II	Faixa I	-5,31	1,44	0,03	-10,30	-0,32
	Faixa V	-0,87	1,44	0,97	-5,86	4,11
	Faixa SC	0,08	1,44	1,00	-4,90	5,06
	Faixa OR-1	0,72	1,44	0,98	-4,26	5,71
Faixa V	Faixa I	-4,44	1,44	0,08	-9,42	0,54
	Faixa II	0,87	1,44	0,97	-4,11	5,86
	Faixa SC	0,95	1,44	0,96	-4,03	5,94
	Faixa OR-1	1,60	1,44	0,79	-3,38	6,58
Faixa SC	Faixa I	-5,39	1,44	0,03	-10,38	-0,40
	Faixa II	-0,08	1,44	1,00	-5,06	4,90
	Faixa V	-0,95	1,44	0,96	-5,94	4,03
	Faixa OR-1	0,64	1,44	0,99	-4,34	5,63
Faixa OR-1	Faixa I	-6,04	1,44	0,01	-11,02	-1,05
	Faixa II	-0,73	1,44	0,98	-5,71	4,26
	Faixa V	-1,60	1,44	0,79	-6,58	3,38
	Faixa SC	-0,65	1,44	0,99	-5,63	4,34

**Tabela 34** – Médias dos Tp para os grupos de faixas granulométricas

Grupo	N	Subconjuntos homogêneos	
		1	2
Faixa OR-1	3	1,67	
Faixa SC	3	2,32	
Faixa II	3	2,4	
Faixa V	3	3,27	3,27
Faixa I	3		7,71
<i>valor-p</i>		0,79	0,08

Segundo os resultados da comparação múltipla entre os grupos de faixas granulométricas apresentados na Tabela 33, foi possível classificá-los em dois subconjuntos homogêneos, conforme demonstrado na Tabela 34. Percebe-se que apenas o grupo de misturas da Faixa I possui, em média, diferenças estatisticamente significativas nos tempos de encharcamento, ao nível de significância de 5%, em relação aos demais grupos, exceto para o grupo da Faixa V, pois este é o único grupo

que não possui diferenças significativas no tempo de encharcamento entre todos os demais, pois faz parte dos dois subconjuntos homogêneos, simultaneamente.

#### 4.3.8. CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE ÁGUA

Os pressupostos para a aplicação da ANOVA aos resultados da capacidade de retenção de água quanto à normalidade de dados e homogeneidade de variâncias foram confirmados pelos testes de Shapiro-Wilk e de Levene, respectivamente, obtendo *valor-p* > 0,05 para ambos os testes. Os resultados da ANOVA estão apresentados na Tabela 35. Pode-se observar que há diferenças estatisticamente significativas, para o nível de significância de 5%, nas médias da capacidade de retenção de água das misturas CPA para os dois fatores avaliados (faixa granulométrica e teor de ligante) pois a estatística  $F_{obs} > F_{crítico}$ , aliada ao resultado do *valor-p* < 0,05 para ambos os fatores, impõem a rejeição da Hipótese Nula ( $H_0$ ), que prevê médias iguais para as variáveis.

**Tabela 35** – ANOVA para a capacidade de retenção de água

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	$F_{obs}$	<i>valor-p</i>	$F_{crítico}$
Faixa granulométrica	55,017	4	13,754	10,16	0,003	3,837
Teor de Ligante	31,364	2	15,682	11,58	0,004	4,458
Erro	10,827	8	1,353			
Total	97,209	14				

Como houve diferenças significativas nas médias da capacidade de retenção de água para ambos os fatores, o Teste de Tukey foi aplicado para comparação múltipla entre os grupos de faixas granulométricas e de teores de ligante de forma a identificar e classificar os grupos em subconjuntos homogêneos. O resultados estão apresentados nas Tabelas 36 e 37. Os resultados permitiram classificar os respectivos grupos em subconjuntos homogêneos, de acordo com as Tabelas 38 e 39 a seguir.

**Tabela 36** – Teste de Tukey para a capacidade de retenção - Grupo Faixa Granulométrica

(I) Faixa	(J) Faixa	Diferença de média (I-J)	Desvio padrão	valor-p	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Faixa I	Faixa II	0,93	0,95	0,85	-2,34	4,21
	Faixa V	4,02	0,95	0,01	0,74	7,30
	Faixa SC	4,63	0,95	0,00	1,35	7,91
	Faixa OR-1	4,27	0,95	0,01	0,98	7,55
Faixa II	Faixa I	-0,93	0,95	0,85	-4,21	2,34
	Faixa V	3,08	0,95	0,06	-0,19	6,36
	Faixa SC	3,70	0,95	0,02	0,41	6,98
	Faixa OR-1	3,33	0,95	0,04	0,05	6,61
Faixa V	Faixa I	-4,02	0,95	0,01	-7,30	-0,74
	Faixa II	-3,08	0,95	0,06	-6,36	0,19
	Faixa SC	0,61	0,95	0,96	-2,66	3,89
	Faixa OR-1	0,24	0,95	0,99	-3,03	3,52
Faixa SC	Faixa I	-4,63	0,95	0,00	-7,91	-1,35
	Faixa II	-3,70	0,95	0,02	-6,98	-0,41
	Faixa V	-0,61	0,95	0,96	-3,89	2,66
	Faixa OR-1	-0,36	0,95	0,99	-3,64	2,91
Faixa OR-1	Faixa I	-4,27	0,95	0,01	-7,55	-0,98
	Faixa II	-3,33	0,95	0,04	-6,61	-0,05
	Faixa V	-0,24	0,95	0,99	-3,52	3,03
	Faixa SC	0,36	0,95	0,99	-2,91	3,64

**Tabela 37** – Teste de Tukey para capacidade de retenção - Grupo Teor de Ligante

(I) Teor de Ligante	(J) Teor de Ligante	Diferença de média (I-J)	Desvio padrão	valor-p	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Teor 4,0%	Teor 4,5%	1,37	0,73	0,21	-0,73	3,47
	Teor 5,0%	3,51	0,73	0,00	1,41	5,61
Teor 4,5%	Teor 4,0%	-1,37	0,73	0,21	-3,47	0,73
	Teor 5,0%	2,14	0,73	0,04	0,03	4,24
Teor 5,0%	Teor 4,0%	-3,51	0,73	0,00	-5,61	-1,41
	Teor 4,5%	-2,14	0,73	0,04	-4,24	-0,03

**Tabela 38** – Médias da Capacidade de retenção para os grupos de faixa granulométricas

Grupo	N	Subconjuntos homogêneos		
		1	2	3
Faixa SC	3	3,64		
Faixa OR-1	3	4,0		
Faixa V	3	4,2	4,25	
Faixa II	3		7,34	7,34
Faixa I	3			8,27
valor-p		0,96	0,06	0,85

**Tabela 39** – Médias da capacidade de retenção para os grupos de teores de ligante

Grupo	N	Subconjuntos homogêneos	
		1	2
Teor 5,0%	5	3,61	
Teor 4,5%	5		5,76
Teor 4,0%	5		7,13
<i>valor-p</i>		1,00	0,21

A Tabela 38 indica que não há diferenças estatisticamente significativas para as médias das capacidades de retenção de água entre as misturas dos grupos das Faixas SC, OR-1 e V. Os grupos da Faixa V e da Faixa II estão presentes em dois subconjuntos homogêneos, simultaneamente, portanto, o grupo da Faixa V também não possui diferenças significativas nas médias da capacidade de retenção de água, ao nível de significância de 5%, com o grupo da Faixa II. Este, como também pertence ao subconjunto homogêneo 2, também não possui diferenças significativas, ao nível de significância de 5%, entre as médias da capacidade de retenção das misturas do grupo da Faixa I.

Com relação à Tabela 39, percebe-se que o grupo de misturas com teor de ligante de 5,0% possui, em média, diferenças estatisticamente significativas, ao nível de significância de 5%, com os grupos de misturas com teores de ligante de 4,5 e 5,0%. Entretanto, estes dois grupos, como fazem parte de um mesmo subconjunto homogêneo, não possuem diferenças entre as médias das capacidades de retenção das misturas a eles pertencentes.

#### **4.3.9. CONSOLIDAÇÃO DOS RESULTADOS ESTATÍSTICOS**

De forma a consolidar os resultados da análise estatística, a Tabela 40 traz um resumo de todas as propriedades (mecânicas e funcionais) que possuem, ou não, diferenças estatisticamente significativas nas médias de seus grupos, ao nível de significância de 5%, com base nos dois fatores de variação considerados, a faixa granulométrica e o teor de ligante. Percebe-se que, para a maioria das propriedades avaliadas, a granulometria influencia mais do que o teor de ligante nas médias dos respectivos valores dessas propriedades das misturas asfálticas porosas concebidas nesta pesquisa. Apenas duas propriedades funcionais, a permeabilidade e a capacidade de retenção de água, possuem médias de valores influenciados tanto pelo granulometria quanto pelo teor de ligante. Nas demais propriedades funcionais, assim

como em todas as propriedades mecânicas, a situação é diferente. Ora a granulometria quem contribui para a variação significativa nas médias dos valores dessas propriedades, ora o teor de ligante quem desempenha este papel, conforme demonstrado na Tabela 40.

**Tabela 40** - Consolidação dos resultados da análise estatística pelo *valor-p*

Propriedade Mecânica/Funcional	<i>valor-p</i>		Médias dos grupos possuem diferenças estatisticamente significativa ao nível de 5%?	
	Fonte de variação (fator)		Fonte de variação (fator)	
	Faixa granulométrica	Teor de ligante	Faixa granulométrica	Teor de ligante
Resistência à tração	< 0,05	> 0,05	sim	não
Módulo de resiliência	< 0,05	> 0,05	sim	não
Perda de massa	> 0,05	< 0,05	não	sim
Dano por umidade induzida	< 0,05	> 0,05	sim	não
Permeabilidade	< 0,05	< 0,05	sim	sim
Capacidade de infiltração	> 0,05	< 0,05	não	sim
Tempo de encharcamento	< 0,05	> 0,05	sim	não
Capacidade de retenção	< 0,05	< 0,05	sim	sim

#### 4.4. RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO

Embora a análise de variância tenha demonstrado que as médias de algumas propriedades mecânicas e funcionais não possuíam diferenças estatisticamente significativas entre os níveis de um determinado fator, seja ele a faixa granulométrica ou o teor de ligante da mistura, tal constatação não foi evidenciada para os dois fatores simultaneamente. Portanto, nenhuma propriedade mecânica e funcional avaliada foi descartada durante o processo de otimização.

Em contrapartida, o modelo de otimização utilizado, baseado no algoritmo *FNDS*, não considera a significância estatística durante o processo de busca, de tal modo que o critério de dominância avalia apenas se uma solução domina outra por meio da comparação das funções-objetivo, por menor que seja essa diferença. Portanto, na análise dos resultados de alguns cenários, avaliou-se a qualidade das soluções considerando a significância estatística dos resultados.

##### 4.4.1. CENÁRIO 1 – OBJETIVOS MECÂNICOS E FUNCIONAIS

Os resultados do algoritmo *FNDS* para o Cenário 1 estão apresentados nos Quadros 6 e 7. Pelo Quadro 6, o modelo classificou todas as 15 soluções do *Espaço de Decisão S* em apenas duas fronteiras de dominância. Conforme já definido na revisão de literatura, as fronteiras de dominância referem-se ao conjunto de soluções (dominadas ou não dominadas) em um problema de otimização multiobjetivo. Quando as soluções são não-dominadas elas formam a denominada Fronteira de Pareto, que representa os melhores *trade-offs* entre os objetivos.

Para o cenário em tela, a maioria das soluções foi de soluções não-dominadas, quando se considera todos os objetivos (mecânicos e funcionais) como funções-objetivo independentes a otimizar. Das 15 soluções  $x_j$  disponíveis, 12 foram alocadas na Fronteira 1, portanto, classificadas como as soluções não-dominadas ou soluções ótimas para o cenário. Para este cenário, o espaço dos objetivos é multidimensional ( $\Omega \in \mathbb{R}^8$ ), portanto, não foi possível gerar as fronteiras para visualizá-las graficamente.

De forma inequívoca, a chance de haver muitas soluções não-dominadas, considerando a otimização de todas as funções objetivo simultaneamente, era muito grande, haja vista o restrito espaço de decisão disponível e o número relativamente grande de funções a avaliar. Portanto, as únicas soluções, totalmente dominadas em

todas as funções, simultaneamente, foram as soluções  $x_8$ ,  $x_9$  e  $x_{14}$ , as quais foram distribuídas na Fronteira 2. De acordo com o Quadro 2 (pág.108), estas soluções correspondem às misturas CPA Faixa V, 4,5%, CPA Faixa V, 4,0% e a OGFC OR-1, 4,5%,

O Quadro 7 identifica quais soluções (misturas) da Fronteira 1 dominaram as misturas supramencionadas em todas as funções-objetivos avaliadas. A solução  $x_8$  (CPA Faixa V 4,5%) é dominada duas vezes: uma pela solução  $x_2$  (CPA Faixa I, 4,5%) e outra pela solução  $x_5$  (CPA Faixa II, 4,5%). A mistura que corresponde à solução  $x_3$  (CPA Faixa I, 4,0%) domina duas misturas ao mesmo tempo, as correspondentes às soluções  $x_9$  (CPA Faixa V, 4,0%) e  $x_{14}$  (OGFC OR-1, 4,5%).

**Quadro 6** – Soluções por fronteira Cenário 1

Cenário	Solução $x_i$	Fronteira	
		1	2
1	$x_1$	Red	
	$x_2$	Red	
	$x_3$	Red	
	$x_4$	Red	
	$x_5$	Red	
	$x_6$	Red	
	$x_7$	Red	
	$x_8$		Blue
	$x_9$		Blue
	$x_{10}$	Red	
	$x_{11}$	Red	
	$x_{12}$	Red	
	$x_{13}$	Red	
	$x_{14}$		Blue
	$x_{15}$	Red	

**Quadro 7** – Conjunto de soluções dominadas Cenário 1

$p$	$S_p$ - Conjunto de soluções dominadas por $p$														
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
$x_1$															
$x_2$							✓								
$x_3$								✓						✓	
$x_4$															
$x_5$							✓								
$x_6$															
$x_7$															
$x_8$															
$x_9$															
$x_{10}$															
$x_{11}$															
$x_{12}$															
$x_{13}$															
$x_{14}$															
$x_{15}$															
$n_p$	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	1	0

$n_p$ : número de vezes que  $p$  é dominado

Pelos resultados do Quadro 7, percebe-se a forma como o algoritmo *FNDS* trabalha o conceito de dominância. Na verdade, não é a quantidade de soluções  $x_j$  dominadas por uma solução  $x_i$  (*Conjunto  $S_p$* ) que determina o seu grau de dominância, ou seja, a fronteira a que pertence, mas o número de vezes que a solução  $x_i$  é dominada, ou seja, o seu valor de  $n_p$ . Quando  $n_p = 0$ , nenhuma solução domina a solução que se encontra nesta condição, portanto, esta fará parte da primeira fronteira, a das soluções não-dominadas.

De acordo com o Quadro 7, o número de vezes que as soluções  $x_8$ ,  $x_9$  e  $x_{14}$

foram dominadas, ou seja, seus valores de  $n_p$ , foram 2, 1 e 1, respectivamente, ou seja, como  $n_p$  é diferente de zero, essas soluções não podem estar na primeira fronteira, pois são soluções dominadas. Por outro lado, as soluções que as dominam ( $x_2$ ,  $x_3$  e  $x_5$ ) possuem  $n_p = 0$  e, portanto, estão na primeira fronteira. Todavia, as demais soluções do *Espaço de Decisão S* também pertencem à primeira fronteira, mesmo não dominando nenhuma solução, sobretudo porque nenhuma delas é dominada por nenhuma outra, pois seus  $n_p = 0$ . Portanto, o que determina se uma solução  $x_i$  é não-dominada é o seu valor de  $n_p$ , não importando a quantidade de soluções  $x_j$  que a solução  $x_i$  domina.

Outra forma de confirmar esta observação é avaliando o conjunto  $S_p$  das soluções. Conforme o Quadro 7, a solução  $x_3$  domina duas soluções, ou seja,  $S_p(x_3) = \{x_9, x_{14}\}$  e as soluções  $x_2$  e  $x_5$  dominam apenas a solução  $x_8$ , portanto,  $S_p(x_2) = \{x_8\}$  e  $S_p(x_5) = \{x_8\}$ . Observa-se, então, que a solução  $x_3$  domina mais soluções do que as soluções  $x_2$  e  $x_5$ , entretanto, todas pertencem à mesma fronteira (Fronteira 1), já que todas têm o valor  $n_p = 0$ . Contudo, por dominar mais soluções, a solução  $x_3$  pode estar localizada na região mais centralizada na fronteira, enquanto as soluções  $x_2$  e  $x_5$  estariam localizadas mais próximas dos extremos.

Para o Cenário 1, o modelo de otimização, a partir do espaço de decisão (soluções) que lhe foi disponibilizado, oferece 13 misturas como alternativas de soluções ótimas para o tomador de decisão (projetista/consultor), o que significa dizer que qualquer uma delas pode ser tomada como uma solução para o problema da forma como foi concebido.

Contudo, para escolher uma solução específica, dentre as não-dominadas, o tomador de decisão pode optar por diferentes critérios, dependendo de informações relevantes ou condições de contorno do problema, como vida útil, vida funcional, clima da região (umidade/temperatura), condições de drenagem da rodovia, etc. e, portanto, atribuir pesos maiores àquela(s) solução(ões) que atenda(m) da melhor forma as necessidades do projeto. Outra alternativa é formular problemas de otimização específicos, considerando essas condições de contorno, e obter as soluções ótimas para cada um deles. Esses cenários específicos também foram avaliados nesta pesquisa e seus resultados serão apresentados e analisados posteriormente.

#### 4.4.2. CENÁRIO 2 – APENAS OBJETIVOS FUNCIONAIS

Os resultados deste cenário estão apresentados nos Quadros 8 e 9. Neste cenário, como já mencionado, reduziu-se o problema a quatro funções-objetivos, sendo todos objetivos funcionais. O objetivos mecânicos foram tratados como restrições normativas a serem atendidas. Entretanto, quando analisou-se os resultados dos ensaios mecânicos, algumas restrições previstas em normas não foram satisfeitas para algumas misturas CPA e OGFC, especificamente quanto à resistência à tração e à perda de massa cântabro. Portanto, estas misturas, em tese, não poderiam participar da seleção multiobjetivo. Entretanto, como o *Espaço de Decisão S* é reduzido (15 misturas no total), estas misturas, em específico, foram colocadas à disposição do modelo de otimização.

**Quadro 8** - Soluções por fronteira Cenário 2

Cenário	Solução	Fronteira	
		1	2
2	$x_1$	1	
	$x_2$	1	
	$x_3$	1	
	$x_4$	1	
	$x_5$	1	
	$x_6$	1	
	$x_7$		2
	$x_8$		2
	$x_9$		2
	$x_{10}$	1	
	$x_{11}$	1	
	$x_{12}$	1	
	$x_{13}$		2
	$x_{14}$		2
	$x_{15}$	1	

**Quadro 9** - Conjunto de soluções dominadas Cenário 2

$p$	$S_p$ - Conjunto de soluções dominadas por $p$														
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
$x_1$															
$x_2$							✓	✓							
$x_3$									✓				✓	✓	
$x_4$															
$x_5$							✓	✓							
$x_6$															
$x_7$															
$x_8$															
$x_9$															
$x_{10}$															
$x_{11}$															
$x_{12}$															
$x_{13}$															
$x_{14}$															
$x_{15}$															
$n_p$	0	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0	0	1	1	0

$n_p$ : número de vezes que  $p$  é dominado

Da mesma forma que o Cenário 1, o algoritmo *FNDS* alocou apenas duas fronteiras de dominância para todas as soluções disponíveis no *Espaço de Decisão S*, contudo, diminuiu-se o número de soluções não-dominadas para dez e aumentou-se para cinco o número de soluções dominadas, conforme demonstrado no Quadro 8. As soluções dominadas  $x_8$ ,  $x_9$  e  $x_{14}$  do problema de otimização do Cenário 1 também são soluções dominadas no Cenário 2, juntamente com as soluções  $x_7$  e  $x_{13}$ , conforme se verifica no Quadro 9. Estas soluções correspondem às misturas CPA Faixa V, 5,0% e

a OGFC Faixa OR-1, 5,0%, respectivamente, de acordo com o Quadro 2.

Analogamente ao cenário anterior, as soluções que dominam as misturas correspondentes às soluções supramencionadas são as misturas representadas pelas soluções não-dominadas  $x_2$ ,  $x_3$  e  $x_5$ , ou seja, as misturas CPA Faixa I, 4,5%, CPA Faixa I, 4,0% e CPA Faixa II, 4,5%, respectivamente. De acordo com as informações do Quadro 9, das dez soluções não-dominadas, sete não dominam nenhuma solução, porém são classificadas como não-dominadas porque não há soluções que as dominem em todas as funções objetivos do problema, ou seja, seus valores de  $n_p$  são iguais a zero. Portanto, dentre as alternativas do *Espaço de Decisão S*, as soluções não -dominadas que otimizam, de uma forma geral, os objetivos funcionais considerados nesta pesquisa, são as misturas apresentadas no Quadro 10.

**Quadro 10** - Resumo das soluções não-dominadas - Cenário 2

<b>Nº</b>	<b>Soluções Não-Dominadas (<math>x_i</math>)</b>	<b>Mistura CPA/OGFC</b>
1	$x_1$	CPA Faixa I, 5,0%
2	$x_2$	CPA Faixa I, 4,5%
3	$x_3$	CPA Faixa I, 4,0%
4	$x_4$	CPA Faixa II, 5,0%
5	$x_5$	CPA Faixa II, 4,5%
6	$x_6$	CPA Faixa II, 4,0%
7	$x_{10}$	OGFC Faixa SC, 5,0%
8	$x_{11}$	OGFC Faixa SC, 4,5%
9	$x_{12}$	OGFC Faixa SC, 4,0%
10	$x_{15}$	OGFC Faixa OR-1, 4,0%

De forma análoga ao Cenário 1, o modelo de otimização, a partir do espaço de decisão disponibilizado, oferece 10 misturas como alternativas de soluções ótimas para o tomador de decisão (projetista/consultor), onde qualquer uma delas pode ser tomada como uma solução para o problema da forma como foi concebido. Assim como o cenário anterior, em termos práticos, a adoção de uma solução específica pelo tomador de decisão – dentre as soluções ótimas disponíveis – dependerá das condições de contorno do problema, atribuindo pesos maiores àquelas soluções que atendem da melhor forma as necessidades do projeto.

#### **4.4.3. CENÁRIO 3 – OBJETIVOS MECÂNICOS E FUNCIONAIS PONDERADOS**

Conforme definido, o Cenário 3 foi concebido considerando duas funções compostas,  $F_1$  e  $F_2$ , sendo a  $F_1$  a função que representa a soma ponderada dos objetivos mecânicos e a  $F_2$  a função que representa a soma ponderada dos objetivos funcionais. Como explicado na metodologia da pesquisa, este cenário foi subdividido nos Cenários 3.1, 3.2 e 3.3.

Os Cenários 3.1 e 3.2 se diferenciam pelas ponderações entres os objetivos mecânicos e funcionais. O Cenário 3.1 considera pesos iguais entre os objetivos mecânicos entre si assim como entre os objetivos funcionais entre si. O Cenário 3.2 têm a mesma configuração do Cenário 3.1, porém, pesos variados entre os objetivos mecânicos e funcionais. O Cenário 3.3 foi aquele em que o problema de otimização foi transformado em um problema mono-objetivo em que a função a ser minimizada foi a soma ponderada entre as duas funções compostas ( $F_1$  e  $F_2$ ).

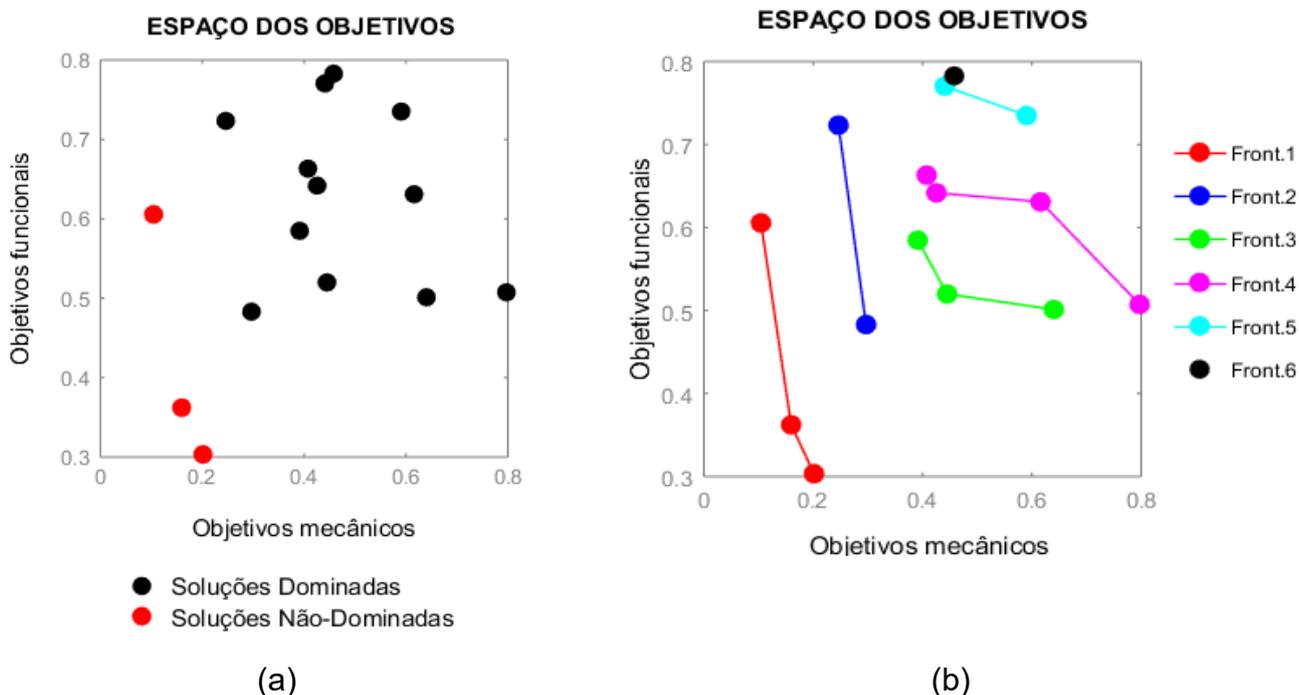
Os resultados estão apresentados nos itens 4.4.3.1, 4.4.3.2 e 4.4.3.3, respectivamente.

##### **4.4.3.1. RESULTADOS DO CENÁRIO 3.1**

Neste cenário, considerou-se a mesma ponderação entre os funções individuais ( $f_k(x_i)$ ), de tal modo que as funções referentes aos objetivos mecânicos e as funções referentes aos objetivos funcionais tivessem o mesmo peso entre si, respectivamente, conforme a Tabela 6. As Figuras 94 (a e b) e os Quadros 11 e 12 apresentam os resultados deste cenário. Como o espaço dos objetivos foi reduzido à duas dimensões ( $\Omega \in \mathbb{R}^2$ ), foi possível visualizar graficamente as soluções não-dominadas e as fronteiras de dominância dos resultados. A Figura 94 (a e b) identifica as soluções não-dominadas e a distribuição das fronteiras de dominância do Cenário 3.1

**Figura 94 - Soluções não-dominadas e distribuição das fronteiras do Cenário 3.1**

Fonte: Autor



**Quadro 11 - Fronteira de cada solução Cenário 3.1**

Cenário	Solução $x_i$	Fronteira					
		1	2	3	4	5	6
3.1	$x_1$	●					
	$x_2$	●					
	$x_3$	●					
	$x_4$		●				
	$x_5$		●				
	$x_6$			●			
	$x_7$				●		
	$x_8$				●		
	$x_9$			●			
	$x_{10}$				●		
	$x_{11}$				●		
	$x_{12}$				●		
	$x_{13}$						●
	$x_{14}$					●	
	$x_{15}$			●			

**Quadro 12 - Conjunto de soluções dominadas Cenário 3.1**

$p$	$S_p$ - Conjunto de soluções dominadas por $p$														
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
$x_1$				✓			✓	✓		✓	✓		✓	✓	
$x_2$				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
$x_3$				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
$x_4$							✓						✓	✓	
$x_5$						✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
$x_6$											✓		✓	✓	
$x_7$													✓		
$x_8$							✓						✓	✓	
$x_9$							✓	✓					✓	✓	
$x_{10}$								✓		✓			✓	✓	
$x_{11}$															
$x_{12}$															
$x_{13}$															
$x_{14}$															
$x_{15}$														✓	
$n_p$	0	0	0	3	2	3	8	5	3	5	6	4	10	9	3

$n_p$ : número de vezes que  $p$  é dominado

De acordo com a Figura 94 (a), o número de soluções não-dominadas é menor à medida que se reduz o número de objetivos para duas funções compostas. O algoritmo distribuiu as soluções ( $x_i$ ) disponíveis no Espaço de Decisão  $S$  entre seis fronteiras de dominância, de acordo a Figura 94 (b). Identificam-se as fronteiras de

cada solução pelo Quadro 11. Percebe-se, para este cenário, que as soluções ótimas (não-dominadas) se restringem apenas a três soluções ( $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ ), que correspondem às misturas CPA da Faixa I, nos teores 5,0%, 4,5% e 4,0%, respectivamente. As demais soluções do *Espaço de Decisão S* foram redistribuídas em mais cinco fronteiras distintas, conforme demonstrados pelo Quadro 11 e pela Figura 94 (b).

De forma objetiva, o que fez com que as misturas CPA da Faixa I fossem as melhores soluções em relação às demais misturas foi a avaliação, pelo modelo de otimização, do valor das funções-objetivo dessas soluções. A proporção de agregados dessas misturas combinada com os teores de ligantes correspondentes proporcionaram propriedades mecânicas e funcionais de tal forma que as somas ponderadas dos objetivos mecânicos e dos objetivos funcionais normalizados, de forma independente, foram minimizadas quando comparada com as das outras misturas. Como se tratam de problemas de minimização de funções, soluções (misturas) que minimizam as funções-objetivo do problema se sobressaem às demais soluções durante o processo de otimização, portanto, estas misturas são as soluções ótimas (não-dominadas) do problema que se deseja resolver.

Outro motivo que ratifica as misturas da Faixa I como soluções ótimas para este cenário são os seus respectivos valores de  $n_p$  iguais a zero, para todas elas, ou seja, as três soluções ( $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ ), que correspondem às misturas da Faixa I, não são dominadas por nenhuma outra solução pertencente ao *Espaço de Decisão S*. Por outro lado, as demais soluções do espaço de decisão possuem  $n_p$  variados, o que explica, em parte, a grande quantidade de fronteiras de dominância.

Além dos valores de  $n_p$ , o conjunto de soluções dominadas por uma solução  $x_i$  ( $S_p(x_i)$ ) também está bem variado entre as soluções, conforme demonstrado pelo Quadro 12, de tal forma que pode-se enfatizar, com maior propriedade, a máxima que, o que determina o grau de dominância (fronteira a qual pertence) de uma solução  $x_i$  não é o seu Conjunto  $S_p(x_i)$ , ou seja, as soluções  $x_j$  que  $x_i$  domina, mas o número de vezes que a solução  $x_i$  é dominada e *por quem ela é dominada*. Por exemplo, observando o Quadro 12, nota-se que as soluções  $x_4$ ,  $x_6$ ,  $x_9$  e  $x_{15}$  possuem o mesmo número de vezes em que são dominadas, ou seja, o mesmo valor  $n_p = 3$ , contudo, cada uma dessas soluções está alocada em fronteiras diferentes. Isso se deve às

soluções que dominam cada uma delas. Por exemplo, as soluções que dominam a solução  $x_4$  são apenas as soluções da Fronteira 1, por esta razão, o modelo alocou  $x_4$  para a fronteira subsequente, que é a Fronteira 2, de acordo com o Quadro 11. A solução  $x_6$ , que tem o mesmo valor de  $n_p$  de  $x_4$ , foi alocada na Fronteira 3, pelo fato de que uma das soluções que a dominam é a solução  $x_5$  e que pertence à Fronteira 2, portanto, de forma inequívoca,  $x_6$  deve pertencer à fronteira subsequente, a Fronteira 3, conforme demonstrado pelo Quadro 11. A mesma análise pode ser estendida para as soluções  $x_9$  e  $x_{15}$ .

Enfim, as soluções não-dominadas do Cenário 3.1 são as misturas CPA da Faixa I, nos teores 5,0%, 4,5% e 4,0%, representadas pelas soluções  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ . Nota-se, até aqui, que estas três soluções são soluções não-dominadas em todos os cenários até então avaliados, pois pertencem à Fronteira 1 de cada um deles.

#### **4.4.3.2. RESULTADOS DO CENÁRIO 3.2**

A principal diferença deste cenário para o Cenário 3.1 foi a ponderação entre os objetivos que compõem cada função composta ( $F_1$  e  $F_2$ ). O critério para atribuição dos pesos de cada objetivo (Tabela 7, pag.113) teve como base os resultados dos ensaios mecânicos e funcionais, a análise de variância e o contexto dos pavimentos permeáveis, onde os objetivos funcionais são mais relevantes durante a concepção do projeto de mistura.

Pelos resultados dos ensaios mecânicos, os resultados da resistência à tração por compressão diametral e a relação de resistência à tração retida do ensaio de suscetibilidade à umidade ou dano por umidade induzida não foram tão diferentes entre as misturas. As médias dos valores também não mostraram diferenças estatisticamente significativas entre os grupos das misturas, conforme demonstrado na análise *pos-hoc* de comparação múltipla (Teste de Tukey), após realizada a análise de variância das médias dessas propriedades mecânicas. Portanto, atribuiu-se um peso de 10% para essas duas funções objetivos que compõem a função composta  $F_1$ .

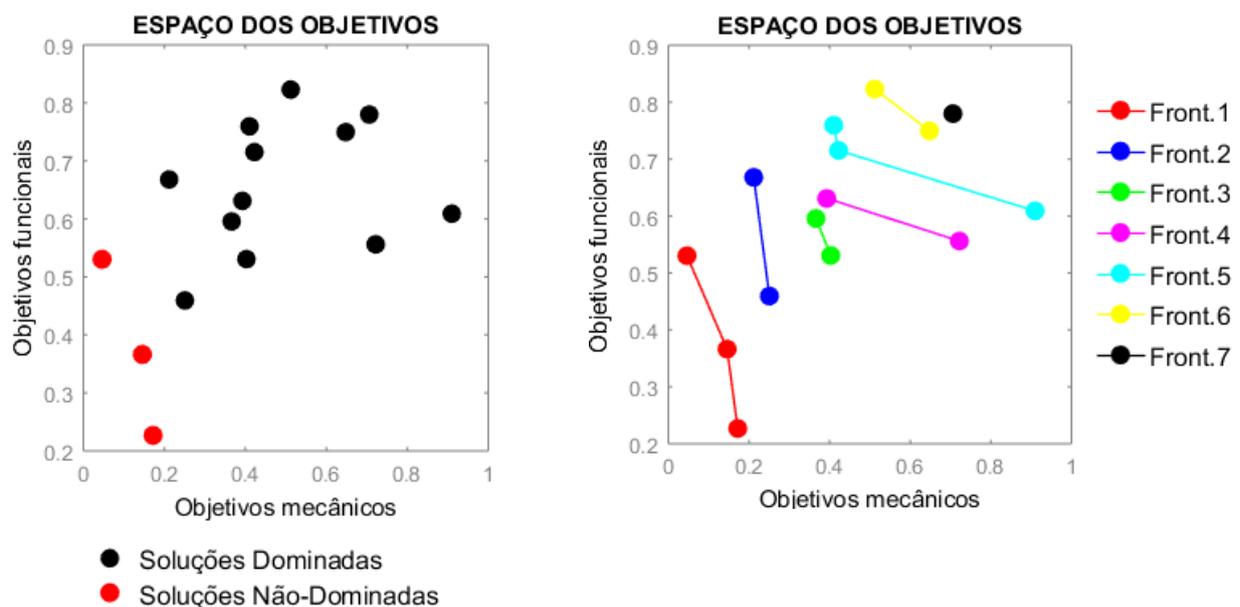
Todavia, os resultados dos ensaios de rigidez e perda de massa foram mais variados entre as 15 misturas CPA/OGFC avaliadas, conforme demonstrado pela análise de variância e pelo teste *pos-hoc*. Portanto, atribuiu-se o maior peso (40%) para cada um desses objetivos pertencentes à função  $F_1$ .

Quanto às ponderações entre os objetivos funcionais que compõem a função  $F_2$ , o menor peso (10%) foi atribuído à permeabilidade, devido à mesma ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade da maioria das misturas, ou seja, sem muitas diferenças significativas nas médias desta variável, conforme demonstrado no Teste de Tukey (Tabela 24, pág.159), onde a maioria das misturas pertence a um mesmo subconjunto homogêneo quanto ao Grupo Faixa Granulométrica.

Com relação aos demais objetivos funcionais (capacidade de infiltração, tempo de encharcamento e capacidade de retenção de cada mistura CPA/OGFC), os resultados foram variados. Foi atribuído um peso maior a estes objetivos em relação ao da permeabilidade. O peso foi de 30%, invariavelmente. Pesos iguais evitam que o modelo, durante o processamento e avaliação das funções-objetivo, favoreça algumas soluções em detrimento de outras. Como, para o problema de otimização do cenário em tela, a ideia é encontrar as melhores misturas considerando a maximização de todos os objetivos funcionais simultaneamente, considerou-se a mesma ponderação.

A Figura 95 (a e b) identifica as soluções não-dominadas e a distribuição das fronteiras de dominância do Cenário 3.2. Assim como no Cenário 3.1, um mesmo padrão foi observado, segundo a Figura 95 (a): quanto menor o número de objetivos, menor o número de soluções não-dominadas e maior o de soluções dominadas. Para o Cenário 3.2, o algoritmo distribuiu as soluções ( $x_i$ ) disponíveis no *Espaço de Decisão S* entre sete fronteiras de dominância, de acordo a Figura 95 (b).

**Figura 95** - Soluções não-dominadas e distribuição das fronteiras do Cenário 3.2  
Fonte: Autor



a)

b)

**Quadro 13** – Fronteira de cada solução  
Cenário 3.2

Cenário	Solução $x_i$	Fronteira							
		1	2	3	4	5	6	7	
3.2	$x_1$	█							
	$x_2$	█							
	$x_3$	█							
	$x_4$		█						
	$x_5$		█						
	$x_6$			█					
	$x_7$				█				
	$x_8$				█				
	$x_9$			█					
	$x_{10}$					█			
	$x_{11}$						█		
	$x_{12}$							█	
	$x_{13}$								█
	$x_{14}$								█
	$x_{15}$								█

**Quadro 14** – Conjunto de soluções dominadas –  
Cenário 3.2

$p$	$S_p$ - Conjunto de soluções dominadas por $p$														
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
$x_1$				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
$x_2$				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
$x_3$				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
$x_4$							✓			✓	✓		✓	✓	
$x_5$							✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
$x_6$							✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓
$x_7$													✓	✓	
$x_8$							✓			✓	✓		✓	✓	
$x_9$							✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	
$x_{10}$											✓		✓	✓	
$x_{11}$														✓	
$x_{12}$															
$x_{13}$															
$x_{14}$															
$x_{15}$													✓		
$n_p$	0	0	0	3	2	3	8	5	4	8	9	7	10	11	5

De acordo com o Quadro 13, as soluções não-dominadas para o Cenário 3.2 foram as mesmas do Cenário 3.1, ou seja, as soluções  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ , que correspondem às misturas CPA da Faixa I, nos teores 5,0%, 4,5% e 4,0%, respectivamente. O Quadro 14 comprova a não dominância das soluções acima pelos respectivos valores de  $n_p$  iguais a zero para cada uma delas.

Os resultados mostrados no Quadro 14 são particularmente interessantes para confirmar, novamente, o que já foi observado durante a análise dos resultados dos cenários anteriores, ou seja, que é o valor de  $n_p$  de uma solução  $x_i$ , e quem a domina, que determinam a fronteira ou o grau de dominância desta solução e não o seu Conjunto  $S_p$ . Por exemplo, pelo Quadro 14, percebe-se, pelo Conjunto  $S_p$  da solução  $x_5$  (Mistura CPA Faixa II, 4,5%), que ela domina o dobro do número de soluções que a solução  $x_4$  (Mistura CPA Faixa II, 5,0%) domina, no entanto, as duas soluções possuem o mesmo grau de dominância já que pertencem à mesma fronteira (Fronteira 2). A razão para pertencerem à mesma fronteira é que as duas soluções ( $x_4$  e  $x_5$ ) são dominadas por soluções com maior grau de dominância em relação a elas e por estas soluções possuírem o mesmo grau de dominância entre si, ou seja, pertencerem à mesma fronteira, no caso, a soluções que as dominam são as soluções  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  que pertencem à Fronteira 1. Não menos importante é observar que não importa se o  $n_p$  de  $x_4$  é maior do que o  $n_p$  de  $x_5$  conforme se observa no Quadro 14, mas o que é

determinante é se as soluções que as dominam possuem um mesmo grau de dominância entre si.

Enfim, em mais um cenário de otimização (Cenário 3.2), as soluções que se sobressaíram, dentro do *Espaço de Decisão S* disponível, foram as referentes às misturas da Faixa I com teores de ligante 5,0, 4,5 e 4,0%. Em termos práticos, até o momento da análise deste e dos cenários anteriores, misturas com graduação aberta semelhantes às misturas da Faixa I e com concentrações de ligantes equivalentes, oferecem as melhores respostas mecânicas e funcionais, de forma simultânea.

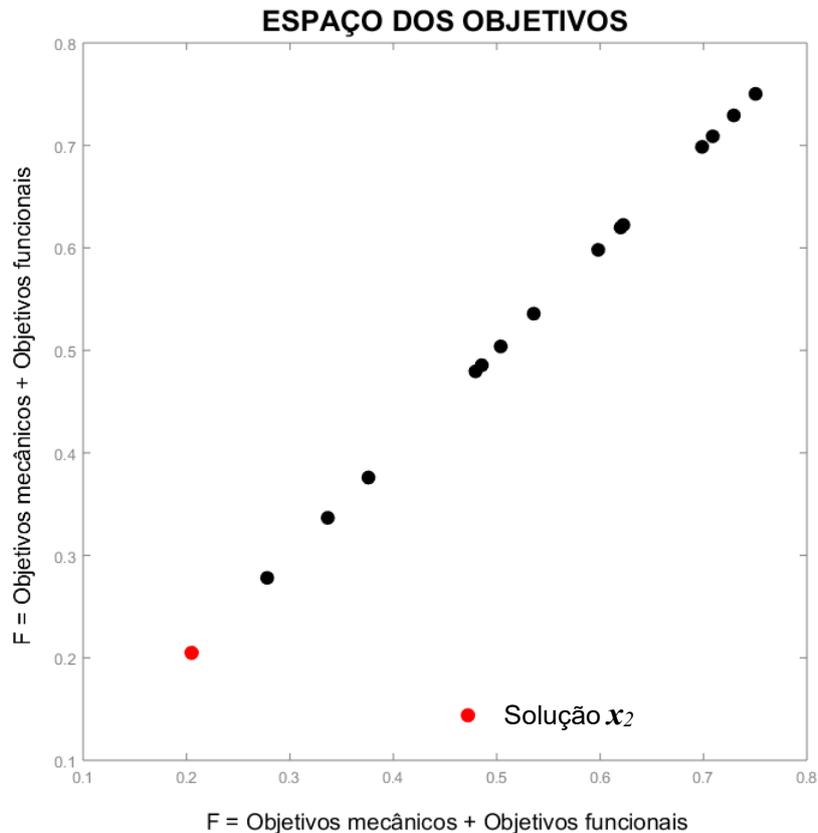
#### **4.4.3.3. RESULTADOS DO CENÁRIO 3.3**

O Cenário 3.3 procurou utilizar a abordagem clássica para resolução de problemas de otimização multiobjetivo transformando-o em um problema mono-objetivo. A função a ser minimizada é a soma ponderada entre os objetivos mecânicos e funcionais, da forma mostrada na Equação 38 (pág.113). Os resultados estão apresentados na Figura 96. A ponderação entre os objetivos procurou priorizar os objetivos funcionais abordados nesta pesquisa, com isso, foi atribuído o peso de 70% para esses objetivos e de 30% para os objetivos mecânicos, como já discutido anteriormente.

Como o problema foi convertido em um problema mono-objetivo, cada solução dentro do *Espaço de Decisão S* possui um valor único de função objetivo ( $F$ ), então, a solução ótima do problema é uma solução única que minimiza a função  $F$ . Portanto, como cada solução  $x_i$  possui um valor de  $F$  específico, o modelo apenas comparou este valor para todas as soluções.

Pela Figura 96, há apenas uma única solução no *Espaço de Decisão S*, a solução  $x_2$ , correspondente à mistura CPA Faixa I, 4,5%.

Figura 96 – Solução do Cenário 3.3



A mistura CPA Faixa I, 4,5% (solução  $x_2$ ) é uma das três soluções não-dominadas mais recorrentes entre os cenários avaliados anteriormente. Ou seja, na prática, ratifica-se o que fora observado nas análises dos resultados do cenário anterior: Até o momento, as misturas de graduação aberta semelhantes às misturas da Faixa I são as que proporcionam, de uma forma geral, o melhor compromisso entre as propriedades mecânicas e funcionais das misturas asfálticas porosas do espaço de decisão disponível.

Este comportamento pode ser atribuído, principalmente, à distribuição e tamanhos dos grãos dessa faixa de granulometria. Dentre todas as faixas, a Faixa I é a que possui a graduação relativamente mais fechada, o que contribui para um maior coesão entre as partículas, que favorece a sua resistência mecânica, porém, sem deixar de garantir uma permeabilidade adequada, que é o principal atributo funcional de uma mistura asfáltica porosa.

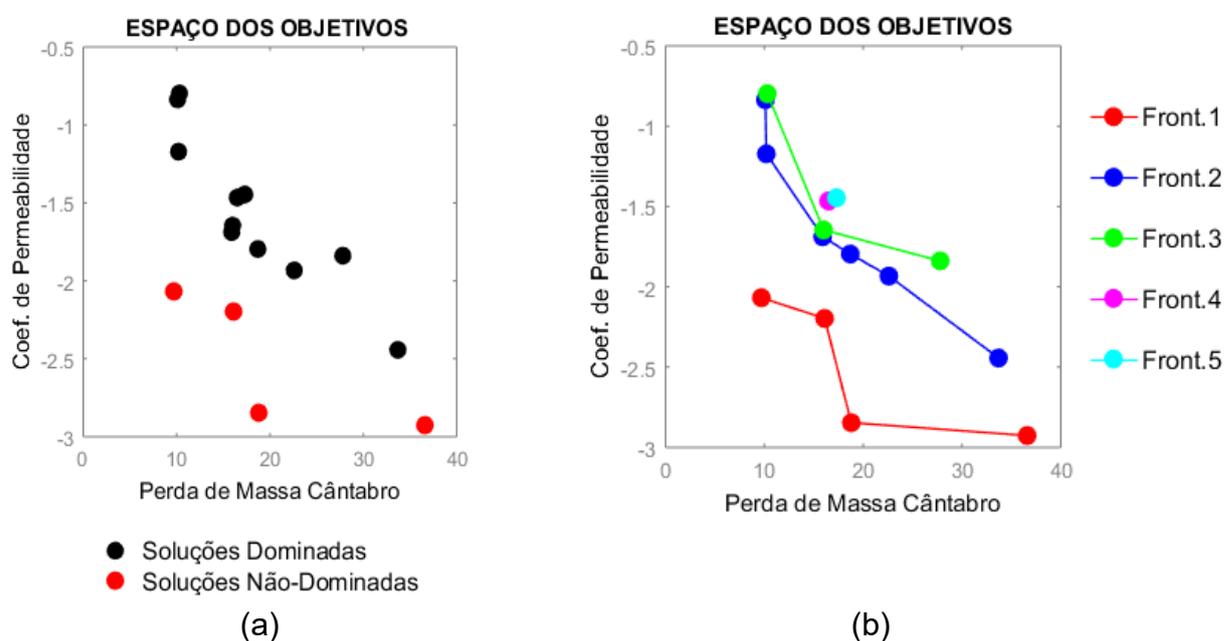
#### 4.4.4. CENÁRIO 4 – SITUAÇÕES ESPECÍFICAS DE OTIMIZAÇÃO – OBJETIVOS CONFLITANTES

Conforme já discutido, este cenário procurou comparar soluções baseadas em situações específicas (durabilidade, clima, condições de drenagem, etc.) em que objetivos notoriamente conflitantes da misturas asfálticas porosas são evidenciados. Os resultados de cada cenário estão apresentados a seguir.

##### 4.4.4.1. RESULTADOS DO CENÁRIO 4.1: PERDA DE MASSA CÂNTABRO X PERMEABILIDADE

A Figura 97 (a e b) e os Quadros 15 e 16 apresentam os resultados fornecidos pelo algoritmo *FNDS*. De acordo com a Figura 97 (a) e o Quadro 15, o modelo alocou quatro soluções não-dominadas na Fronteira 1. As demais soluções (dominadas) foram alocadas em mais quatro fronteiras distintas, conforme demonstrado na Figura 97 (b).

**Figura 97** – Soluções não-dominadas e distribuição das fronteiras do Cenário 4.1  
Fonte: Autor



**Quadro 15** – Fronteira de cada solução  
Cenário 4.1

Cenário	Solução $x_i$	Fronteira				
		1	2	3	4	5
4.1	$x_1$		■			
	$x_2$				■	
	$x_3$	■				
	$x_4$			■		
	$x_5$			■		
	$x_6$		■			
	$x_7$		■			
	$x_8$					■
	$x_9$		■			
	$x_{10}$	■				
	$x_{11}$	■				
	$x_{12}$	■				
	$x_{13}$		■			
	$x_{14}$			■		
	$x_{15}$		■			

**Quadro 16** – Conjunto de soluções  
dominadas - Cenário 4.1

$p$	$S_p$ - Conjunto de soluções dominadas por $p$														
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
$x_1$				✓											
$x_2$								✓							
$x_3$	✓					✓		✓	✓						✓
$x_4$															
$x_5$	✓							✓							
$x_6$															✓
$x_7$				✓											
$x_8$															
$x_9$															
$x_{10}$	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓	
$x_{11}$						✓								✓	✓
$x_{12}$															
$x_{13}$	✓			✓				✓							
$x_{14}$															
$x_{15}$															
$n_p$	1	4	0	3	2	3	1	5	2	0	0	0	1	4	1

De acordo com o Quadro 15, dentre as soluções ótimas (não-dominadas), encontra-se as soluções  $x_3$ ,  $x_{10}$ ,  $x_{11}$  e  $x_{12}$ , que, segundo o Quadro 2, correspondem às misturas CPA Faixa I, 4,0%, OGFC Faixa SC, 5,0%, OGFC SC, 4,5% e a OGFC SC, 4,0%, respectivamente. A não-dominância dessas soluções é confirmada pelos seus respectivos valores de  $n_p$  (iguais a zero) conforme demonstra o Quadro 16.

Neste caso, avaliando-se as soluções pelos critérios de durabilidade e permeabilidade, o tomador de decisão (projetista/consultor) pode optar por qualquer uma das quatro soluções não-dominadas acima, pois todas são soluções ótimas para o problema de otimização concebido. Entretanto, a escolha de uma solução em específico pode depender de condições de contorno do problema. Por exemplo, caso o tomador de decisão esteja em busca de uma mistura para ser aplicada em vias ou rodovias em que a perda de massa por abrasão do revestimento seja um fator limitante (p.ex., nível de tráfego intenso), a escolha mais evidente seria umas das soluções não-dominadas referentes às misturas das Faixas CPA Faixa I 4,0% e OGFC-SC 5,0%, pois demonstraram menores perdas de massa por abrasão em relação a outras soluções (ótimas), e mesmo assim são classificadas como misturas de elevada permeabilidade, de acordo com a Tabela 20.

Segundo a análise de variância, houve diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos valores de perdas de massas ao nível de significância de 5% apenas quando a fonte de variação é o teor de ligante. Quanto à

faixa granulométrica a diferença entre as médias é insignificante.

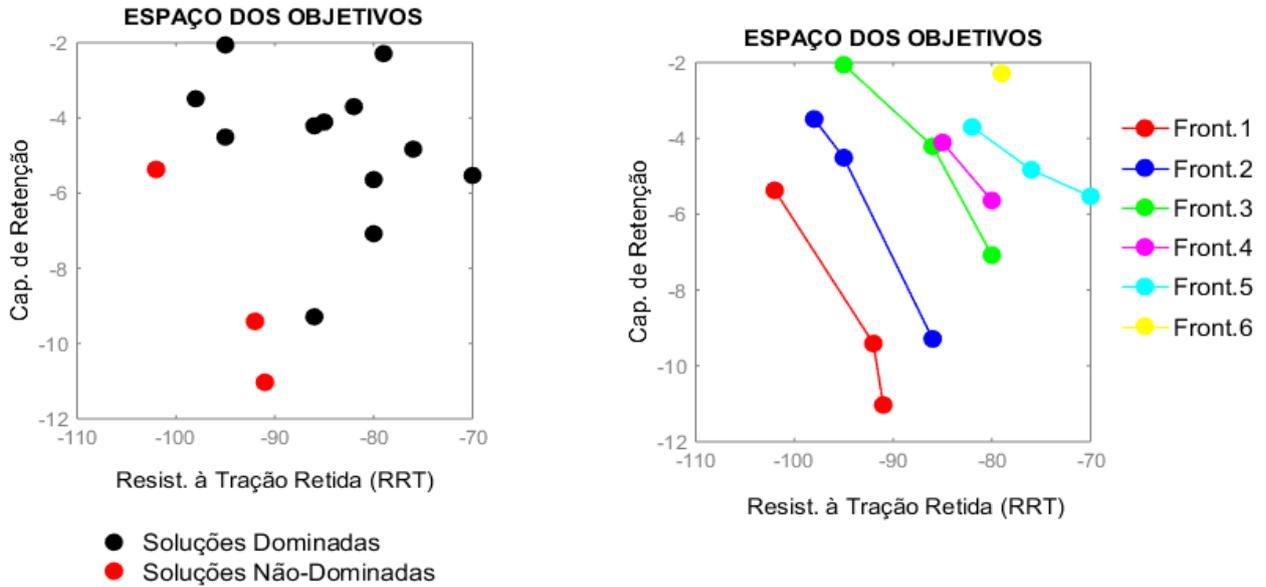
De acordo com os resultados do Teste de Tukey apresentados nas Tabelas 15 e 16, as misturas com teores de ligante de 4,0 e 5,0% fazem partes de subconjuntos homogêneos diferentes, portanto, havendo diferenças significativas entre as médias de perdas de massa entre elas. Diante disto, como a pretensão é minimizar a perda de massa, a solução ótima mais evidente a ser escolhida seria a mistura OGFC-SC 5,0%.

#### **4.4.4.2. RESULTADOS DO CENÁRIO 4.2: CAP. RETENÇÃO X RELAÇÃO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO RETIDA**

A Figura 98 (a e b) e os Quadros 17 e 18 apresentam os resultados do cenário em tela. Quando o objetivo é maximizar a capacidade de retenção e a relação de resistência à tração retida, ao mesmo tempo, apenas três soluções não-dominadas do *Espaço de Decisão S* são encontradas, as soluções  $x_1$ ,  $x_4$  e  $x_{10}$ , que correspondem às misturas CPA Faixa I, 5,0%, CPA Faixa II, 5,0% e OGFC Faixa SC, 5,0%. As demais soluções foram alocadas em outras cinco fronteiras distintas conforme ilustrado pela Figura 98 (b).

Como já descrito na metodologia, este cenário tem como condições de contorno (fatores limitantes) a variabilidade climática da região, principalmente em relação às condições de umidade e temperatura. A suscetibilidade à umidade e aos efeitos das altas temperaturas na mistura são determinantes para a escolha de soluções que respondam de forma satisfatória a essa condição. Misturas porosas relativamente mais fechadas e com menores volumes de vazios são as candidatas às soluções deste cenário. Explica-se, portanto, porque as soluções ótimas foram as misturas da Faixa I e II, com teores de ligante de 5,0%, pois são as que possuem as granulometrias relativamente mais fechadas diante da demais e com os menores volumes de vazios.

**Figura 98** - Soluções não-dominadas e distribuição das fronteiras do Cenário 4.2  
 Fonte: Autor



**Quadro 17** – Fronteira de cada solução  
 Cenário 4.2

Cenário	Solução $x_i$	Fronteira					
		1	2	3	4	5	6
4.2	$x_1$	█					
	$x_2$		█				
	$x_3$		█				
	$x_4$	█					
	$x_5$			█			
	$x_6$					█	
	$x_7$				█		
	$x_8$					█	
	$x_9$						█
	$x_{10}$	█					
	$x_{11}$		█				
	$x_{12}$			█			
	$x_{13}$			█			
	$x_{14}$				█		
	$x_{15}$					█	

**Quadro 18** – Conjunto de soluções dominadas -  
 Cenário 4.2

$p$	$S_p$ - Conjunto de soluções dominadas por $p$														
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
$x_1$	✓				✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓
$x_2$					✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓
$x_3$									✓			✓	✓	✓	✓
$x_4$	✓				✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓
$x_5$					✓	✓	✓	✓							
$x_6$															
$x_7$					✓		✓	✓							
$x_8$															
$x_9$															
$x_{10}$		✓					✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
$x_{11}$									✓			✓			
$x_{12}$															
$x_{13}$									✓				✓	✓	
$x_{14}$									✓					✓	
$x_{15}$									✓						
$n_p$	0	2	1	0	3	5	4	6	11	0	1	3	5	6	7

O fato da mistura OGFC Faixa SC, 5,0% ter sido uma das soluções não-dominadas foi devido à mistura ter a maior relação de resistência à tração retida (RRT) dentre todas as outras misturas, contudo, a RRT obtida foi questionada na análise de resultados por ter sido maior do que 100%. Portanto, as soluções ótimas (não-dominadas) mais evidentes para este cenário são as misturas CPA Faixa I, 5,0% e CPA Faixa II, 5,0%.

Ao se considerar a significância estatística dos resultados da capacidade de retenção para as duas misturas (CPA Faixa I, 5,0% e CPA Faixa II, 5,0%), não há diferenças estatisticamente significativas, ao nível de significância de 5%, entre as médias desse atributo, conforme se verifica na Tabela 38, considerando o grupo Faixa Granulométrica, pois as duas faixas fazem parte de um mesmo subconjunto homogêneo dentre os que podem ser formados após o Teste de Tukey. Neste caso, quanto à capacidade de retenção, qualquer uma das misturas pode ser selecionada, já que possuem o mesmo teor de ligante.

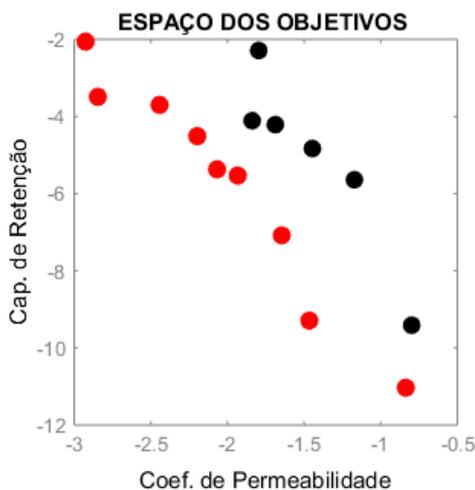
Quanto à suscetibilidade à umidade, também não há diferenças estatisticamente significativas, ao nível de 5%, nas médias desse atributo entre as duas misturas, pois as duas faixas também fazem parte de um mesmo subconjunto homogêneo após o teste *post-hoc* de comparação múltipla (Teste de Tukey), conforme se verifica na Tabela 19. Portanto, qualquer uma das soluções não-dominadas, seja a CPA Faixa I, 5,0% e CPA Faixa II, 5,0%, pode ser uma solução para o cenário em tela.

#### **4.4.4.3. RESULTADOS DO CENÁRIO 4.3: PERMEABILIDADE X CAP. DE RETENÇÃO**

Os resultados da otimização para este cenário estão apresentados na Figura 99 e nos Quadros 19 e 20. Quando o critério de avaliação é a capacidade de retenção x permeabilidade da mistura asfáltica, 9 das 15 soluções disponíveis no *Espaço de Decisão S* são soluções ótimas (não-dominadas) e pertencem à primeira fronteira, de acordo com a Figura 99 (a e b) e o Quadro 19.

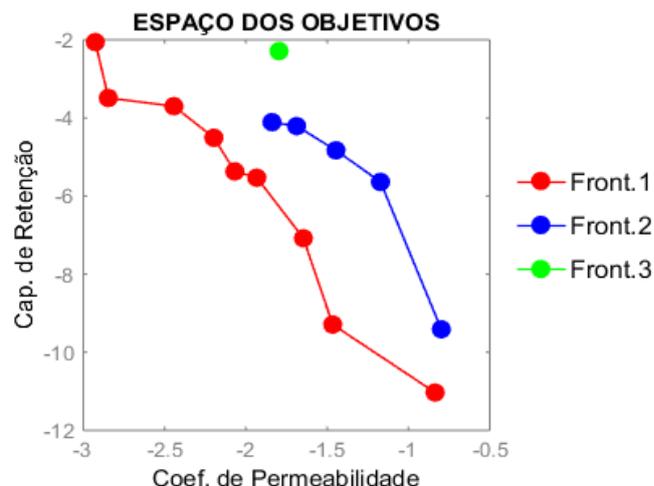
**Figura 99** — Soluções não-dominadas e distribuição das fronteiras do Cenário 4.3

Fonte: Autor



● Soluções Dominadas  
● Soluções Não-Dominadas

(a)



(b)

**Quadro 19** - Fronteira de cada solução - Cenário 4.3

Cenário	Solução $x_i$	Fronteira		
		1	2	3
4.3	$x_1$	1		
	$x_2$	1		
	$x_3$	1		
	$x_4$		2	
	$x_5$	1		
	$x_6$	1		
	$x_7$		2	
	$x_8$		2	
	$x_9$			3
	$x_{10}$	1		
	$x_{11}$	1		
	$x_{12}$	1		
	$x_{13}$		2	
	$x_{14}$		2	
	$x_{15}$	1		

**Quadro 20** - Conjunto de Soluções dominadas - Cenário 4.3

$p$	$S_p$ - Conjunto de soluções dominadas por $p$														
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$
$x_1$				✓											
$x_2$							✓	✓							
$x_3$									✓				✓	✓	
$x_4$															
$x_5$							✓	✓							
$x_6$								✓	✓				✓	✓	
$x_7$															
$x_8$															
$x_9$															
$x_{10}$									✓	✓			✓	✓	
$x_{11}$										✓					
$x_{12}$															
$x_{13}$															
$x_{14}$											✓				
$x_{15}$											✓				
$n_p$	0	0	0	1	0	0	2	4	6	0	0	0	3	3	0

O Quadro 21 identifica as soluções não-dominadas neste cenário. De acordo ele, todas as misturas da Faixa I e Faixa SC, com teores de ligante 5,0, 4,5 e 4,0%, são soluções ótimas para o problema, pois são as misturas que possuem as maiores capacidades de retenção e de permeabilidade, respectivamente.

**Quadro 21** - Identificação das soluções não-dominadas – Cenário 4.3

<b>Nº</b>	<b>Soluções Não-Dominadas (<math>x_i</math>)</b>	<b>Mistura CPA/OGFC</b>
1	$x_1$	CPA Faixa I, 5,0%
2	$x_2$	CPA Faixa I, 4,5%
3	$x_3$	CPA Faixa I, 4,0%
4	$x_5$	CPA Faixa II, 4,5%
5	$x_6$	CPA Faixa II, 4,0%
6	$x_{10}$	OGFC Faixa SC, 5,0%
7	$x_{11}$	OGFC Faixa SC, 4,5%
8	$x_{12}$	OGFC Faixa SC, 4,0%
9	$x_{15}$	OGFC Faixa OR-1, 4,0%

Como se trata de objetivos conflitantes e o objetivo é maximizar essas propriedades, simultaneamente, uma solução com maior permeabilidade obviamente não terá a maior capacidade de retenção, e vice-versa. Portanto, a escolha de uma das soluções ótimas (não-dominadas), neste cenário específico, também vai depender das necessidades de projeto.

O revestimento a ser selecionado pode depender das condições de drenagem superficial da rodovia (presença de sarjetas, valetas, descidas d'água, etc.). Se estes dispositivos respondem bem às vazões de projeto as quais foram dimensionados, então revestimentos porosos com maiores coeficientes de permeabilidades, como os das Faixa SC ou OR-1, podem ser soluções em potencial. De acordo com o Teste de Tukey, há significância estatística das médias dos coeficientes de permeabilidade entre esses dois grupos de faixa granulométrica, portanto, a mistura OGFC Faixa SC, 4,0% seria a solução melhor avaliada.

Contudo, se a drenagem superficial da rodovia estiver subdimensionada, um revestimento que retenha mais água e que alivie estes dispositivos seria uma escolha mais apropriada para minimizar o problema de alagamentos da superfície do pavimento, portanto, de acordo com a Figura 93, que demonstra as capacidades de retenção de água de cada mistura, as misturas do tipo CPA da Faixa I ou II seriam as alternativas mais apropriadas. A Tabela 38 alerta que as misturas pertencentes a essas faixas granulométricas não possuem diferenças significativas nas médias das capacidades de retenção de água, contudo, a Tabela 39 indica que as misturas com teores de ligantes de 5,0% possuem diferenças significativas nas médias deste

atributo, ao nível de significância de 5%, com misturas dos grupos de teores de 4,0 e 4,5%. Portanto, a solução não-dominada mais apropriada, para esta situação, é a mistura CPA Faixa I, 5,0%.

#### **4.5. INDICATIVO DE MISTURAS ASFÁLTICAS POROSAS EM SITUAÇÕES ESPECÍFICAS BASEADO NOS RESULTADOS DA PESQUISA**

Numa abordagem generalizada, do ponto de vista qualitativo e a nível de anteprojecto, é possível apontar uma ou mais alternativas para a concepção de misturas asfálticas porosas baseando-se na selecção óptima realizada nesta pesquisa. Desde que as condições de contorno do problema sejam as mesmas dos problemas multiobjectivos concebidos para realizar a selecção, como o clima da região, nível de tráfego e condições de drenagem superficial da rodovia, é possível indicar alternativas de misturas para cada situação. O Quadro 22 foi desenvolvido com base nas soluções óptimas dos problemas multiobjectivos elaborados durante a pesquisa e indicam as misturas mais apropriadas para cada situação específica em função das condições de contorno consideradas.

**Quadro 22** - Indicação de misturas asfálticas porosas em situações específicas das condições de contorno do problema

CONDIÇÃO DE CONTORNO (FATOR LIMITANTE)	SITUAÇÃO ESPECÍFICA	Solução ( $x_i$ )	ID Solução ( $x_i$ ) Mistura CPA/ OGFC)
1. NÍVEL DE TRÁFEGO	Intenso	$x_{10}$	OGFC SC, 5,0%
	Médio	$x_3$	CPA Faixa I, 4,0%
	Leve	$x_{11}$	OGFC SC 4,5%
2. PLUVIOSIDADE	Alta	$x_1, x_4$	CPA Faixa I, 5,0% ou CPA Faixa II,
	Baixa	$x_1$	CPA Faixa I, 5,0%
3. TEMPERATURA	Alta	$x_1$	CPA Faixa I, 5,0%
	Baixa	-	Nenhuma
4. DRENAGEM SUPERFICIAL DA RODOVIA	Boas condições	$x_{12}$	OGFC Faixa SC, 4,0%
	Más condições	$x_1$	CPA Faixa I, 5,0%

De acordo com o Quadro 22, quando a situação específica e a condição de contorno são a intensidade e o nível de tráfego, respectivamente, a situação é preocupante, pois condições de tráfego intenso podem resultar em desgastes superficiais do revestimento poroso e a redução da sua funcionalidade. Portanto, a solução mais adequada para um tráfego intenso, dentro das alternativas disponíveis para a seleção, é a mistura OGFC SC com teor de ligante de 5,0%, em virtude desta ter obtido a menor perda por abrasão e oferecer uma elevada permeabilidade. Esta mistura é uma das soluções não-dominadas do Cenário 4.1. Além dela, o modelo ofereceu mais três soluções não-dominadas para este cenário. Apesar de obterem perdas de massa maiores, os valores estão dentro dos limites aceitáveis pelas normas, de tal modo que podem ser indicadas para níveis de tráfego menores. Pela ordem de grandeza das perdas de massa, a mistura CPA Faixa I com teor de ligante 4,0% poderia ser indicada para a situação de nível de tráfego médio e a mistura OGFC SC, com teor de ligante 4,5%, para vias com nível de tráfego leve, conforme apresentado no Quadro 22.

Em regiões de alta pluviosidade, misturas asfálticas abertas têm maiores chances de reterem água no interior dos vazios não conectados, ficando mais suscetíveis à umidade. Neste caso, de acordo com o Quadro 22, duas soluções foram

propostas para otimizar esses dois atributos, que são as misturas CPA das Faixas I e II, com teores de ligante de 5,0%, por possuírem as melhores respostas em termos de capacidade de retenção e dano por umidade. Para a situação oposta, de baixa pluviosidade, dentre as duas soluções não-dominadas, a mistura que possui granulometria relativamente mais fechada e com uma quantidade mínima de vazios pode oferecer mais resistência aos esforços mecânicos provenientes do tráfego. A mistura CPA Faixa I, como teor de 5,0% obteve o volume de vazios mínimo (18%) dentre todas as misturas concebidas na pesquisa, portanto, foi a mais indicada para a situação acima.

Quando a situação específica e a condição de contorno é a alta temperatura, a mistura porosa mais apropriada deve apresentar propriedades mecânicas e funcionais semelhantes às da mistura CPA Faixa I com 5,0% de teor de ligante. O ligante asfáltico, sendo um material com comportamento viscoelástico, é diretamente influenciado pela temperatura, portanto, uma mistura com graduação menos aberta, com o mínimo de vazios possível, é mais apropriada, que foi o caso da mistura CPA Faixa I com 5,0 % de ligante. Nesta condição, o ligante asfáltico estará menos sujeito aos efeitos das altas temperaturas, o que previne o seu envelhecimento precoce.

Por outro lado, segundo Zhang *et al.* (2020), quando a temperatura do pavimento cai rapidamente para temperaturas baixas, a camada de mistura asfáltica porosa desenvolverá tensões de tração por gradiente de temperatura. Não obstante, a mistura porosa é uma estrutura de esqueleto com contato grão a grão, portanto, essas tensões de tração resultantes podem causar fissuras no interior dos pavimentos permeáveis. Embora a fissuração devido à baixa temperatura, a princípio, possa não levar a um problema relevante no pavimento, essas fissuras tendem a se expandir e aumentar gradualmente com o tempo e, finalmente, afetar o seu desempenho (ZHANG *et al.*, 2020). Neste caso, a recomendação é utilizar ligantes de maiores penetrações (ex. 80/100) para dar maior flexibilidade à mistura em baixas temperaturas. Na pesquisa, o ligante utilizado (AMP 55/75) possui penetração entre 50 e 70 mm, portanto, nenhuma mistura do espaço de decisão disponível foi indicada para ser aplicada em regiões de baixas temperaturas.

Entretanto, Zhang *et al.* (2020) afirmam que é praticamente consenso a não recomendação de misturas asfálticas porosas (CPA. OGFC, etc.) em regiões com precipitação congelada, com muita neve e temperaturas baixas contínuas, pois,

geralmente, sais de degelo e areia são aplicados nas rodovias para aumentar a segurança dos usuários, porém, esse procedimento pode causar a colmatação dos poros do revestimento e impactar a sua capacidade de infiltração de água através da estrutura do pavimento.

Outra condição de contorno para um problema de otimização pode ser as condições de drenagem superficial da rodovia. Se os dispositivos de drenagem superficial, como os meio-fios, sarjetas, descidas d'águas, valetas de corte e aterro, etc., estiverem subdimensionados, misturas que aliviem as vazões escoadas para estes dispositivos são as mais adequadas, desde que preservem a sua funcionalidade, ou seja, ofereçam uma boa permeabilidade. Neste caso, a mistura CPA Faixa I com teor de ligante de 5,0%, mais uma vez, foi uma alternativa de solução, conforme a seleção ótima realizada nesta pesquisa.

Todavia, se a situação fosse inversa, ou seja, os dispositivos de drenagem respondem bem às vazões de projeto às quais foram dimensionados, então revestimentos porosos com maiores permeabilidades são soluções em potencial, de forma a minimizar os efeitos da presença de lâmina d'água na superfície do pavimento. Neste caso, a solução melhor avaliada foi a mistura OGFC Faixa SC com teor de ligante de 4,0%.

Apesar das recomendações do Quadro 22 as misturas indicadas não devem ser tomadas como soluções absolutas. Estas são apenas um indicativo de solução, um ponto de partida, pois existem outras possibilidades de combinações de misturas asfálticas porosas possíveis que não foram ensaiadas, tampouco disponibilizadas para o modelo de otimização. Pois, misturas com respostas mecânicas e funcionais semelhantes às indicadas no Quadro 22 também podem ser soluções viáveis em problemas semelhantes.

O espaço de decisão desta pesquisa foi restrito a 15 misturas CPA/OGFC e há inúmeras combinações de projetos de misturas que não foram estudadas, de tal forma que as misturas consideradas como soluções ótimas (não-dominadas) dos problemas multiobjetivos concebidos, não podem ser consideradas soluções ótimas globais, pois o espaço de decisão (soluções) possível é bastante amplo e indefinido.

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados dos ensaios e do modelo de otimização proposto nesta pesquisa, chegou-se às seguintes conclusões:

✓ A distribuição e o tamanho dos grãos influenciam mais fortemente a rigidez da mistura porosa que o ligante asfáltico. Por outro lado, este teor foi mais determinante do que a granulometria nas respostas das misturas diante do desgaste por abrasão. A dificuldade para se atingir o valor mínimo da resistência à tração foi quase sistemática e, nos casos em que foi atendida, a margem de valores foi estreita. Quanto à suscetibilidade à umidade, acredita-se que a utilização do ligante modificado com polímero, combinado com a adição da cal como filer nas misturas contribuíram para o desempenho das misturas porosas;

✓ Os vazios comunicantes das misturas CPA/OGFC é diretamente proporcional à permeabilidade, pois o padrão de comportamento na variação dessas duas propriedades foi idêntico. A capacidade de retenção de água das misturas porosas, que é notoriamente conflitante com a permeabilidade, mostrou-se influenciada tanto pela porosidade efetiva, quanto pela granulometria e teor de ligante da mistura;

✓ Apesar das simplificações e limitações do ensaio de infiltração, pôde-se observar que o teor de ligante tem impacto nas velocidades de infiltração de pavimentos permeáveis, contudo, a partir dos resultados da influência dos diferentes cenários de duração, intensidade de chuvas, granulometria e teores de ligante da mistura, pôde-se inferir que os fatores que governariam uma variação significativa no tempo de encharcamento seriam, principalmente, as espessuras e a anisotropia das camadas granulares do pavimento permeável;

✓ Quanto à otimização, os resultados confirmaram o que se observa na maioria dos casos envolvendo problemas de otimização multiobjetivo, ou seja, que não há solução única para um determinado problema;

✓ A otimização de várias funções-objetivo, simultaneamente, dificulta a tomada de decisão devido à possibilidade de se obterem muitas soluções não-dominadas. Um espaço de decisão restrito também contribui para falta de soluções ótimas globais;

✓ As dificuldades supramencionadas demonstraram a importância de se

delinear com cuidado o problema que se deseja resolver, reduzindo o número de objetivos e, conseqüentemente, o número factível de soluções não-dominadas para facilitar a tomada de decisão;

✓ A concepção de problemas de otimização específicos para seleção ótima de misturas asfálticas porosas, a partir de diferentes condições de contorno, facilitou a seleção das misturas mais adequadas a cada caso. De uma forma geral, misturas análogas às misturas CPA da Faixa I, com diâmetros máximos de agregados de 12,5 mm, respondem razoavelmente bem em, praticamente, todos os cenários de problemas de otimização multiobjetivo concebidos;

✓ Embora variações no teor de ligante tenham sido observadas entre as misturas porosas da Faixa I tomadas como soluções ótimas pelo modelo de otimização, foi a mistura CPA Faixa I com 5,0% de teor de ligante que se destacou como a solução ótima mais recorrente, dentro do espaço de decisão disponível, para os diferentes problemas de otimização multiobjetivo concebidos durante a pesquisa.

## **5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Ao longo da pesquisa, principalmente durante a realização dos ensaios funcionais, e sabendo que não há, atualmente, uma padronização definida de cada ensaio para as misturas asfálticas porosas, algumas condições de contorno foram estabelecidas, dentre elas:

- Os resultados da permeabilidade foram determinados considerando a condição de fluxo unidirecional;
- Nos ensaios de infiltração, os resultados das velocidades e capacidade de infiltração são válidos para as estruturas de camadas sobrepostas modeladas nesta pesquisa, com espessuras definidas e compacidade das camadas granulares consideradas constantes durante todos os ensaios;
- Todos os resultados das propriedades funcionais das misturas asfálticas porosas se limitam aos ensaios de laboratório. Nenhum deles foram submetidos à validação em campo (in situ).

## 5.2. RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Durante o andamento desta pesquisa, listou-se algumas sugestões para trabalhos futuros que podem ser exploradas para a continuidade e complementação da pesquisa em tela, são elas:

- ↘ Aumentar o espaço de decisão para o modelo de otimização a partir da concepção de outras configurações de misturas abertas, utilizando tipos de ligantes diferentes, como o AMP 60/85, AMP 65/90, combinados com diferentes faixas granulométricas que não foram exploradas nesta pesquisa, principalmente de outras graduações internacionais;
- ↘ Formular outros problemas de otimização com funções-objetivo distintas desta pesquisa, como, por exemplo, a maximização da absorção sonora das misturas porosas, a minimização do impacto ambiental, a maximização da viabilidade econômica das misturas asfálticas porosas em obras de pavimentação, dentre outras;
- ↘ Avaliar o método da Distância Euclidiana como tomador de decisão para a escolha da melhor solução de compromisso entre os múltiplos objetivos de um problema que possuam diferentes soluções não-dominadas;
- ↘ Implementar, no código do algoritmo *FNDS*, rotinas de análise estatística dos resultados de forma a automatizá-la e gerar, efetivamente, resultados estatisticamente significativos para serem avaliados pelo modelo durante o processo de busca das soluções a partir do conceito de dominância;
- ↘ Estudar o efeito da anisotropia na permeabilidade da mistura asfáltica porosa, considerando-a nas direções vertical e horizontal;
- ↘ Validação em campo, por amostragem, dos resultados dos ensaios funcionais obtidos em laboratório das misturas asfálticas porosas concebidas nesta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 13292. **Solo — Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Granulares à Carga Constante**. Brasil: [s.n.], 2021. ISBN 9786556597867.
- ABNT NBR 14545. **Solo — Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Aargilosos à Carga Variável**. Brasil: [s.n.], 2021. ISBN 9786556598352.
- ABNT NBR 15086. **Materiais betuminosos - Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro**. Brasil: [s.n.], 2006.
- ABNT NBR 15087. **Misturas Asfálticas — Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral**. Brasil: [s.n.], 2012. ISBN 978-85-07-03760-6.
- ABNT NBR 15184. **Materiais Betuminosos — Determinação da Viscosidade em Temperaturas Elevadas usando um Viscosímetro Rotacional**. Brasil: [s.n.], 2021. ISBN 978-85-07-08832-5.
- ABNT NBR 15617. **Misturas asfálticas — Determinação do dano por umidade induzida**.
- ABNT NBR 16018. **Misturas Asfálticas – Determinação da Rigidez por Compressão Dametral sob Carga Repetida**. Brasil: [s.n.], 2011. ISBN 978-85-07-03165-9.
- ABNT NBR 16416. **Pavimentos Permeáveis de Concreto — Requisitos e Procedimentos**. Brasil: [s.n.], 2015. ISBN 978-85-07-05719-2.
- ABNT NBR 6560. **Ligantes asfálticos — Determinação do Ponto de Amolecimento — Método do Anel e Bola**. Brasil: [s.n.], 2016. ISBN 978-85-07-06603-3.
- ABNT NBR 6576. **Materiais asfálticos — Determinação da penetração**. Brasil: [s.n.], 2007. ISBN 978-85-07-00373-1.
- AFNOR NF-P98-254-2, A. F. D. N. (AFNOR). **Essais relatifs aux chaussées - Mesure de propriétés liées à la perméabilité des matériaux des mélanges hydrocarbonés - Partie 2: détermination du pourcentage de vides communicants des matériaux liés**. [S.l.]: [s.n.], 1993.
- AFONSO, A.; NUNES, C. **Probabilidade e Estatística: Aplicações e Soluções em SPSS**. [S.l.]: [s.n.], 2019.
- AFONSO, M. I. L. **Pavimentos Betuminosos Permeáveis na Mitigação e Adaptação às Alterações Climáticas**. [S.l.]: Tese de Doutorado. Universidade Beira Interior, 2021.
- AHIABLAME, L.M., ENGEL, B.A., CHAUBEY, I. Effectiveness of Low Impact Development Practices in Two Urbanized Watersheds: Retrofitting with Rain Barrel/Cistern and Porous Pavement. 151–161 (April). **J. Environ. Manag.**, 2013. v. 119, p. 151–161.
- AHIABLAME, L. M.; ENGEL, B. A.; CHAUBEY, I. Effectiveness of low impact development practices: Literature review and suggestions for future research. **Water, Air, and Soil Pollution**, 2012. v. 223, n. 7, p. 4253–4273.
- AL-SAAD, I. *et al.* Multi-objective optimization of pavement preservation strategy considering agency cost and environmental impact. **International Journal of Sustainable Transportation**, 2021. v. 15, n. 11, p. 826–836.
- ALBER, S.; RESSEL, W.; SCHUCK, B. Explaining drainage of porous asphalt with hydrological modelling. **International Journal of Pavement Engineering**, 2020. v. 0, n. 0, p. 1–11.
- ALECRIM, C. M. C. **Avaliação da utilização de camada porosa de atrito em vias do meio urbano**. [S.l.]: Universidade Federal do Ceará, 2021.

- ALVAREZ, A. E.; MARTIN, A. E.; ESTAKHRI, C. A review of mix design and evaluation research for permeable friction course mixtures. **Construction and Building Materials**, 2011. v. 25, n. 3, p. 1159–1166.
- ALVES, A. **Comportamento Mecânico, Funcional e Ambiental de Misturas Asfálticas Porosas**. [S.l.]: Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, 2019.
- ARAGÃO, R. COSTA, F.F., RUFINO, I.A.A., RAMOS FILHO, R. S., SRINIVASAM, V. S., TRUTA NETO, J. B. Intensity-Duration-Frequency equations (IDF) for the state of Paraíba, Brazil, and regionalization of its parameters. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2024. v. 28, p. 11.
- ARAVIND, S. NSGA - II: A multi-objective optimization algorithm. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10429-nsga-ii-a-multi-objective-optimization-algorithm>, 2024.
- ASTM D3385. **Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer**. EUA: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003.
- ASTM D4791/D4791M. **Standard test method for flat or elongated particles in coarse aggregate**. Washington DC, EUA: [s.n.], 2023.
- ASTM D6373. **Standard Specification for Performance Grade Asphalt Binder**. EUA: American Society for Testing and Materials, 2016.
- BAGAMPADDE, U.; ISACSSON, U.; KIGGUNDU, B. M. Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures. **International Journal of Pavement Engineering**, 2005. v. 6, n. 4, p. 229–239.
- BAI, Y. Et Al. Comprehensive performance evaluation system based on environmental and economic benefits for optimal allocation of LID facilities. **Water**, 2019. v. 11, n. 2, p. 1–14.
- BARBOSA, E. *et al.* Mechanical Analysis through Non-Destructive Testing of Recycled Porous Friction Course Asphalt Mixture. **Buildings**, 2024. v. 14, n. 9, p. 1–16.
- BAZZO, J. A.; HORN, P. L. **Calibração do Modelo Matemático de Infiltração de Horton em Pavimento de Concreto Tipo Blocos Intertravados**. [S.l.]: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2017.
- BEAN, E. Z. Et Al. Permeable pavements. Virginia, 2015. **1st editio ed. Reston**, 2015.
- BELSHIE, M. *et al.* Temperature gradient and curling stresses in concrete pavement with and without open-graded friction course. **Journal Transporting Engenniering**, 2011. v. 10, p. 723–729.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8ª edição ed. Viçosa-MG: [s.n.], 2006.
- BOTELHO, F. V. C.; FILHO, F. P. S. . A. M. G. G. . M. M. D. F. M. M. Uso de Agregado Calcário em Asfalto Drenante. **13ª Reunião de Pavimentação Urbana**, 2004.
- BRASWELL, A. S.; ANDERSON, A. R.; HUNT, W. F. Hydrologic and water quality evaluation of a permeable pavement and biofiltration device in series. **Water**, 2018. v. 10, n. 1, p. 33.
- BRESSY, A. Et Al. Efficiency of source control systems for reducing runoff pollutant loads: feedback on experimental catchments within Paris conurbation. **Water Research**, 2014. v. 57, p. 234–246.
- BROWN, K.; MIJIC, D. A. **Integrating green and blue spaces into our cities: making it happen**. London: [s.n.], 2019.
- BURKE, E.K., KENDALL, G. **Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques**. [S.l.]: [s.n.], 2014. ISBN

9781461469407.

CAO, R. *et al.* Multi-objective optimization for maintaining low-noise pavement network system in Hong Kong. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2020. v. 88, n. November, p. 102573.

CARO, S. *et al.* Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: Mechanisms. **International Journal of Pavement Engineering**, 2008. v. 9, n. 2, p. 81–98.

CARVALHO, D. F. . S. L. D. B. Hidrologia. **Hidrologia**, 2006.

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

CETIN, A. Effects of crumb rubber size and concentration on performance of porous asphalt mixtures. **International Journal of Polymer Science**, 2013. v. 2013.

CHEN, Y., SAMUELSON, H.W., TONG, Z. Integrated Design Workflow and a New Tool for Urban Rainwater Management. **J. Environ. Manag.**, 2016. v. 180, p. 45–51.

CHEN, Xueqin *et al.* Case study: performance effectiveness and cost-benefit analyses of open-graded friction course pavements in Tennessee. **International Journal of Pavement Engineering**, 2017. v. 18, n. 11, p. 957–970.

COELLO, C. A. Evolutionary Multiobjective Optimization. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge**, 2011. v. 1, n. 5, p. 444–447.

COOLEY, J. W. *et al.* **Construction and maintenance practices for permeable friction courses**. Washington DC: [s.n.], 2009.

COUNCIL, T. Activities. **Enhancing the Durability of Asphalt Pavements Transportation Research board 2014–2015**. Washington DC: [s.n.], 2014.

DAMODARAM, C., GIACOMONI, M.H., PRAKASH KHEDUN, C., HOLMES, H., RYAN, A., SAOUR, W., ZECHMAN, E. . Simulation of Combined Best Management Practices and Low Impact Development for Sustainable Stormwater Management. **J. Am. Water Resour. Assoc.**, 2010. v. 46 (5), p. 907–918.

DAVIS, M.; NAUMANN, S. Making the case for sustainable urban drainage systems as a nature-based solution to urban flooding. **Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas.**, 2017. p. 123–137.

DEB, Kalyanmoy. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. **John Wiley & Sons.**, 2001. v. 5.

DEB, Kalyanmoy *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, 2002. v. 6, n. 2, p. 182–197.

DIEP, L. *et al.* Problematizing infrastructural “fixes”: critical perspectives on technocratic approaches to Green Infrastructure. **Urban Geography**, 2023. v. 44, n. 3, p. 470–491.

DNIT 135 ME. **Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas. Determinação do Módulo de resiliência - Método de Ensaio**. Brasil: [s.n.], 2018.

DNIT 136 ME. **Pavimentação asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral – Método de Ensaio**. Brasil: [s.n.], 2018.

DNIT 180 ME. **Pavimentação - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida – Método de Ensaio**. Brasil: [s.n.], 2018.

DNIT 184 ME. **Ensaio Uniaxial de Carga Repetida para Determinação da Resistência à Deformação Permanente de Misturas Asfálticas**. Brasil: [s.n.], 2018.

DNIT ES 386. **Pavimentação - Pré-Misturado a Quente com Asfalto Polímero - Camada Porosa de Atrito**. Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes.

DNIT ME 383. **Desgaste por Abrasão de Misturas Betuminosas com Asfalto Polímero - Ensaio Cantabro**. Brasil: [s.n.], 1999.

DRAKE, J.; BRADFORD, A.; SETERS, T. VAN. Hydrologic Performance of Three Partial-Infiltration Permeable Pavements in a Cold Climate over Low Permeability Soil. **Journal of Hydrologic Engineering**, 2014. v. 19, n. 9.

DRESCH, F. **Comportamento De Misturas Asfálticas Tipo Camada Porosa De Atrito (Cpa)**. [S.l.]: Diisertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

ECKART, K.; MCPHEE, Z.; BOLISETTI, T. Performance and implementation of low impact development – A Review. **Science of the Total Environment**, 2017. v. 607–608, p. 413–432.

ELHADIDY, A. A.; ELBELTAGI, E. E.; AMMAR, M. A. Optimum analysis of pavement maintenance using multi-objective genetic algorithms. **HBRC Journal**, 2015. v. 11, n. 1, p. 107–113.

FAY, L.; AKIN, M. Snow and ice control on porous and permeable pavements: literature review and state of the practice. [S.l.]: Transportation Research Board, 2014.

FLETCHER, T. D. *et al.* SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, 2015. v. 12, n. 7, p. 525–542.

FOGEIRO, J. S. **Cidade Esponja – Aplicação do Conceito e Métodos no Bairro Marechal Gomes da Costa , Porto**. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Faculdade do Porto, 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, F. –. The Impact of Disasters and Crises on Agriculture and Food Security: 2021. **FAO**, 2021.

GAUTIER, D. N. J. **Algoritmo de Otimização Multi-Objetivo Assistida por Metamodelagem com Aplicações em Problemas de Aerodinâmica**. [S.l.]: Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá, 2020.

GHODSI, S. H. Et Al. Optimal design of low impact development practices in response to climate change. **Journal of Hydrology**, 2020. v. 580.

GUO, X. Et Al. Modelling Low Impact Development in Watersheds Using the Storm Water Management Model. **Urban Water Journal**, 2019. v. 16, n. 2, p. 146–155.

HAMEL, P.; DALY, E.; FLETCHER, T. D. Source-Control Stormwater Management for Mitigating the Impacts of Urbanisation on Baseflow: A Review. **Journal of Hydrology**, 2013. v. 485, p. 201–211.

HOWARD, G. Et Al. Climate change and water and sanitation: likely impacts and emerging trends for action. [S.l.]: [s.n.], 2016. p. 253–276.

HUANG, T.; WANG, Y.; ZHANG, J. Simulation and Evaluation of Low Impact Development of Urban Residential District based on SWMM and GIS. **Earth and Environmental Science**, 2017. v. 74, n. 1.

JABUR, A. *et al.* Determinação da Capacidade de Infiltração de Pavimentos Permeáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2015. v. 20, n. 4, p. 937–945.

JACQUES, G. E. **Aplicabilidade de misturas mornas em revestimentos do tipo camada porosa de atrito (CPA)**. [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

JAIN, C. K.; SINGH, S. Impact of climate change on the hydrological dynamics of River

- Ganga, India. **Journal of Water and Climate Change**, 2018. v. 11, n. 1, p. 274–290.
- JIA, H. *et al.* Planning of LID-BMPs for urban runoff control: The case of Beijing Olympic Village. **Separation and Purification Technology**, 2012. v. 84, p. 112–119.
- KAMAR, F. H. A.; SARIF, J. N. Design of porous asphalt mixture to performance related criteria. (Road Engineering Association of Asia and Australasia (REAAA), Org.). [S.l.]: [s.n.], 2009. p. 9– 07.
- KANDHAL, P. **Design, Construction, and Maintenance of Open-Graded Asphalt Friction Courses**. [S.l.]: [s.n.], 2002.
- KANDHAL, P. S. Design, Construction, and Maintenance of Open-Graded Asphalt Friction Courses. **National Asphalt Pavement Association**, 2002.
- KATHRYN, L. Porous Asphalt Pavement designs: Proactive design for cold climate use. 2007. p. 105.
- KING, W. *et al.* **Evaluation of Open Graded Friction Course (OGFC) Mixtures. LTRC Project No. 04-5B, Louisiana Transportation Research Center**. Los Angeles: [s.n.], 2013.
- KNABBEN, R. M. **Desenvolvimento de um Trailer-CPX e de uma mistura asfáltica de baixa emissão de ruído pneu-pavimento**. [S.l.]: UFSC, 2017.
- KOŁODZIEJ, V. M. **Estudo das propriedades acústicas, drenantes e mecânicas de revestimentos asfálticos porosos**. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.
- KONG, F. *Et Al.* Modeling Stormwater Management at the City District Level in Response to Changes in Land use and Low Impact Development. **Environmental Modelling and Software**, 2017. v. 95, p. 132–142.
- KONRAD, C.P., BOOTH, D. B. Hydrologic Changes in Urban Streams and their Ecological Significance. [S.l.]: [s.n.], 2005. V. 47, p. 157–177.
- KUMAR, B. K.; MANJUNATHA, S.; SHIVA PRASAD, N. Porous Asphalt Pavement-A Tentative Mix Design Guidelines. New Generation Open Graded Friction Course Approach. **International Journal of engineering Science invention research & Development**, 2014. v. 1.
- KURUPPU, U.; RAHMAN, A.; RAHMAN, M. A. Permeable pavement as a stormwater best management practice: a review and discussion. **Environmental Earth Sciences**, 2019. v. 78, n. 10, p. 1–20.
- LI, NAN, Q. C. . Du. Optimization of China sponge city design: The case of Lincang Technology Innovation Park. **Water (Switzerland)**, 2018. v. 10, n. 9.
- LIAO, K. H.; DENG, S.; TAN, P. Y. Blue-Green infrastructure: new frontier for sustainable urban stormwater management. **Greening cities: forms and functions**. Singapore: [s.n.], 2017, p. 203–226.
- LIU, Y. *et al.* Enhancing a Rainfall-Runoff Model to Assess the Impacts of BMPs and LID Practices on Storm Runoff. **Journal of Environmental Management**, 2015. v. 147, p. 12–23.
- LUXMAN, N. N. *et al.* Effect of compaction temperature on porous asphalt performance. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2019. v. 244, n. 1.
- MCGRANE, S. J. Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. **Hydrological Sciences Journal**, 2016. v. 61, n. 13, p. 2295–2311.
- MENDES, A. T., SANTOS, G. R. Drenagem e Manejo Sustentável de Águas Pluviais

Urbanas: o que falta para o Brasil adotar? Rio de Janeiro: **IPEA. Ministério da Economia**, 2022. p. 52.

MENDES, A. T.; SANTOS, G. R. **Infraestruturas sustentáveis no Brasil: oportunidades para o saneamento e políticas urbanas**. [S.l.]: [s.n.], 2021.

MENG, Q. **Research on Adaptability of Vibrating Compaction to Porous Asphalt Mixture**. [S.l.]: Chang'an University, 2013.

MEURER FILHO, E. **Estudo de Granulometria para Concretos Asfálticos Drenantes**. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; BIANCHINI, L. Flood risk assessment and management: a case study in Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: **WIT Transactions on the Built Environment**, 2014. v. 13, p. 29–41.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade. [S.l.]: [s.n.], 2016.

MIRANDA, E.; SANTANA, G. M. R.; NEPOMUCENO, D. V. PAVIMENTAÇÃO: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O CONCRETO ASFÁLTICO TRADICIONAL (CBUQ) E CONCRETO ASFÁLTICO DRENANTE. [S.l.]: [s.n.], 2017. p. 1–21.

MIRÓ RECASENS, R. **Nuevas Mezclas para Capas de Rodadura y su Influencia en el Confort (Ruido) y la Seguridad**. [S.l.]: Universidad Politécnica de Cataluña, 2006.

MITCHELL, V. G. Applying Integrated Urban Water Management Concepts: A Review of Australian Experience. **Environ. Manag. J.**, 2006. p. 589–605.

MO, L. T. *et al.* Bitumen-stone adhesive zone damage model for the meso-mechanical mixture design of ravelling resistant porous asphalt concrete. **International Journal of Fatigue**, 2011. v. 33, n. 11, p. 1490–1503.

MULLANEY, J.; LUCKE, T. Practical Review of Pervious Pavement Designs. **Clean - Soil, Air, Water**, 2014. v. 42, n. 2, p. 111–124.

NCHRP PROJECT. **Performance and Maintenance of Permeable Friction Courses**. Ridgeland, Mississippi: [s.n.], 2008.

NIELSEN, C. B. **Durability of porous asphalt-International experience**. [S.l.]: [s.n.], 2006.

NUERNBERG, J. K. **Proposta de Modelagem de Pavimentos Permeáveis do Tipo C como Sub-Bacias Regulares Equivalentes**. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.

OLIVEIRA, C. G. M. **Estudo de Propriedades Mecânicas e Hidráulicas do Concreto Asfáltico Drenante**. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 2003.

PAGOTTO, C.; LEGRET, M.; CLOIREC, P. LE. Comparison of the hydraulic behaviour and the quality of highway runoff water according to the type of pavement. **Water Research**, 2000. v. 34, n. 18, p. 4446–4454.

PALLA, A.; GNECCO, I. Hydrologic Modeling of Low Impact Development Systems at the Urban Catchment Scale. **Journal of Hydrology**, 2015. v. 528, p. 361–368.

PARK, S. W.; PARK, H. M.; HWANG, J. J. Application of Genetic Algorithm and Finite Element Method for backcalculating layer moduli of flexible pavements. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2010. v. 14, n. 2, p. 183–190.

PAULE-MERCADO, M. A. *et al.* Influence of Land Development on Stormwater Runoff from a MixSd Land Use and Land Cover Catchment. **Science of the Total Environment**, 2017. v. 599–600, p. 2142–2155.

- PIARC (WORLD ROAD ASSOCIATION). Quiet Pavement Technologies. **Technical Committee D.2 Road Pavements**, 2013. p. 3.
- PINTO, S.; PINTO, I. E. **Pavimentação Asfáltica: Conceitos Fundamentais sobre Materiais e Revestimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2015.
- POTGIETER, C. J.; SADLER, D. E.; VILLIERS, E. M. Bitumen Rubber Asphalt: Report on the long term performance in South Africa. (ISAP, Org.). [S.I.]: [s.n.], 2002.
- PRYKE, A.; EVDORIDES, H.; ERMAILEH, R. A. Optimization of pavement design using a genetic algorithm. **2006 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2006**, 2006. p. 1095–1098.
- PUTMAN, B. J. Evaluation of Open-Graded Friction Courses: Construction, Maintenance, and Performance. **Fhwa-Sc-12-04**, 2012. n. October, p. 119.
- QIN, H. PENG; LI, Z. XI; FU, G. The Effects of Low Impact Development on Urban Flooding Under Different Rainfall Characteristics. **Journal of Environmental Management**, 2013. v. 129, p. 577–585.
- RESSEL. Modelling and simulation of pavement drainage. **International Journal of Pavement Engineering**, **20 (7)**, 801–810, 2019. v. 20, p. 801–810.
- REYES, S.; COELO, C. Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: A Survey of the State-of-the-Art. , 2(3): 287–308. **International Journal of Computational Intelligence Research**, 2006. v. 2, n. 3, p. 287–308.
- ROON, M. VAN. Ecological Context of Development: New Zealand Perspectives. [S.I.]: [s.n.], 2004.
- \_\_\_\_\_. Water Localisation and Reclamation: Steps Towards Low Impact Urban Design and Development. J., 437–447. **Environ. Manag. J.**, 2007. p. 437–447.
- ROSEBORO, A. Et Al. The impacts of climate change and porous pavements on combined sewer overflows: a case study of the city of Buffalo, New York, USA. **Frontiers in Water**, 2021. v. 3.
- SCHMITT, E. **Winter Maintenance on Porous Asphalt. The European Asphalt Magazine**. [S.I.]: [s.n.], 1994.
- SCHOLZ, M.; GRABOWIECKI, P. Review of permeable pavement systems. **Building and Environment**, 2007. v. 42, n. 11, p. 3830–3836.
- SHAFFER, P. *et al.* Understanding permeable and impermeable surfaces: Technical report on surfacing options and cost benefit analysis. **[Pdf]**, 2009. n. December, p. 118.
- SHAFIQUE, M. KIM, R. Low Impact Development Practices: A Review of Current Research and Recommendations for Future Directions. **Water Air Soil Pollut**, 2015. v. 186, p. 351–363.
- SHIRU, M. S. Et Al. Challenges in water resources of Lagos mega city of Nigeria in the context of climate change. **Journal of Water and Climate Change**, 2019. v. 11, n. 4, p. 1067–1083.
- SHIRZADI JAVID, A. A.; NASERI, H.; ETEBARI GHASBEH, M. A. Estimating the Optimal Mixture Design of Concrete Pavements Using a Numerical Method and Meta-heuristic Algorithms. **Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering**, 2021. v. 45, n. 2, p. 913–927.
- SHUSTER, W. D.; MORRISON, M. A.; WEBB, R. Front-Loading Urban Stormwater Management for Success - A Perspective Incorporating Current Studies on the Implementation of Retrofit Low-Impact Development. **Cities and the Environment**, 2008. v.

1, n. 2, p. 1–15.

SINDI, W.; AGBELIE, B. Assignments of Pavement Treatment Options: Genetic Algorithms versus Mixed-Integer Programming. **Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements**, 2020. v. 146, n. 2, p. 04020008.

SOUSA, T. M. DE. **ANÁLISE DO EFEITO DA ADIÇÃO DE AGREGADO POROSO, SATURADO EM ÓLEO DE SOJA RESIDUAL, NO REJUVENESCIMENTO DE CAMADAS POROSAS DE ATRITO**. [S.l.]: Universidade Federal de Campina Grande, 2024.

SOUZA, S. A. **Avaliação da Capacidade de Escoamento da Água dm Mistura Asfáltica Drenante: Proposta de Ensaio de Laboratório**. [S.l.]: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

SUI, X.; VEN, F. Van De. Can the implementation of low impact development reduce basin runoff? **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, 2021. p. 1–24.

SUN, Z.; LOTZ, T.; CHANG, N. Bin. Assessing the long-term effects of land use changes on runoff patterns and food production in a large lake watershed with policy implications. **Journal of Environmental Management**, 2017. v. 204, p. 92–101.

TAKAHASHI, S. Comprehensive study on the porous asphalt effects on expressways in Japan: Based on field data analysis in the last decade. **Road Materials and Pavement Design**, 2013. v. 14, n. 2, p. 239–255.

TALIB, A.; RANDHIR, T. O. Climate change and land use impacts on hydrologic processes of watershed systems. **Journal of Water and Climate Change**, 2017. v. 8, n. 3, p. 363–374.

TUCCI, C. E. M. DRENAGEM URBANA. **Cienc. Cult**, 2003. v. 55, n. 4, p. 36–37.

TUCCI, C. E. M. Gestão da drenagem urbana. **Texto para Discussão, n. 48**, Brasília, 2012.

WANG, Y.; WANG, G. **Improvement of Porous Pavement**. [S.l.]: [s.n.], 2011.

WATER, U.-W. Climate change and water. **Geneve: UN-Water**, [S.l.], 2019.

WEITMAN, D.; WEINBERG, A.; GOO, R. Reducing stormwater costs through LID strategies and practices. Washigton: [s.n.], 2008. p. 1–10.

WILBANKS, T. J.; FERNANDEZ, S. (Ed. ). **Climate change and infrastructure, urban systems, and vulnerabilities**.

WONG, T.H.F., EADIE, M. L. Water Sensitive Urban Design—A Paradigm Shift in Urban Design. [S.l.]: [s.n.], 2000. p. 12–16.

WOODS-BALLARD, B. Et Al. **The SuDS Manual**. [S.l.]: [s.n.], 2015. V. 1.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. WMO atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970-2019). [S.l.], 2021.

WU, H. *et al.* A critical state-of-the-art review of durability and functionality of open-graded friction course mixtures. **Construction and Building Materials**, 2020. v. 237, p. 117759.

YANG, W. Et Al. Measuring performance of low impact development practices for the surface runoff management. **Environmental Science and Ecotechnology**, 2020. v. 1, p. 100010.

YU, B. *et al.* Multi-objective optimization for asphalt pavement maintenance plans at project level: Integrating performance, cost and environment. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 2015. v. 41, p. 64–74.

ZAHMATKESH, Z. Et Al. Analysis of the effects of climate change on urban storm water runoff using statistically downscaled precipitation data and a change factor approach. **Journal of Hydrologic Engineering**, 2015a. v. 20, n. 7.

ZAHMATKESH, Z. Et Al. Low-Impact Development Practices to Mitigate Climate Change Effects on Urban Stormwater Runoff: Case Study of New York City. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 2015b. v. 141, n. 1, p. 1–13.

ZANGO, B. S. Et Al. Impacts of urbanization and climate change on water quantity and quality in the Carp River watershed. **Journal of Water and Climate Change**, 2021. v. 13, n. 2, p. 786–816.

ZHANG, Z. *et al.* State-of-the-art of porous asphalt pavement: Experience and considerations of mixture design. **Construction and Building Materials**, 2020. v. 262, p. 119998.

ZHAO, G.; MENG, D. Z. Research progress of low impact development technology. **Earth and Environmental Science**, 2020. v. 474, p. 052033.

# APÊNDICE A – Ensaios de permeabilidade à carga constante das misturas CPA/OGFC

**ENSAIO PERMEABILIDADE A CARGA CONSTANTE**

FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H(cm)			
				2,5	3,0	3,5	4,0
I	5,0%	1	tempo (s)	60	60	60	60
			volume (cm³)	330	350	395	427
			velocidade (cm/s)	0,070	0,074	0,084	0,091
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,37	6,37	6,37	6,37
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,099	1,177	1,256	1,334
			temperatura (°C):	24,5°C	24,5°C	24,5°C	24,5°C
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,898	0,898	0,898	0,898
			velocidade corrigida (cm/s):	0,063	0,067	0,075	0,081
FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H(cm)			
I	5,0%	2	tempo (t):	60	60	60	60
			volume (cm³):	330	350	400	429
			velocidade (cm/s):	0,070	0,074	0,085	0,091
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,37	6,37	6,37	6,37
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,099	1,177	1,256	1,334
			temperatura (°C):	24,5°C	24,5°C	24,5°C	24,5°C
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,898	0,898	0,898	0,898
			velocidade corrigida (cm/s):	0,063	0,067	0,076	0,082
FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H(cm)			
I	5,0%	3	tempo (t):	60	60	60	60
			volume (cm³):	330	350	400	430
			velocidade (cm/s):	0,070	0,074	0,085	0,091
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,37	6,37	6,37	6,37
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,099	1,177	1,256	1,334
			temperatura (°C):	24,5°C	24,5°C	24,5°C	24,5°C
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,898	0,898	0,898	0,898
			velocidade corrigida (cm/s):	0,063	0,067	0,076	0,082
VALORES MÉDIOS							
velocidade (v) (cm/s):				0,063	0,067	0,076	0,082
gradiente hidráulico (i) (cm/cm):				1,099	1,177	1,256	1,334

**ENSAIO PERMEABILIDADE A CARGA CONSTANTE**

FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H(cm)			
				2,5	3,0	3,5	4,0
I	4,5%	1	tempo (s)	60	60	60	60
			volume (cm³)	428	468	540	602
			velocidade (cm/s)	0,091	0,099	0,115	0,128
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,43	6,43	6,43	6,43
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,089	1,166	1,244	1,322
			temperatura (°C):	24,3	24,3	24,3	24,3
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,902	0,902	0,902	0,902
			velocidade corrigida (cm/s):	0,082	0,090	0,103	0,115
FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H(cm)			
I	4,5%	2	tempo (t):	60	60	60	60
			volume (cm³):	428	472	549	600
			velocidade (cm/s):	0,091	0,100	0,117	0,127
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,43	6,43	6,43	6,43
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,089	1,166	1,244	1,322
			temperatura (°C):	24,3	24,3	24,3	24,3
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,902	0,902	0,902	0,902
			velocidade corrigida (cm/s):	0,082	0,090	0,105	0,115
FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H(cm)			
I	4,5%	3	tempo (t):	60	60	60	60
			volume (cm³):	428	472	550	602
			velocidade (cm/s):	0,091	0,100	0,117	0,128
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,43	6,43	6,43	6,43
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,089	1,166	1,244	1,322
			temperatura (°C):	24,3	24,3	24,3	24,3
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,902	0,902	0,902	0,902
			velocidade corrigida (cm/s):	0,082	0,090	0,105	0,115
VALORES MÉDIOS							
velocidade (v) (cm/s):				0,082	0,090	0,105	0,115
gradiente hidráulico (i) (cm/cm):				1,089	1,166	1,244	1,322

**ENSAIO PERMEABILIDADE A CARGA CONSTANTE**

FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H(cm)			
				2,5	3,0	3,5	4,0
I	4,0%	1	tempo (s)	60	60	60	60
			volume (cm³)	585	668	790	840
			velocidade (cm/s)	0,124	0,142	0,168	0,178
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,45	6,45	6,45	6,45
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,085	1,163	1,240	1,318
			temperatura (°C):	25	25,4	24,9	24,3
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,887	0,879	0,889	0,902
			velocidade corrigida (cm/s):	0,110	0,125	0,149	0,161
			FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	2,5
I	4,0%	2	tempo (t):	60	60	60	60
			volume (cm³):	589	690	780	840
			velocidade (cm/s):	0,125	0,146	0,166	0,178
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,45	6,45	6,45	6,45
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,085	1,163	1,240	1,318
			temperatura (°C):	25	25,4	24,9	24,3
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,887	0,879	0,889	0,902
			velocidade corrigida (cm/s):	0,111	0,129	0,147	0,161
			FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	2,5
I	4,0%	3	tempo (t):	60	60	60	60
			volume (cm³):	592	691	780	840
			velocidade (cm/s):	0,126	0,147	0,166	0,178
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,45	6,45	6,45	6,45
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,085	1,163	1,240	1,318
			temperatura (°C):	25	25,4	24,9	24,3
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,887	0,879	0,889	0,902
			velocidade corrigida (cm/s):	0,111	0,129	0,147	0,161
			<b>VALORES MÉDIOS</b>				
velocidade (v) (cm/s):				0,111	0,127	0,148	0,161
gradiente hidráulico (i) (cm/cm):				1,085	1,163	1,240	1,318

**ENSAIO PERMEABILIDADE A CARGA CONSTANTE**

FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H(cm)			
				2,5	3,0	3,5	4,0
II	5,0%	1	tempo (s)	60	60	60	60
			volume (cm³)	340	370	421	440
			velocidade (cm/s)	0,072	0,079	0,089	0,093
			h1-h2 (cm)	8,0	8,5	9,0	9,5
			L (cm)	6,26	6,26	6,26	6,26
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,278	1,358	1,438	1,518
			temperatura (°C):	25,5	25,5	25,5	25,5
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,877	0,877	0,877	0,877
			velocidade corrigida (cm/s):	0,063	0,069	0,078	0,082
			FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	2,5
II	5,0%	2	tempo (t):	60	60	60	60
			volume (cm³):	349	369	415	442
			velocidade (cm/s):	0,0741	0,0783	0,0881	0,0938
			h1-h2 (cm)	8,0	8,5	9,0	9,5
			L (cm)	6,26	6,26	6,26	6,26
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,278	1,358	1,438	1,518
			temperatura (°C):	25,5	25,5	25,5	25,5
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,877	0,877	0,877	0,877
			velocidade corrigida (cm/s):	0,065	0,069	0,077	0,082
			FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	2,5
II	5,0%	3	tempo (t):	60	60	60	60
			volume (cm³):	345	368	420	445
			velocidade (cm/s):	0,0732	0,0781	0,0891	0,0944
			h1-h2 (cm)	8,0	8,5	9,0	9,5
			L (cm)	6,26	6,26	6,26	6,26
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,278	1,358	1,438	1,518
			temperatura (°C):	25,5	25,5	25,5	25,5
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,877	0,877	0,877	0,877
			velocidade corrigida (cm/s):	0,064	0,068	0,078	0,083
			<b>VALORES MÉDIOS</b>				
velocidade (v) (cm/s):				0,064	0,069	0,078	0,082
gradiente hidráulico (i) (cm/cm):				1,278	1,358	1,438	1,518

**ENSAIO PERMEABILIDADE A CARGA CONSTANTE**

FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	2,5	3,0	3,5	4,0
II	4,5%	1	tempo (s)	60	60	60	60
			volume (cm³)	630	680	721	820
			velocidade (cm/s)	0,134	0,144	0,153	0,174
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,38	6,38	6,38	6,38
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,097	1,176	1,254	1,332
			temperatura (°C)	23,0	23,0	23,0	23,0
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$	0,930	0,930	0,930	0,930
			velocidade corrigida (cm/s)	0,124	0,134	0,142	0,162
FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	2,5	3,0	3,5	4,0
II	4,5%	2	tempo (t):	60	60	60	60
			volume (cm³):	630	680	728	850
			velocidade (cm/s):	0,1337	0,1443	0,1545	0,1804
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,38	6,38	6,38	6,38
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,097	1,176	1,254	1,332
			temperatura (°C)	23,0	23,0	23,0	23,0
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$	0,930	0,930	0,930	0,930
			velocidade corrigida (cm/s)	0,124	0,134	0,144	0,168
FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	2,5	3,0	3,5	4,0
II	4,5%	3	tempo (t):	60	60	60	60
			volume (cm³):	630	680	722	830
			velocidade (cm/s):	0,1337	0,1443	0,1532	0,1761
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,38	6,38	6,38	6,38
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,097	1,176	1,254	1,332
			temperatura (°C)	23,0	23,0	23,0	23,0
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$	0,930	0,930	0,930	0,930
			velocidade corrigida (cm/s)	0,124	0,134	0,142	0,164
<b>VALORES MÉDIOS</b>							
			<b>velocidade (v) (cm/s):</b>	0,124	0,134	0,143	0,164
			<b>gradiente hidráulico (i) (cm/cm):</b>	1,097	1,176	1,254	1,332

**ENSAIO PERMEABILIDADE A CARGA CONSTANTE**

FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H (cm)			
				2,5	3,0	3,5	4,0
II	4,0%	1	tempo (s)	30	30	30	30
			volume (cm³)	480	541	558	580
			velocidade (cm/s)	0,204	0,230	0,237	0,246
			h1-h2 (cm)	8,5	9,0	9,5	9,7
			L (cm)	6,42	6,42	6,42	6,42
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,324	1,402	1,480	1,511
			temperatura (°C)	25,3	25,3	25,3	25,3
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$	0,881	0,881	0,881	0,881
			velocidade corrigida (cm/s)	0,179	0,202	0,209	0,217
FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H (cm)			
				2,5	3,0	3,5	4,0
II	4,0%	2	tempo (t):	30	30	30	30
			volume (cm³):	480	540	560	580
			velocidade (cm/s):	0,2037	0,2292	0,2377	0,2462
			h1-h2 (cm)	8,5	9,0	9,5	9,7
			L (cm)	6,42	6,42	6,42	6,42
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,324	1,402	1,480	1,511
			temperatura (°C)	25,3	25,3	25,3	25,3
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$	0,881	0,881	0,881	0,881
			velocidade corrigida (cm/s)	0,179	0,202	0,209	0,217
FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H (cm)			
				2,5	3,0	3,5	4,0
II	4,0%	3	tempo (t):	30	30	30	30
			volume (cm³):	480	540	565	589
			velocidade (cm/s):	0,2037	0,2292	0,2398	0,2500
			h1-h2 (cm)	8,5	9,0	9,5	9,7
			L (cm)	6,42	6,42	6,42	6,42
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,324	1,402	1,480	1,511
			temperatura (°C)	25,3	25,3	25,3	25,3
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$	0,881	0,881	0,881	0,881
			velocidade corrigida (cm/s)	0,179	0,202	0,211	0,220
<b>VALORES MÉDIOS</b>							
			<b>velocidade (v) (cm/s):</b>	0,179	0,202	0,210	0,218
			<b>gradiente hidráulico (i) (cm/cm):</b>	1,324	1,402	1,480	1,511

**ENSAIO PERMEABILIDADE A CARGA CONSTANTE**

FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H(cm)			
				2,5	3,0	3,5	4,0
V	5,0%	1	tempo (s)	60	60	60	60
			volume (cm³)	590	648	685	735
			velocidade (cm/s)	0,125	0,138	0,145	0,156
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,36	6,36	6,36	6,36
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,101	1,179	1,258	1,336
			temperatura (°C)	24,5	24,5	24,5	24,5
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$	0,898	0,898	0,898	0,898
			velocidade corrigida (cm/s)	0,112	0,123	0,131	0,140
			<b>VALORES MÉDIOS</b>				
velocidade (v) (cm/s):				0,112	0,122	0,131	0,140
gradiente hidráulico (i) (cm/cm):				1,101	1,179	1,258	1,336

**ENSAIO PERMEABILIDADE A CARGA CONSTANTE**

FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H(cm)			
				2,5	3,0	3,5	4,0
V	4,5%	1	tempo (s)	60	30	30	30
			volume (cm³)	1000	540	560	591
			velocidade (cm/s)	0,212	0,229	0,238	0,251
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,31	6,31	6,31	6,31
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,109	1,189	1,268	1,347
			temperatura (°C)	26,8	24,9	24,9	24,9
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$	0,851	0,889	0,889	0,889
			velocidade corrigida (cm/s)	0,181	0,204	0,211	0,223
			<b>VALORES MÉDIOS</b>				
velocidade (v) (cm/s):				0,186	0,205	0,211	0,222
gradiente hidráulico (i) (cm/cm):				1,109	1,189	1,268	1,347

**ENSAIO PERMEABILIDADE A CARGA CONSTANTE**

FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H(cm)			
				2,5	3,0	3,5	4,0
V	4,0%	1	tempo (s)	60	60	60	60
			volume (cm <sup>3</sup> )	670	740	780	897
			velocidade (cm/s)	0,142	0,157	0,166	0,190
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,39	6,39	6,39	6,39
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,095	1,174	1,252	1,330
			temperatura (°C):	23,7	23,7	23,7	23,7
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,915	0,915	0,915	0,915
			velocidade corrigida (cm/s):	0,130	0,144	0,151	0,174
FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	2,5	3,0	3,5	4,0
V	4,0%	2	tempo (t):	60	60	60	60
			volume (cm <sup>3</sup> ):	660	750	782	890
			velocidade (cm/s):	0,140	0,159	0,166	0,189
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,39	6,39	6,39	6,39
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,095	1,174	1,252	1,330
			temperatura (°C):	23,7	23,7	23,7	23,7
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,915	0,915	0,915	0,915
			velocidade corrigida (cm/s):	0,128	0,146	0,152	0,173
FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	2,5	3,0	3,5	4,0
V	4,0%	3	tempo (t):	60	60	60	60
			volume (cm <sup>3</sup> ):	670	750	788	900
			velocidade (cm/s):	0,142	0,159	0,167	0,191
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,39	6,39	6,39	6,39
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,095	1,174	1,252	1,330
			temperatura (°C):	23,7	23,7	23,7	23,7
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,915	0,915	0,915	0,915
			velocidade corrigida (cm/s):	0,130	0,146	0,153	0,175
VALORES MÉDIOS							
velocidade (v) (cm/s):				0,129	0,145	0,152	0,174
gradiente hidráulico (i) (cm/cm):				1,095	1,174	1,252	1,330

**ENSAIO PERMEABILIDADE A CARGA CONSTANTE**

FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H(cm)			
				2,5	3,0	3,5	4,0
SC	5,0%	1	tempo (s)	30	30	30	30
			volume (cm <sup>3</sup> )	580	629	670	712
			velocidade (cm/s)	0,246	0,267	0,284	0,302
			h1-h2 (cm)	6,0	6,5	7,0	7,5
			L (cm)	6,43	6,43	6,43	6,43
			grad. Hidráulico (cm/cm)	0,933	1,011	1,089	1,166
			temperatura (°C):	25,7	25,7	25,7	25,7
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,873	0,873	0,873	0,873
			velocidade corrigida (cm/s):	0,215	0,233	0,248	0,264
FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	2,5	3,0	3,5	4,0
SC	5,0%	2	tempo (t):	30	30	30	30
			volume (cm <sup>3</sup> ):	582	630	678	710
			velocidade (cm/s):	0,247	0,267	0,288	0,301
			h1-h2 (cm)	6,0	6,5	7,0	7,5
			L (cm)	6,43	6,43	6,43	6,43
			grad. Hidráulico (cm/cm)	0,933	1,011	1,089	1,166
			temperatura (°C):	25,7	25,7	25,7	25,7
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,873	0,873	0,873	0,873
			velocidade corrigida (cm/s):	0,216	0,233	0,251	0,263
FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	2,5	3,0	3,5	4,0
SC	5,0%	3	tempo (t):	30	30	30	30
			volume (cm <sup>3</sup> ):	590	639	688	718
			velocidade (cm/s):	0,250	0,271	0,292	0,305
			h1-h2 (cm)	6,0	6,5	7,0	7,5
			L (cm)	6,43	6,43	6,43	6,43
			grad. Hidráulico (cm/cm)	0,933	1,011	1,089	1,166
			temperatura (°C):	25,7	25,7	25,7	25,7
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,873	0,873	0,873	0,873
			velocidade corrigida (cm/s):	0,219	0,237	0,255	0,266
VALORES MÉDIOS							
velocidade (v) (cm/s):				0,216	0,234	0,251	0,264
gradiente hidráulico (i) (cm/cm):				0,933	1,011	1,089	1,166

**ENSAIO PERMEABILIDADE A CARGA CONSTANTE**

FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H(cm)			
				2,5	3,0	3,5	4,0
SC	4,5%	1	tempo (s)	30	30	30	30
			volume (cm³)	535	580	628	655
			velocidade (cm/s)	0,227	0,246	0,267	0,278
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	7,6	8,0
			L (cm)	6,34	6,34	6,34	6,34
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,104	1,183	1,199	1,262
			temperatura (°C):	24,1	24,1	24,1	24,1
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,906	0,906	0,906	0,906
			velocidade corrigida (cm/s):	0,206	0,223	0,241	0,252
			<b>VALORES MÉDIOS</b>				
<b>velocidade (v) (cm/s):</b>	0,208	0,223	0,242	0,252			
<b>gradiente hidráulico (i) (cm/cm):</b>	1,104	1,183	1,199	1,262			

FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H(cm)			
				2,5	3,0	3,5	4,0
SC	4,0%	1	tempo (s)	30	30	30	30
			volume (cm³)	601	640	730	775
			velocidade (cm/s)	0,255	0,272	0,310	0,329
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,29	6,29	6,29	6,29
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,113	1,192	1,272	1,351
			temperatura (°C):	23,3	23,3	23,3	23,3
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,923	0,923	0,923	0,923
			velocidade corrigida (cm/s):	0,235	0,251	0,286	0,304
			<b>VALORES MÉDIOS</b>				
<b>velocidade (v) (cm/s):</b>	0,237	0,250	0,286	0,303			
<b>gradiente hidráulico (i) (cm/cm):</b>	1,113	1,192	1,272	1,351			

**ENSAIO PERMEABILIDADE A CARGA CONSTANTE**

FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H(cm)			
				2,5	3,0	3,5	4,0
OR-1	5,0%	1	tempo (s)	30	30	30	30
			volume (cm³)	425	459	495	525
			velocidade (cm/s)	0,180	0,195	0,210	0,223
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,25	6,25	6,25	6,25
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,120	1,200	1,280	1,360
			temperatura (°C):	23,3	23,3	23,3	23,3
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,923	0,923	0,923	0,923
			velocidade corrigida (cm/s):	0,166	0,180	0,194	0,206
			<b>FAIXA</b>	<b>Teor de ligante</b>	<b>Repetição</b>	<b>PARÂMETROS</b>	<b>2,5</b>
OR-1	5,0%	2	tempo (t):	30	30	30	30
			volume (cm³):	422	460	498	525
			velocidade (cm/s):	0,179	0,195	0,211	0,223
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,25	6,25	6,25	6,25
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,120	1,200	1,280	1,360
			temperatura (°C):	23,3	23,3	23,3	23,3
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,923	0,923	0,923	0,923
			velocidade corrigida (cm/s):	0,165	0,180	0,195	0,206
			<b>FAIXA</b>	<b>Teor de ligante</b>	<b>Repetição</b>	<b>PARÂMETROS</b>	<b>2,5</b>
OR-1	5,0%	3	tempo (t):	30	30	30	30
			volume (cm³):	422	458	500	525
			velocidade (cm/s):	0,179	0,194	0,212	0,223
			h1-h2 (cm)	7,0	7,5	8,0	8,5
			L (cm)	6,25	6,25	6,25	6,25
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,120	1,200	1,280	1,360
			temperatura (°C):	23,3	23,3	23,3	23,3
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,923	0,923	0,923	0,923
			velocidade corrigida (cm/s):	0,165	0,179	0,196	0,206
			<b>VALORES MÉDIOS</b>				
<b>velocidade (v) (cm/s):</b>				0,166	0,180	0,195	0,206
<b>gradiente hidráulico (i) (cm/cm):</b>				1,120	1,200	1,280	1,360

**ENSAIO PERMEABILIDADE A CARGA CONSTANTE**

FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H(cm)			
				2,5	3,0	3,5	4,0
OR-1	4,5%	1	tempo (s)	30	30	30	30
			volume (cm³)	430	461	499	538
			velocidade (cm/s)	0,183	0,196	0,212	0,228
			h1-h2 (cm)	7,5	8,0	8,5	9,0
			L (cm)	6,34	6,34	6,34	6,34
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,183	1,262	1,341	1,420
			temperatura (°C):	22,3	22,3	22,3	22,3
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,945	0,945	0,945	0,945
			velocidade corrigida (cm/s):	0,172	0,185	0,200	0,216
			<b>FAIXA</b>	<b>Teor de ligante</b>	<b>Repetição</b>	<b>PARÂMETROS</b>	<b>2,5</b>
OR-1	4,5%	2	tempo (t):	30	30	30	30
			volume (cm³):	430	469	495	539
			velocidade (cm/s):	0,183	0,199	0,210	0,229
			h1-h2 (cm)	7,5	8,0	8,5	9,0
			L (cm)	6,34	6,34	6,34	6,34
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,183	1,262	1,341	1,420
			temperatura (°C):	22,3	22,3	22,3	22,3
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,945	0,945	0,945	0,945
			velocidade corrigida (cm/s):	0,172	0,188	0,199	0,216
			<b>FAIXA</b>	<b>Teor de ligante</b>	<b>Repetição</b>	<b>PARÂMETROS</b>	<b>2,5</b>
OR-1	4,5%	3	tempo (t):	30	30	30	30
			volume (cm³):	429	458	498	539
			velocidade (cm/s):	0,182	0,194	0,211	0,229
			h1-h2 (cm)	7,5	8,0	8,5	9,0
			L (cm)	6,34	6,34	6,34	6,34
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,183	1,262	1,341	1,420
			temperatura (°C):	22,3	22,3	22,3	22,3
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,945	0,945	0,945	0,945
			velocidade corrigida (cm/s):	0,172	0,184	0,200	0,216
			<b>VALORES MÉDIOS</b>				
<b>velocidade (v) (cm/s):</b>				0,172	0,186	0,199	0,216
<b>gradiente hidráulico (i) (cm/cm):</b>				1,183	1,262	1,341	1,420

**ENSAIO PERMEABILIDADE A CARGA CONSTANTE**

FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	Carga H(cm)			
				2,5	3,0	3,5	4,0
OR-1	4,0%	1	tempo (s)	30	30	30	30
			volume (cm <sup>3</sup> )	460	518	562	615
			velocidade (cm/s)	0,195	0,220	0,239	0,261
			h1-h2 (cm)	7,5	8,0	8,5	9,0
			L (cm)	6,25	6,25	6,25	6,25
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,200	1,280	1,360	1,440
			temperatura (°C):	23,5	23,5	23,5	23,5
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,919	0,919	0,919	0,919
			velocidade corrigida (cm/s):	0,179	0,202	0,219	0,240
			FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	2,5
OR-1	4,0%	2	tempo (t):	30	30	30	30
			volume (cm <sup>3</sup> ):	469	521	568	620
			velocidade (cm/s):	0,199	0,221	0,241	0,263
			h1-h2 (cm)	7,5	8,0	8,5	9,0
			L (cm)	6,25	6,25	6,25	6,25
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,200	1,280	1,360	1,440
			temperatura (°C):	23,5	23,5	23,5	23,5
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,919	0,919	0,919	0,919
			velocidade corrigida (cm/s):	0,183	0,203	0,222	0,242
			FAIXA	Teor de ligante	Repetição	PARÂMETROS	2,5
OR-1	4,0%	3	tempo (t):	30	30	30	30
			volume (cm <sup>3</sup> ):	470	520	570	618
			velocidade (cm/s):	0,199	0,221	0,242	0,262
			h1-h2 (cm)	7,5	8,0	8,5	9,0
			L (cm)	6,25	6,25	6,25	6,25
			grad. Hidráulico (cm/cm)	1,200	1,280	1,360	1,440
			temperatura (°C):	23,5	23,5	23,5	23,5
			$\mu/\mu_{20^{\circ}C}$ :	0,919	0,919	0,919	0,919
			velocidade corrigida (cm/s):	0,183	0,203	0,222	0,241
			<b>VALORES MÉDIOS</b>				
<b>velocidade (v) (cm/s):</b>				0,182	0,203	0,221	0,241
<b>gradiente hidráulico (i) (cm/cm):</b>				1,200	1,280	1,360	1,440

## APÊNDICE B – Ensaios de infiltração das estruturas de camadas sobrepostas

<b>ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - FAIXA I - 5,0%</b>							
Tempo (mm:ss)	Leitura da régua (cm)	Lâmina infiltrada (cm)	Intervalo de tempo (s)	Intervalo de tempo (min.)	Tempo acum. (min.)	Velocidade de infiltração (mm/h)	Infiltração acum. (cm)
00:00	6,3	4,3	30	0,50	0,50	5.160,0	4,30
00:30	7,3	1,0	30	0,50	1,00	1.200,0	5,30
01:00	8,3/2,0	1,0	30	0,50	1,50	1.200,0	6,30
01:30	2,7	0,7	30	0,50	2,00	840,0	7,00
02:00	3,5	0,8	30	0,50	2,50	960,0	7,80
02:30	4,6	1,1	30	0,50	3,00	1.320,0	8,90
03:00	4,9	0,3	30	0,50	3,50	360,0	9,20
03:30	5,1	0,2	60	1,00	4,50	120,0	9,40
05:30	5,3	0,2	60	1,00	6,50	120,0	9,80
10:30	5,7	0,4	300	5,00	11,50	48,0	10,20
15:30	6,1	0,4	300	5,00	16,50	48,0	10,60
20:30	6,5	0,4	300	5,00	21,50	48,0	11,00
25:30	6,8	0,3	300	5,00	26,50	36,0	11,30
30:30	7,0	0,2	300	5,00	31,50	24,0	11,50
35:30	7,2	0,2	300	5,00	36,50	24,0	11,70
40:30	7,4	0,2	300	5,00	41,50	24,0	11,90
45:30	7,6	0,2	300	5,00	46,50	24,0	12,10
50:30	7,8	0,2	300	5,00	51,50	24,0	12,30

<b>ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - FAIXA I - 4,5%</b>							
Tempo (mm:ss)	Leitura da régua (cm)	Lâmina infiltrada (cm)	Intervalo de tempo (s)	Intervalo de tempo (min.)	Tempo acum. (min.)	Velocidade de infiltração (mm/h)	Infiltração acum. (cm)
01:00	4,8	2,8	60	1,00	1,0	1.680,0	2,8
02:00	6,4	1,6	60	1,00	2,0	960,0	4,4
03:00	8,0	1,6	60	1,00	3,0	960,0	6,0
04:00	2,3	0,4	60	1,00	4,0	240,0	6,4
05:00	2,3	0,4	60	1,00	5,0	240,0	6,8
06:00	2,5	0,2	60	1,00	6,0	120,0	7,0
11:00	3,4	0,9	300	5,00	11,0	108,0	7,9
16:00	4,1	0,7	300	5,00	16,0	84,0	8,6
21:00	4,7	0,6	300	5,00	21,0	72,0	9,2
26:00	5,3	0,6	300	5,00	26,0	72,0	9,8
31:00	5,9	0,6	300	5,00	31,0	72,0	10,4

ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - FAIXA II - 5,0%							
Tempo (mm:ss)	Leitura da régua (cm)	Lâmina infiltrada (cm)	Intervalo de tempo (s)	Intervalo de tempo (min.)	Tempo acum. (min.)	Velocidade de infiltração (mm/h)	Infiltração acum. (cm)
00:00	7,0	5,0	30	0,50	0,5	6.000,0	5,00
00:30	7,2	0,2	30	0,50	1,0	240,0	5,20
01:00	7,3	0,1	30	0,50	1,5	120,0	5,30
01:30	7,4	0,1	30	0,50	2,0	120,0	5,40
02:00	7,5	0,1	30	0,50	2,5	120,0	5,50
02:30	7,6	0,1	30	0,50	3,0	120,0	5,60
03:00	7,7	0,1	30	0,50	3,5	120,0	5,70
04:30	7,8	0,1	60	1,00	4,5	60,0	5,80
05:30	7,9	0,1	60	1,00	5,5	60,0	5,90
10:30	8,3	0,4	300	5,00	10,5	48,0	6,30
15:30	8,8	0,5	300	5,00	15,5	60,0	6,80
20:30	9,2	0,4	300	5,00	20,5	48,0	7,20
25:30	9,5	0,3	300	5,00	25,5	36,0	7,50
30:30	9,8/1,9	0,3	300	5,00	30,5	36,0	7,80
35:30	2,2	0,3	300	5,00	35,5	36,0	8,10
40:30	2,5	0,3	300	5,00	40,5	36,0	8,40
45:30	2,8	0,3	300	5,00	45,5	36,0	8,70

ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - FAIXA II - 4,5%							
Tempo (mm:ss)	Leitura da régua (cm)	Lâmina infiltrada (cm)	Intervalo de tempo (s)	Intervalo de tempo (min.)	Tempo acum. (min.)	Velocidade de infiltração (mm/h)	Infiltração acum. (cm)
00:30	5,2	3,2	30	0,50	0,5	3.840,0	3,2
01:00	7,6/2	2,8	30	0,50	1,0	3.360,0	6,0
01:30	4,8	2,4	30	0,50	1,5	2.880,0	8,4
02:00	4,9	0,1	30	0,50	2,0	120,0	8,5
02:30	4,9	0,1	30	0,50	2,5	120,0	8,6
03:00	5,1	0,2	30	0,50	3,0	240,0	8,8
03:30	5,2	0,1	30	0,50	3,5	120,0	8,9
04:30	5,3	0,1	60	1,00	4,5	60,0	9,0
05:30	5,6	0,3	60	1,00	5,5	180,0	9,3
10:30	6,1	0,5	300	5,00	10,5	60,0	9,8
15:30	6,7	0,6	300	5,00	15,5	72,0	10,4
20:30	7,2/2	0,5	300	5,00	20,5	60,0	10,9
25:30	2,5	0,5	300	5,00	25,5	60,0	11,4
30:30	3,1	0,6	300	5,00	30,5	72,0	12,0
35:30	3,6	0,5	300	5,00	35,5	60,0	12,5
40:30	4,2	0,6	300	5,00	40,5	72,0	13,1
45:30	4,7	0,5	300	5,00	45,5	60,0	13,6

ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - FAIXA II- 4,0%							
Tempo (mm:ss)	Leitura da régua (cm)	Lâmina infiltrada (cm)	Intervalo de tempo (s)	Intervalo de tempo (min.)	Tempo acum. (min.)	Velocidade de infiltração (mm/h)	Infiltração acum. (cm)
00:00	2,0						
00:30	5,4	3,4	30	0,50	0,5	4.080,0	3,40
01:00	7,4/2	2,0	30	0,50	1,0	2.400,0	5,40
01:30	3,4	1,4	30	0,50	1,5	1.680,0	6,80
02:00	4,2	0,8	30	0,50	2,0	960,0	7,60
02:30	4,3	0,1	30	0,50	2,5	120,0	7,70
03:00	4,4	0,1	30	0,50	3,0	120,0	7,80
03:30	4,5	0,1	30	0,50	3,5	120,0	7,90
04:30	4,9	0,4	60	1,00	4,5	240,0	8,30
05:30	5,0	0,1	60	1,00	5,5	60,0	8,40
10:30	6,0	1,0	300	5,00	10,5	120,0	9,40
15:30	6,8/1,7	0,8	300	5,00	15,5	96,0	10,20
20:30	2,6	0,9	300	5,00	20,5	108,0	11,10
25:30	3,4	0,8	300	5,00	25,5	96,0	11,90
30:30	4,3	0,9	300	5,00	30,5	108,0	12,80
35:30	5,1	0,8	300	5,00	35,5	96,0	13,60
40:30	5,9	0,8	300	5,00	40,5	96,0	14,40
45:30	6,7	0,8	300	5,00	45,5	96,0	15,20

ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - FAIXA V- 5,0%							
Tempo (mm:ss)	Leitura da régua (cm)	Lâmina infiltrada (cm)	Intervalo de tempo (s)	Intervalo de tempo (min.)	Tempo acum. (min.)	Velocidade de infiltração (mm/h)	Infiltração acum. (cm)
00:30	4,3/2	2,3	30	0,50	0,5	2.760,0	2,3
01:00	5,3	3,3	30	0,50	0,5	3.960,0	3,3
01:30	5,8	2,3	30	0,50	1,0	2.760,0	5,6
02:00	5,8	0,5	30	0,50	1,5	600,0	6,1
02:30	5,9/1,8	0,1	30	0,50	2,0	120,0	6,2
03:00	2	0,1	30	0,50	2,5	120,0	6,3
05:30	2,2	0,2	60	1,00	4,0	120,0	6,6
10:30	2,3	0,1	60	1,00	5,0	60,0	6,7
15:30	2,8	0,5	300	5,00	10,0	60,0	7,2
20:30	3,2	0,4	300	5,00	15,0	48,0	7,6
25:30	3,6	0,4	300	5,00	20,0	48,0	8,0
30:30	3,9	0,3	300	5,00	25,0	36,0	8,3
35:30	4,1	0,2	300	5,00	30,0	24,0	8,5
40:30	4,3	0,2	300	5,00	35,0	24,0	8,7
45:30	4,5	0,2	300	5,00	40,0	24,0	8,9
50:30	4,7	0,2	300	5,00	45,0	24,0	9,1

ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - FAIXA V - 4,5%							
Tempo (mm:ss)	Leitura da régua (cm)	Lâmina infiltrada (cm)	Intervalo de tempo (s)	Intervalo de tempo (min.)	Tempo acum. (min.)	Velocidade de infiltração (mm/h)	Infiltração acum. (cm)
00:30	5,5/2	3,5	30	0,50	0,5	4.200,0	3,5
01:00	3,8	1,8	30	0,50	1,0	2.160,0	5,3
01:30	4	0,2	30	0,50	1,5	240,0	5,5
02:00	4,2	0,2	30	0,50	2,0	240,0	5,7
02:30	4,2	0,2	30	0,50	2,5	240,0	5,9
03:00	4,3	0,1	30	0,50	3,0	120,0	6,0
03:30	4,3	0,1	30	0,50	3,5	120,0	6,1
04:30	4,6	0,3	60	1,00	4,5	180,0	6,4
05:30	4,8	0,2	60	1,00	5,5	120,0	6,6
10:30	5,3	0,5	300	5,00	10,5	60,0	7,1
15:30	5,8/1,8	0,5	300	5,00	15,5	60,0	7,6
20:30	2,2	0,4	300	5,00	20,5	48,0	8,0
25:30	2,7	0,5	300	5,00	25,5	60,0	8,5
30:30	3,2	0,5	300	5,00	30,5	60,0	9,0
35:30	3,6	0,4	300	5,00	35,5	48,0	9,4
40:30	4,1	0,5	300	5,00	40,5	60,0	9,9
45:30	4,5	0,4	300	5,00	45,5	48,0	10,3

ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - FAIXA V - 4,0%							
Tempo (mm:ss)	Leitura da régua (cm)	Lâmina infiltrada (cm)	Intervalo de tempo (s)	Intervalo de tempo (min.)	Tempo acum. (min.)	Velocidade de infiltração (mm/h)	Infiltração acum. (cm)
00:00	2	0					
00:30	6	4,0	30	0,50	0,5	4.800,0	4,0
01:00	7,4/1,8	1,4	30	0,50	1,0	1.680,0	5,4
01:30	1,9	0,1	60	1,00	2,0	60,0	5,5
02:00	2,2	0,3	30	0,50	2,5	360,0	5,8
02:30	2,4	0,2	30	0,50	3,0	240,0	6,0
03:00	2,5	0,1	60	1,00	4,0	60,0	6,1
04:30	2,7	0,2	60	1,00	5,0	120,0	6,3
05:30	2,9	0,2	300	5,00	10,0	24,0	6,5
10:30	3,8	0,9	300	5,00	15,0	108,0	7,4
15:30	4,7	0,9	300	5,00	20,0	108,0	8,3
20:30	5,4	0,7	300	5,00	25,0	84,0	9,0
25:30	6,2	0,8	300	5,00	30,0	96,0	9,8
30:30	6,9/2	0,7	300	5,00	35,0	84,0	10,5
35:30	2,7	0,7	300	5,00	40,0	84,0	11,2
40:30	3,4	0,7	300	5,00	45,0	84,0	11,9
45:30	4,2	0,8	300	5,00	50,0	96,0	12,7

ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - FAIXA SC- 5,0%							
Tempo (mm:ss)	Leitura da régua (cm)	Lâmina infiltrada (cm)	Intervalo de tempo (s)	Intervalo de tempo (min.)	Tempo acum. (min.)	Velocidade de infiltração (mm/h)	Infiltração acum. (cm)
00:30	8/2	6,0	30	0,50	0,5	7.200,0	6,0
01:00	2,1	0,1	30	0,50	1,0	120,0	6,1
01:30	2,2	0,1	30	0,50	1,5	120,0	6,2
02:00	2,3	0,1	30	0,50	2,0	120,0	6,3
02:30	2,3	0,1	30	0,50	2,5	120,0	6,4
03:00	2,4	0,1	30	0,50	3,0	120,0	6,5
03:30	2,4	0,1	30	0,50	3,5	120,0	6,6
04:30	2,5	0,1	30	0,50	4,0	120,0	6,7
05:30	2,6	0,1	60	1,00	5,0	60,0	6,8
10:30	3,1	0,5	300	5,00	10,0	60,0	7,3
15:30	3,4	0,3	300	5,00	15,0	36,0	7,6
20:30	3,7	0,3	300	5,00	20,0	36,0	7,9
25:30	3,9	0,2	300	5,00	25,0	24,0	8,1
30:30	4,2	0,3	300	5,00	30,0	36,0	8,4
35:30	4,4	0,2	300	5,00	35,0	24,0	8,6
40:30	4,6	0,2	300	5,00	40,0	24,0	8,8
45:30	4,8	0,2	300	5,00	45,0	24,0	9,0
50:30	5,1	0,3	300	5,00	50,0	36,0	9,3

ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - FAIXA SC- 4,5%							
Tempo (mm:ss)	Leitura da régua (cm)	Lâmina infiltrada (cm)	Intervalo de tempo (s)	Intervalo de tempo (min.)	Tempo acum. (min.)	Velocidade de infiltração (mm/h)	Infiltração acum. (cm)
00:30	10/2	8,0	30	0,50	0,5	9.600,0	8,0
01:00	2	0,2	30	0,50	1,5	240,0	8,2
01:30	2,2	0,1	30	0,50	2,0	120,0	8,1
02:00	2,3	0,1	30	0,50	2,5	120,0	8,1
02:30	2,4	0,1	30	0,50	3,0	120,0	8,3
03:00	2,5	0,1	30	0,50	3,5	120,0	8,2
03:30	2,6	0,1	60	1,00	4,5	60,0	8,2
04:30	2,7	0,1	60	1,00	5,5	60,0	8,4
05:30	2,8	0,6	300	5,00	10,5	72,0	8,8
10:30	3,4	0,4	300	5,00	15,5	48,0	8,6
15:30	3,8	0,3	300	5,00	20,5	36,0	8,7
20:30	4,1	0,2	300	5,00	25,5	24,0	9,0
25:30	4,3	0,4	300	5,00	30,5	48,0	9,0
30:30	4,7	0,3	300	5,00	35,5	36,0	9,0
35:30	5	0,3	300	5,00	40,5	36,0	9,3
40:30	5,3	0,3	300	5,00	45,5	36,0	9,3
45:30	5,6	0,3	300	5,00	50,5	36,0	9,3

ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - FAIXA SC- 4,0%							
Tempo (mm:ss)	Leitura da régua (cm)	Lâmina infiltrada (cm)	Intervalo de tempo (s)	Intervalo de tempo (min.)	Tempo acum. (min.)	Velocidade de infiltração (mm/h)	Infiltração acum. (cm)
00:30	8,5	6,5	30	0,50	0,5	7.800,0	6,5
01:00	8,7	0,2	30	0,50	1,0	240,0	6,7
01:30	8,8/2	0,1	30	0,50	1,5	120,0	6,8
02:00	2,1	0,1	30	0,50	2,0	120,0	6,9
02:30	2,3	0,2	30	0,50	2,5	240,0	7,1
03:00	2,4	0,1	30	0,50	3,0	120,0	7,2
03:30	2,5	0,1	30	0,50	3,5	120,0	7,3
04:30	2,7	0,2	60	1,00	4,5	120,0	7,5
05:30	2,9	0,2	60	1,00	5,5	120,0	7,7
10:30	3,8	0,9	300	5,00	10,5	108,0	8,6
15:30	4,6	0,8	300	5,00	15,5	96,0	9,4
20:30	5,3	0,7	300	5,00	20,5	84,0	10,1
25:30	6	0,7	300	5,00	25,5	84,0	10,8
30:30	6,7	0,7	300	5,00	30,5	84,0	11,5
35:30	7,4	0,7	300	5,00	35,5	84,0	12,2
40:30	8,1	0,7	300	5,00	40,5	84,0	12,9
45:30	8,8	0,7	300	5,00	45,5	84,0	13,6

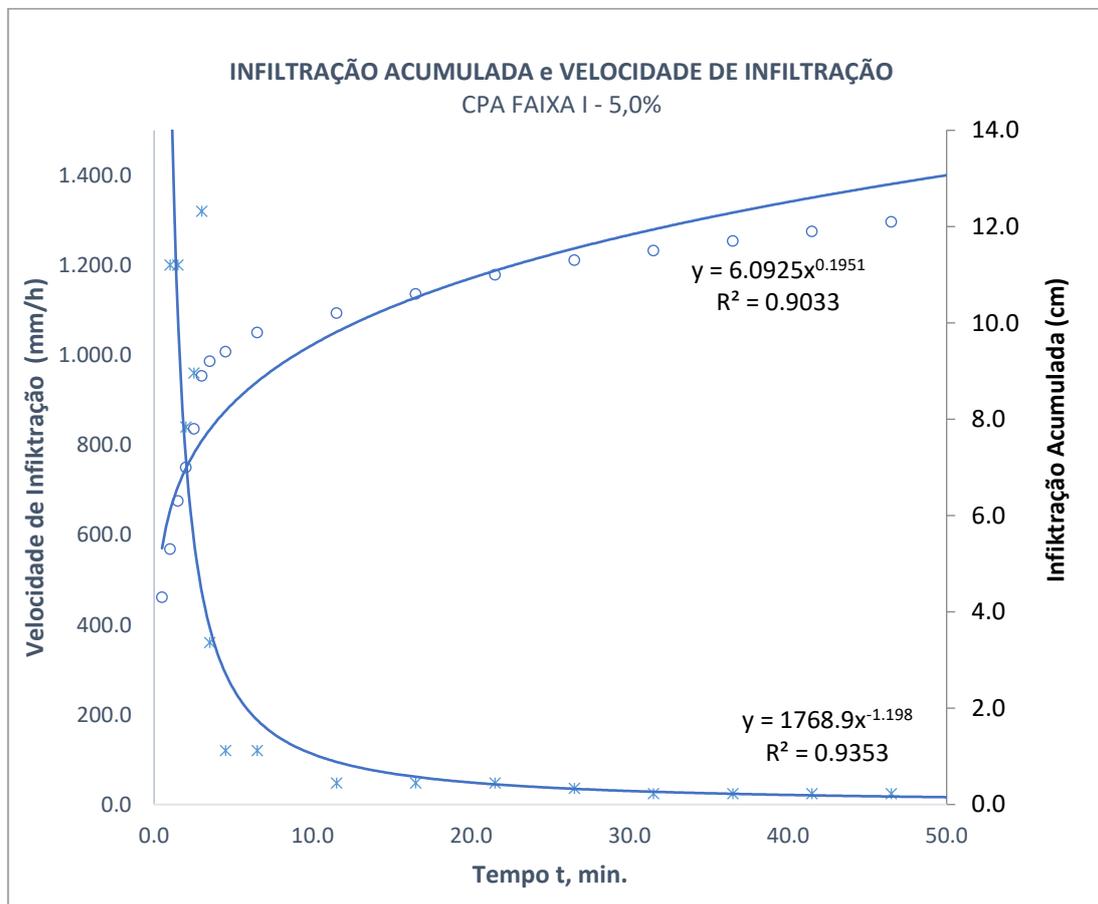
ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - FAIXA OR-1- 5,0%							
Tempo (mm:ss)	Leitura da régua (cm)	Lâmina infiltrada (cm)	Intervalo de tempo (s)	Intervalo de tempo (min.)	Tempo acum. (min.)	Velocidade de infiltração (mm/h)	Infiltração acum. (cm)
00:30	8,5	6,5	30	0,50	0,5	7.800,0	6,5
01:00	8,8/2	0,3	30	0,50	1,0	360,0	6,8
01:30	2,1	0,1	30	0,50	1,5	120,0	6,9
02:00	2,15	0,0	30	0,50	2,0	60,0	7,0
02:30	2,2	0,1	30	0,50	2,5	60,0	7,0
03:00	2,3	0,1	30	0,50	3,0	120,0	7,1
03:30	2,4	0,1	30	0,50	3,5	120,0	7,2
04:30	2,6	0,2	60	1,00	4,5	120,0	7,4
05:30	2,7	0,1	60	1,00	5,5	60,0	7,5
10:30	3,4	0,7	300	5,00	10,5	84,0	8,2
15:30	3,8	0,4	300	5,00	15,5	48,0	8,6
20:30	4,15	0,35	300	5,00	20,5	42,0	9,0
25:30	4,5	0,35	300	5,00	25,5	42,0	9,3
30:30	4,8	0,3	300	5,00	30,5	36,0	9,6
35:30	5	0,2	300	5,00	35,5	24,0	9,8
40:30	5,3	0,3	300	5,00	40,5	36,0	10,1
45:30	5,55	0,3	300	5,00	45,5	30,0	10,4
50:30	5,8	0,3	300	5,00	50,5	30,0	10,6

<b>ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - FAIXA OR-1- 4,5%</b>							
Tempo (mm:ss)	Leitura da régua (cm)	Lâmina infiltrada (cm)	Intervalo de tempo (s)	Intervalo de tempo (min.)	Tempo acum. (min.)	Velocidade de infiltração (mm/h)	Infiltração acum. (cm)
00:30	7,3	5,3	30	0,50	0,5	6.360,0	5,3
01:00	2,8	0,8	30	0,50	1,0	960,0	6,1
01:30	3	0,2	30	0,50	1,5	240,0	6,3
02:00	3,1	0,1	30	0,50	2,0	120,0	6,4
02:30	3,2	0,1	30	0,50	2,5	120,0	6,5
03:00	3,3	0,1	30	0,50	3,0	120,0	6,6
03:30	3,4	0,1	30	0,50	3,5	120,0	6,7
04:30	3,6	0,2	60	1,00	4,5	120,0	6,9
05:30	3,7	0,1	60	1,00	5,5	60,0	7,0
10:30	4,2	0,5	300	5,00	10,5	60,0	7,5
15:30	4,6	0,4	300	5,00	15,5	48,0	7,9
20:30	4,9	0,3	300	5,00	20,5	36,0	8,2
25:30	5,2	0,3	300	5,00	25,5	36,0	8,5
30:30	5,4	0,2	300	5,00	30,5	24,0	8,7
35:30	5,7	0,3	300	5,00	35,5	36,0	9,0
40:30	5,9	0,2	300	5,00	40,5	24,0	9,2
45:30	6,2	0,3	300	5,00	45,5	36,0	9,5
50:30	6,5	0,3	300	5,00	50,5	36,0	9,8
55:30	6,8	0,3	300	5,00	55,5	36,0	10,1

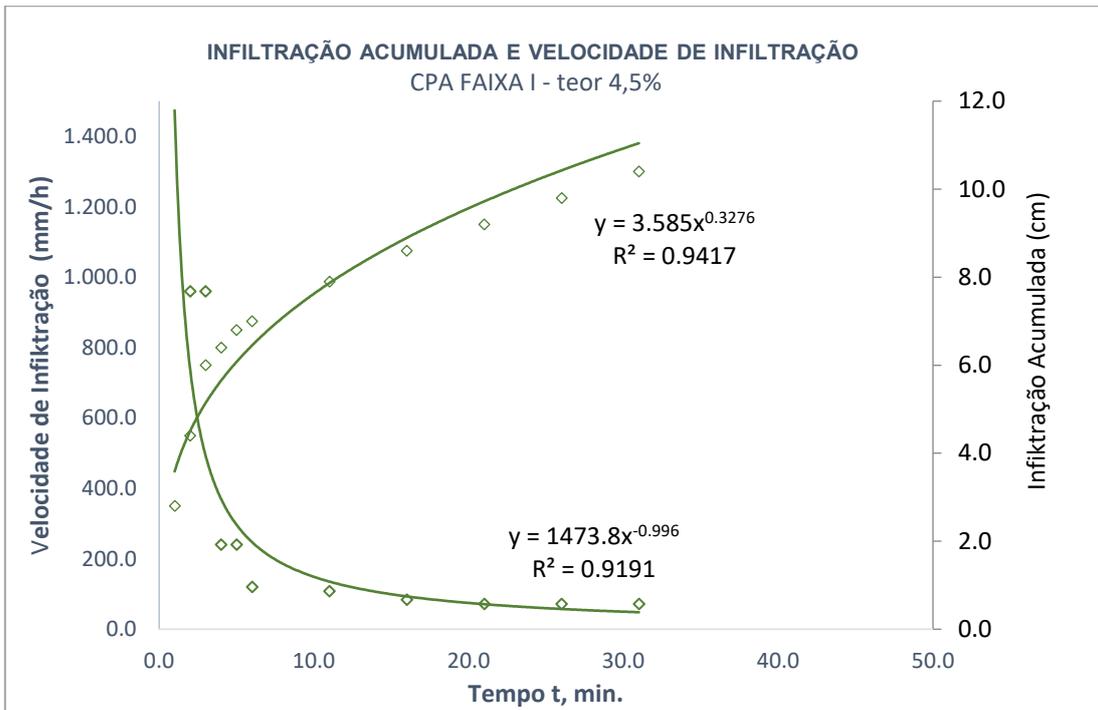
<b>ENSAIO DE INFILTRAÇÃO - FAIXA OR-1- 4,0%</b>							
Tempo (mm:ss)	Leitura da régua (cm)	Lâmina infiltrada (cm)	Intervalo de tempo (s)	Intervalo de tempo (min.)	Tempo acum. (min.)	Velocidade de infiltração (mm/h)	Infiltração acum. (cm)
00:30	6,4	4,4	30	0,50	0,5	5.280,0	4,4
01:00	7	0,6	30	0,50	1,0	720,0	5,0
01:30	7,3	0,3	30	0,50	1,5	360,0	5,3
02:00	7,4	0,1	30	0,50	2,0	120,0	5,4
02:30	7,5	0,1	30	0,50	2,5	120,0	5,5
03:00	7,6	0,1	30	0,50	3,0	120,0	5,6
03:30	7,7	0,1	30	0,50	3,5	120,0	5,7
04:30	7,8	0,1	60	1,00	4,5	60,0	5,8
05:30	8	0,2	60	1,00	5,5	120,0	6,0
10:30	8,6/2	0,6	300	5,00	10,5	72,0	6,6
15:30	2,4	0,4	300	5,00	15,5	48,0	7,0
20:30	2,8	0,4	300	5,00	20,5	48,0	7,4
25:30	3,4	0,6	300	5,00	25,5	72,0	8,0
30:30	4,1	0,7	300	5,00	30,5	84,0	8,7
35:30	4,8	0,7	300	5,00	35,5	84,0	9,4
40:30	5,5	0,7	300	5,00	40,5	84,0	10,1

# APÊNDICE C – Curvas de infiltração acumulada e velocidade de infiltração das estruturas de camadas modeladas com as misturas CPA/OGFC

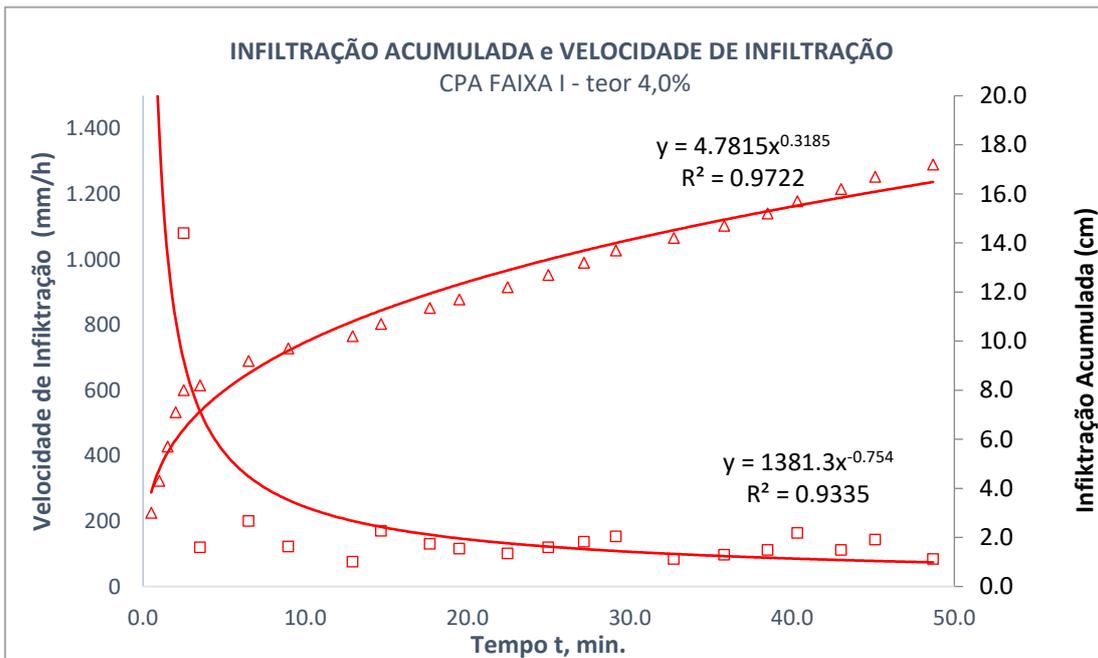
## CPA FAIXA I – 5,0%



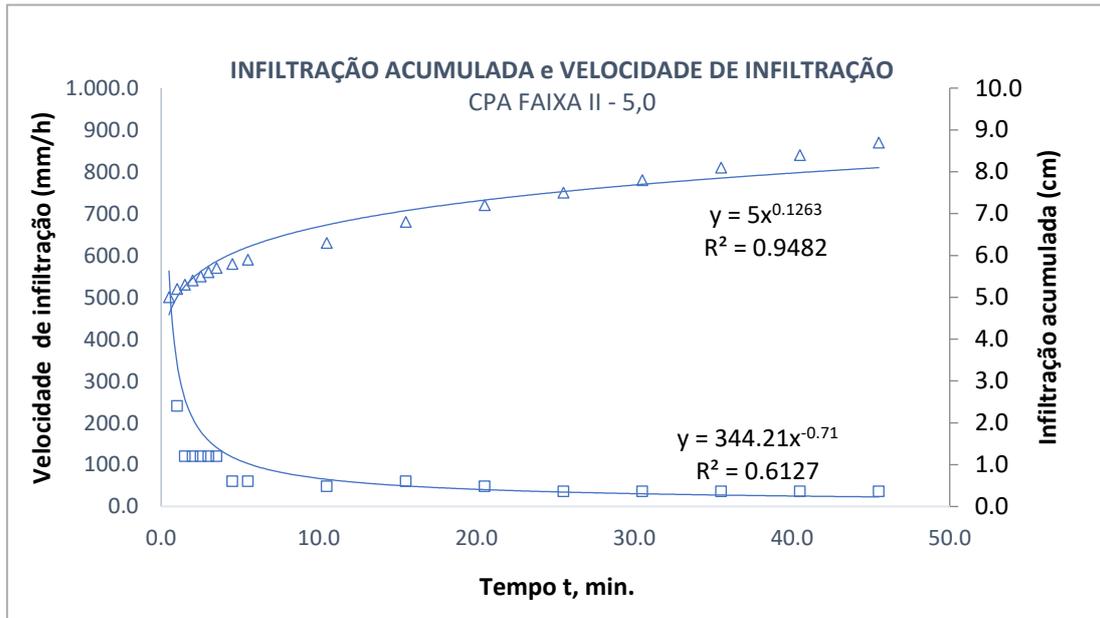
## CPA FAIXA I – 4,5%



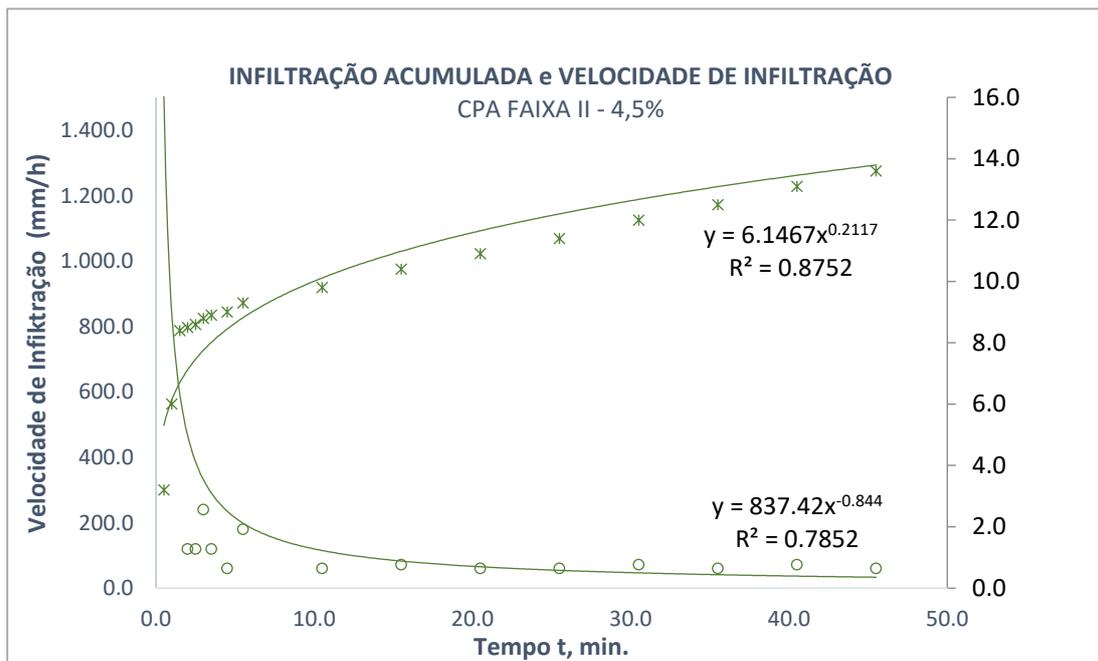
**CPA FAIXA I – 4,0%**



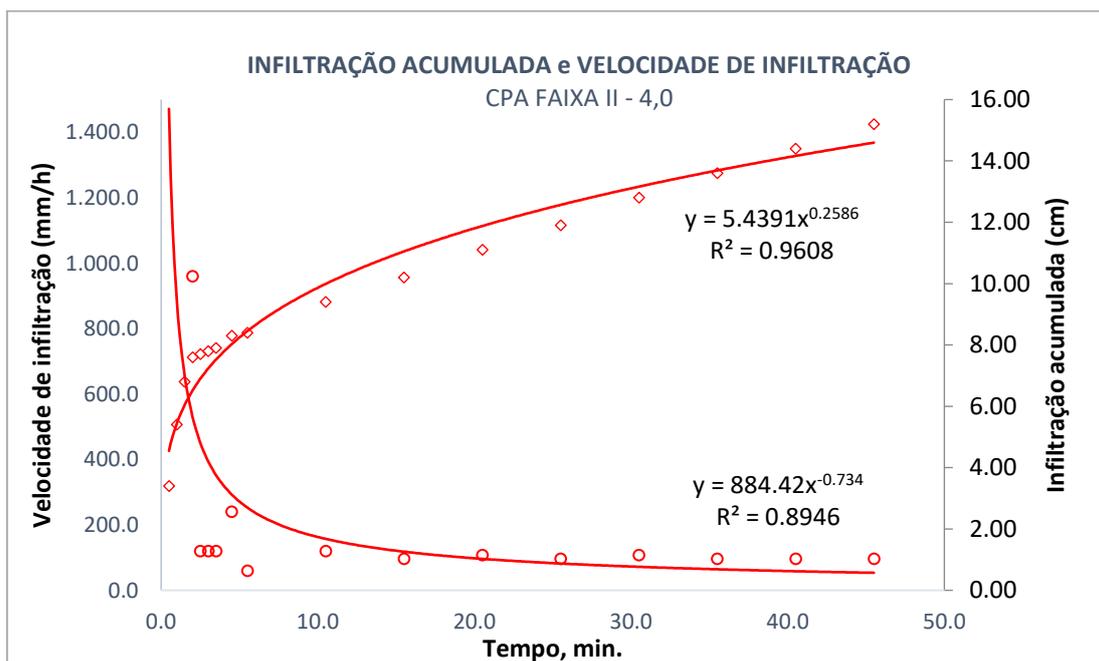
### CPA FAIXA II – 5,0%



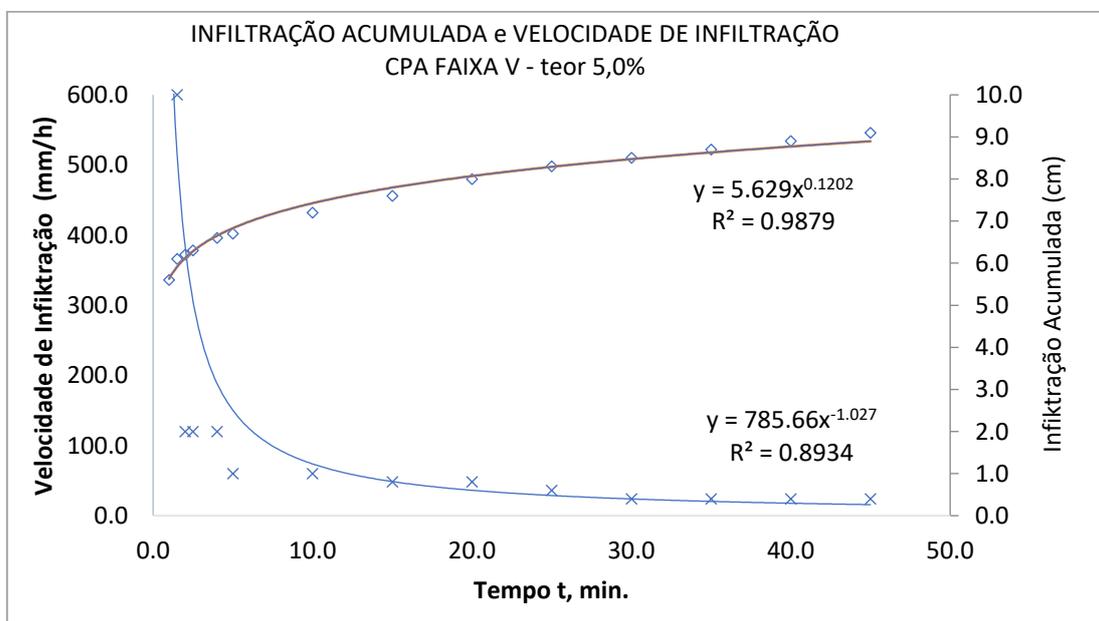
### CPA FAIXA II – 4,5%



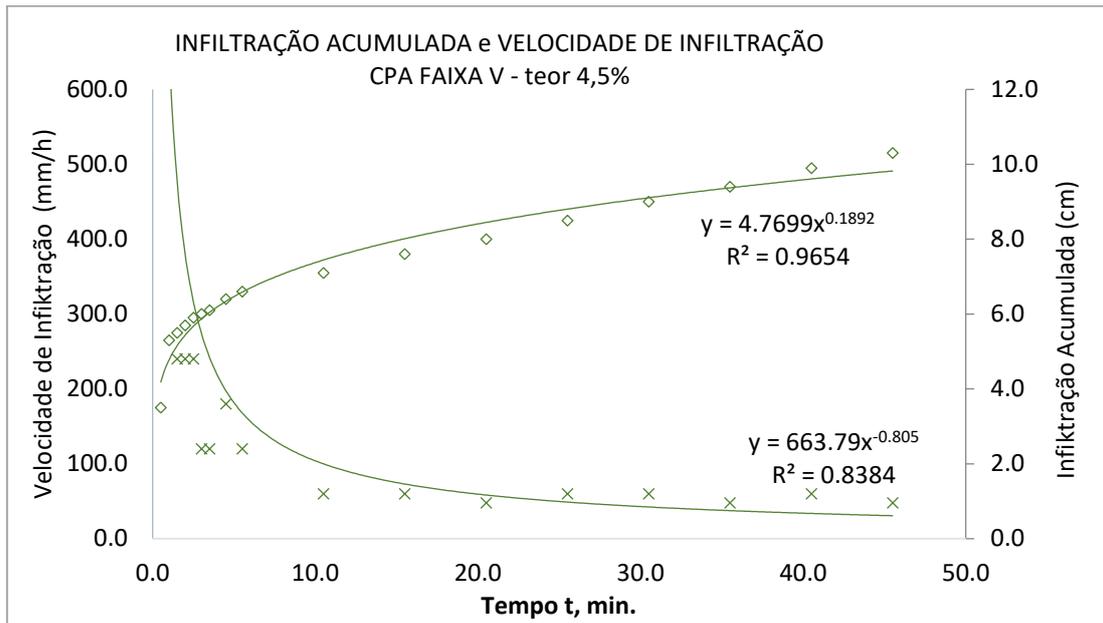
### CPA FAIXA II – 4,0%



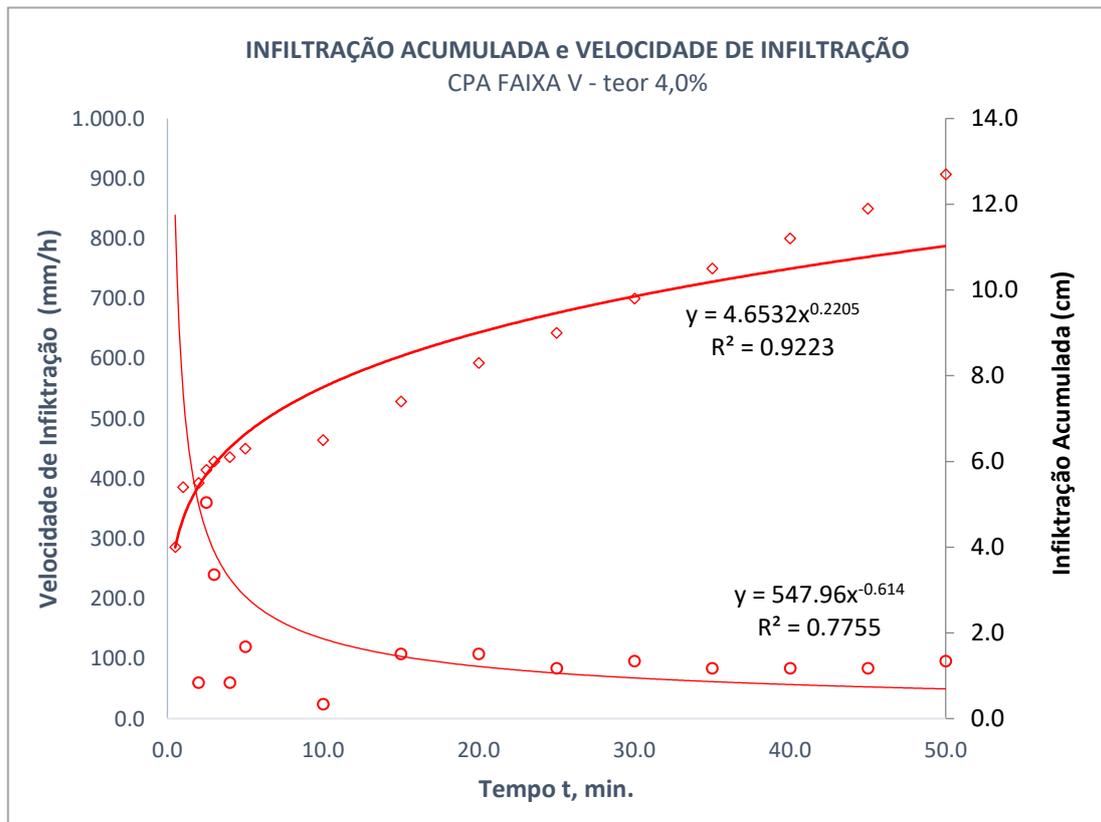
### CPA FAIXA V – 5,0%



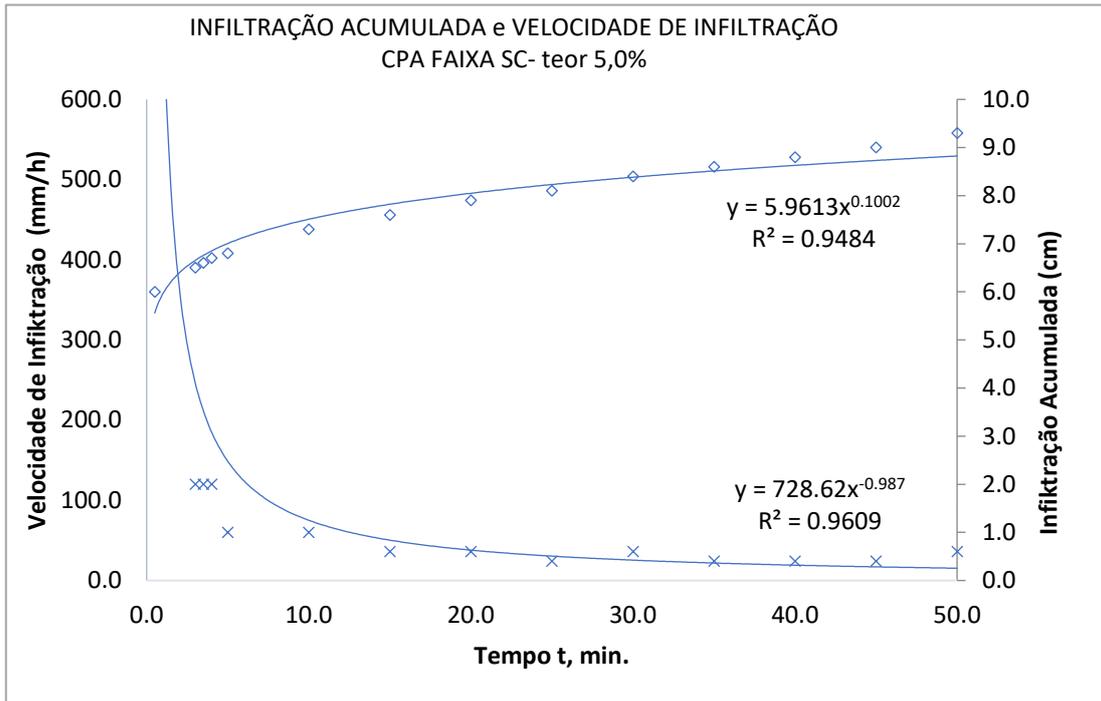
### CPA FAIXA V – 4,5%



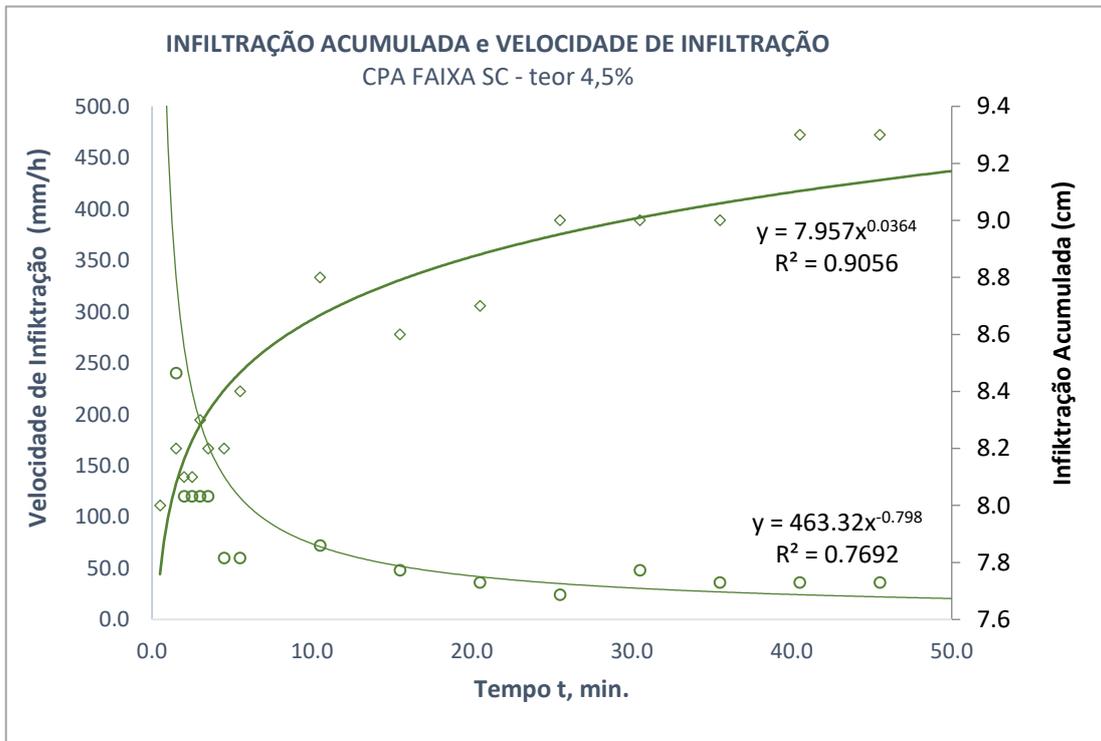
### CPA FAIXA V – 4,0%



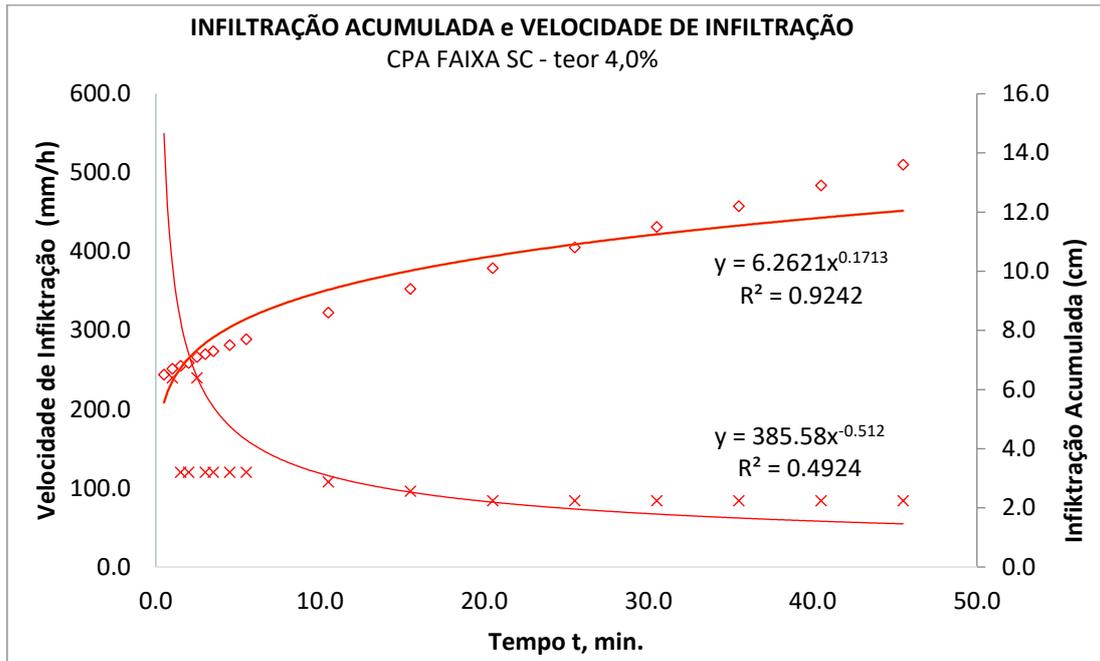
### OGFC FAIXA SC – 5,0%



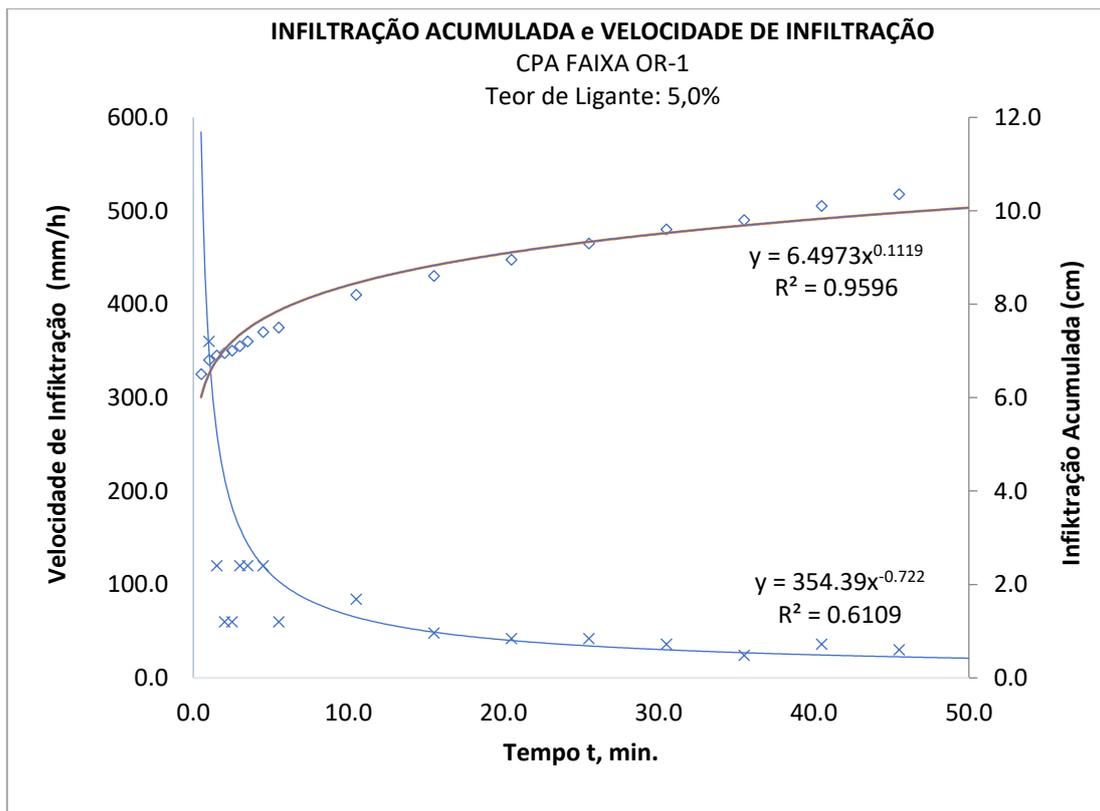
### OGFC FAIXA SC – 4,5%



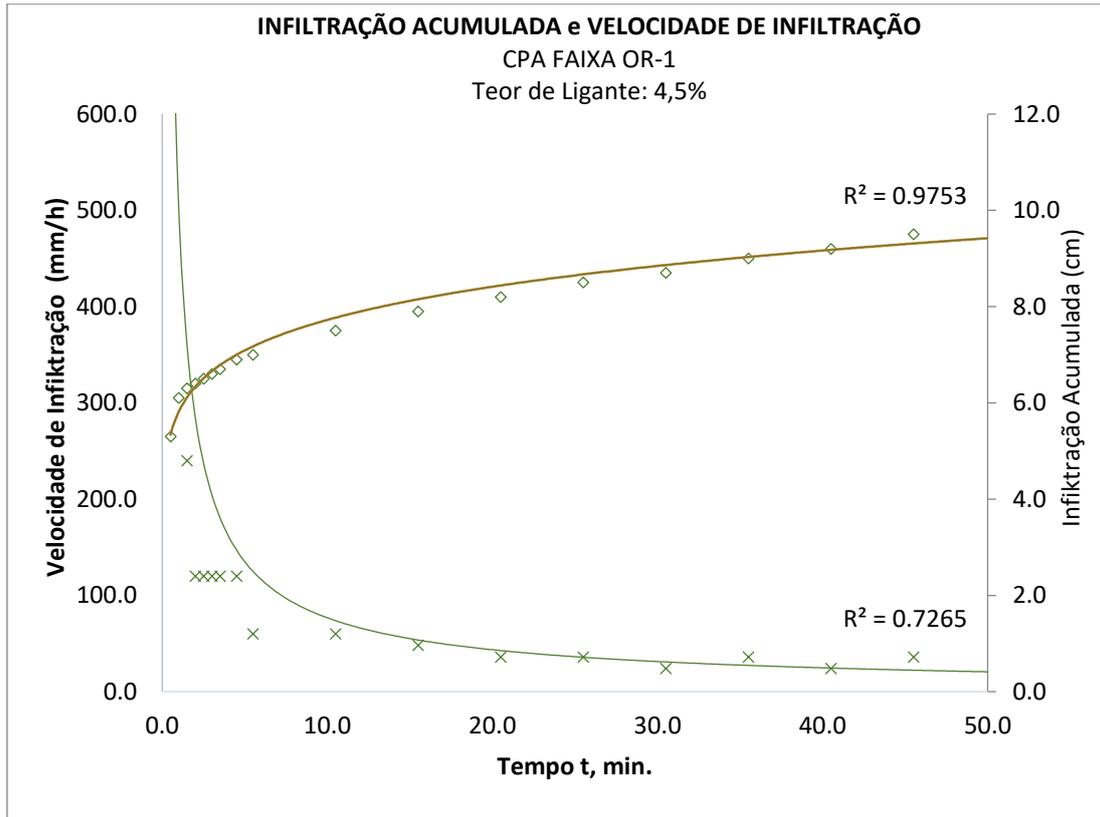
### OGFC FAIXA SC – 4,0%



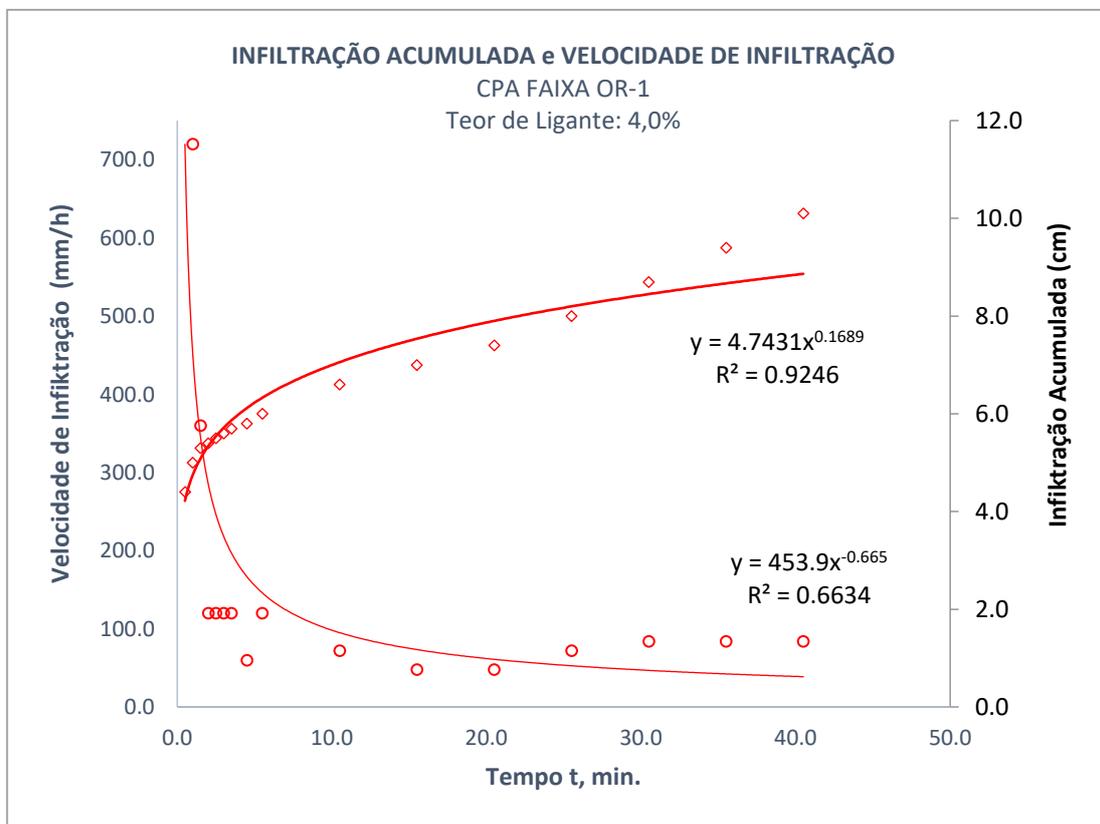
### OGFC FAIXA OR-1 – 5,0%



### OGFC FAIXA OR-1 – 4,5%



### OGFC FAIXA OR-1 – 4,0%



## APÊNDICE D – Código do algoritmo *FNDS*

```
% Algoritmo FNDS -FAST NONDOMINATED SORTING (DEB, 2002)
% Encontrando a 1ª fronteira (soluções não-dominadas)
for i=1:N
    % Número de pontos que dominam x
    x(i).n = 0;
    % Conjunto de pontos que x domina
    x(i).p = [];
    for j=1:N
        dom_menor=0;
        dom_igual=0;
        dom_maior=0;
        for k = 1:K
            if (p(i).functions(k)< p(j).functions(k))
                dom_menor = dom_menor + 1;
            elseif (p(i).functions(k)== p(j).functions(k))
                dom_igual = dom_igual + 1;
            else
                dom_maior = dom_maior + 1;
            end
        end
        if dom_menor == 0 && dom_igual ~= K
            x(i).n = x(i).n + 1;
        elseif dom_maior == 0 && dom_igual ~= K
            x(i).p = [x(i).p j];
        end
    end
    if x(i).n == 0
        p(i).functions(K+1)=1;
        F(front).f = [F(front).f i];
    end
end

%Encontrando as fronteiras subsequentes
while ~isempty(F(front).f)
    Q=[];
    for i= 1:length(F(front).f)
        if ~isempty(x(F(front).f(i)).p)
            for j = 1:length(x(F(front).f(i)).p)
                x(x(F(front).f(i)).p(j)).n = x(x(F(front).f(i)).p(j)).n - 1;
                if x(x(F(front).f(i)).p(j)).n == 0
                    p(x(F(front).f(i)).p(j)).functions(K+1) = front+1;
                    Q = [Q x(F(front).f(i)).p(j)];
                end
            end
        end
    end
    front=front+1;
    F(front).f = Q;
end
```