



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL de LONDRINA

---

GERSSON FERNANDO BARRETO SANDOVAL

**PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DO CONCRETO PERMEÁVEL  
SUBMETIDO A COLMATAÇÃO**

---

Londrina  
2020

GERSSON FERNANDO BARRETO SANDOVAL

**PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DO CONCRETO PERMEÁVEL  
SUBMETIDO A COLMATAÇÃO**

Tese apresentada ao curso de Pós-graduação  
em Doutorado em Engenharia Civil da  
Universidade Estadual de Londrina.  
Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Berenice Martins  
Toralles

Coorientador: Prof. Dr. André de Campos Moura

Londrina  
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

SANDOVAL, GERSSON FERNANDO BARRETO.  
PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DO CONCRETO PERMEÁVEL SUBMETIDO A COLMATAÇÃO / GERSSON FERNANDO BARRETO SANDOVAL. - Londrina, 2020.  
188 f.

Orientador: BERENICE MARTINS TORALLES.

Coorientador: ANDRÉ DE CAMPOS MOURA.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.

Inclui bibliografia.

1. concreto permeável - Tese. 2. colmatação - Tese. 3. manutenção - Tese. 4. vida útil - Tese. I. MARTINS TORALLES, BERENICE. II. DE CAMPOS MOURA, ANDRÉ. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDU 62

GERSSON FERNANDO BARRETO SANDOVAL

**PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DO CONCRETO PERMEÁVEL SUBMETIDO  
A COLMATAÇÃO**

Tese apresentada ao Curso de Pós-graduação  
Doutorado em Engenharia Civil da Universidade  
Estadual de Londrina, como requisito parcial à  
obtenção ao título de Doutor.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Berenice Martins  
Toralles  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Ravindra Gettu  
Indian Institute of Technology Madras

---

Prof. Dr. Eduardo Inocente Jussiani  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Isaac Galobardes Reyes  
Mohammed VI Polytechnic University

---

Prof. Dr. Hemerson Pinheiro  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Washington Peres Núñez  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul -  
UFRGS

Londrina, 28 de setembro de 2020.

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais **Jose Hildebrando Barreto Riaño** e **Rosalba Sandoval Blanco**  
Sem vocês não teria conseguido alcançar todos meus sonhos, obrigado pai e mãe  
por existir e serem meus guias, amo vocês.

## AGRADECIMENTOS

Ao longo dessa caminhada aprendi que não se faz pesquisa sozinho, que o caminho é árduo, e que sem a ajuda de vocês teria sido impossível começar e terminar esta tese. Agora que esta jornada termina, e os meus objetivos foram alcançados não poderia deixar de agradecer a todos vocês:

A **DEUS** por sempre me mostrar o caminho a seguir, por me fortalecer sempre e manter a minha vontade de ser melhor cada dia.

Aos meus pais **Jose Barreto** e **Rosalba Sandoval**, todo este tempo longe de vocês me mostrou o quão são importantes para mim, vocês são a minha inspiração, e meu exemplo, obrigado pelo apoio sincero, por me escutar dia a dia, me aconselhar sempre que foi necessário e me animar nos meus momentos mais difíceis, amo muito vocês.

A minha tia **Nubia** (minha segunda mãe) pelo seu carinho, apoio e suas palavras de ânimo, obrigado por fazer parte da minha vida.

A minha Família **Sandoval Blanco** por ter me incentivado sempre a ser uma melhor pessoa e um melhor profissional.

A minha noiva **Camila Arcarde Grande**, por ter feito parte de todo este processo, ter me apoiado sempre, ter me escutado quando foi necessário, pela sua ajuda e disposição infinita, pelas risadas, pela paciência, por me mostrar o lado bom da vida, sobretudo por ser um exemplo de responsabilidade e perseverança e compartilhar todo este tempo ao meu lado, sem você o caminho não teria sido nada fácil, amo você.

A Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> **Berenice Martins Toralles** por me orientar, o meu maior agradecimento pela oportunidade de realizar este trabalho ao lado de uma docente e pesquisadora exemplar, obrigado por me escolher tanto no mestrado quanto no doutorado e se arriscar a trabalhar comigo mesmo sem me conhecer; meu respeito e admiração pela sua serenidade, capacidade de análise do perfil de seus alunos, pelo seu dom no ensino da ciência, sua simplicidade e eficiência, e sobretudo pelo seu caráter, lembrarei de você sempre.

A Prof. Dr. **André Moura** por me coorientar, obrigado pela sua disposição, pela sua paciência e por compartilhar comigo seu conhecimento e sua ampla experiência, levo comigo a seriedade e a importância que você sempre deu ao meu trabalho, obrigado.

Ao Professores Dr. **Hemerson Pinheiro**, Dr. **Eduardo Inocente**, dr. **Pedro Vendrame**, Dr. **Rafael Nardini Gomes** e Dra. **Fátima Guimarães** pelo auxílio e presteza, e os conhecimentos transmitidos sobre o assunto abordado.

Ao Prof. Dr. e amigo **Isaac Galobardes Reyes**, por compartilhar seu conhecimento comigo e sempre estar disposto a me ajudar quando foi necessário, obrigado de verdade.

Aos meus grandes amigos **Angel e Angela** e meu afilhado **Juan Esteban** pela parceria de sempre, pela amizade sincera, pelas risadas, pelo apoio, pela sua presença na minha vida, DEUS me apresentou vocês no momento indicado e agradeço ter a oportunidade desta amizade.

Ao meu grande amigo **Jose Carlos Gasparine** sua querida esposa **Isabel** e suas filhas **Vitória e Carolina** por me receber em sua casa, como se fosse um filho mais, pela confiança e o apoio nos momentos difíceis.

Ao meu amigo **Felipe Gonçalves de Jesus**, pela sua amizade e apoio ao longo desses quatro anos.

A minha grande amiga **Nicole Schwantes-Cezario**, pela sua amizade sincera, por ser uma parceira em todo momento, compartilhar alegrias e tristezas e por ter me ajudado sempre e me dar dicas para melhorar o meu trabalho, ter conhecido você foi uma das melhores coisas que aconteceu ao longo desta caminhada, obrigado por contar com a sua amizade.

Aos Srs. **André, Anderson e Carlos**, do Laboratório de Materiais de Construção e de Maquetaria do CTU/UEL, pela força e todo o apoio no desenvolvimento das atividades experimentais.

Aos alunos do curso de graduação em Engenharia Civil da UEL, **Caroline Dias e Nevair Brandão**, a sua ajuda foi fundamental no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores do programa de pós-Graduação em Doutorado em Engenharia Civil, pelo conhecimento compartilhado e pela paciência.

A todas as pessoas que de uma ou outra forma sempre estiveram aí para me dar uma mão e ajudar a seguir em frente.

Por último, a **CAPES** pela bolsa recebida durante o desenvolvimento do doutorado.

**“Aprendi que a coragem não é a ausência do medo, mas o triunfo sobre ele. O homem corajoso não é aquele que não sente medo, mas o que conquista esse medo.”**

**Nelson Mandela**

SANDOVAL, Gersson Fernando Barreto. **Previsão da vida útil do concreto permeável submetido a colmatação**. 2020. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

## RESUMO

Os resultados encontrados indicam que existe uma influência direta do tipo de sedimento e da velocidade de adição do mesmo no fenômeno da colmatação do CoPe, sendo os sedimentos finos (argila) os mais prejudiciais na perda da permeabilidade do material. Com base nesses resultados, um modelo analítico de colmatação foi proposto, o qual permitiu determinar o potencial de colmatação ( $c$ ) dado por cada tipo de sedimento e para cada velocidade de colmatação simulada, resultando em uma ferramenta útil na previsão da perda da permeabilidade. Em termos de recuperação de permeabilidade, a hidrolavagem mostrou-se mais efetiva para os sedimentos finos (argila) e o ar para os sedimentos grossos (areia). A recuperação de permeabilidade apresentou um comportamento inverso à colmatação, visto que a maior recuperação de permeabilidade aconteceu com o sedimento de argila e a menor recuperação com o sedimento de areia. No estudo da periodicidade de manutenção, ficou evidente que não existe uma diferença significativa em termos de recuperação de permeabilidade com as duas periodicidades estudadas, sendo as duas igualmente efetivas. Com os resultados de colmatação e os resultados de limpeza foi proposto um modelo de vida útil hidráulica para o concreto permeável, o qual correlaciona as condições do local (erosão, regime de chuvas e topografia) com a perda de permeabilidade ao longo do tempo. Finalmente, o modelo proposto permitiu prever o tempo necessário para o material atingir a permeabilidade mínima de norma em função das condições de manutenção.

**Palavras-chave:** Concreto permeável. Colmatação. Sedimentos. Permeabilidade. Vida útil.

SANDOVAL, Gersson Fernando Barreto. **Forecast of the useful life of permeable concrete subjected to clogging**. 2020. 191 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

### **ABSTRACT**

The results found indicate that there is a direct influence of the type of sediment and the rate of its addition in the clogging phenomenon, with fine sediments (clay) being the most harmful. Based on these results, an analytical clogging model was proposed which allowed to determine the clogging potential given by each type of sediment (c) being a useful tool in predicting the loss of permeability. In terms of permeability recovery, hydrowashing was more effective for fine sediments (clay) and air for coarse sediments (sand), the permeability recovery showed an inverse behavior to clogging, since the greatest permeability recovery happened with clay sediment and less recovery with sand sediment. In the study of periodicity maintenance, it was evident that there is no significant difference in terms of permeability recovery with the two periodicities studied (medium and high periodicity), both being equally effective. Finally using both the clogging results and the cleaning results, a hydraulic life model for pervious concrete was proposed, which correlates the conditions of the site (erosion, rainfall and topography) with the loss of permeability over time, this model made it possible to predict the time required for the material to reach the minimum permeability of the standard depending on the maintenance conditions.

**Keywords:** Pervious concrete. Clogging. Sediments. Permeability. Useful life.

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b>	Definições do CoPe .....	25
<b>Quadro 2</b>	Faixas de consumos de materiais encontrados na literatura .....	28
<b>Quadro 3</b>	Resistências à compressão encontradas na literatura.....	30
<b>Quadro 4</b>	Valores do coeficiente de permeabilidade k encontrados na literatura .....	35
<b>Quadro 5</b>	Sedimentos utilizados e encontrados em laboratório e campo ....	43
<b>Quadro 6</b>	Variáveis das equações do modelo analítico .....	46
<b>Quadro 7</b>	Mapa de erosão do Brasil .....	51
<b>Quadro 8</b>	Fatores k determinados por Kirkby e Morgan .....	52
<b>Quadro 9</b>	Valores do Fator topográfico LS determinados por Bertoni & Lombardi (1985).....	53
<b>Quadro 10</b>	Valores de CP encontrados na literatura .....	53
<b>Quadro 11</b>	Resumo ensaios de colmatação encontrados na literatura.....	54
<b>Quadro 12</b>	Modelos de colmatação encontrados na literatura.....	61
<b>Quadro 13</b>	Principais características dos artigos de manutenção do CoPe...	64
<b>Quadro 14</b>	Faixa de variação ICP .....	73
<b>Quadro 15</b>	Faixa de variação IGG .....	74

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	Especificações cimento CP II-Z-32 .....	79
<b>Tabela 2</b>	Caracterização do agregado graúdo utilizado.....	79
<b>Tabela 3</b>	Consumo de materiais por m <sup>3</sup> .....	81
<b>Tabela 4</b>	Planejamento Experimental da Primeira Campanha.....	85
<b>Tabela 5</b>	Planejamento Experimental da Segunda Campanha.....	90
<b>Tabela 6</b>	Planejamento Experimental da Terceira Campanha.....	95
<b>Tabela 7</b>	Resultados da massa específica em fresco e em endurecido ...	108
<b>Tabela 8</b>	Resultados do ensaio de resistência à compressão (MPa) .....	109
<b>Tabela 9</b>	Resultados médios das propriedades hidráulicas do CoPe .....	110
<b>Tabela 10</b>	Valores de c e R <sup>2</sup> encontrados com o IBM SPSS .....	122
<b>Tabela 11</b>	Valores de “c” e R <sup>2</sup> para os dados de laboratório.....	123
<b>Tabela 12</b>	Valores de “c” e R <sup>2</sup> para os dados obtidos em campo .....	125
<b>Tabela 13</b>	Resumo dos resultados do laboratório e campo experimental...	126
<b>Tabela 14</b>	Coeficientes c quinta campanha .....	149
<b>Tabela 15</b>	Resultados da aplicação da USLE no ano de 2018 - Londrina..	156
<b>Tabela 16</b>	Variáveis da USLE exemplo de aplicação .....	164
<b>Tabela 17</b>	Calculo da MSA anual utilizando a USLE com os dados de chuva de Londrina.....	165
<b>Tabela 18</b>	Valores dos coeficientes c, k <sup>∞</sup> , e n para as três periodicidades de limpeza estudadas .....	166
<b>Tabela 19</b>	Previsão da vida útil em função da periodicidade de manutenção .....	167
<b>Tabela 20</b>	Parâmetros Equação 42 .....	168
<b>Tabela 21</b>	índices de vazios calculados com a Equação 42 .....	169

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Fluxograma dos tópicos abordados na revisão.....	24
<b>Figura 2</b>	Tipos de granulometrias utilizadas no CoPe a) contínua b) descontínua c) uniforme.....	26
<b>Figura 3</b>	Variação da resistência segundo a literatura .....	30
<b>Figura 4</b>	Ensaio de Permeabilidade em laboratório: a) Constante b) Variável .....	33
<b>Figura 5</b>	Permeômetro NCAT.....	37
<b>Figura 6</b>	Método ASTM C1701 para medição de permeabilidade em campo .....	38
<b>Figura 7</b>	Comparação dos resultados dos ensaios em campo.....	39
<b>Figura 8</b>	Passo a passo da busca sistemática .....	41
<b>Figura 9</b>	Tópicos desenvolvidos na revisão de colmatação .....	41
<b>Figura 10</b>	Colmatação com areia para 15, 20 e 25% de índice de vazios....	57
<b>Figura 11</b>	Colmatação com argila para 15, 20 e 25% de índice de vazios...	57
<b>Figura 12</b>	Colmatação para 15, 20 e 25% de índice de vazios .....	58
<b>Figura 13</b>	Resultados obtidos por Deo et al. (2010) para diferentes tamanhos máximos.....	59
<b>Figura 14</b>	Resultados Deo et al. (2010) para granulometrias descontínuas.....	60
<b>Figura 15</b>	Comparação da diminuição máxima de k por granulometria .....	61
<b>Figura 16</b>	Busca sistemática Manutenção.....	63
<b>Figura 17</b>	Desempenho ao longo do tempo .....	69
<b>Figura 18</b>	Métodos de previsão da vida útil para estruturas de concreto .....	71
<b>Figura 19</b>	Fluxograma do trabalho experimental.....	77
<b>Figura 20</b>	Curva granulométrica do agregado graúdo.....	80
<b>Figura 21</b>	Mistura e moldagem do concreto .....	82
<b>Figura 22</b>	Granulometria dos sedimentos utilizados .....	83
<b>Figura 23</b>	Descrição da Primeira Campanha Experimental.....	84
<b>Figura 24</b>	Ensaio de índice de vazios ASTM C1754 .....	86
<b>Figura 25</b>	Montagem do ensaio de permeabilidade a carga constante.....	86
<b>Figura 26</b>	Ensaio de permeabilidade a carga constante .....	87
<b>Figura 27</b>	Fluxograma da Segunda Campanha Experimental.....	88

<b>Figura 28</b>	Ensaio de colmatação em laboratório: a) Verificação da permeabilidade inicial do CoPe, b) Adição do sedimento em seco, c) Verificação da permeabilidade do CoPe colmatado .....	89
<b>Figura 29</b>	Fluxograma da Terceira Campanha Experimental.....	91
<b>Figura 30</b>	Perfil do Campo Experimental 1.....	91
<b>Figura 31</b>	Processo de construção CE1.....	92
<b>Figura 32</b>	Teste do procedimento de compactação .....	93
<b>Figura 33</b>	Processo do ensaio de colmatação em campo: a) Verificação da permeabilidade inicial, b) Adição do sedimento em seco e c) Verificação da permeabilidade do CoPe colmatado.....	94
<b>Figura 34</b>	Localização dos campos experimentais: a) localização geral, b) CE1, c) CE2 .....	96
<b>Figura 35</b>	Planejamento Experimental da Recuperação de Permeabilidade .....	97
<b>Figura 36</b>	Procedimentos de limpeza no campo experimental 1 (CE 1).....	98
<b>Figura 37</b>	Limpeza superficial .....	99
<b>Figura 38</b>	Limpeza com ar.....	99
<b>Figura 39</b>	Limpeza com água.....	100
<b>Figura 40</b>	Construção do segundo campo experimental (CE2).....	101
<b>Figura 41</b>	Fluxograma da Quinta Campanha Experimental .....	102
<b>Figura 42</b>	Microtomógrafo Utilizado .....	105
<b>Figura 43</b>	Resultados da velocidade lenta de colmatação .....	111
<b>Figura 44</b>	Resultados de velocidade média de colmatação .....	113
<b>Figura 45</b>	Resultados de velocidade rápida de colmatação .....	114
<b>Figura 46</b>	Resumo da Segunda Campanha Experimental .....	115
<b>Figura 47</b>	Resultados da Colmatação do Campo Experimental 1 .....	117
<b>Figura 48</b>	Tendência experimental entre k e n .....	118
<b>Figura 49</b>	Curva de regressão segundo a Equação 36.....	120
<b>Figura 50</b>	Validação da Equação 36 com os dados obtidos por Haselbach (2010).....	121
<b>Figura 51</b>	Resultados de laboratório e regressão não linear.....	123
<b>Figura 52</b>	Resultados de campo e regressão não linear .....	124
<b>Figura 53</b>	Resultados dos métodos de limpeza do sedimento de areia .....	127
<b>Figura 54</b>	Resultados dos métodos de limpeza do sedimento de argila .....	128

<b>Figura 55</b>	Resultados dos métodos de limpeza da combinação de sedimentos.....	129
<b>Figura 56</b>	Resultados de periodicidade média para o sedimento de areia.	131
<b>Figura 57</b>	Efeito nos grãos de sedimento: a) antes, b) durante e c) após a limpeza.....	132
<b>Figura 58</b>	Resultados de periodicidade média para o sedimento de argila	133
<b>Figura 59</b>	Efeito nos grãos de sedimento: a) antes, b) durante e c) após a limpeza.....	134
<b>Figura 60</b>	Resultados de periodicidade média para a combinação de sedimentos.....	134
<b>Figura 61</b>	Efeito nos grãos de sedimento: a) antes, b) durante e c) após a limpeza.....	135
<b>Figura 62</b>	Resultados de periodicidade alta para o sedimento de areia.....	136
<b>Figura 63</b>	Resultados de periodicidade alta para o sedimento de argila ....	137
<b>Figura 64</b>	Resultados de periodicidade alta para o sedimento de combinação.....	138
<b>Figura 65</b>	Comparação das periodicidades de limpeza do sedimento de areia .....	139
<b>Figura 66</b>	Comparação das periodicidades de limpeza do sedimento de argila .....	140
<b>Figura 67</b>	Comparação das periodicidades de limpeza da combinação de sedimentos.....	141
<b>Figura 68</b>	Ábaco de Recuperação de Permeabilidade.....	143
<b>Figura 69</b>	Modelo aplicado aos resultados de periodicidade da combinação de sedimentos.....	144
<b>Figura 70</b>	Nova tendência de degradação de permeabilidade para a combinação de sedimentos.....	145
<b>Figura 71</b>	Modelo aplicado aos resultados de periodicidade do sedimento de argila .....	146
<b>Figura 72</b>	Nova tendência de degradação de permeabilidade para o sedimento de argila.....	147
<b>Figura 73</b>	Modelo aplicado aos resultados de periodicidade do sedimento de areia .....	148

<b>Figura 74</b>	Nova tendência de degradação de permeabilidade para o sedimento de areia.....	149
<b>Figura 75</b>	Resultados Microtomografia-3D (VOI size – 35x35x30 mm) .....	151
<b>Figura 76</b>	Distância entre os pontos e a diferença de altura .....	155
<b>Figura 77</b>	Perda da permeabilidade em função do tempo (areia) .....	157
<b>Figura 78</b>	Perda da permeabilidade em função do tempo (argila) .....	158
<b>Figura 79</b>	Perda da permeabilidade em função do tempo (combinação) ...	158
<b>Figura 80</b>	Modelo conceitual da vida útil do CoPe .....	160
<b>Figura 81</b>	Condições de manutenção do CoPe.....	161
<b>Figura 82</b>	Projeto do CoPe.....	162
<b>Figura 83</b>	Correlação permeabilidade (k) vs índice de vazios ( $\phi$ ) .....	168
<b>Figura 84</b>	Índice de condição hidráulica (IHC) .....	170

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	18
1.1	JUSTIFICATIVA.....	19
1.2	OBJETIVOS .....	20
1.2.1	Objetivo Geral.....	20
1.2.2	Objetivos Específicos .....	20
1.3	QUESTÃO DE PESQUISA.....	20
1.4	HIPÓTESE.....	20
1.5	TRABALHOS DO GRUPO DE PESQUISA DE CoPE UEL (GCoPE) .....	21
1.6	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA .....	22
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	23
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	24
2.1	DEFINIÇÃO.....	25
2.2	MATERIAIS CONSTITUINTES.....	25
2.2.1	Agregados .....	26
2.2.2	Cimento .....	27
2.2.3	Água .....	27
2.2.4	Aditivos e Adições .....	27
2.2.5	Dosagem .....	28
2.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	29
2.3.1	Resistência à Compressão.....	29
2.4	PROPRIEDADES HIDRÁULICAS .....	31
2.4.1	Índice de Vazios .....	32
2.4.2	Permeabilidade (k).....	32
2.5	COLMATAÇÃO .....	39
2.5.1	Definição.....	41
2.5.2	Sedimentos.....	43
2.5.3	Ensaio de Colmatação.....	54
2.5.4	Influência do Índice de Vazios na Colmatação .....	56
2.5.5	Modelos de Colmatação .....	61
2.6	MANUTENÇÃO.....	63
2.7	VIDA ÚTIL .....	69

<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	77
3.1	MATERIAIS	79
3.1.1	Processo de Produção	80
3.1.2	Sedimentos	82
3.1.3	Massa de Sedimento Acumulada (MSA)	83
3.2	PRIMEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL	84
3.2.1	Planejamento Experimental	85
3.3	SEGUNDA CAMPANHA EXPERIMENTAL	87
3.3.1	Ensaio de Colmatação em Laboratório	88
3.3.2	Planejamento Experimental	90
3.4	TERCEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL	91
3.4.1	Construção do Campo Experimental 1 (CE1)	92
3.4.2	Planejamento Experimental	94
3.4.3	Modelo Analítico	95
3.5	QUARTA E QUINTA CAMPANHAS EXPERIMENTAIS	96
3.5.1	Seleção do Procedimento de Limpeza (Quarta Campanha Experimental)	97
3.5.2	Periodicidade de Limpeza (Quinta Campanha Experimental)	101
3.5.3	Modelo de Recuperação de Permeabilidade	103
3.5.4	Microtomografia 3D	104
3.5.5	Avaliação das Condições do Local de Utilização do CoPe (Erosão)	105
3.5.6	Modelo de Vida Útil	106
3.5.7	Sugestão de Parâmetros de Manutenção Para Pavimentos Existentes	107
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISE</b>	108
4.1	PRIMEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL	108
4.1.1	Propriedades no Estado Fresco e no Estado Endurecido	108
4.1.2	Propriedades Hidráulicas	109
4.2	SEGUNDA CAMPANHA EXPERIMENTAL	111
4.2.1	Velocidade Lenta de Colmatação (1/10)	111
4.2.2	Velocidade Média de Colmatação (1/5)	113
4.2.3	Velocidade Rápida de Colmatação (1/2)	114

4.3	TERCEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL .....	116
4.4	MODELO ANALÍTICO DE COLMATAÇÃO.....	118
4.4.1	Comparação dos Dois Ensaios (Laboratório e Campo).....	125
4.5	QUARTA CAMPANHA EXPERIMENTAL – PROCEDIMENTO DE LIMPEZA.....	126
4.5.1	Limpeza do Sedimento de Areia.....	127
4.5.2	Limpeza do Sedimento de Argila .....	128
4.5.3	Limpeza da Combinação de Sedimentos .....	129
4.6	QUINTA CAMPANHA EXPERIMENTAL – PERIODICIDADES DE LIMPEZA.....	130
4.6.1	Periodicidade Média .....	130
4.6.2	Periodicidade Alta.....	136
4.6.3	Comparação das Periodicidades de Limpeza .....	139
4.7	MODELO DE RECUPERAÇÃO DE PERMEABILIDADE .....	142
4.7.1	Modelo de Periodicidade Média .....	144
4.8	MICROTOMOGRÁFIA 3D – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS SEDIMENTOS .....	150
4.9	AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DO LOCAL DE UTILIZAÇÃO DO CoPe (EROSÃO).....	153
4.9.1	Equação universal de erosão do solo (USLE) .....	153
4.10	Modelo de Vida Útil Hidráulica.....	159
4.11	Exemplo de Aplicação Modelo de Vida Útil do CoPe .....	163
4.12	SUGESTÃO DE PARÂMETROS DE MANUTENÇÃO PARA PAVIMENTOS EXISTENTES .....	169
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>173</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....</b>	<b>177</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>178</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto permeável (CoPe) é considerado um concreto especial, cujas características principais são a sua elevada permeabilidade e a sua capacidade de armazenamento da água na sua estrutura (camadas). Esse concreto surge como resposta as problemáticas ambientais causadas pelo aumento do escoamento superficial nas áreas urbanas devido à impermeabilização do solo, criada como consequência da urbanização e do uso de materiais impermeáveis (Kevern, Schaefer e Wang, 2009).

A diminuição do escoamento superficial é quase instantânea pela grande capacidade de infiltração e de armazenagem do CoPe, porém esta água traz consigo sedimentos de diferentes origens (orgânico ou inorgânico) que dependendo das suas características físicas podem ficar armazenados nos vazios superficiais e internos do material (Chandrappa e Biligiri, 2016a).

O tipo de sedimento, que pode ser transportado no escoamento superficial, depende da localização geográfica e das características geológicas do solo. Esses sedimentos, segundo o seu tamanho, podem ficar retidos na superfície do material formando uma camada fina que acaba obstruindo os vazios superficiais e, finalmente, a permeabilidade. Sedimentos de granulometria mais fina também podem ficar retidos no interior dos vazios mais profundos, impedindo o fluxo contínuo de água pelos canais internos do CoPe (vazios interconectados), o que contribui ainda mais para a redução da permeabilidade (Mata, 2008).

Ao transporte de sedimentos acontece de forma gradativa e como explicado anteriormente dependendo pode levar o CoPe a pequenas ou grandes reduções de permeabilidade, por tanto o estudo aprofundado deste fenômeno é indispensável para a recomendação de técnicas de recuperação de permeabilidade efetivas que consigam manter o funcionamento do material nos parâmetros mínimos de norma e também aumentar a vida útil.

A vida útil do CoPe está relacionada de forma direta com as suas propriedades hidráulicas. A perda das mesmas ao longo do tempo pode diminuir seu potencial hidráulico, até o ponto que o material não seja mais considerado permeável. Por tanto, estudos com o intuito de caracterizar e prever o desempenho do CoPe ao

longo do tempo são de grande importância, tendo em vista que esse deve manter uma permeabilidade mínima para garantir o seu correto funcionamento como o estabelecido na ACI 522R-10 e na ABNT NBR 16416/2015 (ABNT NBR 16416, 2015; ACI 522-R10, 2010).

#### JUSTIFICATIVA

Uma das principais variáveis que influencia a vida útil do CoPe é a colmatção, fenômeno que consiste no preenchimento dos vazios interconectados com sedimento, com a consequente diminuição de sua eficiência hidráulica. A colmatção dos vazios do concreto permeável pode ser causada por diferentes materiais biodegradáveis (folhas, flores, sementes, resíduos vegetais, etc.) e/ou partículas do solo (argila, areia, etc.) acumuladas ao longo do tempo, que acabam preenchendo os vazios de forma parcial ou total, diminuindo a velocidade de transporte da água na estrutura de canais internos do material.

A previsão da evolução desse fenômeno é crucial na estimativa de tempos de manutenção mínimos e da vida útil do material, porém as normas atuais (ACI 522-10 e ABNT NBR 16416) não contemplam a perda de permeabilidade ao longo do tempo, e atualmente não existem metodologias que permitam essa previsão.

De igual forma as normas atuais não estabelecem métodos de limpeza nem periodicidades de limpeza efetivas que permitam conservar a permeabilidade do CoPe pelo menos na permeabilidade mínima de norma  $>1\text{mm/s}$ , por tanto, assim como o estudo da colmatção a recuperação de permeabilidade é de suma importância na vida útil hidráulica do material.

Assim, constata-se a necessidade de um estudo aprofundado relacionado à colmatção dos vazios, a recuperação da permeabilidade e à sua relação com a vida útil do material, e desta forma, garantir o funcionamento correto em termos hidráulicos ao longo do tempo.

## OBJETIVOS

### Objetivo Geral

Propor um modelo de vida útil hidráulica para o CoPe baseado no fenômeno da **colmatação** causada por diferentes tipos de sedimentos (areia e argila).

### Objetivos Específicos

- Determinar a influência do tipo de sedimento no fenômeno de colmatação do CoPe;
- Adequar o ensaio de permeabilidade a carga constante em laboratório para medição da colmatação;
- Adequar o ensaio ASTM C1701 para medição de colmatação;
- Estabelecer uma correlação entre o ensaio de permeabilidade a carga constante em laboratório e o ensaio ASTM C1701 em campo;
- Propor um procedimento de limpeza que possa aumentar a vida útil do CoPe;
- Propor a periodicidade de manutenção, de acordo com o local de exposição do material;
- Estimar a vida útil hidráulica para o CoPe submetido a colmatação.

### QUESTÃO DE PESQUISA

É possível estimar a vida útil hidráulica do CoPe mediante um modelo de previsão baseado na colmatação do material?

### HIPÓTESE

A partir do estudo do fenômeno da colmatação no CoPe é possível propor um modelo de previsão da vida útil hidráulica do material, baseado na conservação das propriedades hidráulicas (segundo os parâmetros da norma ABNT NBR 16416/2015 e ACI 522R-10).

## TRABALHOS DO GRUPO DE PESQUISA DE COPE UEL (GCoPe)

O grupo de pesquisa GCoPe da UEL começou no ano de 2013, tendo desenvolvido até o dia de hoje duas dissertações de mestrado concluídas e uma em andamento e três trabalhos de conclusão de curso (TCC), descritos continuação:

Dissertações de mestrado concluídas:

- Dissertação de Mestrado: Desempenho do concreto poroso com agregados sustentáveis (2013-2014);
- Dissertação de Mestrado: Proposta de procedimento de moldagem de corpos de prova em laboratório para concretos permeáveis (2015-2017);

Dissertações de mestrado em andamento:

- Interação das camadas de pavimento permeável em sistemas de paver permeável.

Trabalhos de conclusão de curso concluídos:

- TCC: Concreto permeável reforçado com fibras (2016);
- TCC: Avaliação da colmatação em concretos permeáveis (2017);
- TCC: Manutenção de concretos permeáveis após o fenômeno da colmatação (2018).

Além dos trabalhos mencionados acima, o GCoPe participou com trabalhos em congressos e artigos em revistas nacionais e internacionais, todos relacionados ao CoPe (sendo este autor o primeiro autor em todos os artigos mencionados):

Artigos de Congressos:

- Influência da granulometria no desempenho do concreto poroso. Ibracon 56 (2014);

Artigos de Revistas:

- Comparison between the falling head and the constant head permeability tests to assess the permeability coefficient of sustainable Pervious Concretes. Cases Studies in Construction Materials (2017);

- Influência da porcentagem da fração fina proveniente do agregado graúdo no desempenho do concreto permeável. *Ciencia y Poder Aéreo* (2017);
- Pervious concrete made with electric furnace slag (FEA): mechanical and hydraulic properties. *RIEM* (2019);
- Correlation between Permeability and Porosity for Pervious Concrete (PC). *Dyna* (2019);
- Assessing the phenomenon of clogging of pervious concrete (PC): Experimental test and model proposition. *Journal of Building Engineering* (2020);
- Proposal of maintenance methodology for pervious concrete (PC) after the phenomenon of clogging. *Construction and Building Materials* (2020);
- Hydraulic behavior variation of pervious concrete due to clogging. *Cases Studies in Construction Materials* (2020);
- Fenômeno da colmatção no concreto permeável (CoPe): Uma Revisão sistemática de Literatura (Em elaboração).

#### DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Para a execução da tese, foram estabelecidas as seguintes delimitações: a granulometria do agregado graúdo (B -  $D_{m\acute{a}x}=9,5$  mm), o traço em massa de 1:3,26 (cimento: agregado graúdo) do CoPe, a relação água/cimento (a/c) de 0,34 e a massa de sedimento acumulada (MSA) de 1,27 g/cm<sup>2</sup> (quantidade de sedimento por unidade de área), estes parâmetros foram fixos com base nos estudos realizados anteriormente nas dissertações de mestrado de Sandoval (2014) e Risson (2017). Além disso, a altura de lâmina de água utilizadas no ensaio de permeabilidade em campo foi padronizada pela ASTM C1701. Estas delimitações foram fixadas para evitar a dispersão na tomada de dados devido a erros humanos. Sendo assim, as únicas variáveis foram o tipo de sedimento, a velocidade de adição da massa total de sedimento na superfície do CoPe, o método de limpeza utilizado e a periodicidade de limpeza avaliada.

## ESTRUTURA DO TRABALHO

A tese está estruturada em cinco capítulos, sendo o primeiro dedicado a introdução, justificativa, objetivos, a questão de pesquisa, hipótese e delimitações do trabalho.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica, que primeiramente estuda a definição, materiais constituintes, dosagem e propriedades mecânicas e hidráulicas do CoPe. Em seguida, foi implementada uma revisão sistemática para abordar o fenômeno da colmatação e a manutenção no CoPe para identificar as principais lacunas do conhecimento no assunto abordado, no final deste capítulo foram pesquisados os conceitos de avaliação de vida útil nas estruturas de concreto e na pavimentação.

Os materiais utilizados, assim como os métodos e adequações dos diferentes ensaios encontram-se no terceiro capítulo. A adequação dos ensaios está fundamentada nas normas em vigência (nacionais e internacionais). Ressalta-se que todas as escolhas de materiais e métodos de ensaios aplicados fundamentaram se na revisão bibliográfica.

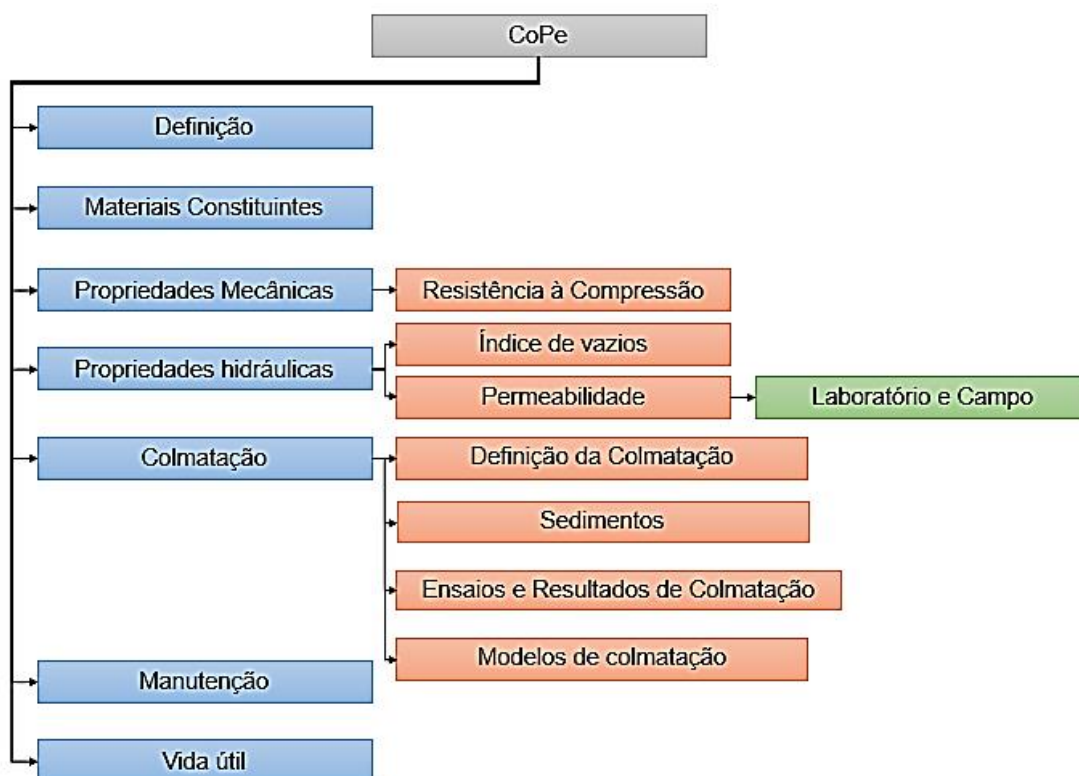
Os resultados obtidos nas cinco campanhas experimentais, assim como a análise, proposta de modelos, e exemplo de aplicação estão apresentados no quarto capítulo.

Finalmente no quinto e último capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas relacionadas aos objetivos e a confirmação da hipótese, a questão de pesquisa e as sugestões para futuras pesquisas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta a compilação do estado da arte do CoPe. Para tanto, foram pesquisados alguns conceitos gerais do CoPe (materiais constituintes, métodos de dosagem, propriedades mecânicas como a resistência à compressão, propriedades hidráulicas como o índice de vazios e a permeabilidade) depois foi realizada uma busca sistemática de informação para o fenômeno da colmatação no CoPe, e a manutenção e vida útil. Na Figura 1 pode-se observar a ordem de estudo dos tópicos de interesse do CoPe para o desenvolvimento deste trabalho.

**Figura 1 – Fluxograma dos tópicos abordados na revisão**



Fonte: O próprio autor

### 2.1 DEFINIÇÃO

O CoPe tem sido estudado por diversos autores, que adotam uma definição para o material, em função das suas principais características. O Quadro 1 apresenta as principais definições do CoPe encontradas na revisão da literatura.

Quadro 1 - Definições do CoPe

Referência	Definição
(Tennis, Leming e Akers, 2004)	Material único e efetivo que ajuda a capturar as águas das chuvas e transportá-las no solo pela sua estrutura de poros aberta.
(Haselbach <i>et al.</i> , 2006)	Mistura especial de concreto com poucos ou sem agregados miúdos que possui uma grande quantidade de macro poros na sua estrutura.
(Neithalath, Weiss e Olek, 2006)	Um tipo de concreto que possui uma rede de canais interconectados dada pelo uso de agregados graúdos de granulometria uniforme e carência de agregados miúdos.
(Montes e Haselbach, 2006)	Um material sustentável que permite a redução do escoamento superficial de forma rápida e segura.
(Yang <i>et al.</i> , 2008)	Um tipo de concreto que não contém agregados miúdos e tem uma estrutura aberta formada pelo travamento dos agregados graúdos.
(Chindaprasirt <i>et al.</i> , 2008)	Um tipo de concreto que possui vazios contínuos, os quais são incorporados de forma intencional no material.
(Deo e Neithalath, 2010)	Concreto especial que possui poros de tamanho considerável (2-8mm) e um elevado índice de vazios.
(ACI 522-R10, 2010)	Concreto com abatimento zero e um material aberto, que consiste em uma mistura de cimento Portland, agregados graúdos, com ou sem agregados miúdos e água.
(ABNT NBR 16416, 2015)	Pavimento que atende simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento, cuja estrutura permite a percolação e/ou o acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar danos na estrutura.

Fonte: O próprio autor

O CoPe é considerado um material que minimiza o problema do escoamento superficial, como exposto no Quadro 1, e neste trabalho é definido como “um concreto especial, que possui uma rede interna de canais formada por vazios na sua maioria interconectados, facilitando o fluxo de água de forma rápida e segura ao solo, reduzindo o potencial de inundação durante um evento de precipitação, e empregado principalmente em recobrimento de calçadas, estacionamentos e pavimentos de tráfego leve”.

## 2.2 MATERIAIS CONSTITUINTES

O CoPe está constituído por cimento, agregado graúdo, e água e, se for necessário, agregados miúdos em uma proporção de no máximo 300 kg/m<sup>3</sup>

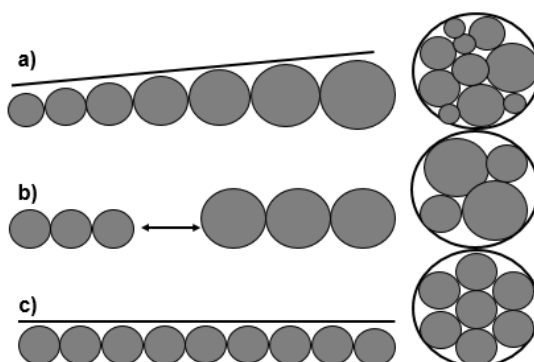
(Bonicelli, Giustozzi e Crispino, 2015). O índice de vazios varia entre 15-30% do volume total do material, visto que, normalmente a relação agregado-cimento é de 1:4 em massa, e a relação água cimento (a/c) inferior a 0,35 (Chandrappa e Biligiri, 2016a; Deo e Neithalath, 2010; Shu *et al.*, 2011; Tennis, Leming e Akers, 2004).

### 2.2.1 Agregados

O agregado gráudo usado na fabricação do CoPe geralmente tem como tamanho máximo 10mm (Neptune e Putman, 2010). Isso se deve ao fato de que partículas (grãos) de tamanho maior tornam mais difícil a obtenção de um bom acabamento final do material (Chandrappa e Biligiri, 2016a; Rehder, Banh e Neithalath, 2014; Soto-Pérez e Hwang, 2016).

A granulometria dos agregados gráudos também influencia de forma direta as propriedades mecânicas do CoPe, como a resistência à compressão e tração na flexão, e as propriedades hidráulicas como o índice de vazios (%) e a permeabilidade (Kim e Lee, 2010; Mahboub *et al.*, 2009; Neptune e Putman, 2010; Yang *et al.*, 2008). Na Figura 2 estão ilustrados os três tipos de granulometrias utilizados no CoPe: contínua, descontínua e uniforme.

**Figura 2 - Tipos de granulometrias utilizadas no CoPe a) contínua b) descontínua c) uniforme**



**Fonte:** O próprio autor

Granulometrias mais contínuas proporcionam maior resistência mecânica devido ao aumento dos pontos de contato entre grão e grão com conseqüente redução dos vazios internos. As granulometrias uniformes, devido ao tamanho similar entre os agregados, tendem a gerar vazios maiores com uma permeabilidade maior (Chandrappa e Biligiri, 2016b; Kim e Lee, 2010; Mahboub *et al.*,

2009; Neptune e Putman, 2010; Sandoval, 2014; Souza Risson, 2017; Yang *et al.*, 2008).

### 2.2.2 Cimento

Na fabricação do CoPe geralmente é utilizado cimento Portland. Segundo a ACI 522R-10 e a ABNT NBR 16416/2015, não existe restrição em relação ao tipo de cimento. Essa escolha dependerá principalmente da solicitação e da disponibilidade do mesmo (ABNT NBR 16416, 2015; ACI 522-R10, 2010; Tennis, Leming e Akers, 2004).

### 2.2.3 Água

Normalmente, utiliza-se água potável como em um concreto convencional, mas a relação a/c é inferior a 0,35, portanto, é denominado um concreto seco (ABNT NBR 16416, 2015; ACI 522-R10, 2010; Leming, Michael L.; Malcom, H. Rooney; Tennis, 2007; Tennis, Leming e Akers, 2004). No Brasil, já foram estudadas misturas com relação a/c de 0,34 sem aditivos, obtendo excelentes resultados quanto a plasticidade e consistência da mistura (Sandoval, 2014; Souza Risson, 2017).

### 2.2.4 Aditivos e adições

O CoPe é conhecido por ter um abatimento nulo (Slump zero). Por conseguinte, o material é difícil de manipular e trabalhar em estado fresco. Esse fato é explicado pela baixa relação a/c e dosagem, de modo que, geralmente, se faz necessário o uso de aditivos que possam melhorar a sua consistência em estado fresco (ACI 522-R10, 2010).

Normalmente, são utilizados aditivos plastificantes e superplastificantes para melhorar a consistência do CoPe, e como consequência, os mesmos acabam influenciando as propriedades mecânicas do material, tendo incrementos tanto na resistência à compressão quanto na resistência à tração na flexão (Chandrappa e Biligiri, 2016b; Soto-Pérez e Hwang, 2016).

### 2.2.5 Dosagem

Não existe um método normatizado para estabelecer as proporções dos materiais constituintes do CoPe, fato que dificulta sua difusão no mundo. A ACI 522R-10 Report on Pervious Concrete recomenda que o método mais adequado para calcular os consumos de materiais do CoPe é **ensaio e erro**, baseando-se sempre em ensaios de laboratório que possam validar as propriedades requeridas.

Nas pesquisas existentes sobre o CoPe, a proporção dos materiais utilizados varia muito e os estudos geralmente estão focados na avaliação das diferentes propriedades para as dosagens utilizadas, como apresentado no Quadro 2.

**Quadro 2 – Faixas de consumos de materiais encontrados na literatura**

Material	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )
Cimento* (tipo I, II, III, IV, V)	180 a 555
Agregado graúdo	964 a 2000
Agregado miúdo	0 a 300
Relação a/c	0,22** a 0,43

\*Geralmente Cimento Portland Tipo I

\*\*Usou-se aditivo superplastificante

**Fonte:** O próprio autor

No Quadro 2 é possível verificar que o consumo de cimento variou entre 180 a 555 kg/m<sup>3</sup> e os agregados graúdos de 964 a 2000 kg/m<sup>3</sup>. A grande variação do consumo de cimento depende do uso final do material e da quantidade de pasta que se deseja obter na mistura final para obter um recobrimento ótimo dos grãos.

Consumos elevados de cimento nem sempre garantirão resistências elevadas, visto que, no caso do CoPe, a resistência está muito ligada à composição granulométrica dos agregados, ao procedimento de compactação o que acaba influenciando o índice de vazios e por conseguinte a resistência mecânica (Agar-Ozbek *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2013; Lian, Zhuge e Beecham, 2011).

No Quadro 2 também é possível observar que quando a relação a/c foi muito baixa (menor do que 0,30) utilizou-se aditivo químico (plastificante, superplastificante, polímeros) para conferir plasticidade à mistura (Huang, *et al.*, 2010; Sata, *et al.*, 2013). As relações a/c variaram entre 0,22 e 0,43, confirmando que o

material é seco e, em vista disso, o uso de aditivos químicos foi implementado em muitas dosagens.

Quanto ao tipo de cimento utilizado, o Quadro 2 apresenta que têm sido utilizados todos os tipos de cimento na fabricação de CoPe, concordando com a ACI 522R-10, que não restringe o uso dos diferentes tipos de cimento na fabricação do CoPe.

Quanto à relação agregado-cimento, verifica-se que, em proporção, os agregados são de 3 a 4,5 vezes a massa de cimento total na mistura, o que contribui para o elevado índice de vazios, dependendo da granulometria do agregado.

## 2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

O comportamento mecânico do CoPe é de vital importância para definir a sua aplicação, a ABNT NBR16416/2015 estipula como resistência mínima, para tráfego de pedestres e tráfego leve, 35 MPa na compressão ou 2 MPa na tração na flexão.

Se entende por tráfego leve "*Ruas de características essencialmente residenciais, para as quais não é previsto o tráfego de Ônibus, podendo existir ocasionalmente passagens de caminhões e Ônibus em número não superior a 20 por dia, por faixa de tráfego, caracterizado por um número "N" típico de  $10^5$  solicitações do eixo simples padrão (80 kN) para o período de projeto de 10 anos*" (Prefeitura de São Paulo, 2004)

### 2.3.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma das propriedades mecânicas mais estudada do CoPe e normalmente é baixa, quando comparada com o concreto convencional. Para o CoPe têm sido encontradas resistências aceitáveis para pavimentos, fato que eleva as possibilidades de ser utilizado nas obras de pavimentação (Brake, Allahdadi e Adam, 2016; Huang *et al.*, 2010; Silva, Brito, De e Dhir, 2016; Zhong e Wille, 2016).

A resistência à compressão do CoPe está diretamente ligada aos seguintes fatores:

- Consumo de cimento;
- Composição granulométrica dos agregados;
- Relação a/c;
- Procedimento de compactação.

Como pesquisado por Sandoval (2014), existe muita dispersão em termos de resultados de resistência à compressão, como apresentado no Quadro 3.

**Quadro 3 - Resistências à compressão encontradas na literatura**

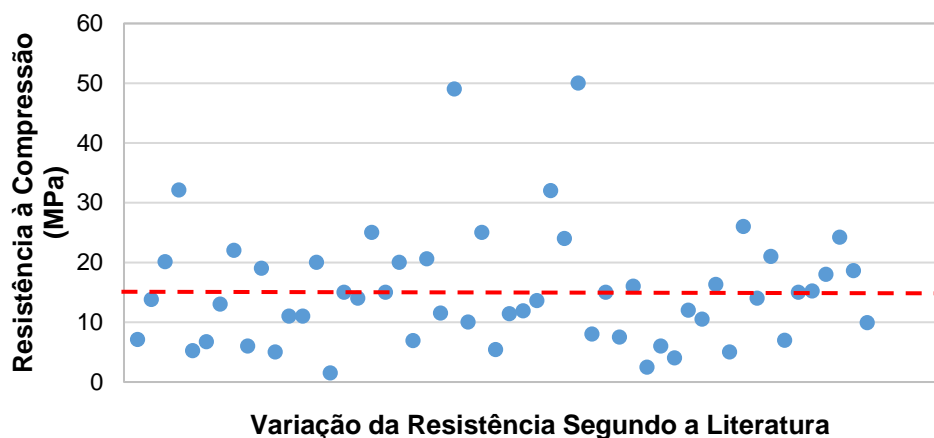
Referências Bibliográficas	Compressão (MPa)	Ano
(Yang e Jiang, 2003)	7,1 - 13,8	2002
(Yang <i>et al.</i> , 2008)	5,22 - 6,71	2008
(Chindaprasirt <i>et al.</i> , 2008)	13 - 22	2008
(Mahboub <i>et al.</i> , 2009)	6 - 19	2009
(Huang <i>et al.</i> , 2010)	5 - 11	2010
(Neptune e Putman, 2010)	11 - 20	2010
(Kim e Lee, 2010)	1,5 - 15	2010
(Wu <i>et al.</i> , 2011)	14 - 25	2011
(Shu <i>et al.</i> , 2011)	15 - 50	2011
(Sumanasooriya e Neithalath, 2011)	6,9 - 20,6	2011
(Lian, Zhuge e Beecham, 2011)	11,5 - 49	2011
(Bhutta <i>et al.</i> , 2012)	10 - 25	2012
(Tho-in <i>et al.</i> , 2012)	5,4 - 11,4	2012
(Sata, Wongsas e Chindaprasirt, 2013)	11,9 - 13,6	2013
(Chen <i>et al.</i> , 2013)	> 32	2013
(Agar-Ozbek <i>et al.</i> , 2013)	24 - 50	2013
(Dong <i>et al.</i> , 2012)	8 - 15	2013
(Bhutta <i>et al.</i> , 2012)	7,5 - 16	2013
(Zaetang <i>et al.</i> , 2013)	2,47 - 5,99	2013
(Kuo, Liu e Su, 2013)	4 - 12	2013
(Nguyen <i>et al.</i> , 2013)	10,5 - 16,3	2013
(Gaedicke, Marines e Miankodila, 2014)	5 - 26	2014
(Hesami, Ahmadi e Nematzadeh, 2014)	14 - 21	2014
(Ibrahim <i>et al.</i> , 2014)	6,95	2014
(Gupta, 2014)	15	2014
((Soto-Pérez e Hwang, 2016)	15,2	2016
(Wu, H. <i>et al.</i> , 2016)(Wu, M. H. <i>et al.</i> , 2016)	18	2016
(Zhang <i>et al.</i> , 2017)	24,2	2017
(Nguyen, Boutouil, Sebaibi, Baraud e Leleyter, 2017)	18,6	2017
(Kim <i>et al.</i> , 2017)	9,9	2017

Fonte: (Sandoval, 2014)

No Quadro 3, observa-se que as resistências reportadas pela bibliográfica variam de 2 a 49 MPa. Isso acontece porque, em muitas pesquisas, o material ensaiado possui em sua composição resíduos de construção civil como agregado graúdo, fato que explica valores tão baixos (Amer Rafique Bhutta *et al.*, 2013; Sata, Wongsas e Chindaprasirt, 2013). Por outro lado, as resistências mais elevadas correspondem ao uso de aditivos químicos e adições minerais que

acabaram otimizando o comportamento mecânico. Em média as resistências a compressão são aproximadamente de 15 MPa como ilustrado na Figura 3.

**Figura 3 – Variação da resistência segundo a literatura (Quadro 3)**



Fonte: O próprio autor

Como mostrado na Figura 3 existe uma grande variabilidade nas resistências à compressão encontradas na literatura, mas notou-se que a grande maioria dos resultados tende a mostrar resistências abaixo de 20 MPa, isto pelo fato do concreto permeável ser um material sem finos e elevado índice de vazios que acabam limitando o desenvolvimento de resistências superiores.

Embora existam na literatura valores adequados de resistência do CoPe, nem sempre é fácil atingir os valores mínimos estabelecidos pela ABNT NBR 16416/2015 (20 MPa), sobretudo, porque esta norma assim como a ACI 522R-10 não estabelecem método de dosagem e procedimento de compactação, o que limita a aplicação do material em escala real.

## 2.4 PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

Dentro das propriedades hidráulicas do CoPe encontram-se o índice de vazios e o coeficiente de permeabilidade. A ABNT NBR 16416/2015 estabelece uma faixa de 15-35% para o índice de vazios e no mínimo 1mm/s para o coeficiente de permeabilidade.

### 2.4.1 Índice de Vazios

O índice de vazios é entendido como a proporção de vazios internos em relação ao volume total do material. No caso do CoPe, esse varia de 15-35%, podendo estar distribuídos entre vazios isolados e vazios interconectados que estão diretamente relacionados com a permeabilidade do material (Alam, Haselbach e Cofer, 2013; Lian, Zhuge e Beecham, 2011; Wu, H. *et al.*, 2016).

Essa propriedade é função da dosagem, da granulometria dos agregados utilizados e do procedimento de compactação, que finalmente darão uma característica de interconectividade aos vazios internos do material (Alam, Haselbach e Cofer, 2013; Martin, Kaye e Putman, 2014; Martin e Putman, 2016; Martin, Putman e Kaye, 2013).

Atualmente, a ABNT NBR 16416/2015 não estabelece um procedimento ou ensaio específico para a determinação do índice de vazios. Devido a isso, é comum o uso de procedimentos empíricos ou da norma americana ASTM C1754 para determinação dessa propriedade.

O ensaio normatizado ASTM C1754 trabalha com o princípio de Arquimedes, no qual o corpo de prova é seco na estufa até alcançar uma massa constante. Logo, é calculado seu peso imerso em água até alcançar uma massa constante. Finalmente, o índice de vazios é determinado mediante a Equação 2.

$$\Phi (\%) = \left[ 1 - \left( \frac{K \cdot (A - B)}{\rho_w \cdot D^2 \cdot L} \right) \right] \cdot 100 \quad (2)$$

Em que:

- A= massa seca do corpo de prova (g);
- B= massa submersa do corpo de prova (g);
- D= diâmetro do corpo de prova (mm);
- L= altura do corpo de prova (mm);
- K= constante (1.274.240 para o SI);
- $\rho_w$ = densidade da água.

## 2.4.2 Permeabilidade ( $k$ )

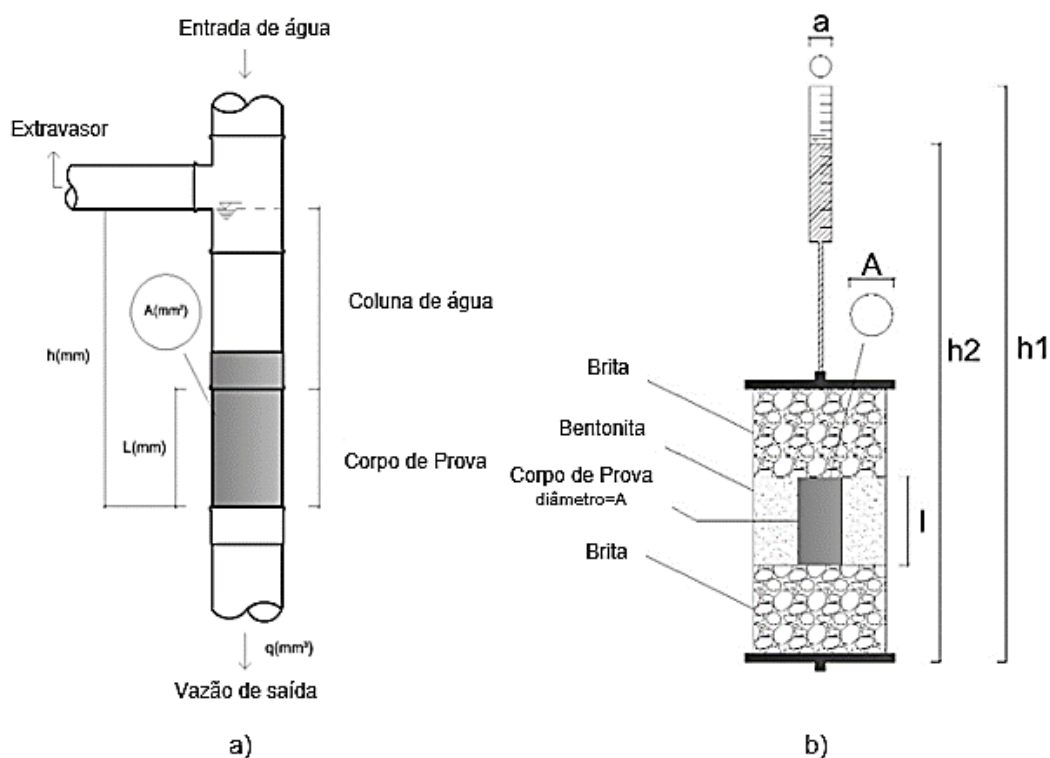
A função principal do CoPe é permitir a passagem da água através da estrutura de vazios interconectados de forma rápida e segura, sendo a permeabilidade a propriedade principal do material (Soto Pérez & Hwang, 2016). Essa é entendida como o fluxo da água através de um meio poroso, que dependerá das seguintes variáveis:

- Viscosidade da água (BRAJA, 2013);
- Temperatura da água (BRAJA, 2013);
- Distribuição e tamanho dos vazios (Deo & Neithalath, 2010)(Deo e Neithalath, 2010);
- Distribuição granulométrica dos grãos do agregado (Chandrappa e Biligiri, 2016b; Neptune e Putman, 2010; Sumanasooriya e Neithalath, 2011);
- Interconectividade de vazios (Sandoval *et al.*, 2019).

### 1.1.1.1 Medição em laboratório

Atualmente, são utilizados dois princípios de ensaio de permeabilidade em condições controladas de laboratório: o ensaio de carga constante e o ensaio de carga variável. Desse modo, cada um deles permite ter uma aproximação do coeficiente de permeabilidade do material (Sandoval *et al.*, 2017). A Figura 4 expõe cada um dos ensaios e as suas principais características.

Figura 4 - Ensaio de Permeabilidade em laboratório: a) Constante b) Variável



Fonte: (Sandoval *et al.*, 2017)

Como exposto na Figura 4a, o ensaio de carga constante, consiste basicamente de uma entrada de água, e um tubo extravasor para manter uma coluna constante de água durante todo o ensaio. No decorrer do processo é medido o volume de água que sai para um tempo determinado. Em contrapartida, na Figura 4b, o ensaio de carga variável apresenta um tubo de carga, no qual é medida a variação da coluna de água no decorrer do ensaio.

As Equações 3 e 4, ambas derivadas da Lei de Darcy, mostram como são calculados os coeficientes de permeabilidade, segundo o tipo de ensaio.

$$k = \frac{q * H}{A * h * t} \quad (3)$$

Em que:

- $k$ : Coeficiente de Permeabilidade a carga constante (cm/s);
- $q$ : Volume de água que passa pelo corpo de prova (cm<sup>3</sup>);
- $H$ : altura do corpo de prova (cm)
- $A$ : área do corpo de prova (cm<sup>2</sup>);
- $h$ : Altura da lâmina de água (cm);

- $t$ : Tempo para coletar o volume de água (s).

$$k = \frac{a * H}{A * \Delta t} * \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (4)$$

Em que:

- $k$ = Coeficiente de permeabilidade a carga variável (cm/s);
- $a$ = Área interna do tubo de carga (cm<sup>2</sup>);
- $H$ = Altura do corpo de prova (cm);
- $A$ = Área do corpo de prova (cm<sup>2</sup>);
- $\Delta t$ = Diferença de tempo entre a altura  $h_1$  e  $h_2$  (s);
- $h_1$ = Altura inicial da lâmina de água (cm);
- $h_2$ = Altura final da lâmina de água (cm).

Embora ambos ensaios utilizem a Lei de Darcy para a determinação da permeabilidade, há na literatura consultada, grandes divergências na ordem de magnitude dos resultados encontrados, tal como pode ser observado no Quadro 4.

**Quadro 4 - Valores do coeficiente de permeabilidade  $k$  encontrados na literatura**

Referências Bibliográficas	Ensaio	Coeficiente de Permeabilidade $k$ (mm/s)	Ano
(Yang e Jiang, 2003)	Variável	1,7 - 34,7	2002
(Yang <i>et al.</i> , 2008)	Constante	27 - 46,7	2008
(Mahboub <i>et al.</i> , 2009)	Constante	0,243 - 0,269	2009
(Huang <i>et al.</i> , 2010)	Constante	10 - 20	2010
(Neptune e Putman, 2010)	Variável	1 - 9	2010
(Wu <i>et al.</i> , 2011)	Variável	0,7 - 3,7	2011
(Shu <i>et al.</i> , 2011)	Variável	0,3 - 3,2	2011
(Li, Kayhanian e Harvey, 2013)	Constante	1,3 - 4	2012
(Li, Kayhanian e Harvey, 2013)	Variável	3,8 - 19,9	2012
(Bhutta <i>et al.</i> , 2012)	Constante	2,5 - 33	2012
(Kayhanian <i>et al.</i> , 2012)	Variável	0,007 - 8,2	2012
(Tho-in <i>et al.</i> , 2012)	Constante	19,2 - 59,6	2012
(Sata, Wongsu e Chindaprasirt, 2013)	Constante	7,1 - 12	2013
(Sonebi e Bassuoni, 2013)	Variável	0,35 - 14,17	2013
(Coleri <i>et al.</i> , 2013)	Constante	11,0 - 20,0	2013
(Aamer Rafique Bhutta <i>et al.</i> , 2013)	Constante	24 - 37	2013
(Zaetang <i>et al.</i> , 2013)	Constante	3 - 47,7	2013
(Kuo, Liu e Su, 2013)	Constante	5 - 40	2013
(Nguyen <i>et al.</i> , 2013)	Variável	3 - 8,4	2013
(Gaedicke, Marines e Miankodila, 2014)	Variável	3 - 15	2014
(Hesami, Ahmadi e Nematzadeh, 2014)	Variável	0,8 - 4,8	2014
(Ibrahim <i>et al.</i> , 2014)	Constante	15,6 - 28,2	2014

Referências Bibliográficas	Ensaio	Coefficiente de Permeabilidade k (mm/s)	Ano
(Jo <i>et al.</i> , 2015)	Constante	1,4 - 12,3	2015
(Yeih <i>et al.</i> , 2015)	Constante	4,0 - 12,0	2015
(Torres, Hu e Ramos, 2015)	Variável	5,9 - 12,5	2015
(Zaetang <i>et al.</i> , 2016)	Constante	7,0 - 13,0	2016
(Soto-Pérez e Hwang, 2016)	Constante	3 - 12	2016
(Lin, Park, Dae-geun Geun, <i>et al.</i> , 2016)	Constante	0,2 - 0,6	2016
(Zhong <i>et al.</i> , 2016)	Constante	4,5	2016
(Kim, Gaddafi e Yoshitake, 2016)	Constante	3,0 - 3,5	2016
(Chang <i>et al.</i> , 2016)	Constante	4,0 - 8,0	2016
(Barnhouse e Srubar, 2016)	Variável	6,3 - 8,2	2016
(Zaetang <i>et al.</i> , 2016)	Constante	2,2 - 10,1	2016
(Giustozzi, 2016)	Variável	10,2 - 18,7	2016
(Wu, M. H. <i>et al.</i> , 2016)	Constante	1,0 - 10,0	2016
(Ibrahim e Abdul Razak, 2016)	Constante	46,0 - 82,0	2016
(Akand, Yang e Gao, 2016)	Variável	0,12 - 0,13	2016
(Chandrappa e Biligiri, 2016a)	Variável	15,0 - 18,0	2016
(Zhang <i>et al.</i> , 2017)	Constante	3,5 - 3,8	2017
(Nguyen, Boutouil, Sebaibi, Baraud e Leleyter, 2017)	Variável	2,2 - 3,4	2017

Fonte: Sandoval (2014)

De acordo com o apresentado no Quadro 4, pode-se concluir que, em função do tipo de ensaio, os valores de permeabilidade apresentam uma grande variação (0,2-82 a carga constante e 0,243-18,7 a carga variável), e que a maior parte das pesquisas utilizam o ensaio de carga constante. Isso poderia ser explicado porque o ensaio de carga constante foi criado para medição de permeabilidade em solos granulares, que tem um comportamento hidráulico similar ao do CoPe. Por outro lado, o ensaio de carga variável de forma inicial foi criado para a avaliação da permeabilidade em solos finos e adaptado para o CoPe.

Segundo Sandoval *et al.* (2017), no caso do CoPe o ensaio de carga constante apresenta maior sensibilidade às variações de índice de vazios do material, e apresenta coeficientes de variação mais baixos (10%) quando comparados com os resultados do ensaio de carga variável (70%), portanto, é um ensaio mais simples de ser executado, sendo os seus resultados mais confiáveis.

Finalmente o índice de vazios e a permeabilidade possuem uma correlação exponencial, isto devido a que pequenas variações no índice de vazios levam a grandes variações na permeabilidade do material, na literatura tem sido propostas correlações para estes dois parâmetros hidráulicos, um exemplo é a

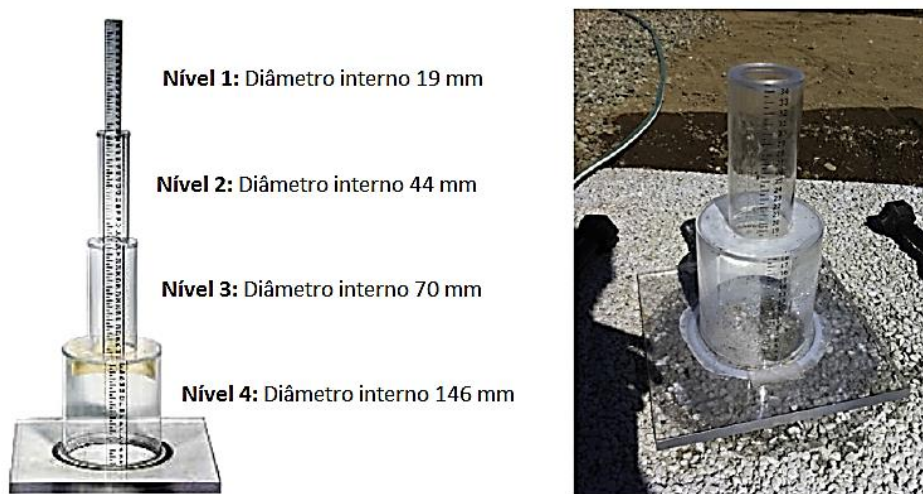
proposta por Sandoval *et al.* (2019), onde a relação esta influenciada pela eficiência hidráulica, sendo alguns CoPe's mais eficientes do que outros (Sandoval *et al.*, 2019).

#### 1.1.1.2 Medição em campo

A medição da permeabilidade em campo é de vital importância para conhecer como será o comportamento hidráulico do CoPe ao longo do tempo e controle de qualidade. Atualmente, existem dois tipos de ensaio para medição da permeabilidade em campo que trabalham com o princípio dos ensaios de carga constante e variável.

Um dos equipamentos mais conhecidos para verificação da permeabilidade é o permeômetro de campo denominado NCAT, que permite avaliar o coeficiente de permeabilidade em pavimentos permeáveis (concreto e asfalto), conforme a Figura 5.

**Figura 5 - Permeômetro NCAT**



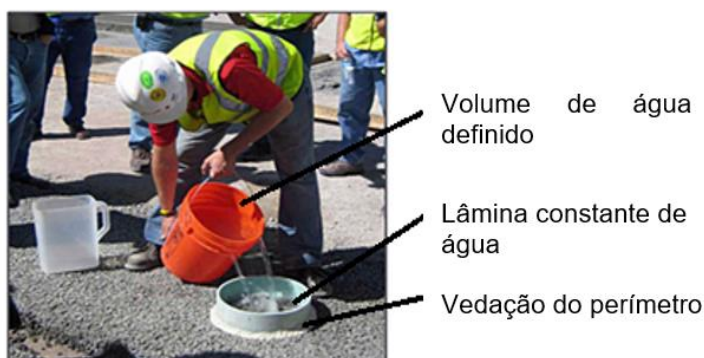
**Fonte:** Li *et al.* (2012)

O NCAT utiliza o princípio de um permeômetro de carga variável, sendo integrado por quatro diâmetros diferentes, como observado na Figura 5. O diâmetro menor fica no topo e o maior na base. Os diâmetros menores são utilizados quando o material possui uma permeabilidade baixa e os diâmetros maiores quando a permeabilidade for muito elevada (LI, *et al.*, 2012).

Outro método é o estabelecido pela ASTM C1701, que resulta em uma medida aproximada do coeficiente de permeabilidade. Esse método utiliza o

princípio do permeâmetro de carga constante, no qual se avalia o tempo para infiltrar um volume definido de água, mantendo uma lâmina constante de 1cm. O ensaio utiliza um tubo de PVC de 30cm de diâmetro (anel de infiltração), que está em contato direto com a superfície permeável. Dessa maneira, o tubo é vedado à superfície (no perímetro interno e externo) com silicone para restringir a saída de água pela lateral, como observado na Figura 6.

**Figura 6 - Método ASTM C1701 para medição de permeabilidade em campo**



**Fonte:** (Tennis, Leming e Akers, 2004)

O coeficiente de permeabilidade para o ensaio ASTM C1701 (Figura 6) é calculado com a Equação 5.

$$I = \frac{K * M}{D^2 * t} \quad (5)$$

Em que:

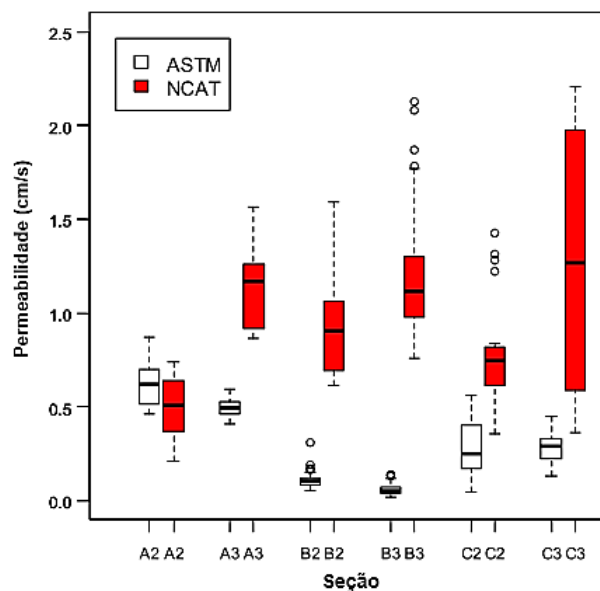
- $I$ = Coeficiente de Permeabilidade (mm/h);
- $M$ = Massa infiltrada de água (kg);
- $D$ = Diâmetro do tubo (mm);
- $t$ = Tempo necessário para absorver a água (s);
- $K$ = Constante do ensaio (4.583.666.000 para o SI).

Em campo são utilizados esses dois tipos de ensaios (Figura 5 e 6) para verificar a magnitude da permeabilidade do material e se cumprirá ou não com a permeabilidade mínima estabelecida pela ACI 522R-10 (1mm/s), porém o ASTM C1701 tem mais praticidade econômica e técnica.

Li *et al.* (2013) compararam a eficiência em campo dos dois tipos de ensaio, concluindo que é de vital importância a vedação da superfície com o equipamento de ensaio, visto que, perdas grandes de água poderiam levar a uma

grande dispersão dos resultados. Também em termos de coeficiente de variação, o ensaio ASTM C1701 diminui a dispersão entre os resultados quando comparados com o ensaio NCAT, tal como mostrado na Figura 7.

**Figura 7 - Comparação dos resultados dos ensaios em campo**



Fonte: (Li, Kayhanian e Harvey, 2013)

Na Figura 7 é possível observar que para os mesmos trechos de pavimento avaliados pelos dois ensaios, os resultados de permeabilidade têm diferença significativa entre eles. Geralmente, o ensaio NCAT encontra resultados maiores quando comparado com o ASTM C1701, porém com uma dispersão elevada, como por exemplo, na seção C3, foram encontrados coeficientes de permeabilidade que variam de 0,3cm/s a 2,4cm/s, diminuindo a confiabilidade desse tipo de ensaio.

Isso pode acontecer pelo fato do NCAT trabalhar com regime variável, em que pode ser induzido pelo mesmo princípio de ensaio uma mudança no tipo de fluxo, justificando a elevada variabilidade e baixa confiabilidade dos resultados encontrados.

## 2.5 COLMATAÇÃO

Para compreender o fenômeno da colmatação no CoPe, seguiu-se o método Systematic Search Flow (SSF) proposto por Ferenhof e Fernandes (2016) para realizar uma revisão bibliográfica de forma sistemática no item de colmatação e

manutenção. O método SSF é composto por quatro fases e oito atividades, sendo essas:

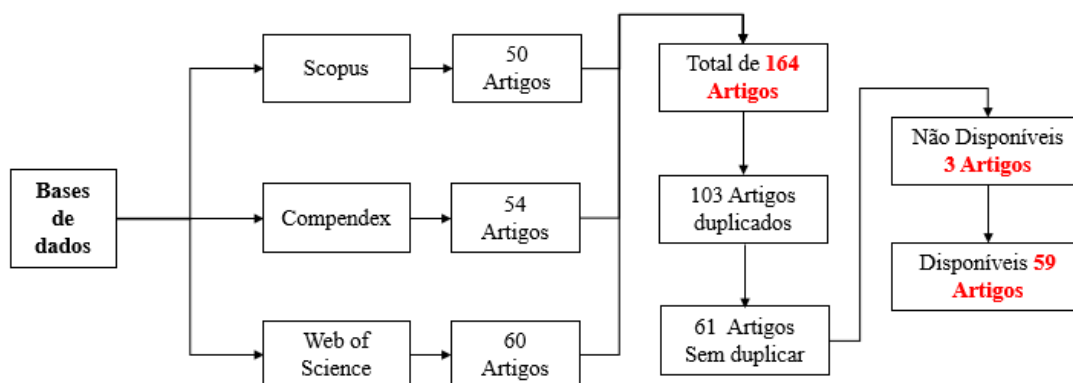
- Fase I - Definição do protocolo de pesquisa:
  1. Estratégia de busca;
  2. Consulta em base de dados;
  3. Organização do portfólio bibliográfico;
  4. Padronização e seleção dos artigos;
  5. Composição do portfólio de artigos.
- Fase II – Análise:
  6. Consolidação dos dados.
- Fase III – Síntese:
  7. Conclusões sobre o tema são construídas e sumarizadas em relatórios;
- Fase IV – Escrever:
  8. Consolidação dos resultados por intermédio da redação científica.

Como parte do protocolo de pesquisa foram escolhidas três bases de dados: Scopus, Compendex e Web of Science. Para a busca sistemática foi utilizado o *query* de busca (“Pervious concrete” **AND** “clogging”). Os critérios de inclusão foram artigos acadêmicos revisados por pares, escritos no idioma português, espanhol ou inglês. Por sua vez, os de exclusão foram de literatura cinzenta, documentos em outras línguas e os não disponíveis para leitura, ou seja, não disponíveis em *open access*, ou fornecido pelo acesso no portal da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), encontrados na internet, ou enviados diretamente pelos autores.

Com intuito de garantir o rigor metodológico e repetibilidade dos resultados, destaca-se que a busca foi executada em 01/04/2020. Novos documentos poderão surgir ao se executar a mesma busca em data posterior.

Ao seguir os passos do método SSF, a busca resultou em 164 artigos. O resultado foi obtido a partir da busca nas três bases de dados já declaradas, observou-se ainda que, 103 estavam duplicados. Portanto, os mesmos foram eliminados, resultando em 61 documentos. Da totalidade destes artigos 3 (três) não se conseguiu documentação na íntegra, portanto, foram descartados. O resultado final foram 59 documentos analisados que formaram o portfólio bibliográfico resultante, conforme a Figura 8.

**Figura 8 - Passo a passo da busca sistemática**

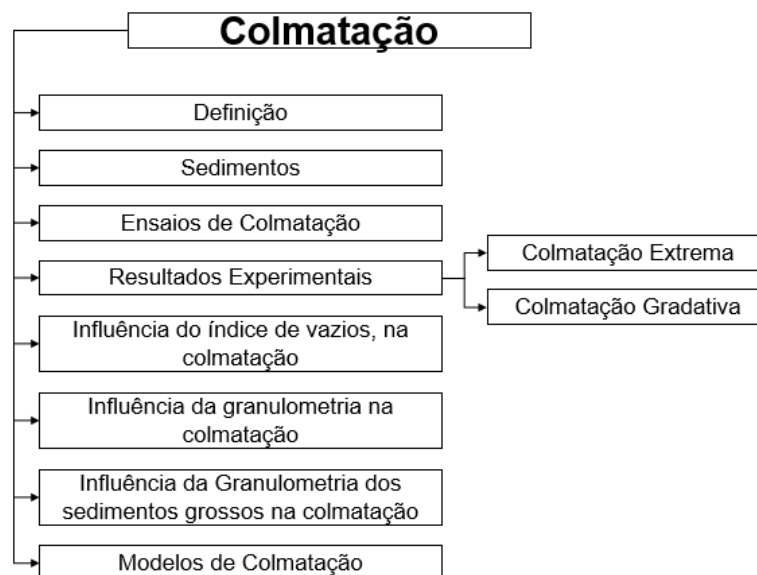


\*Os números fazem relação a quantidade de artigos

Fonte: O próprio autor

Com base no portfólio resultante (59 artigos), foi criada uma estrutura de desenvolvimento do tema com o objetivo de contemplar os principais tópicos relacionados com a colmatação no CoPe e cumprir o objetivo do trabalho, como exposto na Figura 9.

**Figura 9 - Tópicos desenvolvidos na revisão de colmatação**



Fonte: O próprio autor

### 2.5.1 Definição

Imediatamente após o início de um evento de precipitação (chuva), a corrente superficial de água, formada dependendo do lugar, leva material em

suspensão (solo ou matéria orgânica), que geralmente são partículas de areia, silte e argila, os quais pelo seu tamanho facilitam esse fenômeno de transporte (Amorim *et al.*, 2010; Reginatto *et al.*, 2011; Tarbuck e Lutgens, 2005; Telles, Guimarães e Dechen, 2011)

Esse transporte de material em suspensão pode ser crítico, como ocorre por exemplo, na China, durante o inverno, onde o rio Amarelo transporta uma quantidade de material tão grande quanto sua vazão de água (Tarbuck e Lutgens, 2005).

Segundo Tarbuck & Lutgens (2005), o tipo de material e a quantidade transportada dependem da velocidade da água, relacionada a intensidade da chuva, e à velocidade de sedimentação do grão, que depende diretamente da morfologia e a natureza do material.

A natureza mineralógica do material também influencia de forma direta na aglomeração do mesmo, por exemplo, as argilas têm a capacidade de se associarem pela força de coesão entre as partículas, fato que é diferente no caso das areias que são solos não coesivos (BRAJA, 2013; Braja M, 1999).

Do transporte de material em suspensão (sedimentos) são motivo da maioria dos problemas nas obras de drenagem, devido à acumulação de sedimentos, perdem a sua capacidade hidráulica, deixando de funcionar de forma adequada.

O CoPe entendido como uma obra de drenagem para gerenciamento do escoamento superficial está submetido à ação dos sedimentos, os quais ao preencher os vazios impedem o fluxo da água pela sua estrutura de forma rápida e segura.

Desde 2006 internacionalmente vem sendo estudado esse tipo de fenômeno e inúmeros autores o chamam de colmatação. No desenvolvimento desta tese e com base na leitura dos artigos da revisão sistemática a colmatação no CoPe é definida como: *“fenômeno mediante o qual são preenchidos os vazios internos do CoPe com partículas do solo ou de material biodegradável (sedimentos), que podem ser deslocados por causa do vento, da água, podendo diminuir a permeabilidade como consequência da redução total ou parcial da seção dos vazios internos e do aumento da tortuosidade”*.

## 2.5.2 Sedimentos

Entende-se como sedimentos os materiais orgânicos ou inorgânicos que tem potencial de preencher total ou parcialmente os vazios do CoPe, esses são uma das variáveis que mais influenciam a ocorrência do fenômeno da colmatção, este fato foi corroborado na maioria de trabalhos encontrados nesta revisão.

De acordo com Tarbuck e Lutgens (2005) (Tarbuck e Lutgens, 2005), as chuvas têm o potencial de transportar diferentes tipos de sedimentos, sendo que o tipo e a quantidade de material transportado dependem da intensidade da chuva escoada e da granulometria do sedimento.

Por sua vez, a velocidade da sedimentação do grão, depende da morfologia do material e sua natureza, onde os sedimentos de maior tamanho conseguem se sedimentar mais rápido e o material fino geralmente fica em suspensão (BRAJA, 2013; Braja M, 1999).

Em laboratório e campo têm sido utilizados e encontrados sedimentos grossos (areias) e sedimentos finos (siltes e argilas), para simular os processos de colmatção no CoPe, tanto de forma extrema quanto de forma gradativa, chegando à conclusão que geralmente os sedimentos finos são os que mais danificam a permeabilidade por efeitos da plasticidade do material (Quadro 5).

**Quadro 5 - Sedimentos utilizados e encontrados em laboratório e campo**

Referência	Tipo de trabalho	Sedimento	Principais Contribuições
(Charles, Stanford; Mbasika A., Onyango; Tricia A., [s.d.])	Laboratorial	Silte (0.07-1.8mm)	Parte dos sedimentos encontrados nos CoPe's existentes era provenientes dos solos da região, mas outra parte poderia ter sido trazida pelos veículos.
(Haselbach <i>et al.</i> , 2006)	Laboratorial	Areia Fina	Foi proposta uma equação para prever a permeabilidade do CoPe colmatado com areia, esta foi validada com experimentos laboratoriais.
(González-Angullo, N.; Castro, D. ; Rodríguez-Hernández, J. ; Davies, 2008)	Laboratorial	Silte	Os resultados indicam que uma superfície de pavers permeáveis com gradiente de 2% que está colmatada com os sedimentos de silte ainda permite níveis significativos de infiltração

Referência	Tipo de trabalho	Sedimento	Principais Contribuições
(Guthrie, Demille e Eggett, 2010)	Laboratorial	Areia com silte e pedrisco	A colmatação do solo e a saturação da água reduzem a durabilidade do CoPe ao congelamento-degelo.
(Chopra <i>et al.</i> , 2010)	Pavimento existente	Areia e Silte	Em função da quantidade de sedimento nos vazios internos do CoPe o desentupimento do material pode ser muito difícil.
(Manoj B. Chopra; Erik Stuart; and Martin P. Wanielista, 2010)	Pavimentos Existentes	Pó de calcário e areia	O pó de calcário resultou ser mais prejudicial na redução da permeabilidade do CoPe.
(Deo <i>et al.</i> , 2010)	Laboratorial	Areia Fina e Areia Grossa	A areia fina resultou ser mais prejudicial do que a areia grossa em termos de redução da permeabilidade do CoPe.
(Haselbach, 2010)	Laboratorial	Argila	A taxa de redução da permeabilidade aumenta com a densidade das argilas.
(Kayhanian <i>et al.</i> , 2012)	Pavimentos existentes	Sedimentos finos < 38mm	As partículas de material formam uma camada de material fino que impede o passo da água na estrutura dos vazios internos.
(Vancura, Macdonald e Khazanovich, 2012)	Pavimentos existentes	Areia fina e Argila	Partículas de areia grossa não reduziram significativamente a permeabilidade do concreto permeável em comparação com partículas de areia fina.
(Coughlin <i>et al.</i> , 2012)	Laboratorial	Areia e Argila	Areia e argila (montmorilonita) causam entupimento, com argila causando aproximadamente dez vezes mais entupimento que areia por massa.
(Suozzo, Mark J e Dewoolkar, 2012)	Pavimentos existentes	Matéria orgânica e areia	As reduções na taxa de infiltração ao longo do tempo foram graduais, o que indicou que o processo de entupimento ocorreu de forma consistente nos dois locais, independentemente da estação do ano.
(Patel <i>et al.</i> , 2012)	Laboratorial	Argila (Bentonita)	Os resultados mostraram que os valores de permeabilidade diminuíram com a quantidade de materiais de entupimento.
(Fwa, Lim e Tan, 2014)	Laboratorial	Areia	Os resultados mostraram uma degradação da permeabilidade em função dos incrementos de sedimento adicionados
(Liv Haselbach, Vanessa Fátima Pasa Dutra, Paulete Schwetz, 2016)	Laboratorial	Argila	Os sedimentos entupiram parcialmente os vazios internos do CoPe

Referência	Tipo de trabalho	Sedimento	Principais Contribuições
(Lin, Park, Dae-geun Geun, <i>et al.</i> , 2016)	Laboratorial	Areia e Argila	o entupimento é bastante afetado pela quantidade acumulada de sedimentos. No entanto, quando os poros estão entupidos em algum grau, a alteração do coeficiente de permeabilidade diminui.
(Nguyen, Boutouil, Sebaibi, Baraud, Leleyter, <i>et al.</i> , 2017)	Laboratorial	Silte arenoso e areia	devido ao entupimento por um sedimento misturado (areia de argila siltosa), a diminuição da permeabilidade foi de 93 a 96% do valor inicial.
(Seo <i>et al.</i> , 2017)	Laboratorial	Silte e areia	Partículas grandes bloquearam o espaço poroso no concreto permeável, reduzindo assim a capacidade de drenagem e permitindo que apenas partículas finas fossem lavadas.
(Chu, Fwa e Tan, 2017)	Laboratorial	Solo natural	A absorção sonora (ruído) diminui quando a colmatação aumenta.
(Andres-Valeri <i>et al.</i> , 2018)	Laboratorial	Calcário e serragem	O sedimento diminuiu 75.5% da permeabilidade inicial do CoPe.
(El-Hassan e Kianmehr, 2018)	Laboratorial	Material fino <25mm	Aconteceu uma degradação gradativa da permeabilidade com o sedimento utilizado.
(Sandoval <i>et al.</i> , 2020)	Laboratorial	Areia, argila e combinação	Os solos finos diminuem mais a permeabilidade do que os solos grossos, e na combinação de solos o comportamento do sedimento fino é preponderante.

Fonte: O próprio autor

Pode se concluir que o tipo de sedimento influencia de forma direta a colmatação do CoPe, sendo os sedimentos finos e coesivos os mais prejudiciais quando comparados aos sedimentos grossos, também é claro que ainda não foi definida a influência da plasticidade dos sedimentos finos na colmatação, isto poderia ajudar no entendimento deste fenômeno.

Assim como o conhecimento básico dos sedimentos é muito importante entender como esses são transportados (escoamento superficial) até o CoPe e definir assim as demais variáveis que podem interferir no fenômeno da colmatação.

### 2.5.2.1 Cálculo dos sedimentos transportados pelo escoamento superficial

Um dos principais meios de produção de sedimentos é a erosão do solo, que pode ser causada pelas chuvas, assim esses sedimentos são transportados pelo escoamento superficial.

Para o cálculo dos sedimentos transportados pelo escoamento superficial podem ser utilizadas duas alternativas, as quais são:

- Uso de um modelo analítico;
- Uso de um modelo empírico;

O uso dessas alternativas permitirá determinar a massa de sedimento que pode ser transportada por efeitos da erosão causada pela chuva em um determinado solo, com condições pluviométricas, topográficas e geológicas específicas.

#### 2.5.2.1.2 Modelo analítico

Para determinar a carga de sedimento pode ser aplicado o modelo analítico proposto por W. Tao *et al.* (2018), o qual determina a carga de sedimento para uma determinada chuva, dependendo da sua intensidade e das características do solo, que pode ser erosivo para três casos de escoamento superficial como mostrado nas Equações 6, 7 e 8 (Tao, Wang e Lin, 2018).

No Quadro 6 são explicadas as variáveis das equações mencionadas anteriormente.

**Quadro 6 - Variáveis das equações do modelo analítico**

Símbolo	Variável
$C_f$	Splash erosion calibration constant (constante de erosão)
$C_r$	Runoff erosion calibration constant (constante de erosão de escoamento)
$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	Water density (densidade da água)
$J$	Overland slope (declive)
$P$ (g/cm <sup>3</sup> )	Bulk density of soil (densidade do solo)
$\alpha$ (g/cm <sup>3</sup> )	Parameter (parâmetro)
$T$	Rainfall duration (duração da chuva)
$t_0$	Initial time (tempo inicial)
$q_0$ (cm/min)	Discharge in any time (descarga em qualquer momento)

<b>Símbolo</b>	<b>Variável</b>
$r_e$	Excess rainfall (escoamento superficial)
$L$	Slope lengths (comprimento do declive)
$N$	Manning's roughness coefficient (coeficiente de rugosidade de manning)
$R$	Rainfall (intensidade da chuva)

Este modelo trabalha com os dados de pluviosidade de uma região específica, assim como as características de topografia e geológicas, permitindo determinar a produção de sedimento após a ocorrência de um evento de precipitação.

**Caso 1:**  $r_e > q_0$

$$M(t) = \left( \frac{2 C_f \gamma J}{3 \rho} \sqrt{\frac{L r_e}{\alpha}} + \frac{C_r}{\rho} r^2 \right) (t - t_0) + \frac{4 C_f \gamma J L}{9 \rho \alpha} \left( \ln \left( \exp^2 \left( -\operatorname{arctanh} \left( \sqrt{\frac{q_0}{r_e}} \right) - \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\alpha r_e}{L}} (t - t_0) \right) + 1 \right) - \ln \left( \exp^2 \left( -\operatorname{arctanh} \left( \sqrt{\frac{q_0}{r_e}} \right) \right) + 1 \right) \right)$$

(6)

**Caso 2:**  $0 < r_e < q_0$

$$M(t) = \left( \frac{2 C_f \gamma J}{3 \rho} \sqrt{\frac{L r_e}{\alpha}} + \frac{C_r}{\rho} r^2 \right) (t - t_0) + \frac{4 C_f \gamma J L}{9 \rho \alpha} \left( \ln \left( \exp^2 \left( -\operatorname{arccoth} \left( \sqrt{\frac{q_0}{r_e}} \right) - \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\alpha r_e}{L}} (t - t_0) \right) - 1 \right) - \ln \left( \exp^2 \left( -\operatorname{arccoth} \left( \sqrt{\frac{q_0}{r_e}} \right) \right) - 1 \right) \right)$$

(7)

**Caso 3:**  $r_e = 0$

$$M(t) = \frac{1}{18} \frac{C_f \gamma J L}{\alpha \rho} \left( 1 - \left( 1 + \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\alpha q_0}{L}} (t - t_0) \right)^{-2} \right)$$

(8)

### 2.5.2.1.3 Modelo empírico

Um dos modelos empíricos mais reconhecidos é a Equação Universal de Perda de Solo (USLE). A USLE (Equação 9) foi desenvolvida para determinar perdas do solo por erosão laminar de solos expostos à intempérie quando acontece um evento de precipitação. Desse modo, essa perda de solo pode ser calculada utilizando a Equação 9 (Barbosa *et al.*, 2015; Maciel, 2000; Telles, Guimarães e Dechen, 2011).

$$A = R * K * LS * C * P \quad (9)$$

Onde:


- $A$  = Representa a estimativa de perda média anual de solo em determinada área, em condições específicas de uso e ocupação do solo (t/ha.ano);
- $R$  = Erosividade da chuva (Mj.mm/ha.h.ano);
- $K$  = Erodibilidade do solo (t.h/Mj.mm);
- $L$  = Comprimento de rampa (m);
- $S$  = Declividade de rampa (%);
- $C$  = Uso e manejo do solo (0 a 1);
- $P$  = Práticas conservacionistas (0 a 1).

#### Fator $R$ de Erosividade da chuva

O fator de erosividade ( $R$ ) é o índice de erosão pelas chuvas, que expressa a capacidade de uma chuva erodir um solo desprotegido, WISCHMEIER (1959). Esse parâmetro representa numericamente a força da chuva e do escoamento e, é constituído por valores EI30 de cada evento de chuva de uma região, sendo que o somatório desses determina o valor  $R$ .

Da Silva (2004) também realizou um mapa de erosão de solos no Brasil sugerindo diferentes correlações de cálculo do fator  $R$  em função da localização geográfica no mapa brasileiro (Quadro 7).

Quadro 7 - Mapa de erosão do Brasil



Número	Equação	Referência
1	$R = 3.76 * \left(\frac{Mx^2}{P}\right) + 42.77$ (10)	Oliveira Jr. e Medina (1990)
2	$R = 38.849 * \left(\frac{Mx^2}{P}\right)^{1.0852}$ (11)	Morais et al. (1991)
3	$R = (0.66 * Mx) + 8.88$ (12)	Oliveira Jr. (1988)
4	$R = 42.307 * \left(\frac{Mx^2}{P}\right) + 69.763$ (13)	Silva (2001)
5	$R = 0.13 * Mx^{1.24}$ (14)	Leprun (1981)
6	$R = 12.529 * \left(\frac{Mx^2}{P}\right)^{0.6030}$ (15)	Val et al. (1986)
7	$R = 68.73 * \left(\frac{Mx^2}{P}\right)^{0.841}$ (16)	Lombardi Neto e Moldenhauer (1992)
8	$R = 19.55 + (4.20 * Mx)$ (17)	Rufino et al. (1993)

Adaptado de: (Silva, Da, 2004).

### Fator K de Erodibilidade do solo

A erodibilidade faz referência às propriedades próprias do solo (textura, estrutura, porosidade e profundidade) e representa a suscetibilidade do material à processos erosivos. Segundo WISCHMEIER & SMITH (1978), essa é determinada em termos de taxa de perda de solo por unidade de erosividade. Assim, um solo com erodibilidade baixa pode apresentar elevado índice de erosão, devido aos demais fatores da Equação, como também alguns solos com erodibilidade alta podem apresentar um baixo índice de erosão devido aos outros fatores da Equação. Essa característica é definida como fator de erodibilidade (Maciel, 2000).

Em um amplo estudo realizado por Kirkby e Morgan (2005) foram determinados os fatores **K** para cada tipo de solo, em função do conteúdo

de matéria orgânica do mesmo (Morgan, 2005). Tais fatores são apresentados no Quadro 8.

**Quadro 8 - Fatores K determinados por Kirkby e Morgan**

TIPO DE SOLO	<0,5%	2%	>4%
Argila	0,017	0,038	-
Argila arenosa	0,018	0,017	0,016
Argila siltosa	0,033	0,03	0,025
Areia	0,007	0,004	0,003
Areia Fina	0,0021	0,018	0,013
Areia Fina orgânica	0,032	0,026	0,021
Areia orgânica	0,016	0,013	0,011
Areia muito orgânica	0,055	0,047	0,037
Areia fina orgânica	0,058	0,05	0,04
Solo orgânico	0,05	0,045	0,038
Orgânico argilosiltoso	0,049	0,042	0,034
Orgânico argiloso	0,037	0,033	0,028
Orgânico areno-argiloso	0,036	0,033	0,028
Orgânico arenoso	0,036	0,032	0,025
Orgânico arenoso fino	0,046	0,04	0,032
Orgânico arenoso muito fino	0,062	0,054	0,043
Silte	0,079	0,068	0,055
Silte orgânico	0,063	0,055	0,043

Adaptado de: (Morgan, 2005).

### Fator LS - Comprimento de rampa e declividade

A magnitude da erosão causada pela precipitação está diretamente influenciada tanto pelo comprimento do declive como pelo seu gradiente Bertoni *et. al.* (1975). Essas duas variáveis têm sido estudadas de forma independente e são representadas na Equação por *L* e *S*. Em relação ao campo, é mais conveniente considerar-se conjuntamente *LS* como fator topográfico WISCHMEIER & SMITH (1978).

Bertoni & Lombardi (1985) estudaram amplamente a determinação da influência do fator topográfico na erosão do solo, chegando a determinar valores genéricos para comprimentos de rampa de 5 a 100 metros e declividades de 1 até 8%, tais valores são apresentados no Quadro 9 (Maciel, 2000).

**Quadro 9 - Valores do Fator topográfico LS determinados por Bertoni & Lombardi (1985)**

Declive (%)	Comprimento de Rampa (m)													
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	80	100
1	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,12	0,13	0,16	0,18
2	0,06	0,09	0,12	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25	0,26	0,28	0,29	0,35	0,41
3	0,1	0,155	0,2	0,24	0,275	0,31	0,34	0,385	0,4	0,425	0,455	0,48	0,575	0,665
4	0,14	0,22	0,28	0,33	0,38	0,43	0,47	0,51	0,55	0,59	0,63	0,67	0,8	0,92
6	0,23	0,35	0,45	0,54	0,62	0,69	0,77	0,83	0,9	0,96	1,02	1,07	1,29	1,48
8	0,32	0,49	0,63	0,76	0,87	0,98	1,08	1,17	1,26	1,34	1,43	1,51	1,81	2,08

Adaptado de: (Morgan, 2005).

### Fator CP: Uso, Manejo e Práticas Conservacionistas

O fator C da USLE é definido como a razão entre as perdas de solo de uma parcela cultivada sob condições específicas de manejo, e as correspondentes a uma parcela mantida continuamente limpa e preparada para o plantio WISCHMEIER & SMITH (1978).

O fator P é definido como a razão entre a quantidade de solo perdido, verificada com uma prática conservacionista específica e as correspondentes obtidas quando se cultiva na direção da declividade WISCHMEIER & SMITH (1978). Esse fator corresponde às práticas de conservação da erosão na proteção do solo (Barbosa *et al.*, 2015).

Barbosa *et al.* (2015) realizaram uma pesquisa, na qual indicam alguns valores do fator CP encontrados na literatura em função da conservação do solo, tais valores são apresentados no Quadro 10.

**Quadro 10 - Valores de CP encontrados na literatura**

Classe de uso	CP
Reflorestamento, matas	0,0001
Agricultura	0,2
Campos nativos	0,01
Pastagem	0,1
Floresta	0,00004
Área Urbana	0
Várzea	0

Adaptado de: (Morgan, 2005)

### 2.5.3 Ensaios de Colmatação

Na tentativa de simular o fenômeno de colmatação em laboratório e campo, inúmeros autores tentaram adequar ensaios com o intuito de avaliar a diminuição da permeabilidade em função da adição de sedimento. O Quadro 11 expõe as características principais dos ensaios propostos encontrados durante a revisão de literatura.

**Quadro 11 - Resumo ensaios de colmatação encontrados na literatura**

Referência	Princípio do ensaio de permeabilidade		Sedimento		Massa de sedimento utilizada (g)	Laboratório	Campo	Velocidade de colmatação		
	Carga variável	Carga constante	Areia	Argila				Lenta	Média	Rápida
(Haselbach <i>et al.</i> , 2006)		X	X		-	X				X
(Deo <i>et al.</i> , 2010)	X		X		225	X		X		
(Haselbach, 2010)	X			X	5-70	X				
(Sriravindrarajah <i>et al.</i> , 2010)	X			X	450	x		X		
(Tong, 2011)	X		X	X	100	X		X		
(Coughlin <i>et al.</i> , 2012)	X		X	X	154	X		X		
(Mata e Leming, 2012)	X		X	X	100	X		X		
(Walsh <i>et al.</i> , 2014)	X		X	X	55,2	X		X		
(Fwa, Lim e Tan, 2014)		X	X		54	X		X		
(Kevern, 2015)	X			X	207	X				X
(Brugin <i>et al.</i> , 2017)	X		X		500-2000	X				X
(Kiran <i>et al.</i> , 2018)	X		X	X	-	X		X		
(Kia, Wong e Cheeseman, 2018)	X		X	X	62,8	X		X		
(Marcaida, Nguyen e Ahn, 2018)		X	X		60	X		X		
(Rama e Shanthi, 2018)	X		X	X	40	X		X		
(Yuan <i>et al.</i> , 2018)		X	X	X		X		X		

Referência	Princípio do ensaio de permeabilidade		Sedimento		Massa de sedimento utilizada (g)	Laboratório	Campo	Velocidade de colmatação		
	Carga variável	Carga constante	Areia	Argila				Lenta	Média	Rápida
(Jiong, Guodong, Zhaoxia, Ruiping, Xinzhuang, Sherui, <i>et al.</i> , 2018)		X	X		-	X		X		
(Zicarelli e Valore, 2019)	X		X	X	100	X		X		
(El-hassan, Kianmehr e Zouaoui, 2019)	X		X			X		X		
(Cui <i>et al.</i> , 2018)	X		X		-	X				X
(Kia, Wong e Cheeseman, 2019)	X		X	X	62	X		X		
(Cui <i>et al.</i> , 2019)		X	X		-	X		X		
(Sandoval <i>et al.</i> , 2020)		X	X	X	100	X	X	X	X	X

Fonte: O próprio autor

De forma geral foram utilizados os ensaios de permeabilidade a carga variável e constante para colmatar o material (Quadro 4), isto por ser os ensaios mais comuns para avaliar o coeficiente de permeabilidade no CoPe.

Têm sido utilizados sedimentos grossos e finos para colmatar os vazios do material concordando com o item 2.5.2 desta revisão. A quantidade de sedimento utilizada tem sido diferente em todas as pesquisas realizadas, esta varia em função do tipo do corpo de prova utilizado e da área superficial do mesmo variando de 5 a 225 g/cm<sup>2</sup>.

A velocidade de colmatação é entendida como a rapidez com a qual o sedimento consegue chegar ao CoPe influencia a perda da permeabilidade em função do sedimento. As velocidades de colmatação mais reproduzidas em laboratório foram: lenta e rápida de forma independente na maioria dos trabalhos estudados, existindo somente um que estuda a influência da velocidade na colmatação em laboratório e campo.

É claro que existem ainda lacunas no conhecimento no fenômeno da colmatação em campo já que a maioria das pesquisas realizadas foram executadas em laboratório o que dificulta o entendimento do mesmo devido a que em laboratório o fluxo é unidirecional e o material é analisado de forma independente. Em campo o CoPe tem que interagir com a camada de material granular e o subleito, fato que pode influenciar de forma notável na velocidade que se apresenta este fenômeno.

Uma vez que foram expostos os ensaios de colmatação advindos da literatura, passa-se a analisar criticamente o resultado destes ensaios.

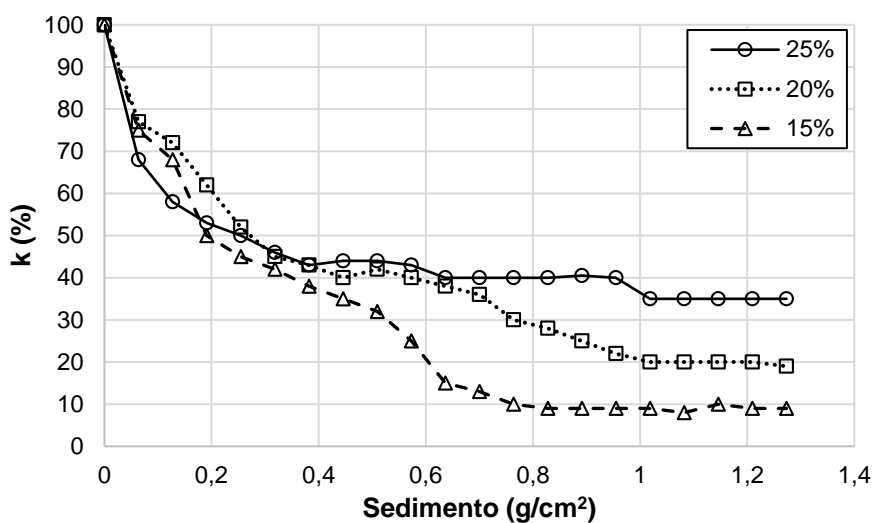
Assim como os sedimentos o índice de vazios influencia diretamente a gravidade do fenômeno da colmatação, por tanto o entendimento desta variável é fundamental para produzir cope's mais resistentes a degradação de permeabilidade ao longo do tempo.

#### 2.5.4 Influência do índice de vazios na colmatação

Uma das propriedades mais importantes no CoPe é o índice de vazios, portanto é necessário conhecer a influência do mesmo durante o fenômeno da colmatação. Para isso, foram encontrados dois trabalhos na busca sistemática realizada (Fwa, Lim e Tan, 2014; Tong, 2011), que testaram 3 CoPe's com diferentes índices de vazios e mediram a variação da permeabilidade após o fenômeno da colmatação.

Tong (2011) realizou o primeiro trabalho com CoPe's contendo índices de vazios de 15, 20 e 25% respectivamente, e os colmatou com sedimentos de areia e argila, chegando nos resultados expostos na Figura 10 para sedimentos de areia e na Figura 11 para sedimentos de argila.

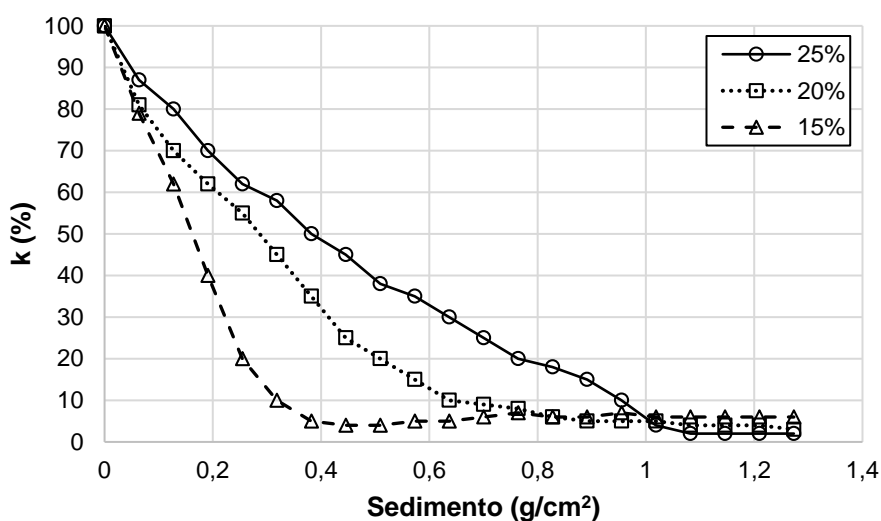
**Figura 10 - Colmatação com areia para 15, 20 e 25% de índice de vazios**



Adaptado de: (Tong, 2011)

Como apresentado na Figura 10, não houve diferença na diminuição de permeabilidade para os 3 índices de vazios estudados (15, 20 e 25) até uma massa de sedimento acumulada de  $0,4 \text{ g/cm}^2$ . Porém, acima desse valor, o comportamento hidráulico mudou como esperado. O CoPe com índice de vazios de 15% teve uma diminuição final de permeabilidade de 90% comparado à inicial, o CoPe com 20% obteve uma redução de 80% e finalmente, o de 25% resultou em uma redução de 65%. Assim, conclui-se que quanto maior o índice de vazios menor será a redução final da permeabilidade para sedimentos de areia.

**Figura 11 - Colmatação com argila para 15, 20 e 25% de índice de vazios**

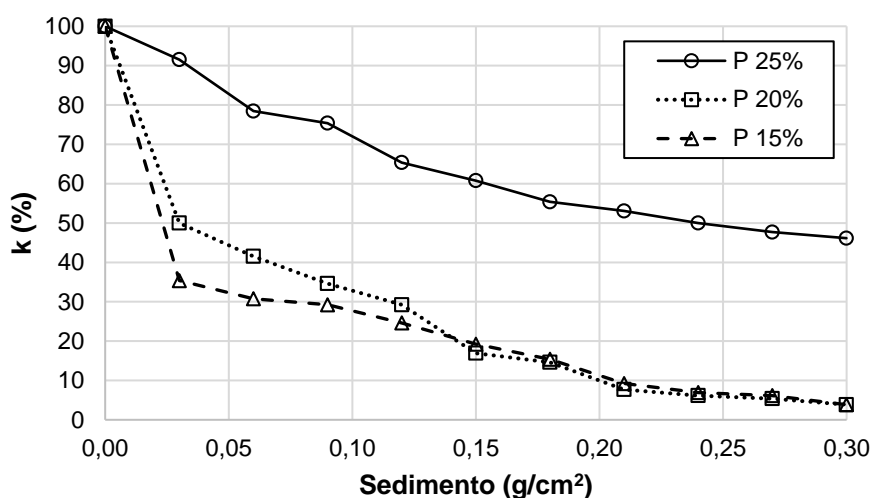


Adaptado de: (Tong, 2011)

No caso do sedimento da argila, o comportamento é o oposto da areia (Figura 11), pois para uma massa de sedimento acumulada de  $0,4 \text{ g/cm}^2$  a diminuição da permeabilidade teve diferença significativa para os 3 índices de vazios estudados. Para o CoPe de 15% de vazios a diminuição com essa massa de sedimento acumulada foi de 95% da permeabilidade inicial, para o de 20% foi de 70% e finalmente, para o de 25% resultou em 50%. Todavia, acima dessa massa de sedimento acumulada as curvas tendem a convergir e para um valor de  $1 \text{ g/cm}^2$  e se estabilizar não sendo representativa a variação do índice de vazios.

Anos mais tarde, Fwa *et al.* (2014) estudaram a influência do índice de vazios no CoPe no processo de colmatação do material, utilizando sedimentos de areia e argila com uma massa de sedimento acumulada máxima de  $0,3 \text{ g/cm}^2$ . Na Figura 12 são mostrados os resultados obtidos nessa pesquisa.

**Figura 12 - Colmatação para 15, 20 e 25% de índice de vazios**



**Adaptado de:** (Fwa, Lim e Tan, 2014)

De acordo com os resultados da Figura 12, há uma diferença significativa entre o índice de vazios de 25% e os outros dois índices, independentemente da massa de sedimento acumulada, chegando em uma diminuição final da permeabilidade inicial de 50% aproximadamente. Os CoPe's com 15% e 20% de índice de vazios praticamente tiveram o mesmo comportamento com a adição de sedimento, chegando em uma redução final de permeabilidade de 95%. Nesta pesquisa, constatou-se que com maiores índices de vazios é possível retardar o processo de colmatação no CoPe.

Por fim, verificou-se que o índice de vazios influencia de forma direta a colmatação quando essa acontece com sedimentos grossos (areia). Em contrapartida, no caso dos sedimentos finos (argila), o índice de vazios não é um fator preponderante e sim a massa de sedimento acumulada final ( $>1 \text{ g/cm}^2$ ).

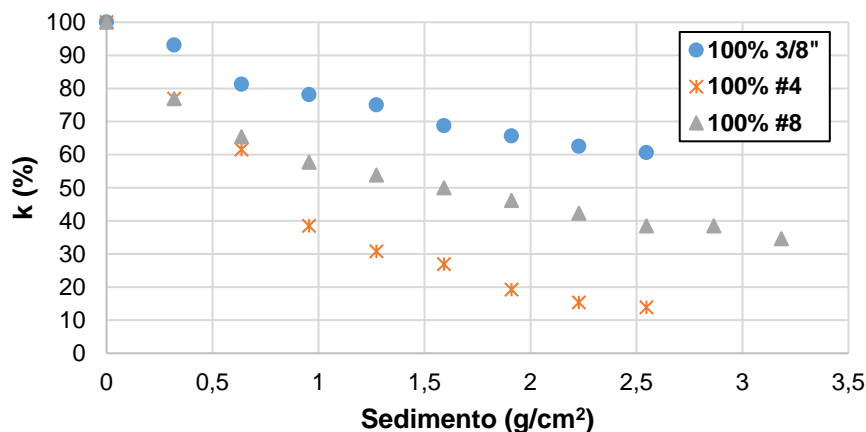
O índice de vazios é diretamente influenciado pela granulometria dos agregados utilizados na fabricação do CoPe, logo a escolha da granulometria é de suma importância para retardar ou acelerar o fenômeno da colmatação, por tanto, o estudo da sua influência é vital no entendimento da durabilidade hidráulica do material.

#### 2.5.4.1 Influência da granulometria na colmatação

A granulometria dos agregados graúdos terá influência direta no índice de vazios e na permeabilidade do material, portanto deve ser levada em consideração no intuito de entender melhor o fenômeno da colmatação.

Tendo isso em vista, foram estudados os resultados obtidos por Deo *et al.* (2010), que trabalharam com 6 agregados de distribuição granulométrica uniforme e dimensões diferentes e avaliaram a influência da adição de sedimento na diminuição da permeabilidade (Deo *et al.*, 2010). Em uma etapa inicial, os autores trabalharam com dimensões máximas diferentes, 100% 3/8" (9,5 mm), 100% #4 (4,8 mm) e 100% #8 (2,36 mm), que foram colmatados com uma massa de sedimento acumulada máxima de  $3,25 \text{ g/cm}^2$  de areia, como exposto na Figura 13.

Figura 13 - Resultados obtidos por Deo *et al.* (2010) para diferentes tamanhos máximos

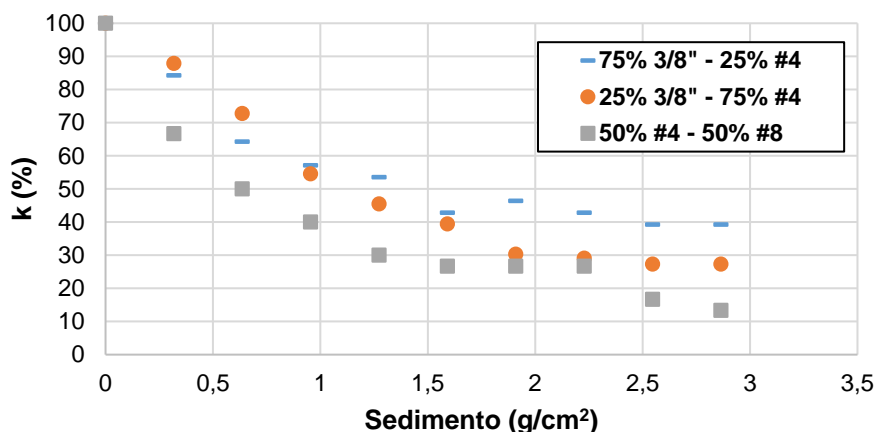


Adaptado de: (Deo *et al.*, 2010)

Pode-se visualizar na Figura 13, a diminuição da permeabilidade é inversamente proporcional ao tamanho máximo do agregado graúdo, pois quando esse foi 100% #8 alcançou a máxima diminuição de permeabilidade de 85% da inicial, seguido por 100% #4, que resultou em uma diminuição de 65% da permeabilidade inicial e finalmente, o menos afetado foi o 100% 3/8" com uma redução final de 40% da permeabilidade inicial. Isso indica que maiores tamanhos máximos e granulometrias uniformes garantem melhor desempenho ao longo do tempo em termos de colmatação.

Os autores também estudaram 3 granulometrias descontínuas, sendo a primeira com 75% de 3/8" e 25% #4, a segunda com 25% 3/8" e 75% #4 e finalmente, a terceira com 50% #4 e 50% #8. Os resultados obtidos para as granulometrias descontínuas são apresentados na Figura 14.

**Figura 14 - Resultados Deo *et al.* (2010) para granulometrias descontínuas**

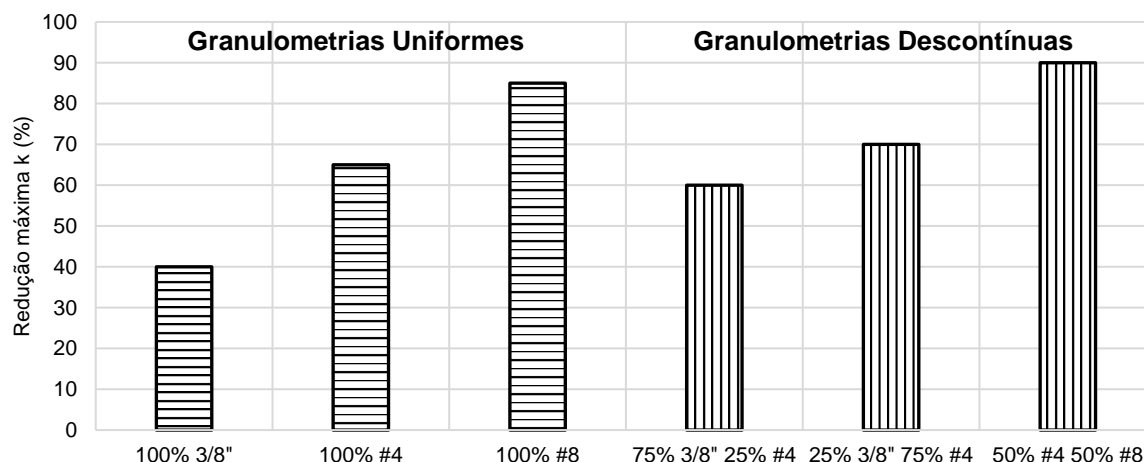


**Adaptado de:** (Deo *et al.*, 2010)

No caso das granulometrias descontínuas, as diferenças de redução entre elas não são tão representativas (Figura 14). Para a massa de sedimento acumulada de 1,5 g/cm<sup>2</sup> a primeira e a segunda respectivamente têm aproximadamente o mesmo valor de redução de permeabilidade de 60%, acima desse valor se apresentam diferenças entre as granulometrias estudadas. Com uma massa de sedimento acumulada final de aproximadamente 3 g/cm<sup>2</sup> a terceira granulometria apresentou a máxima redução de permeabilidade de 90%, seguida pela segunda granulometria com redução de 70% e por fim, a primeira granulometria com uma redução de 60% da permeabilidade inicial.

Na Figura 15 são ilustradas as reduções máximas de permeabilidade para todas as granulometrias utilizadas por Deo *et al.* (2010).

**Figura 15 - Comparação da diminuição máxima de k por granulometria**



Adaptado de: (Deo *et al.*, 2010)

Assim, presume-se que o uso de granulometrias uniformes reduz a diminuição da permeabilidade quando comparado ao uso de granulometrias descontínuas (Figura 15), ou seja, o uso de granulometrias uniformes aumenta o tamanho dos vazios internos permitindo maior fluxo da água e diminuindo os possíveis efeitos causados pelo sedimento.

### 2.5.5 Modelos de Colmatção

Os modelos de colmatção são importantes no intuito de entender mais o fenômeno, suas variáveis e suas limitantes e assim conseguir caracterizar prever o comportamento do material quando colmatado. No Quadro 12 são expostos os modelos de colmatção encontrados na literatura.

**Quadro 12 - Modelos de colmatção encontrados na literatura**

Referência	Modelo
(Haselbach <i>et al.</i> , 2006)	$k_{eff} = (P_{top}/100) * k_{sand}$ (18)
(Deo <i>et al.</i> , 2010)	$\Phi_{colmatada(m)} = \frac{V_{\Phi inicial(m)} - V_{areia}}{V_{CP}}$ (19)
(Walsh <i>et al.</i> , 2014)	$k(t) = k_0 * e^{C*M}$ (20)
(Fwa, Lim e Tan, 2014)	$k = a * e^{-bN}$ (21)
(Lin, Park, Dae Geun, <i>et al.</i> , 2016)	$y = 0.17 + 0.41 * e^{-0.65*x}$ (22)
(Kia, Wong e Cheeseman, 2018)	$k(t) = k_i * e^{-\lambda t}$ (23)
(Yuan <i>et al.</i> , 2018)	$k(n) = 1 - b * (1 - e^{a*n})$ (24)
(Cui <i>et al.</i> , 2018)	$k = \frac{(1-P)^2}{P^3} \frac{(P-\alpha\sigma)^3}{[1-(P-\alpha\sigma)]^2}$ (25)
(Zicarelli e Valore, 2019)	$k = 100 * k_0 * e^{-0,283N}$ (26)

Referência	Modelo
(Sandoval <i>et al.</i> , 2020)	$k_{clog} = k_{\infty} + (k_0 - k_{\infty}) * e^{-c*n}$ (27)

Fonte: O próprio autor

Como mostrado na Quadro 12 desde o ano de 2006 foram propostos modelos (Equação 18) que visam obter a variação da permeabilidade em função da porosidade e a permeabilidade do sedimento utilizado (Haselbach *et al.*, 2006). Deo *et al.* (2010) propuseram um modelo da variação do índice de vazios em função das características iniciais do corpo de prova utilizado e o volume de sedimento de areia (Equação 19).

Walsh *et al.* (2014) propõem a Equação 20 para caracterizar a perda de permeabilidade em função do sedimento este modelo tem um comportamento exponencial, no qual para pequenas variações no sedimento se apresentam grandes variações na permeabilidade do CoPe. Fwa *et al.* (2014) também propuseram um modelo exponencial (Equação 21) o qual considera duas constantes e o número de ciclos de colmatação.

Lin *et al.* (2016) propuseram a Equação 22 que considera a quantidade de sedimento que pode chegar a colmatar os vazios do CoPe. Kia *et al.* (2018) propuseram definir o potencial de colmatação (Equação 23) das seguintes formas: a razão entre a permeabilidade e a permeabilidade inicial ( $\Delta k/k_i$ ); b) o número de ciclos necessários para reduzir a permeabilidade à metade do valor inicial (isto é, meia-vida permeabilidade), e; c) o número de ciclos necessários para o entupimento total dos vazios internos.

Yuan *et al.* (2018) concluíram que a degradação da permeabilidade tinha uma tendência exponencial (Equação 24) que está em função da quantidade de sedimento utilizada e um coeficiente b de transferência de probabilidades.

Cui *et al.* (2018) adequaram a equação de Kozeny–Carmen (Equação 25) para descrever a perda de permeabilidade em função da colmatação.

Zicarelli e Valore (2019) definiram que a perda da permeabilidade está em função do número  $N$  de ciclos de colmatação aos que for exposto o CoPe (Equação 26) mostrando uma queda exponencial por ciclo.

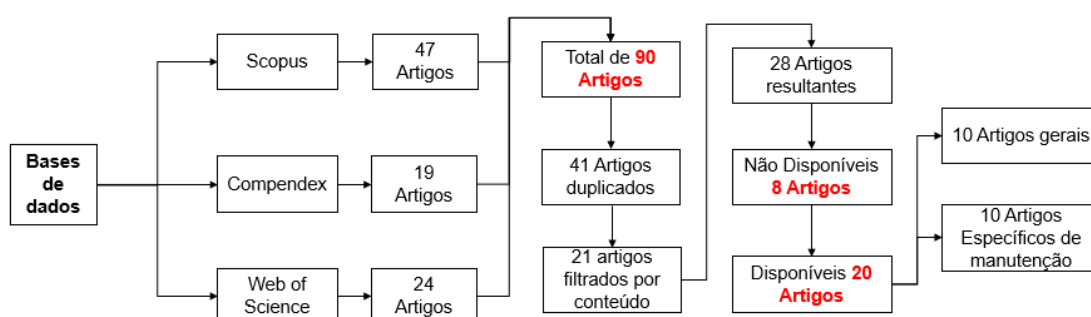
Finalmente Sandoval *et al.* (2020) realizaram uma proposta da variação da permeabilidade em função da carga de sedimento e da variação da permeabilidade (Equação 27), esta permite prever a perda da permeabilidade do material ao longo do tempo.

A escassez de trabalhos nas bases de dados consultadas que tratam do assunto da colmatação do CoPe e a ausência de pesquisas de campo demonstra que ainda existem grandes lacunas no conhecimento do desenvolvimento de um modelo de colmatação que possa auxiliar a previsão da vida útil do material.

## 2.6 MANUNTENÇÃO

Neste item da revisão também foi implementada uma busca sistemática (de forma análoga ao item anterior) sobre métodos de limpeza para o CoPe. Esta busca utilizou 3 bases de dados: COMPENDEX, SCOPUS e WEB OF KNOWLEDGE. O query de busca utilizado foi: “Pervious Concrete; Maintenance” (Concreto permeável; Manutenção). Para facilitar a gestão dos documentos foi utilizado o software ENDNOTE, a gestão foi feita seguindo as etapas mostradas na Figura 16. Após a gestão documental foram obtidas 20 publicações. As mesmas foram separadas em duas categorias: geral e de manutenção.

**Figura 16 – Busca sistemática Manutenção**



**Fonte:** o próprio autor.

A partir da busca sistemática, só 10 artigos abordaram o tema de manutenção do CoPe, estes são apresentados no Quadro 13 junto com as suas principais características.

Quadro 13 – Principais características dos artigos de manutenção do CoPe

Referência	Sedimento	Tipo de pesquisa	Método de limpeza (k)	Idade de intervenção	Espessura CoPe (cm)	Recuperação da permeabilidade (%)	Periodicidade de manutenção sugerida	Contribuições
(Haselbach, 2010)	Argila, Kaolin, Betonita	Laboratorial	Varrição (limpeza superficial)	Imediata	-	-	-	Após a remoção dos depósitos superficiais, verifica-se que a taxa de infiltração melhorará com os processos de enxágue subsequentes. Os núcleos entupidos com as argilas menos coesas tendiam a remediar mais rapidamente.
(Kevern, 2010)	Areia e Argila	Campo	Aspiração / Lavagem a pressão com água	Imediata e longo termo de utilização	-	-	Semestral	A colmatação excessiva e a permeabilidade inadequada podem ser resolvidos criando áreas distribuídas de seções de drenagem de alta permeabilidade. Esses drenos podem ser estruturas tradicionais ou áreas em que o concreto permeável de menor permeabilidade é substituído por uma mistura de permeabilidade muito maior.

Referência	Sedimento	Tipo de pesquisa	Método de limpeza (k)	Idade de intervenção	Espessura CoPe (cm)	Recuperação da permeabilidade (%)	Periodicidade de manutenção sugerida	Contribuições
(Dougherty, Mark <i>et al.</i> , 2011)	Material orgânico e silte	Campo	Compressão de ar + Lavagem a pressão com água	Longo termo de utilização	10,2	90	Uma ou duas vezes por ano	Os autores reconhecem que, para instalações de PCs que cobrem grandes áreas, como estacionamentos, um sistema combinado de lavadora a vácuo e pressão, semelhante a uma varredora de rua, é o método de limpeza mais efetivo e econômico.
(Suozzo, Mark J. e Dewoolkar, 2012)	Material orgânico e areia	Campo	Varição com caminhão especial / Caminhão de aspiração / Aspiração com equipamento manual / Lavagem a pressão com água	Longo termo de utilização	-	21-30-85	Limpeza regular	A limpeza por lavagem sob pressão foi eficaz para restaurar as taxas de infiltração em áreas de entupimento severo
(Vancura, Macdonald e Khazanovich, 2012)	Solos finos, areias e material orgânico	Campo	Varição com caminhão especial / Caminhão de aspiração	Longo termo de utilização	15,2 - 20,3	>50	-	O trabalho experimental demonstrou que, embora se o material de entupimento permaneceu dentro dos vazios de concreto permeáveis após a manutenção, a permeabilidade do concreto permeável foi restaurada.

Referência	Sedimento	Tipo de pesquisa	Método de limpeza (k)	Idade de intervenção	Espessura CoPe (cm)	Recuperação da permeabilidade (%)	Periodicidade de manutenção sugerida	Contribuições
(Henderson e Tighe, 2012)	Material fino e material orgânico	Campo	Lavagem a pressão com água / aspiração / Varrição	Longo termo de utilização	-	-	-	É necessário agitar os detritos nos espaços vazios durante a manutenção para melhorar a permeabilidade, varrer com uma vassoura doméstica rígida e enxaguar a superfície com uma mangueira de jardim, ambos provaram ser os métodos eficazes para fazer isso.
(Drake e Bradford, 2013)d	Areia e finos	Campo	Aspiração / varrição / lavagem a pressão com água	Longo termo de utilização	-	>50	-	Testes de equipamentos de pequeno porte descobriram que a limpeza a vácuo e a lavagem sob pressão têm o potencial de melhorar a capacidade de infiltração. Testes em caminhões de varredura de tamanho normal demonstraram que a permeabilidade pode ser parcialmente restaurada no CoPe por varredura baseada em sucção.
(Haselbach <i>et al.</i> , 2015)	Mistura de Argila siltosa e areia	Laboratório	Varrição / Lavagem a pressão com água	Imediato e médio termo - deposição	12 - 19	5-20	-	As taxas de infiltração são significativamente mais baixas após o entupimento e a varredura, mas se forem altas o suficiente para lidar com os

Referência	Sedimento	Tipo de pesquisa	Método de limpeza (k)	Idade de intervenção	Espessura CoPe (cm)	Recuperação da permeabilidade (%)	Periodicidade de manutenção sugerida	Contribuições
								fluxos de águas pluviais para as quais o sistema foi projetado, eles ainda serão adequados e o sistema funcionará hidráulicamente.
(Weiss <i>et al.</i> , 2015)	Areia e argila	Campo	Lavagem a pressão com água / aspiração	Longo termo de utilização	-	-	Mínimo 1 vez por ano, ou de 2 a 4 vezes por ano	As atividades típicas de manutenção incluem lavagem sob pressão e aspiração. Geralmente, a varredura mecânica não é recomendada porque, em vez de remover partículas do pavimento, empurra as partículas mais para dentro do pavimento.
(Hu <i>et al.</i> , 2020)	Solos e material orgânico	Campo	Lavagem a pressão com água / Aspiração	Longo termo de utilização	10	26-73	2 a 5 vezes por ano	Todas as medidas de manutenção podem restaurar a permeabilidade do pavimento permeável em certa medida. A eficiência da lavagem sob pressão é muito maior que a da sucção a vácuo.

Fonte: O próprio autor

Como mostrado no Quadro 13 cada uma das publicações estudadas tem características diferentes, mas tentaram avaliar a recuperação da permeabilidade no CoPe no intuito de preservar seu comportamento hidráulico nos limites de norma ( $>1\text{mm/s}$ ).

Os métodos de limpeza utilizados variaram desde os mais simples (varrição superficial) até os mais sofisticados utilizando por exemplo caminhões especiais que realizavam 3 funções diferentes (varrição, aspiração e lavagem) os quais nem sempre estão disponíveis em todos os locais.

A maior parte dos trabalhos analisados avaliaram o desempenho hidráulico do material em campo, de forma inicial e após um longo tempo de utilização ( $\geq 1$  ano), para assim tentar avaliar a variação real da permeabilidade e sua capacidade de recuperação.

A recuperação da permeabilidade variou de 20-90%, isto em função do índice de vazios do CoPe e do sedimento utilizado, mostrando que existe a possibilidade de recuperar a permeabilidade do material aplicando o método de limpeza adequado. Finalmente a periodicidade sugerida variou de 1 a 5 vezes por ano, na intenção de manter a permeabilidade o mais próximas da inicial.

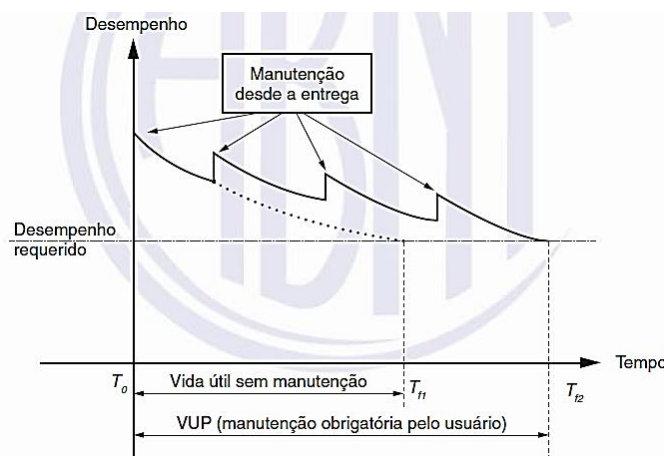
Pode se concluir que nos últimos anos métodos de limpeza para CoPe's vem sendo estudados. Mesmo que tenham sido sugeridas periodicidades de limpeza não foi encontrado um roteiro que permita estimar esta periodicidade em função das características específicas de cada obra e local mostrando que ainda há uma falta de informação quanto a periodização da limpeza, não existindo este item na norma nacional ABNT NBR 16416 (2015) e internacional ACI 522R-10. Finalmente nenhum dos artigos e trabalhos pesquisados estudou a vida útil hidráulica do CoPe, sendo ainda uma lacuna do conhecimento importante no material.

## 2.7 VIDA ÚTIL

O conceito de vida útil tem sido amplamente pesquisado na área das edificações de forma geral, nesse respeito a ABNT NBR 15575 (2015) define a vida útil como “*Período de tempo em que um edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos, com atendimento dos níveis de desempenho previstos nesta Norma, considerando a periodicidade e a correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo manual de uso, operação e manutenção (a vida útil não pode ser confundida com prazo de garantia legal ou contratual).*”

Tal conceito de vida útil da ABNT NBR 15575 (2015) está ligado ao desempenho das estruturas, sendo este definido como “o comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas”, por tanto as estruturas terão um desempenho inicial e ao longo do tempo este irá se degradando por agentes ambientais ou o próprio uso das mesmas como exposto na Figura 17.

**Figura 17 - Desempenho ao longo do tempo**



**Fonte:** (NBR 15575, 2015)

Considerando a Figura 17, as estruturas têm uma vida útil sem manutenção e esta pode ser acrescentada com uma periodicidade de manutenção

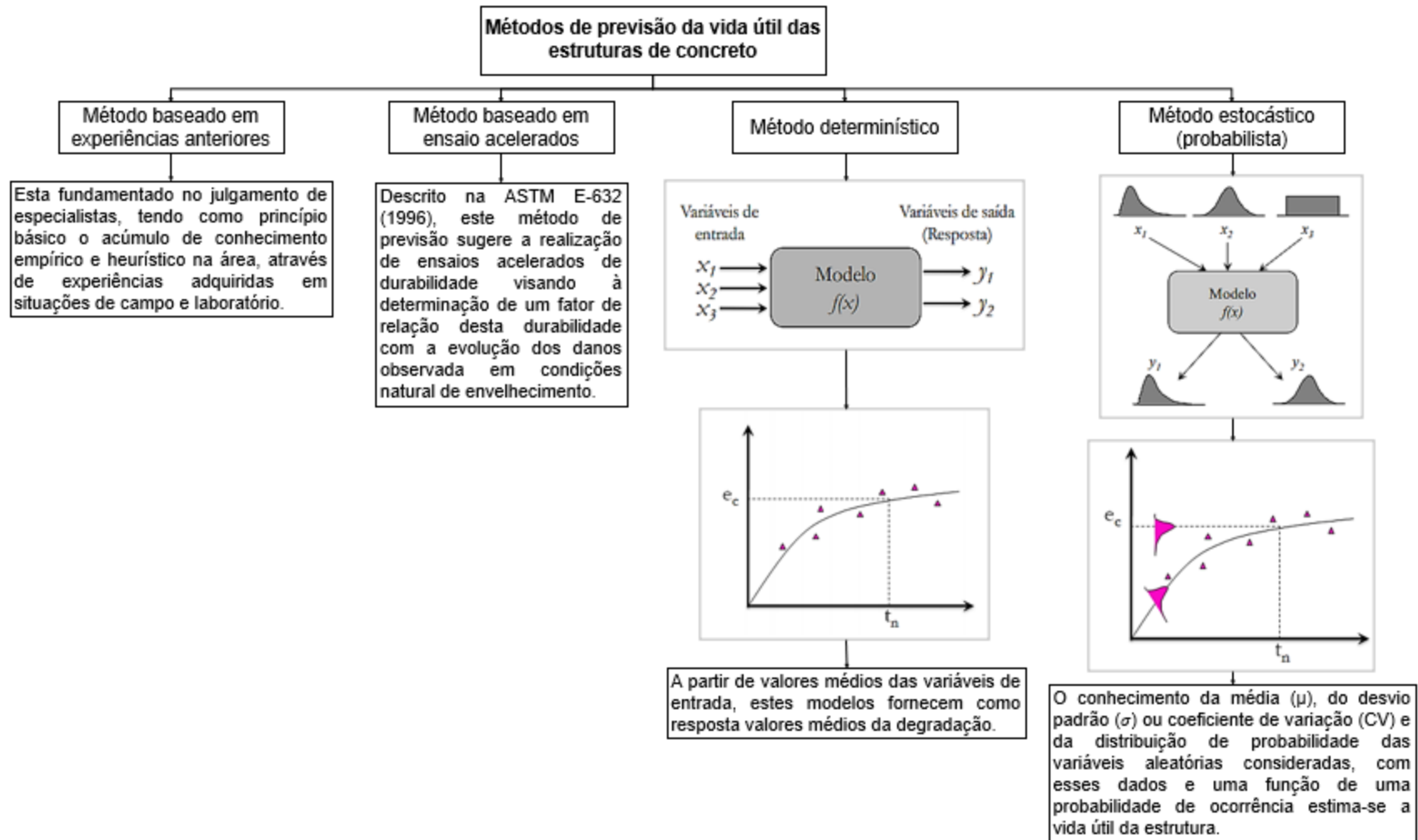
adequada, para manter sempre um desempenho requerido estabelecido nas normas.

Uma outra norma que aborda o conceito de vida útil é a ISO 13823 (2008), nessa é definida como o “*período efetivo de tempo durante o qual uma estrutura ou qualquer dos seus componentes satisfazem os requisitos de desempenho do projeto, sem ações imprevistas de manutenção ou reparo*” (ISO 13823, 2008).

Esses dois conceitos mencionados anteriormente são aplicados na área de edificações, agora na área de materiais Possan & Demoliner (2013) definem vida útil como o tempo no qual o material apresenta um bom desempenho (comportamento em uso do material), considerando as condições mínimas de durabilidade e resistência. Por tanto o desempenho do material é variável, e depende das condições de exposição, do uso, e da manutenção (Possan e Demoliner, 2013), um dos materiais que tem sido muito estudado nesse respeito é o concreto e os critérios de vida útil são avaliados respeito aos seus materiais constituintes e condições de funcionamento.

Possan (2010) define 4 métodos principais para determinação da vida útil do concreto novo (Figura 18), estes estão associados a experiências de campo, experiências laboratoriais, análise matemático empírico e semi-empírico, análise analítica, e análises probabilísticas quando se conta com um grande número de dados e um reconhecimento da variação destes.

Figura 18 - Métodos de previsão da vida útil para estruturas de concreto



Adaptado de: (Possan, 2010)

As definições e métodos anteriormente mencionadas também podem ser aplicadas na área de pavimentação (pavimento flexível e rígido), onde os materiais utilizados devem cumprir com uns requisitos iniciais em termos de resistência e durabilidade, visto que, ao longo do tempo o material sofre processo de degradação derivado do seu uso próprio e de agentes ambientais que aceleram este processo (Karballaezadeh *et al.*, 2019). A degradação do pavimento geralmente é manifestada em diferentes tipos de falhas. Sendo estas estruturais ou funcionais, a falha funcional é normalmente definida como a condição indesejável de certos tipos de desgastes, como rachaduras na superfície ou rugosidade. A falha estrutural, por outro lado, normalmente é baseada na fadiga devido a cargas repetitivas (Yang, 2011), esses tipos de falhas geralmente são avaliadas por diferentes tipos de técnicas em função das normas nacionais ou regionais ou das agências encarregadas do gerenciamento das rodovias.

No Canadá no atual sistema de gerenciamento de pavimentos (AT&U) é realizada uma ênfase no desempenho estrutural considerando os seguintes dados:

- Informação de resistência estrutural;
- Informação de rugosidade superficial;
- Dados de defeitos visuais.

Essas informações são coletadas no intuito de determinar o desempenho atual do pavimento, planejar as etapas de manutenção e/ou determinar o programa de reabilitação quando for preciso.

Em vista disso, têm sido desenvolvidas metodologias que permitam avaliar o estado atual dos materiais e garantir que esses podem recuperar algumas das suas condições iniciais com a intenção de aumentar a vida útil.

Estas metodologias visam prever a “vida útil restante” (VUR) e programar assim a periodicidade de manutenção adequada para cumprir com os parâmetros mínimos das normas para cada material (Karballaezadeh *et al.*, 2019).

A previsão do VUR é indispensável no gerenciamento dos pavimentos. A conscientização das condições futuras dos pavimentos é um ponto importante na tomada de decisões no planejamento da manutenção e periodicidade de manutenção do pavimento.

Em pavimentos convencionais é utilizado o índice de condição do pavimento (ICP) para verificar quando tem que ser realizadas intervenções de manutenção, este índice avalia a variação das condições mecânicas dos materiais do sistema de pavimento respeito as suas condições iniciais, logo varia de 0-100% (Misael, Páez e Lopes, 2015). No Quadro 14 são expostas as faixas de variação desse índice (Condition, Basics e Classification, [s.d.]; Setyawan, Nainggolan e Budiarto, 2015).

**Quadro 14 - Faixa de variação ICP**

Classificação						
Índice ICP						
Excelente	Muito bom	Bom	Regular	Ruim	Péssimo	Muito péssimo
100-85	85-70	70-55	55-40	40-25	25-10	10-0

**Fonte:**(Condition, Basics e Classification, [s.d.]; Elkins *et al.*, 2013)

Por tanto é considerado que o pavimento está trabalhando em boas condições quando ocorre uma degradação das suas propriedades até no máximo 45%, acima desse valor o material é suscetível de manutenção (Fernando e Gonçalves, 1999).

O atual sistema de gerenciamento de pavimentos sugerido pela Agência de Transporte e Utilidades do Canadá (AT&U) utiliza o Índice de Conforto para condução (RCI), o Índice de Adequação Estrutural (SAI), o Índice de Condição Visual (VCI) e o Índice de Qualidade do Pavimento (PAI) para medir, monitorar e prever a condição da rede de rodovias. O Índice de Qualidade do Pavimento (PQI) é um índice composto que incorpora RCI, SAI e VCI em um índice no relacionamento mostrado na Equação 28 (Alberta Transportation and Utilities, 1997).

$$PQI = 1,1607 + 0,0596(RCI * VCI) + 0,4264(RCI * \log_{10} SAI) \quad (28)$$

Os quatro índices utilizados na equação 28 variam de 0-10, sendo 0 ruim e 10 excelente, alguns valores aceitáveis para tais índices sugeridos pela AT&S são. O PQI é utilizado para avaliar o estado atual do pavimento, prever a sua vida útil e identificar quais seções precisam de uma intervenção (Alberta Transportation and Utilities, 1997).

Também existe o índice de gravidade global (IGG) que consiste na ponderação das patologias em pavimentos flexíveis e semirrígidos e sua quantificação segue o índice (DNIT, 2005). É o somatório dos Índices de Gravidade Individuais (IGI) e seu resultado representa o conceito de degradação do pavimento segundo a seguinte faixa de variação mostrada no Quadro 15.

**Quadro 15 - Faixa de variação IGG**

Classificação				
Índice IGG				
Excelente	Muito bom	Regular	Ruim	Péssimo
0-20	20-40	40-80	80-100	>100

Fonte:(DNIT, 2005; Elkins *et al.*, 2013)

Em pavimentos de concreto existe uma degradação natural ou prematura das propriedades do material, tal degradação reduz o desempenho diminuindo a vida útil do material, e pode ser causada pela má qualidade dos materiais utilizados, problemas no projeto e na execução das obras ou simplesmente pela ausência de manutenção o que acelera o processo de degradação (Possan e Demoliner, 2013).

Considerar a manutenção na etapa de projeto é indispensável para manter o funcionamento das estruturas de forma adequada e prolongar a vida útil do material, por tanto fatores como a periodicidade de manutenção tornam se obrigatórios antes de executar as obras. Antigamente os materiais eram avaliados somente pela sua resistência, e com o passo do tempo foi entrando o conceito de

durabilidade, juntando esses dois criou-se o critério de desempenho do material, e finalmente o de vida útil.

Nesse sentido os pavimentos terão então uma vida útil inicial e derivado do seu uso e as condições de exposição uma vida útil remanente (VUR), a qual refere-se ao tempo necessário para que o pavimento atinja um status inaceitável e precise ser reabilitado ou reconstruído (Karballaezadeh *et al.*, 2019).

A vida VUR em pavimentos pode ser determinada por métodos mecânicos e empíricos (semiempíricos). Os métodos mecânicos usam testes tanto destrutivos quanto não destrutivos para determinar as características de resistência dos pavimentos existentes, essas determinações são feitas por meio de equações empíricas ou leis físicas. Finalmente, a VUR é calculada usando o tráfego previsto. Nos ensaios destrutivos, o pavimento deve ser perturbado para a retirada das respectivas amostras, esta amostragem causa danos ao pavimento. Por outro lado os testes não destrutivos, não danificam o material e a sua abordagem é baseada na deflexão medida da superfície do pavimento (Karballaezadeh *et al.*, 2019).

No método empírico, a VUR é determinada com base em dados históricos observados e outras condições e características do projeto. Além disso, os efeitos dos principais parâmetros podem ser previstos direta ou indiretamente com correlações.

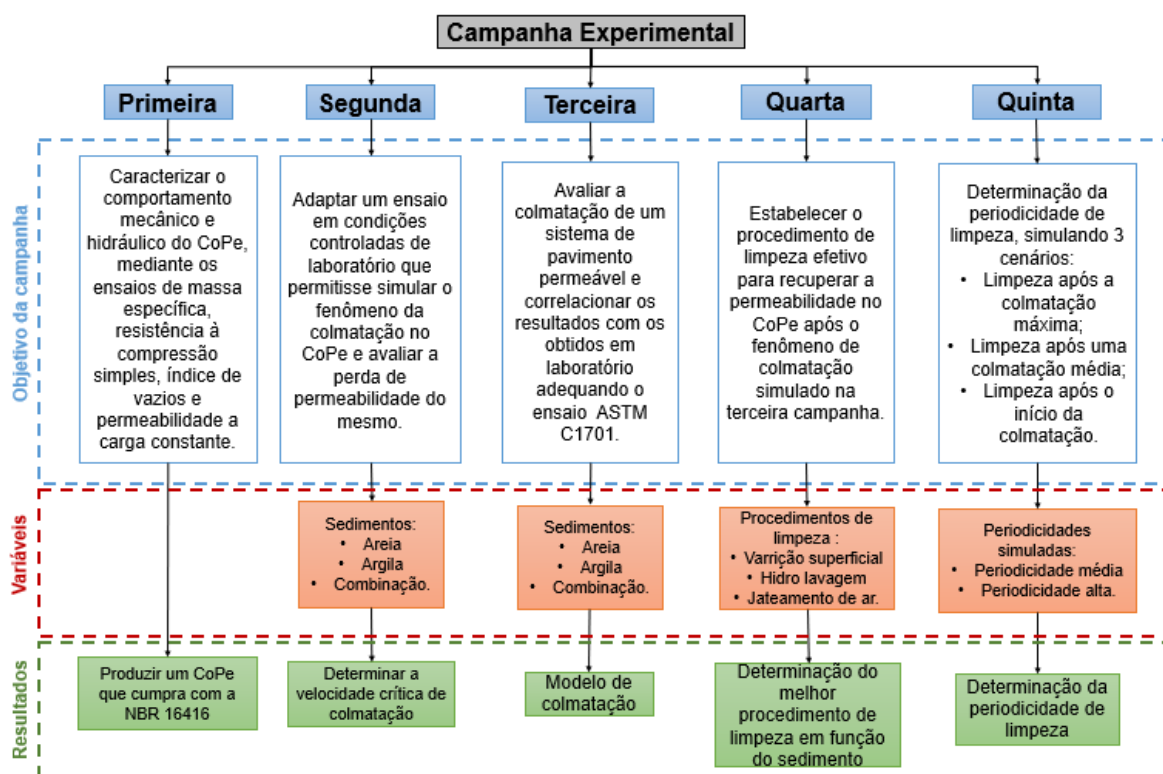
Para o CoPe não existe uma definição formal relacionada a vida útil hidráulica do material, por tanto no desenvolvimento desta tese a vida útil do material foi definida como “período temporal no qual o CoPe tem um desempenho hidráulico aceitável segundo os limites da norma ABNT NBR 16416 (2015), sem considerar manutenção”, esta definição limitou-se só ao desempenho hidráulico pelo fato de ser a linha estudada nesta pesquisa. De forma análoga não existem metodologias que permitam determinar a VUR do CoPe.

Neste sentido pode ser considerada como vida útil hidráulica do CoPe o tempo no qual o material atende um nível de desempenho hidráulico adequado mantendo uma permeabilidade mínima conforme a ABNT NBR 16416 (2015).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos nesta tese e dar resposta a questão de pesquisa, o trabalho experimental foi dividido em cinco campanhas experimentais, as primeiras três focadas no fenômeno da colmatação do CoPe e a quarta e a quinta na recuperação da permeabilidade do material como ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Fluxograma do trabalho experimental



Fonte: O próprio autor

Na Primeira Campanha Experimental, foi caracterizado o CoPe em termos mecânicos e hidráulicos para verificar o cumprimento dos parâmetros mínimos da norma ABNT NBR 16416/2015.

Após caracterizado o CoPe, a Segunda Campanha Experimental tratou-se da adequação do ensaio de permeabilidade de carga constante para avaliar o processo de colmatação no CoPe e assim, possibilitar a determinação da

variação da permeabilidade em função da massa de sedimento acumulada e 3 condições de colmatação diferentes.

Na Terceira Campanha Experimental foi construído um sistema pavimento permeável de infiltração total (Campo Experimental 1) com o intuito de avaliar o fenômeno da colmatação em condições de campo por meio da adequação do ensaio ASTM C1701 e a pior condição de colmatação (velocidade crítica) da Segunda Campanha Experimental.

Após a finalização das campanhas de colmatação, começou-se a fase de recuperação de permeabilidade para isto foram implementadas a quarta e a quinta campanha experimental. Na Quarta Campanha Experimental, foi avaliado o procedimento de limpeza mais efetivo por tipo de sedimento utilizado para colmatar o CoPe.

Por fim, após escolhido o procedimento de limpeza (recuperação de permeabilidade) mais efetivo para cada tipo de sedimento iniciou-se a Quinta Campanha experimental, que teve como objetivo avaliar a periodicidade de limpeza (Campo Experimental 2), mediante a simulação de duas periodicidades de limpezas diferentes. Desse modo, também foram realizados ensaios de microtomografia 3D para determinar a localização espacial dos sedimentos no CoPe.

### 3.1 MATERIAIS

Nas cinco campanhas experimentais foram utilizados os seguintes materiais na fabricação do CoPe:

- Cimento Portland CP II-Z-32 (cimento mais utilizado na região) que possui as características químicas e mecânicas mostradas na Tabela 1.

**Tabela 1 - Especificações cimento CP II-Z-32**

Parâmetros	
Tempo de início de pega (horas)	≥ 1
MgO (%)	-
Perda ao fogo (%)	≤ 8,5
Resíduo insolúvel (%)	≤ 18,5
SO <sub>3</sub>	≤ 4,5
Resistência à Compressão (MPa)	
1 dia	-
3 dias	≥ 10
7 dias	≥ 20
28 dias	≥ 32
Adições Permitidas (%)	
Fíler calcário	0 a 15
Material Pozolânico	6 a 14

Adaptado de: ITAMBÉ (2018)

- Agregado graúdo de basalto de dimensão máxima 9,5 mm (brita zero – B0);
- Água potável.

Os resultados dos ensaios de caracterização do agregado encontram-se na Tabela 2.

**Tabela 2 – Caracterização do agregado graúdo utilizado**

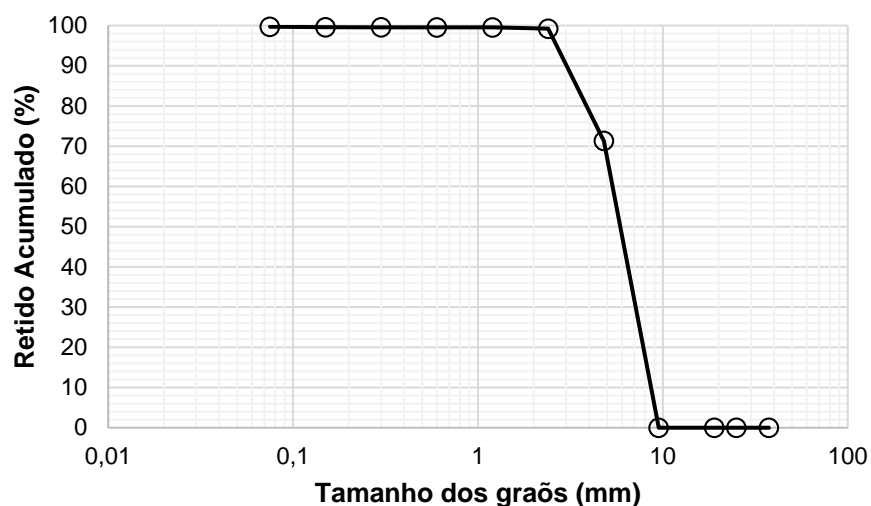
Agregado	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de Material pulverulento (%)	Absorção de água (%)
	ABNT NBR NM 53/2003	ABNT NBR NM 45:2006	ABNT NBR NM 46/2003	ABNT NBR NM 53/2003
Basalto	2,80	1,50	4,15	1,42

Fonte: O próprio autor

Os resultados da Tabela 2, corroboram a natureza mineralógica do agregado utilizado para massa específica (basalto), e a absorção é condizente com o encontrado na literatura (Mehta e Monteiro, 2006).

A Figura 20 ilustra a curva granulométrica do agregado com base na norma ABNT NBR NM 248/2003.

**Figura 20 - Curva granulométrica do agregado graúdo**



**Fonte:** O próprio autor

A dimensão máxima do agregado graúdo utilizado foi 9,5mm condizente com as recomendações encontradas na literatura (ACI 522-R10, 2010; Chandrappa e Biligiri, 2016a; Kia *et al.*, 2017; Mrakovčić, Čeh e Jugovac, 2014), nas quais o tamanho máximo de grão recomendado para aplicações como pavimentação é de 10 mm. Observa-se na Figura 20 que 70% dos grãos correspondem a 4,8 mm e que 30% está distribuído nos outros tamanhos, resultando em uma granulometria praticamente uniforme confirmada pelo coeficiente de uniformidade (Cu) de 2.

### 3.1.1 Processo de Produção

O processo de produção considera a fixação do traço, o procedimento de mistura, compactação e moldagem dos corpos de prova (CP's).

### 3.1.1.1 .Traço

O traço foi fixado em massa (1:3,26) com relação água cimento (a/c) de 0,34. Esse traço foi utilizado por Sandoval (2014) e Risson (2017). Na Tabela 3 é mostrado o consumo de materiais por metro cúbico.

**Tabela 3 - Consumo de materiais por m<sup>3</sup>**

Consumo de cimento (kg)	Consumo de agregado (kg)	a/c	Água (l)
420,0	1369,2	0,34	142,8

**Fonte:** O próprio autor

Como apresentado na Tabela 3, o consumo de cimento foi de 420,0 kg/m<sup>3</sup>, estando na faixa dos consumos encontrados na literatura (Quadro 1). O consumo de agregado graúdo de 1369,2 kg corresponde a uma relação de 1:3,26 com o cimento, seguindo a recomendação feita por Tennis *et al.* (2004) e finalmente, a relação a/c de 0,34 justificada pela ausência de aditivos químicos ou adições minerais.

### 3.1.1.2 Mistura e moldagem

A mistura foi realizada em betoneira (Figura 21a), seguindo o procedimento sugerido por Sandoval (2014), tendo um tempo total de mistura de 5 minutos.

Após a mistura do CoPe foram moldados corpos de prova cilíndricos de 100mmx200mm (Figura 21b) e 50mmx100mm. A compactação desses corpos de prova foi executada utilizando o soquete de Proctor (Figura 21c), como recomendado por Risson (2017). O procedimento de compactação utilizado diminui a variabilidade da energia de compactação durante a moldagem, isto em virtude da massa do soquete (2,5 kg) e da altura de queda (30 cm) serem constantes.

A compactação ocorreu em camada única com 10 golpes. Tal procedimento é justificado por Risson (2017) ao verificar que esse número de golpes é suficiente para manter as propriedades em estado fresco (consistência e massa

específica) do CoPe como especificado na ABNT NBR 16416 (2015) (1800-2000 kg/m<sup>3</sup>).

**Figura 21 - Mistura e moldagem do CoPe**



Fonte: O próprio autor

Após 24 horas da moldagem, os CP's foram desmoldados, levados para a câmara úmida e mantidos em imersão em água até a idade de ensaio (Figura 21d), tendo em vista assegurar o processo correto de cura e hidratação do cimento.

### 3.1.2 Sedimentos

Para induzir a colmatção, em laboratório e em campo, no CoPe, foram escolhidos três tipos de sedimentos que são os mais encontrados nos vazios internos deste tipo de material ao longo da sua vida útil (item 2.5.2 revisão) sendo estes: areia, argila e uma combinação dos dois em iguais proporções (50/50) (Welker *et al.*, 2013).

Na Figura 22 são ilustradas as curvas granulométricas dos sedimentos utilizados nas cinco Campanhas Experimentais realizadas.



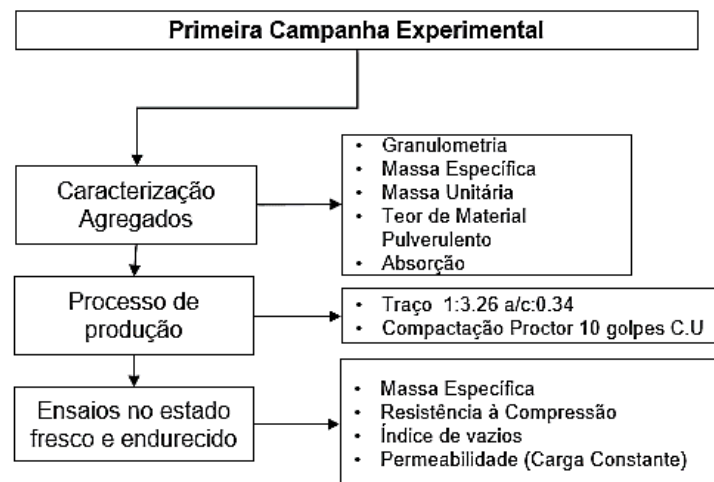
O valor máximo referente a massa de sedimento acumulada (MSA) a ser utilizado nas campanhas experimentais, foi fixo em  $1,27 \text{ g/cm}^2$  baseado no trabalho de Mata & Leming (2012). Dito valor define que uma massa de 100 g de sedimento sobre uma superfície de um corpo de prova cilíndrico de 10 cm de diâmetro ( $100 \text{ g}/78,54 \text{ cm}^2=1,27 \text{ g/cm}^2$ ) representa 20 anos de serviço do CoPe em condições normais no local do estudo (precipitação de chuvas e erosão do solo).

Cabe destacar que, ao se trabalhar com a MSA torna-se possível manter a massa de sedimento em função da área superficial do CP testado, e também facilita a análise com outros trabalhos, que na revisão bibliográfica tem seus resultados expressados em função da MSA.

### 3.2 PRIMEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL

O objetivo desta campanha foi caracterizar o comportamento mecânico e hidráulico do CoPe, mediante os ensaios de massa específica, resistência à compressão simples, índice de vazios e permeabilidade a carga constante. Na Figura 23 está apresentado o objetivo, os ensaios e resultados coletados na primeira Campanha Experimental.

**Figura 23 - Descrição da Primeira Campanha Experimental**



\*C.U= Camada única

Fonte: O próprio autor

### 3.2.1 Planejamento experimental

Com o intuito de caracterizar o CoPe no estado fresco (massa específica) e no estado endurecido (comportamento mecânico e hidráulico), foram realizados 4 ensaios, como exposto na Tabela 4.

**Tabela 4 - Planejamento Experimental da Primeira Campanha**

Tipo de Ensaio	Ensaio	Dimensão Corpo de Prova (mm)	Amostras por idade		
			7 dias	14 dias	28 dias
Estado fresco	Massa Específica (ABNT NBR 9833/2009)	100 X 200	7	7	7
Estado endurecido	Resistência à compressão (ABNT NBR 5739/1994)				
	Índice de vazios (ASTM C1754)				
	Permeabilidade a Carga Constante (Sandoval, 2014)				

**Fonte:** O próprio autor

Para a realização dos ensaios apresentados na Tabela 4 foram utilizados 21 CP's. Primeiramente, foi executado o ensaio de massa específica do concreto em estado fresco, posteriormente os ensaios hidráulicos e finalmente, o ensaio de resistência à compressão, visando facilitar a correlação de resultados.

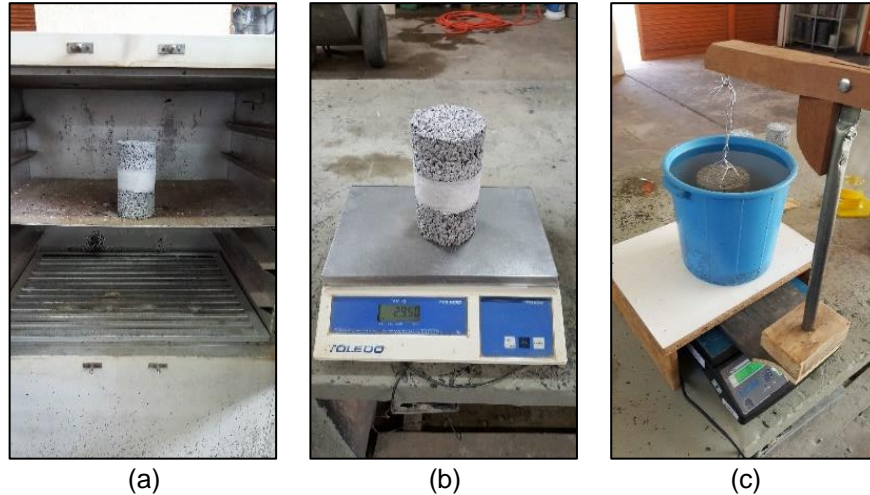
Os ensaios de massa específica e resistência à compressão foram realizados na íntegra, segundo as normativas de referência (Tabela 4).

#### 3.2.1.1 Ensaio hidráulicos

Para caracterizar o comportamento hidráulico do material foram realizados os ensaios de: índice de vazios e permeabilidade a carga constante.

O ensaio de índice de vazios foi executado de acordo com a norma ASTM C1754, que considera a relação da massa seca do corpo de prova e a massa submersa do mesmo, conforme o procedimento apresentado na Figura 24.

**Figura 24 - Ensaio de índice de vazios ASTM C1754**

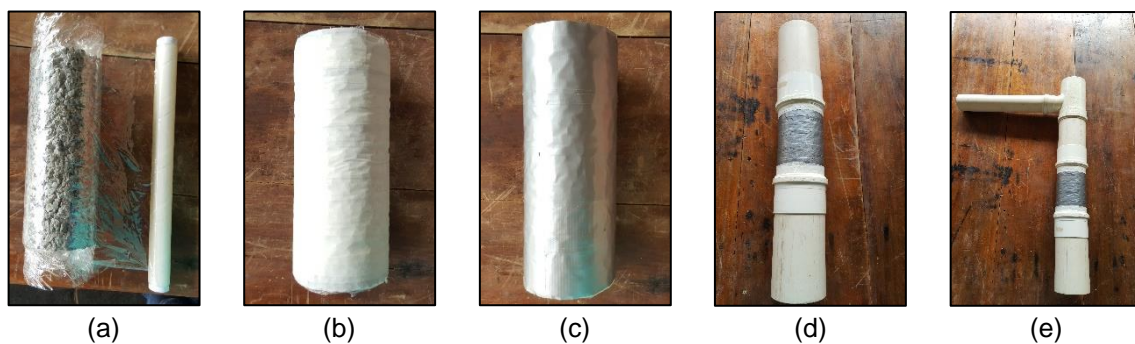


Fonte: O próprio autor

Como apresentado na Figura 24a, primeiramente os corpos de prova foram secos em estufa por 24 horas até a massa constante e pesados (Figura 24b) e, finalmente, submersos em água até não ocorrer variação na sua massa (Figura 24c). O índice de vazios é calculado mediante a Equação 2 (item 2.4.1 da revisão).

Após a realização do ensaio de índice de vazios, foi realizado o ensaio de permeabilidade a carga constante, como mostrado na Figura 25.

**Figura 25 - Montagem do ensaio de permeabilidade a carga constante**



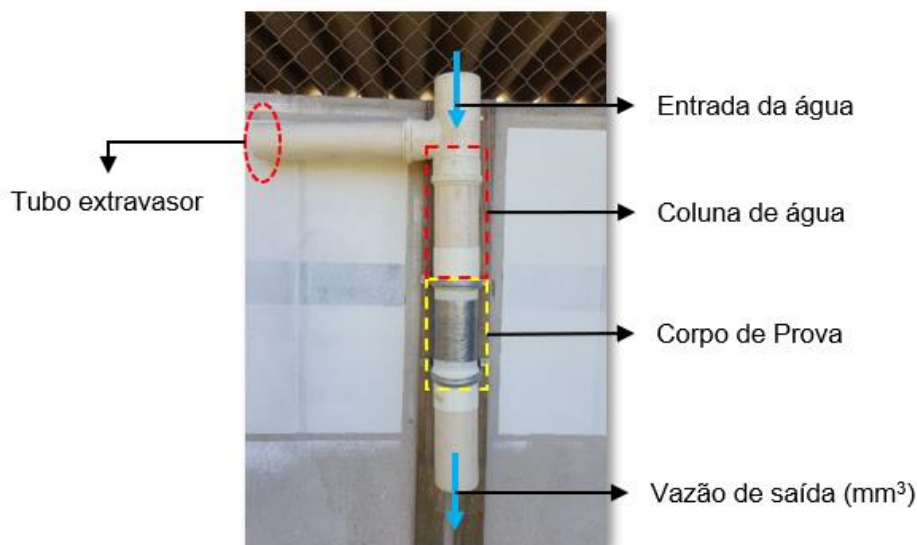
Fonte: O próprio autor

A sequência de montagem do ensaio de permeabilidade a carga constante (Figura 25) seguiu o recomendado por Sandoval *et al.* (2017), sendo a única variação do ensaio o uso de vaselina entre as luvas de PVC (perímetro interno) e no perímetro externo dos corpos de prova (por cima da fita silvertape)

para evitar vazamento da água durante a execução do ensaio e facilitar sua desmontagem.

Após a montagem do permeâmetro de carga constante, procedeu-se a realização do ensaio, como ilustrado na Figura 26.

**Figura 26 - Ensaio de permeabilidade a carga constante**



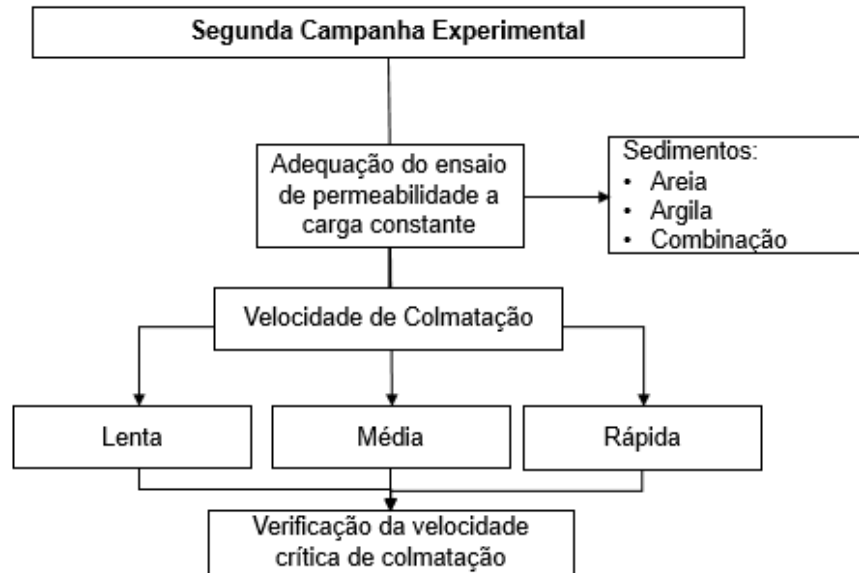
**Fonte:** O próprio autor

Na Figura 26 pode ser observada a entrada da água na parte superior do permeâmetro, o tubo extravasador, a coluna de água que, no caso deste ensaio, foi fixada em 230 mm acima do corpo de prova e, finalmente, a saída da água na parte inferior do permeâmetro. Para o cálculo do coeficiente de permeabilidade a carga constante foi utilizada a Equação 3 (item 2.4.2 da revisão), derivada da Lei de Darcy. A permeabilidade de cada CP foi calculada com a média de 4 medições.

### 3.3 SEGUNDA CAMPANHA EXPERIMENTAL

O objetivo da Segunda Campanha Experimental foi adaptar um ensaio em condições controladas de laboratório que permitisse simular o fenômeno da colmatção no CoPe e avaliar a perda de permeabilidade do mesmo. A campanha seguiu o fluxograma apresentado na Figura 27.

**Figura 27 - Fluxograma da Segunda Campanha Experimental**



**Fonte:** O próprio autor

Como apresentado na Figura 27 foram avaliadas 3 velocidades de colmatação diferentes, a velocidade lenta que simulava um processo gradativo de colmatação do material, a velocidade média que simulava a chegada de maiores quantidades de sedimento, e a velocidade rápida que simulava praticamente o entupimento total dos vazios de forma instantânea.

### 3.3.1 Ensaio de Colmatação em Laboratório

Com o objetivo de simular o processo de colmatação foi necessário padronizar um procedimento de ensaio que levasse em consideração os seguintes itens:

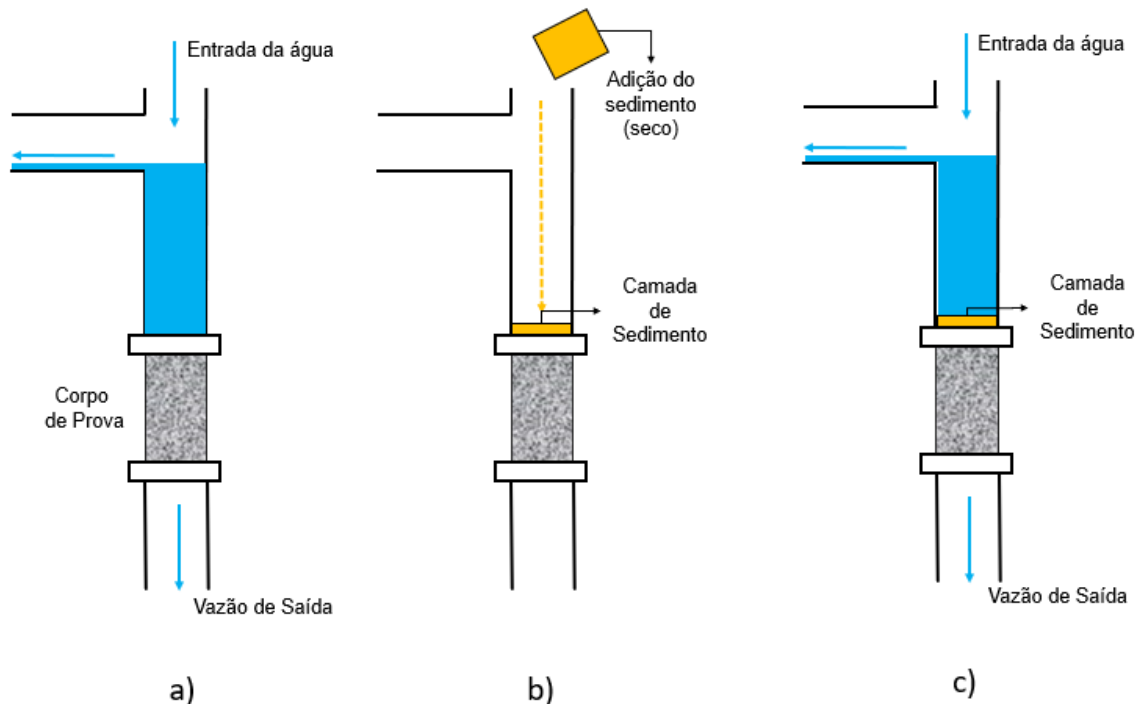
- Prático e fácil de executar;
- Capaz de reproduzir uma colmatação imediata e gradativa;
- Capaz de medir a variação do coeficiente de permeabilidade em função da massa de sedimento acumulada;
- Facilmente reproduzido.

Portanto, foi escolhido o ensaio de permeabilidade a carga constante, utilizado na Primeira Campanha Experimental, implementando a adição

de sedimentos (em seco). Com esse ensaio pode ser determinada a variação da permeabilidade em função do tipo e quantidade de sedimento adicionado.

Para a execução desse ensaio, primeiro foi realizado o teste de permeabilidade sem colmatar (no CP) para a determinação da permeabilidade inicial do CoPe ( $k_0$  ou 100%), sendo que adaptações foram necessárias em virtude da incorporação de sedimentos. O novo procedimento de ensaio com as devidas adequações está ilustrado na Figura 28.

**Figura 28 – Ensaio de colmatação em laboratório: a) Verificação da permeabilidade inicial do CoPe, b) Adição do sedimento em seco, c) Verificação da permeabilidade do CoPe colmatado**



**Fonte:** O próprio autor

Como ilustrado na Figura 28 primeiramente foi verificada a permeabilidade inicial do CoPe sem colmatar, em seguida foi adicionado o sedimento (em seco) e finalmente verificada a permeabilidade do material colmatado. Para a simulação das três velocidades de colmatação o ensaio foi dividido em três fases, a primeira, em que o sedimento foi fracionado em 1/10 da massa total, correspondendo a uma velocidade de colmatação lenta. A segunda em

1/5 relativo a uma velocidade média e finalmente, a 1/2 referindo-se a uma velocidade alta. Lembrando que, a MSA corresponde a 1,27 g/cm<sup>2</sup> de uma massa total de sedimento de 100 g. Para todas as fases, ou seja, após a adição de cada fração de sedimento, sempre foi verificado o coeficiente de permeabilidade, conforme a Figura 28. Além disso, na execução do ensaio de permeabilidade fixou-se um tempo inicial de 3 minutos para a estabilização da mistura (água e sedimento) de forma a minimizar a dispersão dos resultados.

### 3.3.2 Planejamento Experimental

Com o intuito de avaliar o fenômeno da colmatção em corpos de prova cilíndricos (100mmx200mm) em laboratório, foram realizados os ensaios apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5 - Planejamento Experimental da Segunda Campanha**

Sedimento	Velocidade de colmatção	MSA adicionada durante o ensaio (g/cm <sup>2</sup> )											Total de amostras por ensaio
		0	0,127	0,254	0,381	0,508	0,635	0,762	0,889	1,016	1,143	1,27	
Areia	Lenta	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	3
Argila		X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	3
Combinação		X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	3
Areia	Média	X		x		x		x		x		x	3
Argila		X		x		x		x		x		x	3
Combinação		X		x		x		x		x		x	3
Areia	Alta	X					x					x	3
Argila		X					x					x	3
Combinação		X					x					x	3

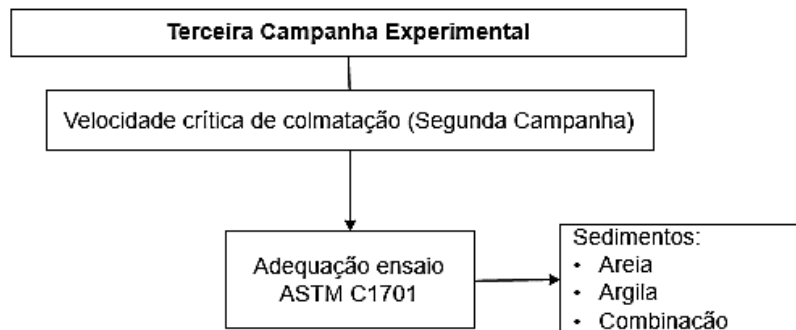
Fonte: O próprio autor

Para a realização dos ensaios apresentados na Tabela 5 foram utilizados 27 CP's. A determinação do coeficiente de permeabilidade foi determinada com a média de 4 medições, cada teste completo demorou aproximadamente 3 horas por corpo de prova testado.

### 3.4 TERCEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL

O objetivo desta campanha foi avaliar a colmatção de um sistema de pavimento permeável e correlacionar os resultados com os obtidos em laboratório (Segunda Campanha Experimental). As atividades realizadas durante essa campanha são apresentadas no fluxograma da Figura 29.

**Figura 29 – Fluxograma da Terceira Campanha Experimental**



**Fonte:** O próprio autor

Para isso, foi construído um sistema de pavimento permeável com infiltração total como definido na ABNT NBR 16416 (2015) (Campo Experimental 1) no Campus Universitário da UEL. Esse sistema tem uma base granular (brita 2) de 30cm de altura, e uma camada de CoPe de 10cm, tal como apresentado na Figura 30.

**Figura 30 - Perfil do Campo Experimental 1**



**Fonte:** O próprio autor

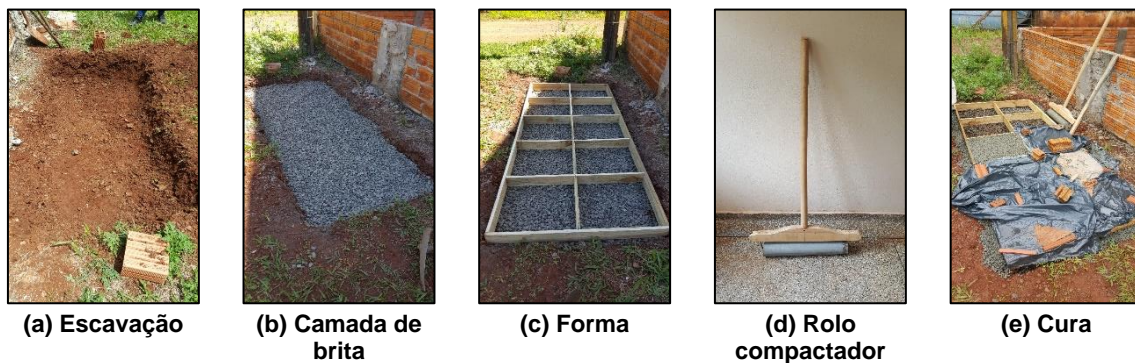
### 3.4.1 Construção do Campo Experimental 1 (CE1)

A construção do campo experimental 1 (CE1) foi realizada ao lado do laboratório de materiais de construção da UEL e seguiu os seguintes passos:

- Escavação;
- Instalação e compactação da base granular (brita 2);
- Posicionamento da forma;
- Mistura e moldagem das placas;
- Cura das placas.

A escavação realizada foi de 2,5 m por 1 m com uma profundidade de 0,4m, conforme a Figura 31a.

**Figura 31 - Processo de construção CE1**

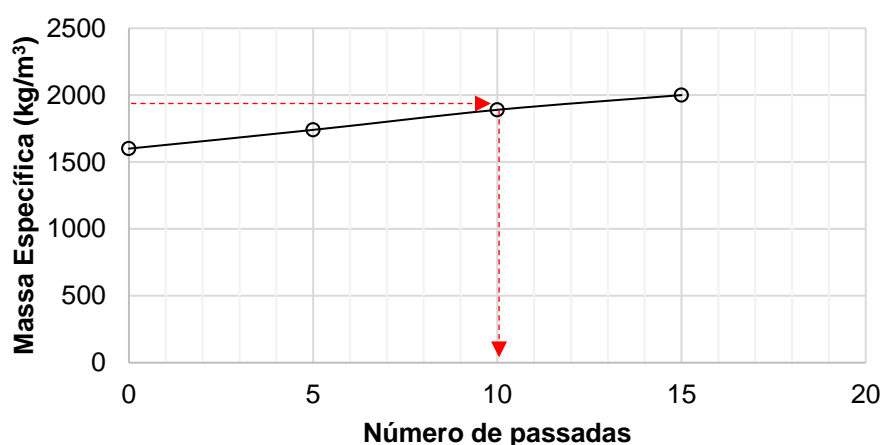


Fonte: O próprio autor

Em seguida, foi executada a base granular com brita 25 mm e nivelada (Figura 31b). Após o nivelamento da camada de brita, foi posicionada a forma para a confecção das placas do CoPe (Figura 31c). Após moldadas, as placas foram compactadas com rolo (Figura 31d), confeccionado na UEL, que consiste de um tubo metálico de 10 cm de diâmetro e 60 cm de comprimento com o interior preenchido de concreto (Figura 31d) e um peso total de 13,2 kg. Logo após a moldagem e compactação, as placas foram cobertas com plástico preto na superfície para evitar a evaporação da água, e ajudar no processo de cura por molhagem que foi de 14 dias (Figura 31e).

O número de passadas do rolo compactador (13,2 kg) foi determinado mediante um teste realizado em laboratório (placa de prova), visando obter uma massa específica previamente determinada (Primeira Campanha Experimental). Assim, foi moldada uma placa de prova (45cmx45cmx10cm) e compactada com 5, 10 e 15 passadas, determinando a massa específica em fresco para cada número de passadas. Os resultados obtidos nesse teste são apresentados na Figura 32.

**Figura 32 - Teste do procedimento de compactação**



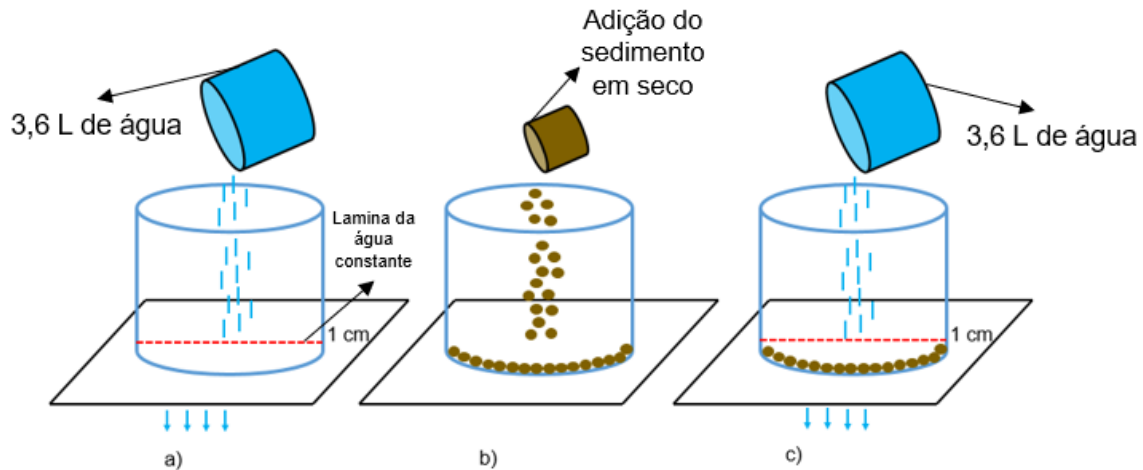
**Fonte:** O próprio autor

Como ilustrado na Figura 32, o número de passadas necessário para alcançar aproximadamente a mesma massa específica encontrada em laboratório (1890 kg/m<sup>3</sup>) foi de 10.

Após a construção do campo experimental e passado o seu tempo de cura por molhagem (14 dias), procedeu-se a adequação do ensaio ASTM C1701 com o intuito de simular o processo de colmatação em campo. Para isso, a MSA utilizada em laboratório de 1,27 g/cm<sup>2</sup> foi também levada para o ensaio em campo.

O ensaio ASTM C1701 utiliza um tubo de PVC de 30 cm de diâmetro, portanto para manter a mesma MSA (1,27 g/cm<sup>2</sup>) foram utilizadas 900 g de material. Para simular a velocidade de colmatação crítica determinada na Segunda Campanha Experimental foi realizado um procedimento análogo ao laboratório, como mostrado na Figura 33.

**Figura 33 - Processo do ensaio de colmatção em campo: a) Verificação da permeabilidade inicial, b) Adição do sedimento em seco e c) Verificação da permeabilidade do CoPe colmatado**



**Fonte:** O próprio autor

De forma análoga à Segunda Campanha Experimental, a adequação do ensaio ASTM C1701 foi dividida em duas etapas. A primeira foi a verificação do coeficiente de permeabilidade inicial (sem colmatar), calculando o tempo necessário para infiltrar um volume de 3,6 L de água (como especificado na ASTM C1701), mantendo uma lâmina constante de 1 cm (Figura 33a), para manter a lâmina da água constante foi feita uma marca no perímetro interno do tubo de PVC, e assim ter um controle visual durante a execução do teste. Na segunda etapa, o sedimento (em seco) foi adicionado na velocidade crítica de colmatção (Figura 33b), e em seguida, foi verificado o coeficiente de permeabilidade colmatado do material com a ajuda do teste ASTM C1701. Esse procedimento foi repetido até completar a adição da massa de sedimento acumulada ( $1,27 \text{ g/cm}^2$ ) ou até atingir a permeabilidade mínima de norma (1 mm/s).

### 3.4.2 Planejamento Experimental

Com o intuito de avaliar o fenômeno da colmatção no campo experimental 1 foi seguido o planejamento experimental apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Planejamento Experimental da Terceira Campanha

Sedimento	Velocidade de colmatção	MSA Adicionada durante o ensaio (gcm <sup>2</sup> )											Total de amostras por ensaio
		0*	0,127	0,254	0,381	0,508	0,635	0,762	0,889	1,016	1,143	1,27	
Areia	Crítica (Segunda Campanha Experimental)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	3
Argila		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	3
Combinação		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	3

**0\* permeabilidade inicial sem colmatar**

Fonte: O próprio autor

Para a execução dos ensaios apresentados na Tabela 6 foram utilizadas 9 placas de CoPe (Campo Experimental 1). O coeficiente de permeabilidade foi determinado com a média de 4 medições, cada teste completo demorou aproximadamente 3 horas por placa testada.

### 3.4.3 Modelo analítico

Na intenção de estabelecer um modelo de previsão da colmatção no CoPe foi desenvolvido um modelo analítico que leva em consideração os resultados experimentais da Segunda e Terceira Campanha Experimental (perda de permeabilidade vs quantidade de sedimento MSA). Esta análise utilizou o como ferramenta o software IBM SPSS, para determinar as variáveis das regressões não lineares aplicadas durante a análise de resultados.

Este modelo considerou as seguintes variáveis:

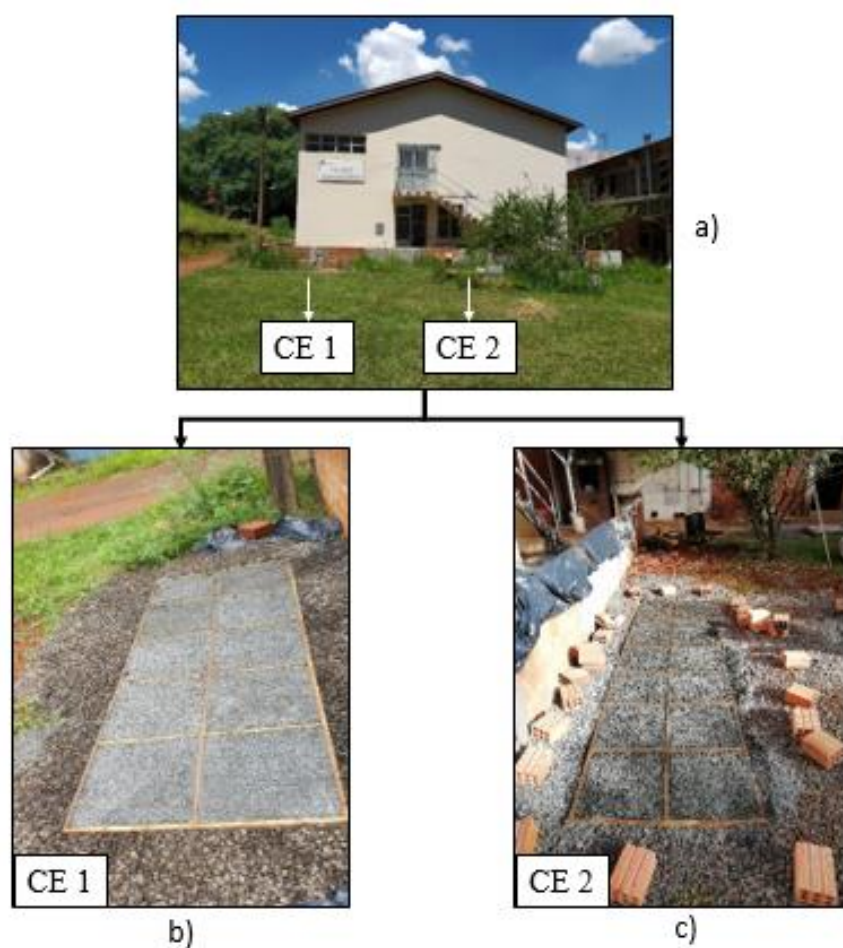
- Permeabilidade inicial;
- MSA (g/cm<sup>2</sup>);
- Perda de permeabilidade em função da MSA.

Também foi realizado um contraste com resultados encontrados na literatura aplicando o modelo desenvolvido na intenção de validar a sua efetividade em termos de previsão da perda da permeabilidade.

### 3.5 QUARTA E QUINTA CAMPANHAS EXPERIMENTAIS

Para determinar o procedimento de limpeza (recuperação de permeabilidade) foi utilizado o Campo Experimental 1 (CE1), e para determinar a periodicidade de limpeza foi construído o Campo Experimental 2 (CE2), ambos localizados no campus da UEL, em frente ao laboratório de aglomerantes, como exibido na Figura 34.

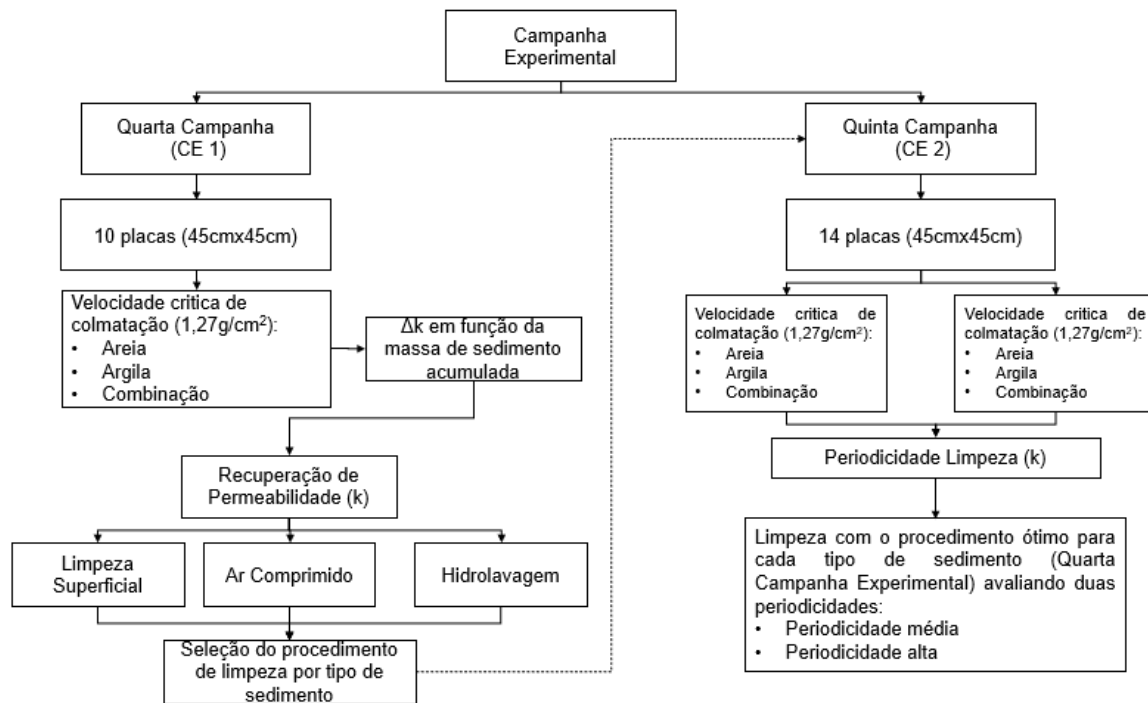
**Figura 34 - Localização dos campos experimentais: a) localização geral, b) CE1, c) CE2**



**Fonte:** O próprio autor

Para cumprir com o objetivo de determinar o melhor procedimento de limpeza por sedimento e estabelecer a periodicidade de manutenção, foi executado o planejamento experimental da Figura 35.

**Figura 35 - Planejamento Experimental da Recuperação de Permeabilidade**



**Fonte:** O próprio autor

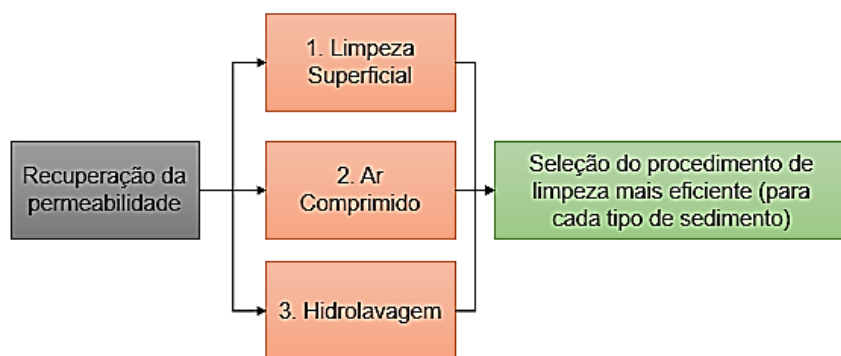
Como apresentado na Figura 35, a recuperação da permeabilidade foi avaliada na Quarta e Quinta Campanha Experimental. A Quarta Campanha tem o intuito de determinar o melhor método de limpeza para cada tipo de sedimento, e a Quinta Campanha com o objetivo de determinar a periodicidade de manutenção baseada em cada condição de colmatação.

### 3.5.1 Seleção do Procedimento de Limpeza (Quarta Campanha Experimental)

Após a Segunda Campanha Experimental onde foi encontrada a velocidade crítica de colmatação e aplicada na Terceira Campanha (CE 1), as placas foram deixadas ao intemperismo durante 5 meses (dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril). Após esse período, foi realizado o ensaio ASTM C1701 para a verificação da permeabilidade.

Posterior à verificação da permeabilidade, foram implementados três procedimentos de limpeza no CoPe, como visto na Figura 36.

**Figura 36 - Procedimentos de limpeza no campo experimental 1 (CE 1)**



**Fonte:** O próprio autor

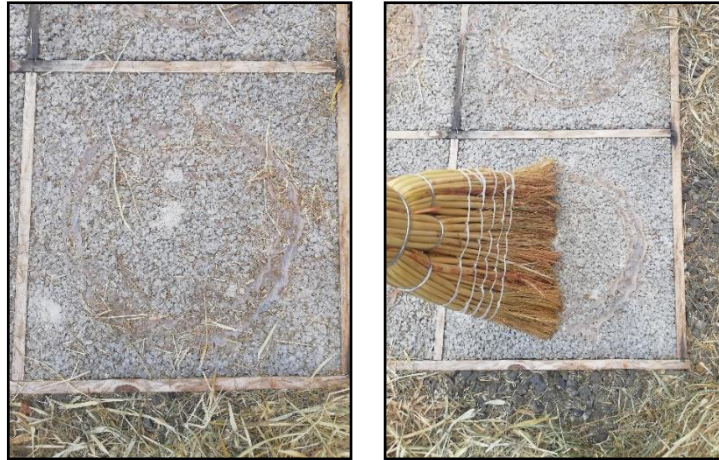
Como apresentado na Figura 36, foram escolhidos os três procedimentos de limpeza. No procedimento 1, foi realizada a limpeza superficial com vassoura para retirar a acumulação de material orgânico e sedimentos do CoPe, e em seguida verificada a permeabilidade com o ensaio ASTM C1701. No procedimento 2, foi implementada a limpeza com ar comprimido (compressor de ar) para facilitar a saída de poeira e sedimento dos vazios do CoPe e depois foi verificada a permeabilidade (ASTM C1701). Finalmente, no procedimento 3, foi realizada a hidrolavagem (lavagem com água a pressão) para desobstruir os vazios, e seguidamente foi verificada a permeabilidade do material. No total foi testada uma placa por procedimento de limpeza por sedimento utilizado.

Após a realização dos 3 procedimentos, foi verificado qual deles obteve a maior recuperação de permeabilidade, para assim ser selecionado para a seguinte campanha. Para realizar essa comparação teve-se como referência sempre a permeabilidade inicial das placas, sendo sempre 100%, e a permeabilidade medida após a limpeza também foi uma relação percentual respeito da inicial.

### 3.5.1.1 *Limpeza superficial*

A limpeza superficial foi executada com vassoura, como exibido na Figura 37, pela facilidade e simplicidade de execução.

**Figura 37 - Limpeza superficial**



**a) antes**

**b) depois**

**Fonte:** O próprio autor

Como exposto na Figura 37 as placas foram limpas passando a vassoura na superfície da forma mais homogeneia possível por aproximadamente 3 minutos por placa, porém foi visto durante a limpeza que grãos de sedimento ficavam retidos nos poros superficiais, não sendo retirados mediante esse método.

### 3.5.1.2 *Limpeza com ar*

Para a limpeza com ar foi utilizado um compressor de 120 libras de potência, para desobstruir os vazios internos pela acumulação de partículas. A Figura 38a mostra o compressor utilizado e a limpeza das placas.

**Figura 38 - Limpeza com ar**



**a) Compressor utilizado**



**b) Limpeza das placas**

**Fonte:** o próprio autor

A limpeza foi realizada de forma uniforme na superfície e nos vazios da placa (diretamente na superfície) com o objetivo de desobstruí-los (Figura 38b), limpando as placas por aproximadamente 3 minutos por placa. No momento da realização da limpeza, tornou-se clara a expulsão dos grãos de sedimento acumulados.

### 3.5.1.3 *Limpeza com água (hidrolavagem)*

O último procedimento de limpeza usado foi a água à pressão (hidro lavagem), indicada como uma alternativa na manutenção do CoPe (ACI 522-R10, 2010). Para isso, foi utilizada uma máquina de hidro jateamento de água (Figura 39a) de 1037 psi de potência.

**Figura 39 - Limpeza com água**



**a) Equipamento de hidro lavagem**



**b) Jato de água na placa**

**Fonte:** o próprio autor

Como apresentado na Figura 39b, o jato de água foi aplicado na superfície do material de forma uniforme a uma distância de aproximadamente 15 cm e por um tempo aproximado de 3 minutos por placa. Durante a aplicação, observou-se a evidente saída de sedimento das placas e a limpeza superficial dos vazios.

Após da aplicação dos 3 procedimentos de limpeza, foi medida a permeabilidade, mediante o ensaio ASTM C1701, para assim verificar qual foi mais eficiente em termos de recuperação de permeabilidade, para cada tipo de

sedimento, comparando a permeabilidade medida com a permeabilidade inicial sem colmatar do material (100%)

### 3.5.2 Periodicidade de limpeza (Quinta Campanha Experimental)

Assim que os procedimentos de recuperação de permeabilidade foram determinados (dependendo do tipo de sedimento), realizou-se a Quinta Campanha Experimental com o intuito de determinar a periodicidade da manutenção. Para isso, foi construído o CE2 (Figura 40), que consistia em um sistema de pavimento permeável de infiltração total (conforme ANBT NBR 16416 (2015)) com 14 placas, mantendo o traço, o procedimento de compactação e cura utilizado no CE1.

**Figura 40 - Construção do segundo campo experimental (CE2)**



**a) Localização da forma**



**b) Camada de base**



**c) Finalização do CE 2**

**Fonte:** o próprio autor

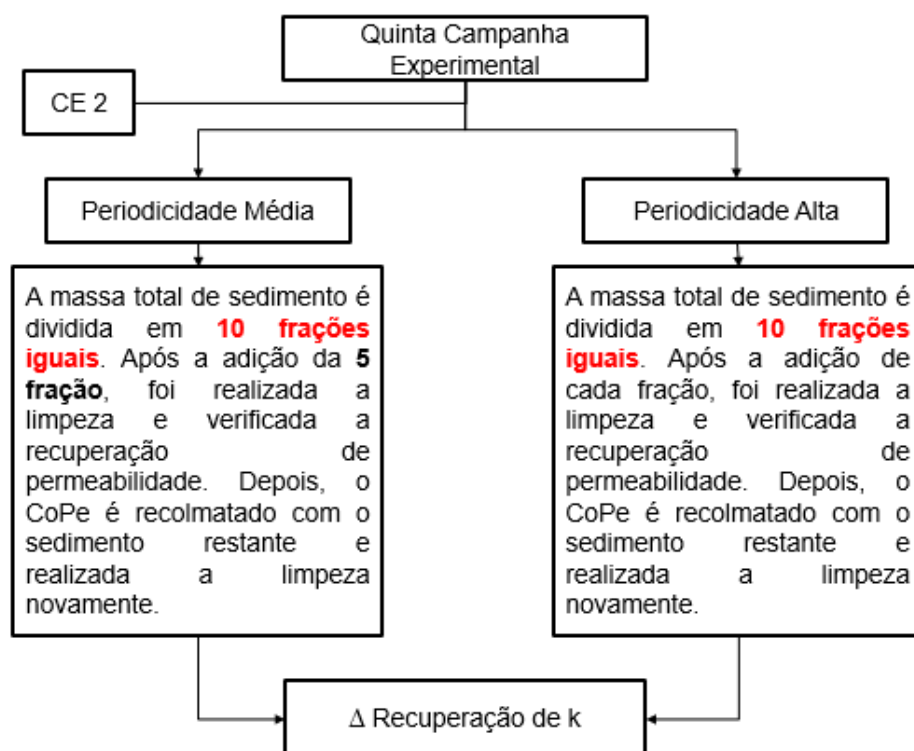
De forma inicial, foi realizada uma escavação de 3,5mx1,2m e 0,4m de profundidade (Figura 40a). Posteriormente, foi posicionada uma camada de brita de diâmetro de 25 mm com uma espessura de 0,3 m. Finalmente, foi posicionada a forma e realizada a concretagem das placas de 0,10 m de espessura.

Assim que o processo de cura foi concluído (14 dias), as placas foram testadas com o ensaio ASTM C1701 para determinar a sua permeabilidade inicial sem colmatar (100%). Em seguida, foram iniciados os ensaios relacionados à periodicidade de manutenção, tendo fixas as seguintes condições:

- Velocidade de crítica de colmatação (determinada na Segunda Campanha Experimental);
- Procedimentos de limpeza por sedimento (determinados na Quarta Campanha Experimental).

Foram testadas duas placas por sedimento, e avaliadas duas periodicidades de limpeza, sendo uma periodicidade média e outra periodicidade alta de manutenção como ilustrado na Figura 41, lembrando que indiretamente na Quarta Campanha Experimental foi avaliada a periodicidade baixa que considerava a limpeza do CoPe após a adição do total da MSA (1,27 g/cm<sup>2</sup>).

**Figura 41 - Fluxograma da Quinta Campanha Experimental**



**Fonte:** o próprio autor

Na periodicidade média o sedimento foi dividido em 10 frações iguais (velocidade crítica de colmatação), sendo verificada a perda de permeabilidade com o ensaio ASTM C1701 após a adição de cada fração, e só após

da adição de 5/10 (5 frações) do sedimento foi implementada a limpeza e verificada a recuperação da permeabilidade do material. Assim que realizada esta verificação foi repetido o procedimento com o sedimento restante (5 frações), executada a limpeza e novamente verificada a recuperação de permeabilidade do material.

No caso da periodicidade alta o sedimento foi dividido em 10 frações e após a adição de cada fração (1/10) foi verificada a perda de permeabilidade, e seguidamente implementada a limpeza do material e corroborada a recuperação da permeabilidade como ilustrado na Figura 41.

Resumindo a verificação da periodicidade de limpeza, seguiu os seguintes passos:

- Medição do coeficiente de permeabilidade inicial sem colmatar (4 medições);
- Adição da fração de sedimento (em seco);
- Verificação do coeficiente de permeabilidade colmatado após a adição de cada fração de sedimento (4 medições);
- Limpeza da placa (procedimento de limpeza por sedimento);
- Verificação da recuperação de permeabilidade após a limpeza (4 medições).

O tempo total do ensaio por placa foi de 1 dia. O intuito de realizar essas verificações de recuperação de permeabilidade no CoPe é a construção de um ábaco que permita identificar graficamente o processo de perda de permeabilidade em função do sedimento.

### 3.5.3 Modelo de Recuperação de Permeabilidade

Na intenção de verificar o comportamento da recuperação da permeabilidade no CoPe foi utilizado o modelo desenvolvido no final da Terceira Campanha Experimental (modelo analítico). Esta análise utilizou como ferramenta o software IBM SPSS, para determinar as variáveis das regressões não lineares aplicadas durante a análise de resultados.

Esse modelo teve como parâmetros fixos:

- Permeabilidade inicial;
- Permeabilidade após a adição de cada fração de sedimento;
- Recuperação da permeabilidade.

#### 3.5.4 Microtomografia 3D

Para contrastar os resultados de recuperação de permeabilidade foi realizada uma análise por microtomografia-3D com a intenção de determinar a distribuição espacial do sedimento no interior dos vazios interconectados e facilitar a interpretação dos resultados.

Para esta análise foram moldados corpos de prova cilíndricos de 50x100mm (3 CP's por sedimento), o teste foi dividido em duas fases, na fase 1 foram testados os corpos de prova sem colmatar, e na fase 2 o teste foi realizado no material colmatado, para isto os corpos de prova foram colmatados seguindo o passo a passo da Segunda Campanha Experimental (velocidade crítica de colmatação). As dimensões dos CP's estavam limitadas ao tamanho máximo de amostra possível a utilizar no microtomógrafo da UEL

Para isto foi utilizado o microtomógrafo marca Bruker Modelo: SKYSCAN 1173 (Figura 42), o qual permite a produção de imagens bidimensionais (2D) de seções internas de um material, formadas pelas diferentes quantidades de radiação absorvida pelas partes do material. Na microtomografia emprega-se um fino feixe de raios X (foco <5  $\mu\text{m}$ ) e um sistema de detecção e alta resolução, que pode revelar detalhes morfológicos e estruturais internos do material, em escala submicrométrica. Imagens tridimensionais (3D) podem ser obtidas pelo processamento das imagens 2D (renderização).

**Figura 42 – Microtomógrafo Utilizado**



**Fonte:** O próprio Autor

Os corpos de prova foram colmatados com os três tipos de sedimento utilizados (argila, areia, combinação) mantendo uma massa de sedimento acumulada de  $1,27 \text{ g/cm}^2$ .

Foram feitos 3 corpos de prova para o sedimento de argila, 3 para o sedimento de areia, e 3 para a combinação de sedimentos. Para a análise no microtomografo foram analisados os corpos de prova antes de colmatar, e após o processo de colmatação, isto para realizar um contraste entre o antes e depois de cada sedimento.

### 3.5.5 Avaliação das Condições do Local de Utilização do CoPe (erosão)

Para correlacionar a MSA utilizada durante as cinco campanhas experimentais com o tempos de funcionamento do CoPe, foi utilizada a Equação Universal de Erosão do Solo USLE (Equação 9), para verificar a produção de sedimento em função do regime de chuvas, as características topográficas e o tipo de solo da região onde foi desenvolvida esta tese.

O uso da USLE (Equação 9) considerou duas condições de declividade diferentes a primeira uma declividade baixa de (1%) e a segunda a declividade do local (localização campos experimentais), para determinar o pior cenário de produção de sedimentos.

Calculada a erosão do solo por ano, foi feita uma correlação (regra de três simples) com a MSA utilizada ( $1,27 \text{ g/cm}^2$ ) para verificar a quantidade de solo (sedimento) que é produzido no local por ano e verificar assim a vida útil do CoPe para cada tipo de sedimento utilizado (areia, argila, combinação).

### 3.5.6 Modelo de Vida Útil

Com os Resultados das Cinco Campanhas Experimentais e a ajuda da revisão bibliográfica (Kazmierczak et al., 2016; Possan e Demoliner, 2013) (item vida útil) foi proposto um modelo de vida útil hidráulica que servirá como guia aos projetistas de CoPe, visando que esta ferramenta (arvore de decisão) auxilie na tomada de decisão em relação ao desempenho hidráulico requerido do material ao longo do tempo. O modelo proposto considera as seguintes variáveis:

- Desempenho hidráulico requerido (permeabilidade inicial tendo como parâmetro de referência a permeabilidade mínima de norma);
- Perda de permeabilidade do CoPe em função das características de local onde será utilizado o material (USLE),
- Fenômeno da colmatação do CoPe (baseado em uma comprovação experimental ou uso do modelo analítico da Equação 36, seção 4.4 item resultados e análise)
- Periodicidade de manutenção (Determinada pelo projetista);
- Dosagem do CoPe (em função do desempenho hidráulico requerido).

Após a aplicação do modelo o projetista terá pelo menos 3 alternativas que permitiram executar o projeto do CoPe segundo as necessidades técnicas e viabilidade econômica.

Finalmente foi feito um exemplo de aplicação do modelo proposto considerando as seguintes condições de contorno:

- Local de construção do CoPe: Londrina, Paraná, Brasil;
- Histórico de chuvas do local de no mínimo um ano (2018);

- Com o regime de chuvas calcular o fator **R** de erosividade do solo com o uso da Equação 16 da revisão bibliográfica;
- Determinação do fator **K**, em função do tipo de solo do local e auxílio do Quadro 9 da revisão bibliográfica;
- Condições topográficas do local (declividade, e distância entre o ponto mais alto e o CoPe) para assim determinar o fator **LS** com o uso do quadro 10 da revisão;
- Determinação do fator **CP** com o auxílio do quadro 11 da revisão bibliográfica;
- Uso da USLE para determinar a erosão dos sedimentos por ano (MSA);
- Utilizar o modelo analítico de manutenção (Equação 36, seção 4.4 item resultados e análise) para determinar a vida útil do CoPe, segundo a MSA ( $n$ );
- Escolher a periodicidade de manutenção;
- Escolher o traço (eficiência hidráulica);
- Verificação do desempenho mecânico e hidráulico do material.

### 3.5.7 Sugestão de parâmetros de manutenção para pavimentos existentes

Com a intenção de sugerir alguns parâmetros que auxiliem as obras existentes de CoPe para verificação do seu desempenho hidráulico e determinação da periodicidade de limpeza, foi sugerida a criação do índice de condição hidráulica (ICH) o qual considera os índices de condição de pavimento (ICP) estudados na revisão de literatura e os dados experimentais obtidos durante as Cinco Campanhas Experimentais.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo são apresentados os resultados e análise provenientes das campanhas experimentais desenvolvidas ao longo desta tese. De forma inicial, são mostrados os resultados da Primeira Campanha Experimental com o objetivo de caracterizar mecânica e hidráulicamente o CoPe. A continuação, os resultados da Segunda Campanha são apresentados com o propósito da avaliação do processo de colmatação, no CoPe, em condições de laboratório e, em seguida, a Terceira Campanha com a finalidade de avaliar o processo de colmatação em campo. Finalmente são apresentados os resultados da Quarta e Quinta Campanha Experimental relacionados a recuperação da permeabilidade e periodicidade de limpeza.

### 4.1 PRIMEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Para as propriedades mecânicas e hidráulicas foram analisadas a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação de cada propriedade avaliada.

#### 4.1.1 Propriedades no Estado Fresco e no Estado Endurecido

Inicialmente, foram avaliadas a massa específica em estado fresco e em estado endurecido do material. A verificação destas propriedades tem como fim a verificação do cumprimento das normas ACI 522R-10 e ABNT NBR 16416 (2015). Na Tabela 7 são apresentados os resultados das massas específicas em fresco e em endurecido para  $n=21$ .

**Tabela 7 - Resultados da massa específica em fresco e em endurecido**

CoPe	Massa Específica Estado Fresco (kg/m <sup>3</sup> )	Massa Específica Estado Endurecido (kg/m <sup>3</sup> )
Média (kg/m <sup>3</sup> )	1910,3	1898,4
Sd (kg/m <sup>3</sup> )	34,1	35,8
CV (%)	1,8	1,9

Fonte: O próprio autor

Os valores expostos na Tabela 7 são condizentes com os encontrados na literatura para concretos permeáveis com agregados convencionais (ACI 522-R10, 2010; Ćosić *et al.*, 2015; Gaedicke *et al.*, 2016; Kevern, Schaefer e Wang, 2009). Salieta-se que o coeficiente de variação é baixo devido à pouca variabilidade obtida nos corpos de prova, consequência do procedimento de compactação utilizado, que foi realizado por uma única pessoa.

Em termos mecânicos foi avaliada a resistência à compressão nas idades de 7, 14 e 28 dias respectivamente. Os resultados obtidos para essa propriedade encontram-se na Tabela 8.

**Tabela 8 - Resultados do ensaio de resistência à compressão (MPa)**

<b>Idade (dias)</b>	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>28</b>
<b>Média (MPa)</b>	4,47	4,93	6,60
<b>Sd (MPa)</b>	0,36	0,42	1,61
<b>CV (%)</b>	8,14	8,45	24,32

Fonte: O próprio autor

Os resultados mostrados na Tabela 8 encontram-se dentro da faixa esperada para o CoPe (Quadro 2). Os coeficientes de variação devido a variabilidade própria do material são os esperados (Chandrappa e Biligiri, 2016a) e atribuem-se ao rearranjo do grãos após o procedimento de compactação, sendo este padronizado por Risson (2017).

#### 4.1.2 Propriedades Hidráulicas

Para avaliar o comportamento hidráulico do CoPe foram realizados ensaios de índice de vazios e permeabilidade a carga constante em 48 corpos de prova, sendo estes das Campanhas Experimentais 1 e 2. Os ensaios, conforme o item 3.2.1.1 de materiais e métodos, seguem as normas ASTM C1754 e a lei de Darcy para o ensaio de permeabilidade.

#### 4.1.2.1 Índice de vazios ( $\Phi$ ) e Permeabilidade ( $k$ )

Na Tabela 9 são mostrados a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados encontrados para um total de 48 copos de prova cilíndricos analisados. Destaca-se que somente são apresentados os resultados médios.

**Tabela 9 – Resultados médios das propriedades hidráulicas do CoPe**

Propriedade	$\Phi$ (%)	$k$ (mm/s)	ABNT NBR 16416 (2015)
Média (%)	26,57	10,27	Atende
Sd (%)	2,61	1,91	Atende
CV (%)	9,82	18,57	Atende

Fonte: O próprio autor

Observa-se na Tabela 9 que o valor médio do índice de vazios foi de 26,57%, resultado condizente com a literatura (ACI 522-R10, 2010; Lian, Zhuge e Beecham, 2011; Martin, Putman e Kaye, 2013; Neithalath, Weiss e Olek, 2006). O índice de vazios está diretamente relacionado com a forma, a granulometria dos agregados e o procedimento de compactação (Deo e Neithalath, 2011; Martin, Kaye e Putman, 2014; Martin e Putman, 2016; Martin, Putman e Kaye, 2013; Neithalath, Weiss e Olek, 2006), neste sentido, os agregados de basalto utilizados possuem uma forma cúbica, uma distribuição granulométrica uniforme, que mesmo após o procedimento de compactação resultou em elevado índice de vazios, conforme a Tabela 9.

Verifica-se também pela Tabela 9 que a média do coeficiente de permeabilidade foi de 10,27 mm/s, cumprindo com o valor mínimo estabelecido na ACI 522R-10 e a ABNT NBR 16416 (2015) de no mínimo 1 mm/s. Esse valor é condizente com o encontrado na literatura (Chandrappa e Biligiri, 2016b; Li, Kayhanian e Harvey, 2013; Lin, Park, Dae Geun, *et al.*, 2016). O coeficiente de variação pode ser explicado pelo rearranjo dos grãos após o procedimento de compactação (Sandoval *et al.*, 2017).

Dessa forma, após a caracterização mecânica e hidráulica, conclui-se que o concreto produzido neste trabalho cumpre com os parâmetros mínimos

estabelecidos na ACI 522R-10 e na ABNT NBR 16416 (2015) para ser classificado como CoPe.

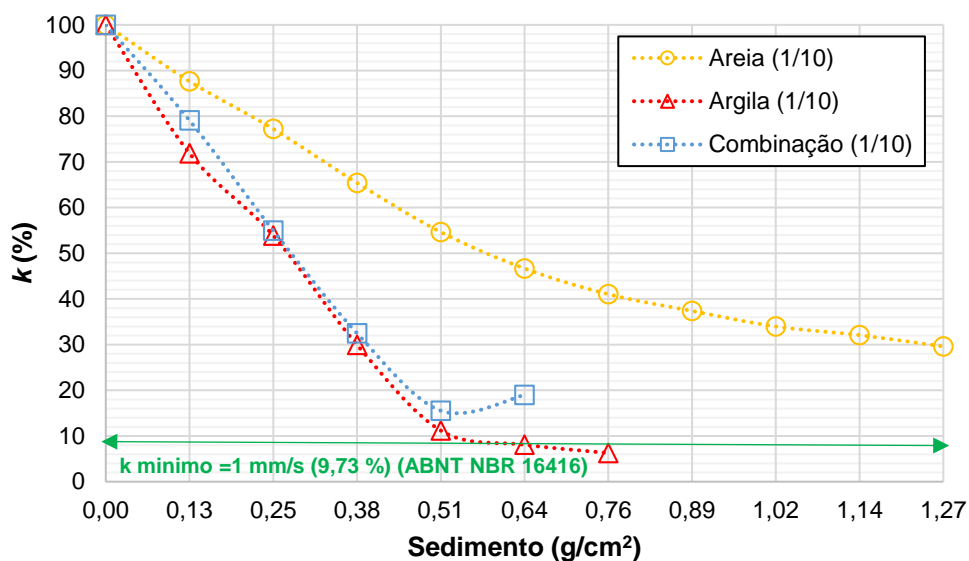
#### 4.2 SEGUNDA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Para avaliar o fenômeno da colmatção, em laboratório, o objetivo principal desta campanha foi avaliar a variação da permeabilidade em função do aumento da massa de sedimento acumulada com os três tipos de sedimentos selecionados, para as velocidades lenta, média e rápida de colmatção.

##### 4.2.1 Velocidade Lenta de Colmatção (1/10)

Tendo como base uma massa total de 100 g de sedimento, que se traduz em uma MSA de  $1,27 \text{ g/cm}^2$ , e com a intenção de avaliar uma velocidade lenta de colmatção, esta foi dividida em 10 frações iguais, apresentando os resultados na Figura 43 onde no eixo y encontrasse a variação da permeabilidade em porcentagem (sendo 100% equivalente a  $10,27 \text{ mm/s}$ ) e no eixo x a MSA durante o ensaio.

**Figura 43 - Resultados da velocidade lenta de colmatção**



Fonte: O próprio autor

Como pode ser observado na Figura 43, a areia foi o único tipo de sedimento que, mesmo com a massa total de 100 g, a permeabilidade, ao final do ensaio, ainda ficou acima do limite estabelecido nas normas ACI 522R-10 e ABNT NBR 16416 (2015) de 1 mm/s, os outros dois tipos de sedimentos reduziram a permeabilidade do CoPe para um valor inferior ao mínimo de norma com aproximadamente 60% ( $0,64 \text{ g/cm}^2$ ) da massa de sedimento acumulada.

A permeabilidade final com o sedimento de areia foi aproximadamente de 30% da sua permeabilidade inicial (3,08 mm/s), perdendo 70% da sua capacidade hidráulica com a carga total de sedimento. Já no caso da argila e a combinação, foi bem diferente, e se atingiu o coeficiente de permeabilidade mínimo com aproximadamente 60g ( $0,76 \text{ g/cm}^2$ ). Com a argila a permeabilidade final foi de aproximadamente 6% da permeabilidade inicial (0,61 mm/s), perdendo 94% de sua permeabilidade. Para a combinação de sedimentos a permeabilidade mínima foi de 19% (1,95 mm/s), perdendo quase 80% de sua permeabilidade. Isso demonstra que existe uma diferença significativa no processo dependendo do tipo de sedimento.

O sedimento areia reduz de forma progressiva o coeficiente de permeabilidade (Deo *et al.*, 2010; Kia *et al.*, 2017; Tong, 2011), conforme verificado nos dados da Figura 43, pois os grãos de areia vão preenchendo de forma superficial os vazios do material, ficando ainda espaços vazios entre os próprios grãos, fazendo com que o fluxo de água continue passando. Isso indica que, mesmo com elevadas quantidades de areia colmatando, o CoPe ainda apresentará uma permeabilidade residual.

Já no caso do sedimento argila, a própria natureza mineralógica e as suas propriedades coesivas, fazem com que a redução da permeabilidade seja quase instantânea (BRAJA, 2013), pois, ao entrar em contato com a água, as partículas se atraem umas com as outras, preenchendo quase todos os vazios na superfície do material, o que explica a elevada redução da permeabilidade.

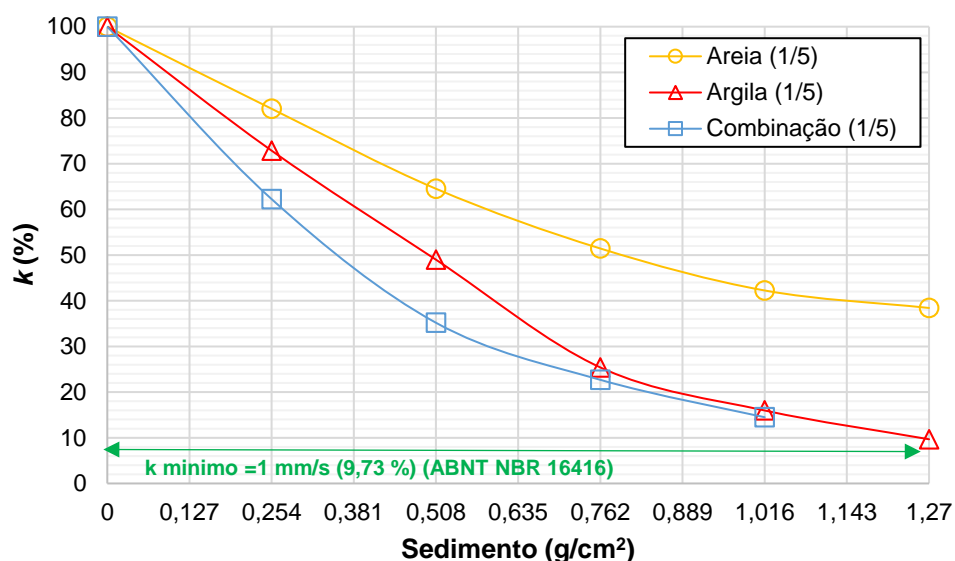
Na combinação de sedimentos, a colmatação foi governada principalmente pela parte do sedimento argila, sendo os resultados similares

àqueles em que se utilizou argila para colmatar o CoPe. Foi visto também uma recuperação falsa da permeabilidade no último ponto analisado na Figura 43, isto aconteceu por um efeito do ensaio onde a água pode ter rearranjado os grãos de sedimento de areia da superfície deixando passar mais água naquele momento criando essa falsa tendência de recuperação de permeabilidade. Os resultados obtidos foram condizentes com a literatura onde também os sedimentos finos foram sempre os mais prejudiciais (Andrés-Valeri *et al.*, 2016; El-hassan, Kianmehr e Zouaoui, 2019; Kevern, 2015).

#### 4.2.2 Velocidade Média de Colmatação (1/5)

Seguindo o mesmo procedimento do item anterior, a massa total de sedimento (100 g) foi dividida em 5 frações iguais mantendo a mesma MSA de 1,27 g/cm<sup>2</sup>. Os resultados encontrados segundo essas condições de ensaio são mostrados na Figura 44 onde no eixo y encontrasse a variação da permeabilidade em porcentagem (sendo 100% equivalente a 10,27 mm/s) e no eixo x a MSA durante o ensaio.

**Figura 44 - Resultados de velocidade média de colmatação**



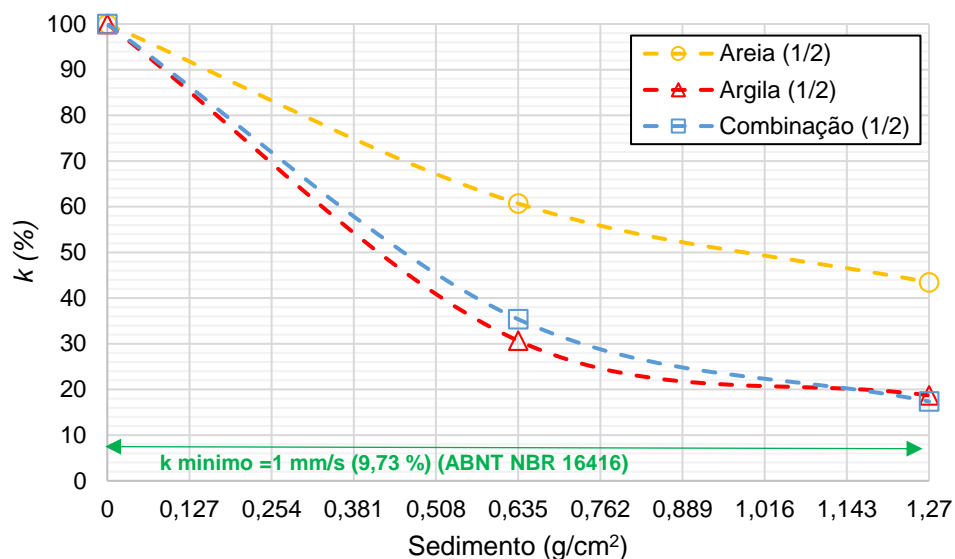
Fonte: O próprio autor

Na velocidade média de colmatação, conforme é possível observar na Figura 44, o comportamento foi análogo a velocidade lenta. A redução final da permeabilidade com o sedimento de areia foi de 40% comparado com a inicial (4,11 mm/s). No caso da argila, ocorreu uma perda da permeabilidade de forma mais rápida, mas após adicionar 1,016 g/cm<sup>2</sup> o fluxo tendeu a se estabilizar (80 g). A permeabilidade final para o a combinação de sedimentos foi de 14% da inicial (1,44 mm/s) e para o caso da argila, foi de 9% da inicial (0,92 mm/s). Portanto, a redução do coeficiente de permeabilidade foi governada pelo tipo de sedimento, sendo mais prejudiciais os sedimentos com grãos finos, resultado condizente com o encontrado na literatura (Haselbach, 2010).

#### 4.2.3 Velocidade Rápida de Colmatação (1/2)

Finalmente, o CoPe foi testado para uma velocidade rápida de colmatação com a mesma massa de sedimentos (100 g) dividida em duas partes iguais, mantendo a MSA de 1,27 g/cm<sup>2</sup>. Os resultados do ensaio de colmatação são apresentados na Figura 45 onde no eixo y encontrasse a variação da permeabilidade em porcentagem (sendo 100% equivalente a 10,27 mm/s) e no eixo x a MSA durante o ensaio.

**Figura 45 - Resultados de velocidade rápida de colmatação**

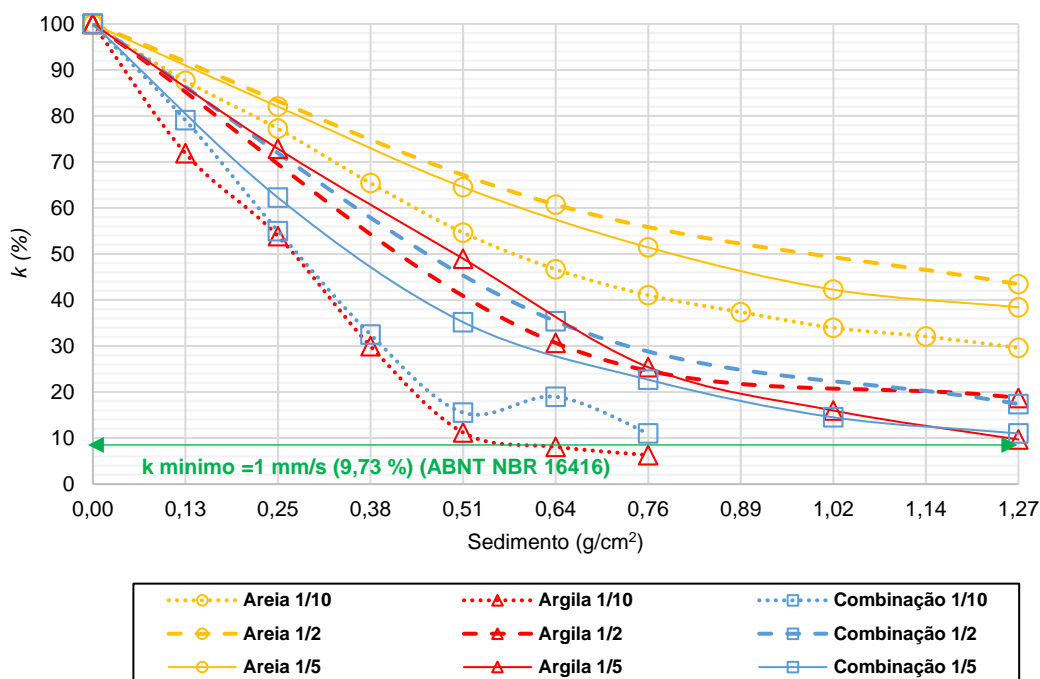


**Fonte:** O próprio autor

Como apresentado na Figura 45, existe uma diferença significativa da perda de permeabilidade dependendo do tipo de sedimento. De forma análoga, nas duas velocidades anteriores os sedimentos contendo grãos finos foram os mais prejudiciais. No sedimento de areia a permeabilidade final foi de 43% da permeabilidade inicial (4,42 mm/s), na argila 17% da inicial (1,75 mm/s) e finalmente, na combinação foi de 19% da permeabilidade inicial (1,95 mm/s). Os resultados obtidos concordam com o encontrado por Kevern (2015) onde grandes quantidades de sedimento provocam reduções praticamente imediatas na permeabilidade do material (Kevern, 2015).

Foi possível, mediante a adequação do ensaio de permeabilidade a carga constante, induzir o fenômeno da colmatação no CoPe. A adição de sedimento permitiu reduzir a permeabilidade de forma gradativa nas 3 velocidades estudadas. Na Figura 46 é apresentado um resumo dos resultados obtidos na Segunda Campanha Experimental.

Figura 46 - Resumo da Segunda Campanha Experimental



Fonte: O próprio autor

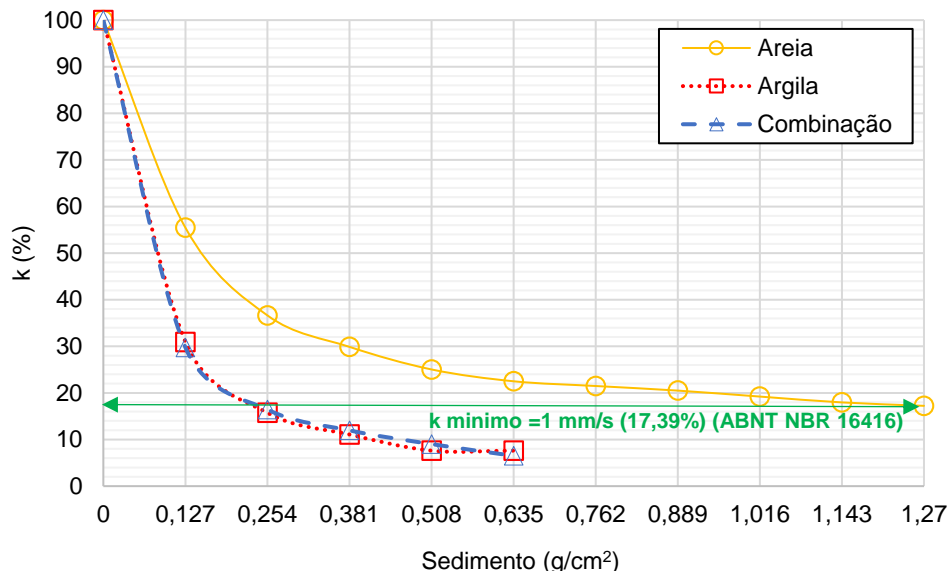
Após a realização do ensaio de colmatção em laboratório, ficou evidente uma diferença no processo entre as 3 velocidades estudadas. Sendo a velocidade lenta a mais prejudicial (velocidade crítica de colmatção), como confirmado na Figura 46. Isso mostra que a velocidade de colmatção é um parâmetro de suma importância a ser levado em consideração para entender este fenômeno, assim como o tipo de sedimento, sendo que quando o sedimento é adicionado de forma gradativa ao material a redução final da permeabilidade é mais acentuada.

Durante a execução do ensaio, percebeu-se que quando era liberada a entrada da água, após a colocação do sedimento na superfície do CoPe, saía uma pequena parte do mesmo pelo extravasor, e outra conseguia atravessar os vazios e se direcionava na saída da água.

#### 4.3 TERCEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Nesta campanha foi simulada a colmatação no campo experimental 1 (9 placas iguais), adequando o ensaio ASTM C1701 e fazendo uma proporção da quantidade de sedimento com base na área superficial de contato, para manter a mesma MSA usada em laboratório de  $1,27 \text{ g/cm}^2$ . O total de sedimento (900 g) foi dividido em 10 frações iguais (velocidade crítica de colmatação Segunda Campanha Experimental) e foi medida a perda de permeabilidade após a adição de cada fração com o ensaio ASTM C1701. Os resultados são apresentados na Figura 47 onde no eixo y encontrasse a variação da permeabilidade em porcentagem (sendo 100% equivalente a  $5,75 \text{ mm/s}$ ) e no eixo x a MSA durante o ensaio

**Figura 47 - Resultados da Colmatação do Campo Experimental 1**



**Fonte:** O próprio autor

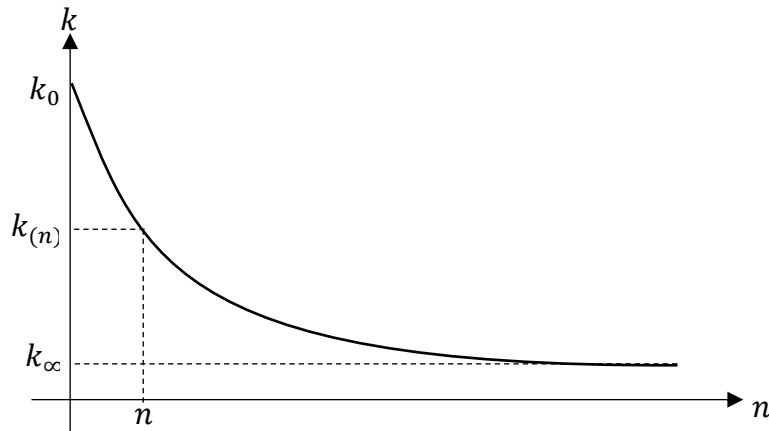
Como apresentado na Figura 47, o fenômeno da colmatação aconteceu de forma progressiva com o sedimento de areia, tendendo a um valor de permeabilidade constante (permeabilidade residual), concordando com os resultados obtidos no ensaio de laboratório. Nesse caso, a permeabilidade final foi de 18% do valor inicial ( $1,035 \text{ mm/s}$ ). Para a argila e a combinação, a massa de 50% ( $0,635 \text{ g/cm}^2$ ) do total de sedimento já resultou em uma perda quase total da permeabilidade ( $0,46 \text{ mm/s}$ ), como observado na Figura 47.

Existe uma diferença significativa em função do tipo de sedimento utilizado, o que mostra que o processo de colmatação está influenciado pelo tipo de sedimento, sendo os finos os mais prejudiciais para o material (Haselbach, 2010). Concordando com os resultados encontrados em laboratório e na literatura, mantendo aproximadamente a mesma tendência (Brugin *et al.*, 2017).

Cabe salientar que, quando comparados esses resultados aos obtidos em laboratório, a redução da permeabilidade foi mais intensa, visto que em laboratório foi analisado o CoPe de forma independente (corpos de prova) e em campo foi medida a permeabilidade do sistema de pavimento permeável composto pelo CoPe (placas), a base granular e o subleito, isto é condizente com os resultados obtidos por Hu *et al.* (2020) onde uma colmatação gradativa (velocidade crítica) em sistemas de pavimentos permeáveis leva a uma maior perda na permeabilidade do material (Hu *et al.*, 2020).

#### 4.4 MODELO ANALÍTICO DE COLMATAÇÃO

A variação da permeabilidade em função da massa de sedimento acumulada foi amplamente determinada experimentalmente na bibliografia (Andres-Valeri *et al.*, 2018; González-Angullo, N.; Castro, D.; Rodríguez-Hernández, J.; Davies, 2008; Haselbach *et al.*, 2006; Kevern, 2015; Sehgal *et al.*, 2018; Welker *et al.*, 2013). Em todos os casos verifica-se o seguinte comportamento: a permeabilidade parte de seu valor inicial (não colmatado,  $k_0$ ), reduzindo gradativamente a medida que aumenta o total de sedimento ( $n$ ) até um valor residual ( $k_\infty$ ), em que a permeabilidade fica estável. Esse valor residual é um valor ponderado da permeabilidade do CoPe e do sedimento. Tal comportamento pode ser melhor observado na Figura 48.

Figura 48 - Tendência experimental entre  $k$  e  $n$ 

Fonte: O próprio autor

Uma das formas de se expressar esse comportamento, é relacionando a variação da permeabilidade ( $\partial k/\partial n$ ) em função da permeabilidade ( $k$ ), por meio de um coeficiente “ $c$ ” que define o potencial de colmatação, tal como expresso na Equação 29.

$$\frac{\partial k}{\partial n} = -ck \quad (29)$$

Reorganizando a Equação 20, obtendo-se a Equação 30:

$$\frac{\partial k}{k} = -c \partial n \quad (30)$$

A Equação 30 pode ser integrada no intervalo de  $k_0$  até  $k_{(n)}$  no eixo vertical e  $0$  até  $n$  no eixo horizontal. A parcela residual constante ( $k_\infty$ ) da função ( $k_{(n)}$ ) do gráfico da Figura 50 pode ser subtraída do intervalo de integração, obtendo assim a Equação 31.

$$\int_{k_0-k_\infty}^{k_{(n)}-k_\infty} \frac{\partial k}{k} = - \int_0^n c \partial n \quad (31)$$

A partir da equação anterior (31) e assumindo que o coeficiente de velocidade ( $c$ ) é constante ao longo de todo o processo de colmatação, obtemos as Equações 32, 33, 34, 35 e 36.

$$\int_{k_0-k_\infty}^{k_{(n)}-k_\infty} \frac{\partial k}{k} = -c \int_0^n \partial n \quad (32)$$

$$\ln k \Big|_{k_0-k_\infty}^{k_{(n)}-k_\infty} = -cn \Big|_0^n \quad (33)$$

$$\ln \frac{k_{(n)}-k_\infty}{k_0-k_\infty} = -cn \quad (34)$$

$$\frac{k_{(n)}-k_\infty}{k_0-k_\infty} = e^{-cn} \quad (35)$$

$$k_{(n)} = k_\infty + (k_0 - k_\infty)e^{-cn} \quad (36)$$

Onde:

- $k_0$ = Permeabilidade inicial (m/s);
- $k_n$ = Permeabilidade do CoPe colmatado (mm/s);
- $k_\infty$ = Permeabilidade residual (mm/s);
- $n$ = Massa de sedimento acumulada em g/cm<sup>2</sup>;
- $c$ = Potencial de colmatação em cm<sup>2</sup>/g (em função do local).

Caso o valor residual de permeabilidade  $k_\infty$  seja igual a zero, a Equação 36 pode ser simplificada na Equação 37. Esta Equação é similar a proposta por Horton (1933) para cálculo de infiltração de água no solo e adaptada por Walsh *et al.* (2016) para degradação de permeabilidade no CoPe (Chow;, Maidment; e Mays, [s.d.]), que observaram o comportamento exponencial de redução de permeabilidade.

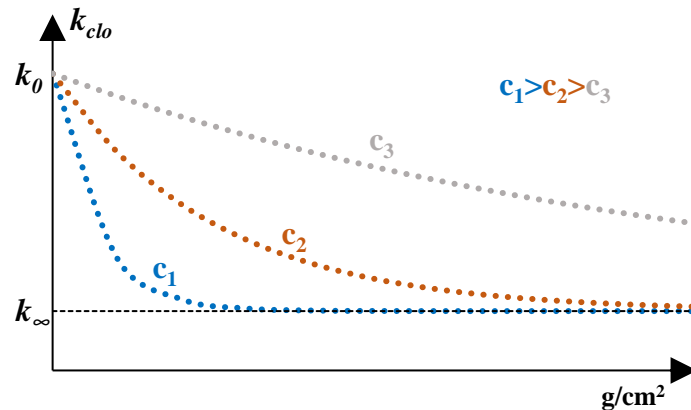
$$k_{(n)} = k_0 e^{-cn} \quad (37)$$

Segundo os diversos resultados experimentais obtidos da bibliografia, costuma haver uma permeabilidade residual ( $k_\infty$ ), portanto a Equação 36 é a mais indicada para representar o processo de colmatação do CoPe. Desse modo, essa expressão pode ser utilizada para ajustar dados experimentais de ensaios de colmatação para a obtenção do potencial de colmatação “ $c$ ” por meio de regressão não linear.

O potencial de colmatação “ $c$ ” da Equação 36 representa a velocidade com que se desenvolve o processo de colmatação, pois dependendo do

tipo de sedimento a permeabilidade residual pode ser atingida de forma mais rápida ou de forma mais lenta, como apresentado na Figura 49.

**Figura 49 - Curva de regressão segundo a Equação 36**

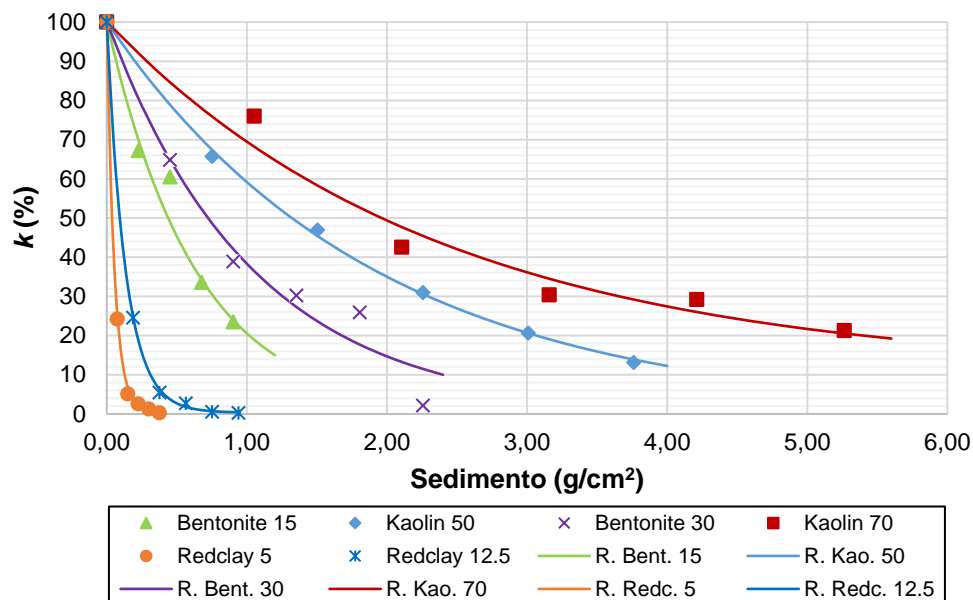


**Fonte:** O próprio autor

Como apresentado na Figura 49, quando o processo de colmatção acontece de forma praticamente imediata ( $c_1$ ), o valor do potencial de colmatção “ $c$ ” tende a ser elevado, e quando o processo é de forma mais gradativa seu valor é menor ( $c_3$ ).

A Equação 36 foi testada com os dados da pesquisa realizada por Haselbach (2010), na qual foi avaliada a colmatção no CoPe quando submetido a 5 tipos de sedimentos com diferentes MSA, levando o material praticamente a um valor desprezível de permeabilidade. Como Haselbach (2010) trabalhou com ciclos de colmatção, foi realizada uma correlação da massa de sedimento por ciclo e a área do corpo de prova utilizada para deixar tudo em termos de MSA ( $g/cm^2$ ). Na Figura 50 são apresentados os resultados adaptados (pontos) e as curvas de regressão (Equação 36) obtidas com o software IBM SPSS.

Figura 50 – Validação da Equação 36 com os dados obtidos por Haselbach (2010)



Fonte: O próprio autor

Como ilustrado na Figura 50, o modelo analítico de colmatção (Equação 36) ajustou-se muito bem com os dados obtidos por Haselbach (2010). Os valores do potencial de colmatção “ $c$ ” e  $R^2$  para cada um dos sedimentos encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores de  $c$  e  $R^2$  encontrados com o IBM SPSS

Sedimento	$c$ (cm <sup>2</sup> /g)	$R^2$
Kaolin 50	0,53	0,99
Bentonite 15	1,56	0,85
Bentonite 30	0,97	0,90
Kaolin 70	0,34	0,91
Redclay 5	18,93	0,99
Redclay 12.2	7,48	0,99

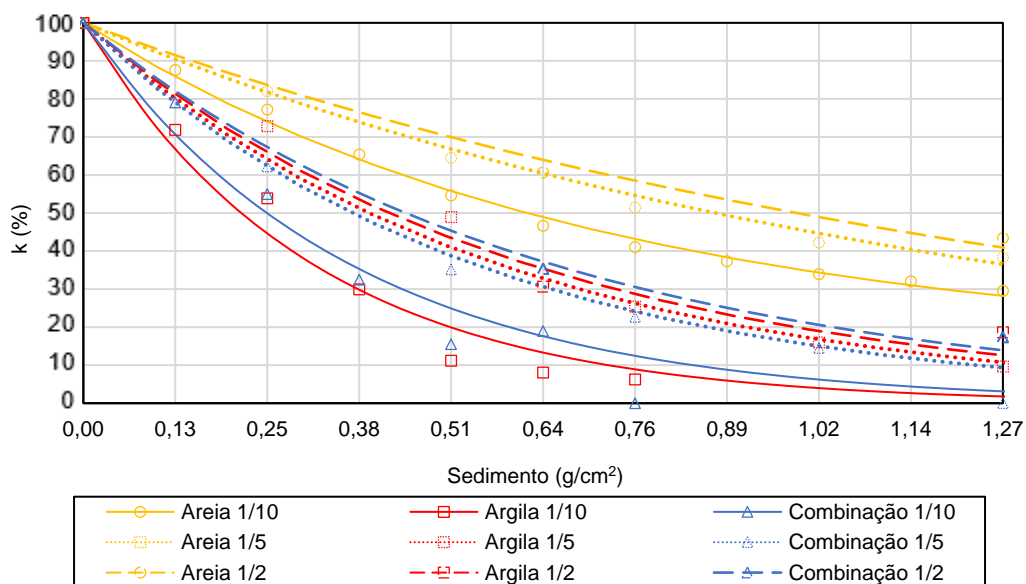
Fonte: O próprio autor

Os potenciais de colmatção “ $c$ ” variaram de 0,53 a 18,93 cm<sup>2</sup>/g, sendo o “Kaolin 70” o sedimento que menos prejudicou a permeabilidade do CoPe e o sedimento “Redclay 5” o mais prejudicial, visto que por cada grama de material adicionado são colmatados aproximadamente 19 cm<sup>2</sup> na superfície do material.

Concluindo, quando o potencial de colmatação “ $c$ ” tende a zero, o processo de colmatação é mais lento, quer dizer, que o potencial de colmatação é baixo, e quando esse valor aumenta, a colmatação acontece de forma muito rápida, diminuindo de forma representativa o coeficiente de permeabilidade do material quando comparado com a sua condição inicial. Também foram verificados os valores do  $R^2$ , que ficaram na faixa de 0,9, representando um bom ajuste da curva para os dados estudados.

Finalmente, a Equação 36 foi utilizada com os dados encontrados em laboratório e em campo para analisar o ajuste da regressão e a tendência do fenômeno da colmatação nas Figuras 51 e 52 (sendo os pontos os resultados experimentais e as linhas o modelo analítico de colmatação aplicado).

**Figura 51 - Resultados de laboratório e regressão não linear**



**Fonte:** O próprio autor

A curva de ajuste utilizando a Equação 36 se adaptou bem aos resultados obtidos em laboratório e seguiu praticamente a mesma tendência, como observado na Figura 51.

Na Tabela 11 são mostrados os valores de “ $c$ ” e  $R^2$  para cada uma das regressões trabalhadas. Tais valores foram calculados com o IBM SPSS.

Tabela 11 - Valores de “c” e R<sup>2</sup> para os dados de laboratório

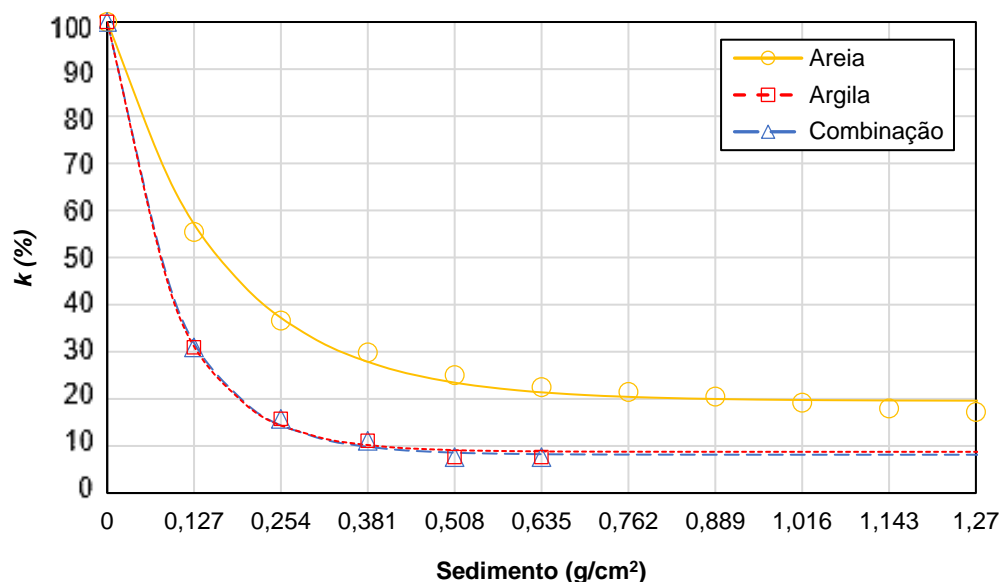
Sedimento	c (cm <sup>2</sup> /g)	R <sup>2</sup>	k <sub>∞</sub> (mm/s)
Areia 1/10	1,42	0,99	0,141
Argila 1/10	3,18	0,97	0,000
Combinação 1/10	2,73	0,97	0,000
Areia 1/5	0,80	0,99	0,002
Argila 1/5	1,87	0,98	0,002
Combinação 1/5	1,76	0,99	0,001
Areia 1/2	0,70	0,99	0,001
Argila 1/2	1,65	0,98	0,003
Combinação 1/2	1,56	0,99	0,001

Fonte: O próprio autor

No caso dos resultados do ensaio de laboratório o “c” variou de 0,7 a 3,2 cm<sup>2</sup>/g. A areia na velocidade rápida foi a que menos prejudicou a permeabilidade, uma vez que por cada grama de sedimento são colmatados 0,70 cm<sup>2</sup>. Por outro lado, a argila na velocidade lenta obteve a maior diminuição da permeabilidade do material, porque segundo seu “c”, para cada grama de sedimento são colmatados 3,175 cm<sup>2</sup>. Por fim, todos os R<sup>2</sup> encontrados são maiores do que 0,90, mostrando um bom ajuste na curva para os resultados obtidos na fase experimental.

Da mesma forma, foi realizada a regressão com os resultados obtidos no campo experimental (velocidade crítica de colmatação). A curva de regressão e os resultados são exibidos na Figura 52.

Figura 52 - Resultados de campo e regressão não linear



Fonte: O próprio autor

Como visualizado na Figura 52, as 3 curvas de regressão para os resultados obtidos têm um bom ajuste, mostrando no caso da areia uma diminuição paulatina da permeabilidade à medida que aumentava a massa de sedimento acumulada. Porém, ao chegar aproximadamente a 50% do total de sedimento adicionado no ensaio, a permeabilidade do material tende a estabilizar

Já no caso da argila e combinação, o comportamento foi praticamente igual, governado pela fração fina no processo de colmatação do material, tendo uma grande queda inicial no valor de permeabilidade. Depois de adicionado 50% da massa de sedimento (0,635 g/cm<sup>2</sup>), a curva tende a estabilizar. Na Tabela 12 são mostrados os valores do coeficiente “c” e R<sup>2</sup>, correspondente aos dados de campo.

Tabela 12 - Valores de “c” e R<sup>2</sup> para os dados obtidos em campo

Sedimento	c (cm <sup>2</sup> /g)	R <sup>2</sup>	k <sub>∞</sub> (mm/s)
Areia	5,97	0,99	0,196
Argila	10,49	0,99	0,081
Combinação	10,88	0,99	0,088

Fonte: O próprio autor

Como exposto na Tabela 12, os valores de “ $c$ ” conservam a mesma tendência que os obtidos em laboratório, variando de 5,9 a 10,8 g/cm<sup>2</sup>, sendo o valor de 5,9 para a areia e o valor de 10,8 para a combinação. Os valores de R<sup>2</sup> mostram o bom ajuste obtido mediante a regressão aplicada nos dados.

#### 4.4.1 Comparação Dos Dois Ensaio (Laboratório e Campo)

Foi realizada uma comparação dos dois ensaios propostos para medição do fenômeno da colmatção no CoPe. Desta análise se destacam os seguintes pontos:

- O ensaio de laboratório analisa o CoPe de forma independente, não existindo nada sob o mesmo que possa limitar o fluxo de água, enquanto o ensaio de campo analisa o sistema de pavimento permeável como tal, uma vez que além da camada de CoPe existe uma influência da base granular e do subleito no fluxo de água durante o ensaio.
- Durante o ensaio de laboratório podem ocorrer perdas de sedimento pelo tubo extravasor, enquanto no ensaio de campo o total de sedimento é aproveitado para colmatar os vazios.
- O ensaio de laboratório requer um permeâmetro e toda uma preparação do corpo de prova, enquanto o ensaio de campo utiliza apenas um tubo de PVC de 30 cm de diâmetro, sendo bem mais simples de executar.

Na Tabela 13 são apresentados os coeficientes  $c$  e R<sup>2</sup> do laboratório e campo experimental para a velocidade lenta de colmatção e também a proporção dos coeficientes  $c$ .

**Tabela 13 – Resumo dos resultados do laboratório e campo experimental**

Sedimento	Laboratório			Campo Experimental			C <sub>campo</sub> /C <sub>lab.</sub>
	$c$ (cm <sup>2</sup> /g)	R <sup>2</sup>	$k_{\infty}$ (mm/s)	$c$ (cm <sup>2</sup> /g)	R <sup>2</sup>	$k_{\infty}$ (mm/s)	
Areia	1,42	0,99	0,141	5,97	0,99	0,20	4,2
Argila	3,18	0,97	0,001	10,50	0,99	0,08	3,3
Combinação	2,73	0,97	0,001	10,88	0,99	0,09	4,0

Fonte: O próprio autor

Quando realizada a relação entre os valores de “ $c$ ” do campo experimental e do laboratório existe uma diferença de aproximadamente 4 a 1 em ordem de magnitude. Isto é explicado pelas condições específicas de cada ensaio.

Em laboratório o CoPe foi testado de forma independente sem nenhuma restrição no material, mantendo sempre um fluxo contínuo da água.

No caso do campo experimental foi testado o sistema de pavimento permeável (CoPe, base granular e subleito), fato que explica os maiores valores de “c” encontrados durante estes ensaios. Isso quer dizer que, existe também no fenômeno da colmatação uma influência das camadas inferiores à camada superficial de CoPe no potencial de colmatação.

Com os valores de “c” obtidos em laboratório e campo experimental, confirma-se que existe a mesma tendência, sendo os valores do sedimento de areia inferiores aos valores do sedimento de argila, pois os finos sempre são os sedimentos mais prejudiciais na redução de permeabilidade do material.

#### 4.5 QUARTA CAMPANHA EXPERIMENTAL – PROCEDIMENTO DE LIMPEZA

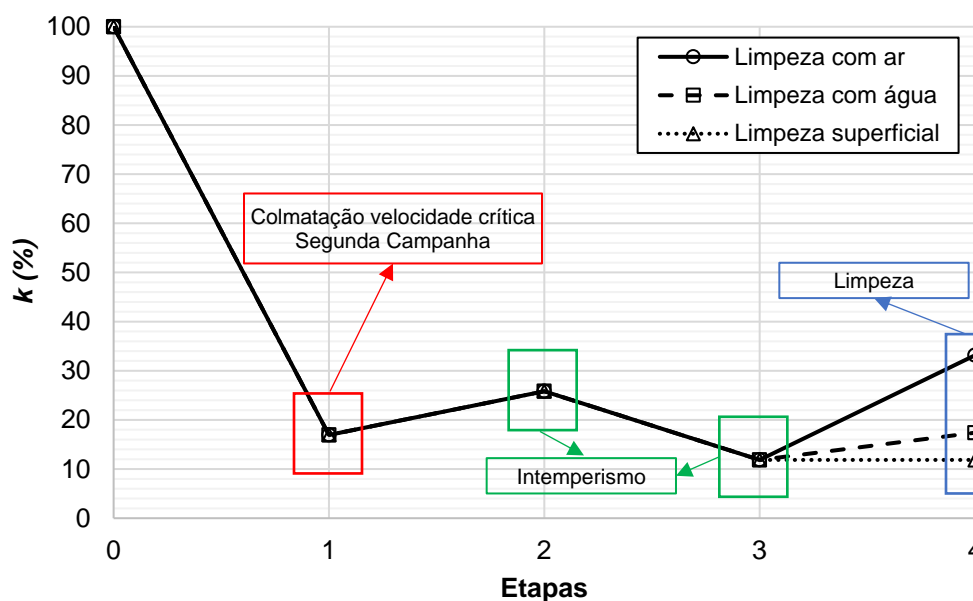
A Quarta Campanha Experimental começou 5 meses depois do final da Terceira Campanha. As placas colmatadas na velocidade crítica de colmatação com cada tipo de sedimento, foram limpas utilizando os três procedimentos de limpeza selecionados (limpeza com ar, limpeza com água e limpeza superficial). Isso, para avaliar a eficiência de cada procedimento em função do sedimento. Os resultados obtidos foram divididos em cinco etapas:

- Etapa 0: Permeabilidade inicial do CoPe sem colmatar (Resultado Terceira Campanha);
- Etapa 1: Permeabilidade após o processo de colmatação com 1,27 g/cm<sup>2</sup> de sedimento (velocidade crítica de colmatação, resultado Terceira Campanha);
- Etapa 2: Permeabilidade após 5 meses ao intemperismo;
- Etapa 3: Permeabilidade de uma semana depois dos 5 meses;
- Etapa 4: Permeabilidade após a limpeza.

##### 4.5.1 Limpeza do sedimento de areia

Na Figura 53, são plotados os resultados de recuperação de permeabilidade para as placas com o sedimento de areia.

**Figura 53 - Resultados dos métodos de limpeza do sedimento de areia**



Fonte: O próprio autor

Como exibido na Figura 53, o método mais eficiente na recuperação da permeabilidade com sedimento de areia foi o ar, seguido pela água e finalmente, pela limpeza superficial. Sendo assim, o ar conseguiu recuperar 21,31% (33,17%-11,86%) da permeabilidade, a água 5,53% (17,39%-11,86%) e a limpeza superficial não foi efetiva, visto que não houve mudança em termos de permeabilidade. Isso pode ser explicado, pois o ar tende a facilitar o desentupimento dos poros por causa da pressão, concordando com a revisão de literatura onde o ar é um dos métodos mais eficientes para este tipo de sedimento (Dougherty, M *et al.*, 2011; Suozzo, Mark J e Dewoolkar, 2012).

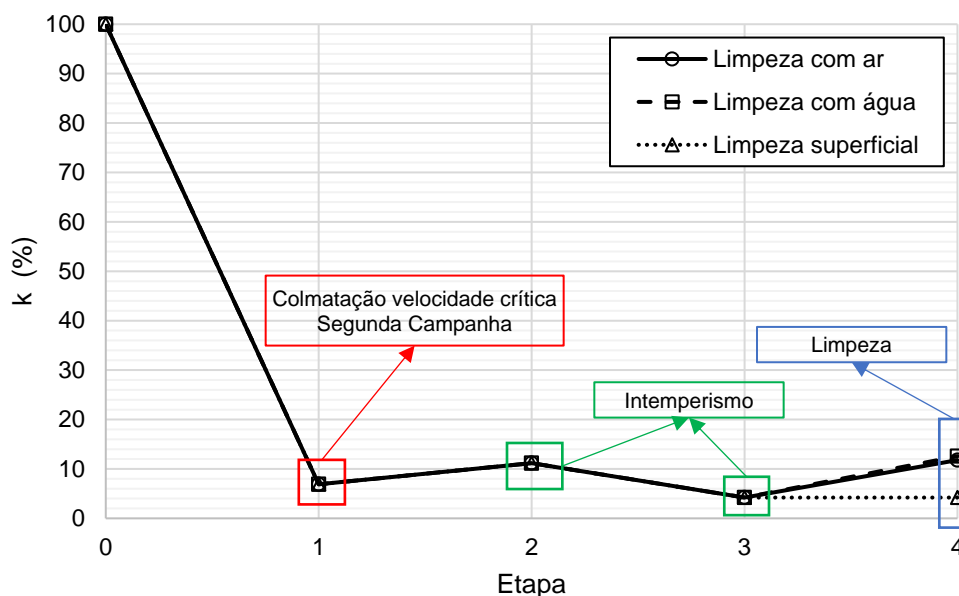
Portanto, as partículas da areia retidas nos vazios superficiais e internos são forçadas a sair. No caso da água, foi menos eficiente, visto que as partículas superficiais conseguem ser removidas pela pressão, porém as partículas que ficam retidas nos poros internos não. Finalmente, no caso da limpeza superficial não se obteve diferença, visto que nem mesmos poros superficiais puderam ser

desobstruídos, o que explica que a permeabilidade foi mantida após esse procedimento.

#### 4.5.2 Limpeza do Sedimento de Argila

Na Figura 54, são apresentados os resultados de recuperação de permeabilidade para as placas com o sedimento de argila.

**Figura 54 - Resultados dos métodos de limpeza do sedimento de argila**



**Fonte:** O próprio autor

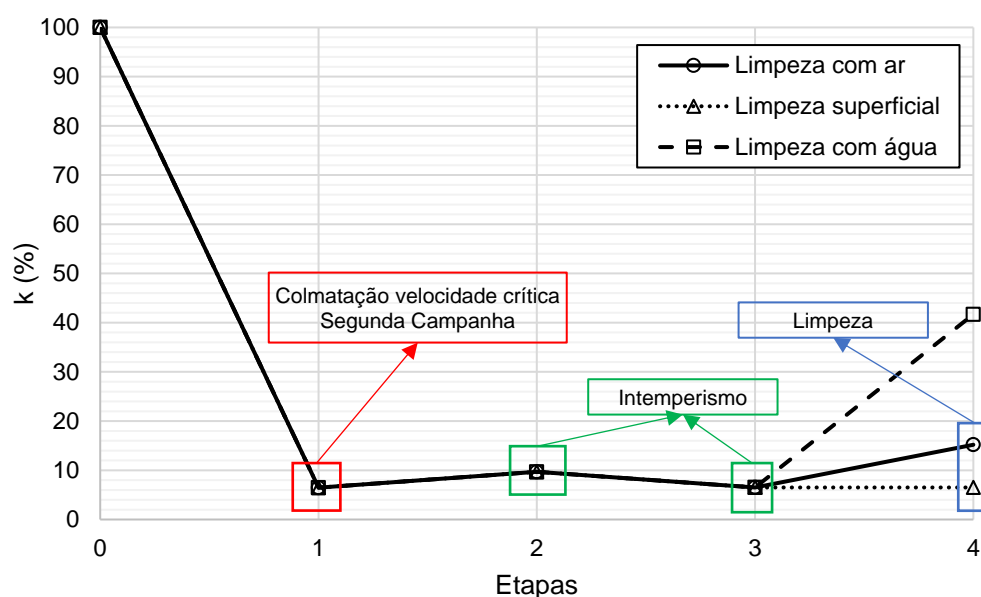
Como observado na Figura 54, os métodos mais eficientes na limpeza dos vazios colmatados com argila foram a água e o ar, finalmente, a limpeza superficial não obteve bons resultados. Assim, a água conseguiu recuperar 8,35% (12,57%-4,21%) da permeabilidade, o ar 7,57% (11,78%-4,21%) e a limpeza superficial não recuperou a permeabilidade do material. A eficiência da água pode ser explicada pelo tamanho dos grãos de argila, os quais conseguem ser expulsos pela alta pressão. Durante o processo, também foi verificada a remoção da argila, visto que a água ficou turva enquanto estava penetrando nos vazios do CoPe. Por outro lado, o ar consegue limpar algumas partículas de argila, porém aquela cobertura superficial (grumos de argila) não pode ser eliminada por completo. Esses resultados são respaldados pela revisão de literatura onde a água a pressão

mostrou-se como um procedimento eficiente para recuperar a permeabilidade para sedimentos e tipo argiloso (Haselbach *et al.*, 2015; Hu *et al.*, 2020; Weiss *et al.*, 2015).

#### 4.5.3 Limpeza da Combinação de sedimentos

Na Figura 55, são apresentados os resultados obtidos para as placas com a combinação de sedimentos.

**Figura 55 - Resultados dos métodos de limpeza da combinação de sedimentos**



**Fonte:** O próprio autor

Como exposto na Figura 55, o método mais eficiente na limpeza da combinação de sedimentos foi a água, seguido pelo ar e finalmente, a limpeza superficial. A água conseguiu recuperar 35,16% (41,69%-6,52%) da permeabilidade, o ar 8,68% (15,2%-6,52%) e a limpeza superficial manteve a mesma permeabilidade antes da limpeza. A pressão da água facilitou a remoção superficial das partículas de areia e a remoção dos grumos de argila nos poros internos, o que explica sua elevada eficiência (Drake e Bradford, 2013). O ar é muito eficiente removendo a areia, mas a argila aderida na superfície do CoPe e no interior dos vazios não consegue ser removida pela ação da pressão do ar.

Após a implementação dos 3 procedimentos de limpeza estudados, conclui-se que, no caso dos sedimentos de areia, o ar mostrou-se mais eficiente, e no caso dos sedimentos com conteúdo de finos (argila), a água mostrou-se mais eficiente. Sendo assim, foi descartada a limpeza superficial, uma vez que não obteve nenhum ganho de permeabilidade em nenhum caso, concordando com as recomendações da literatura onde a limpeza superficial geralmente não obteve bons resultados (Chopra *et al.*, 2010).

#### 4.6 QUINTA CAMPANHA EXPERIMENTAL – PERIODICIDADES DE LIMPEZA

Os ensaios correspondentes a periodicidade de limpeza foram realizados no Campo Experimental 2 (CE 2), onde a média da permeabilidade sem colmatar das 12 placas de CoPe foi de 5,75 mm/s tal valor foi sempre considerado como 100%. Para avaliação da periodicidade de limpeza foram analisados dois tipos de cenários, o primeiro realizando uma limpeza com uma periodicidade média e outro cenário com periodicidade alta. Isso com o fim de determinar a influência da periodicidade na recuperação de permeabilidade do material.

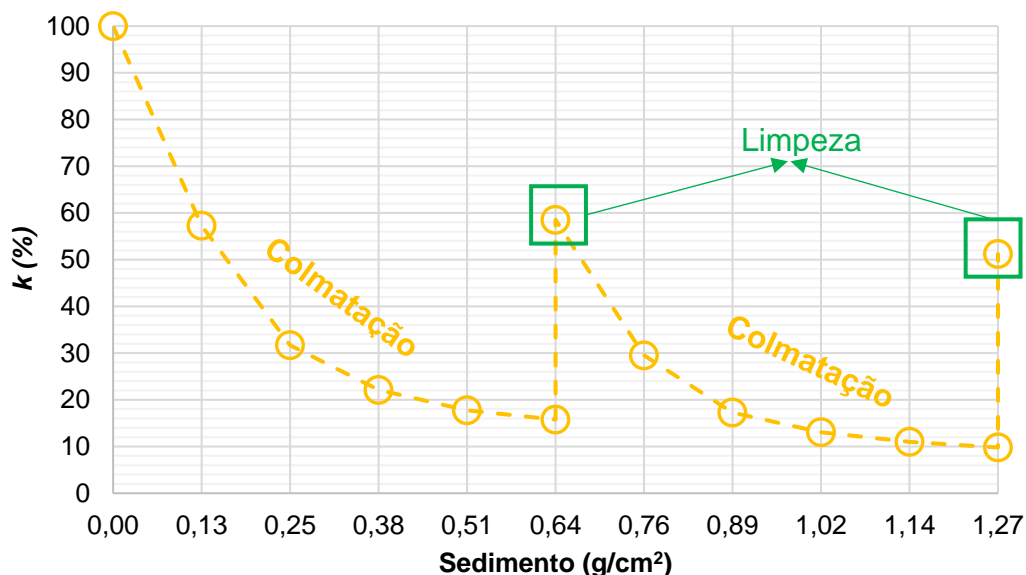
##### 4.6.1 Periodicidade média

Foram avaliadas duas placas colmatadas com o sedimento de areia, duas com o sedimento argila e duas com a combinação de sedimentos, nas quais o total de sedimento foi dividido em 10 frações iguais (velocidade crítica de colmatação). Após a adição da metade do sedimento (5/10), ou seja, 5 frações, foi realizada a limpeza com o método mais efetivo para cada tipo de sedimento, definido na Quarta Campanha Experimental e verificada imediatamente a recuperação da permeabilidade com o ensaio ASTM C1701.

##### 4.6.1.1 *Areia*

Os resultados para a avaliação da periodicidade média de limpeza para o sedimento de areia são apresentados na Figura 56. No eixo vertical, encontra-se a variação da permeabilidade e no eixo horizontal a massa de sedimento acumulada ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) até o processo de limpeza.

**Figura 56 - Resultados de periodicidade média para o sedimento de areia**



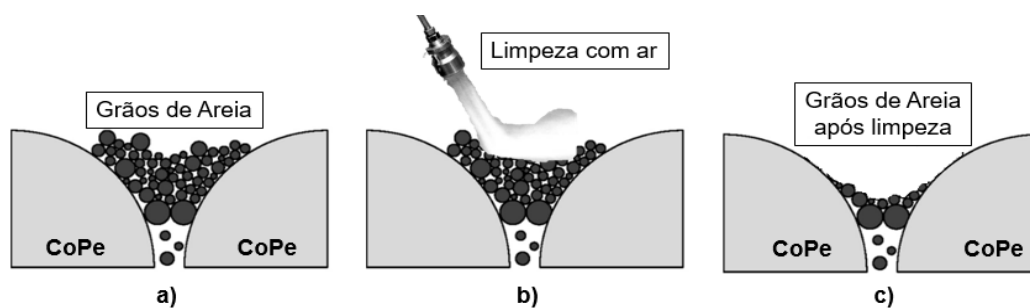
**Fonte:** O próprio autor

Como exposto na Figura 56, após a adição das primeiras 5 frações (5/10) da areia, houve uma redução de 82% da permeabilidade inicial, sendo explicado pela massa de sedimento utilizada e confirmado pela campanha experimental 3. Após a limpeza com ar (compressor), foi recuperada 60% da permeabilidade inicial. Na adição das 5 frações restantes (10/10) de sedimento, foi alcançada uma redução de 90% da permeabilidade. Após a segunda limpeza, o CoPe recuperou 50% da permeabilidade inicial.

No caso do sedimento da areia, a recuperação da permeabilidade não foi tão efetiva, fato que é explicado pelo tamanho dos grãos de sedimento, e porque, durante o processo de limpeza, uma parte dos grãos não pode ser expulsa e se adentrou mais nos vazios do material.

A areia utilizada é uma areia grossa, portanto alguns grãos conseguem ficar retidos entre os vazios do CoPe com facilidade, e quando entra o ar comprimido, força esses grãos a se fixar em alguns vazios. Logo, a seção dos vazios é reduzida, justificando a pouca efetividade da limpeza do material, como apresentado na Figura 57.

Figura 57 - Efeito nos grãos de sedimento: a) antes, b) durante e c) após a limpeza

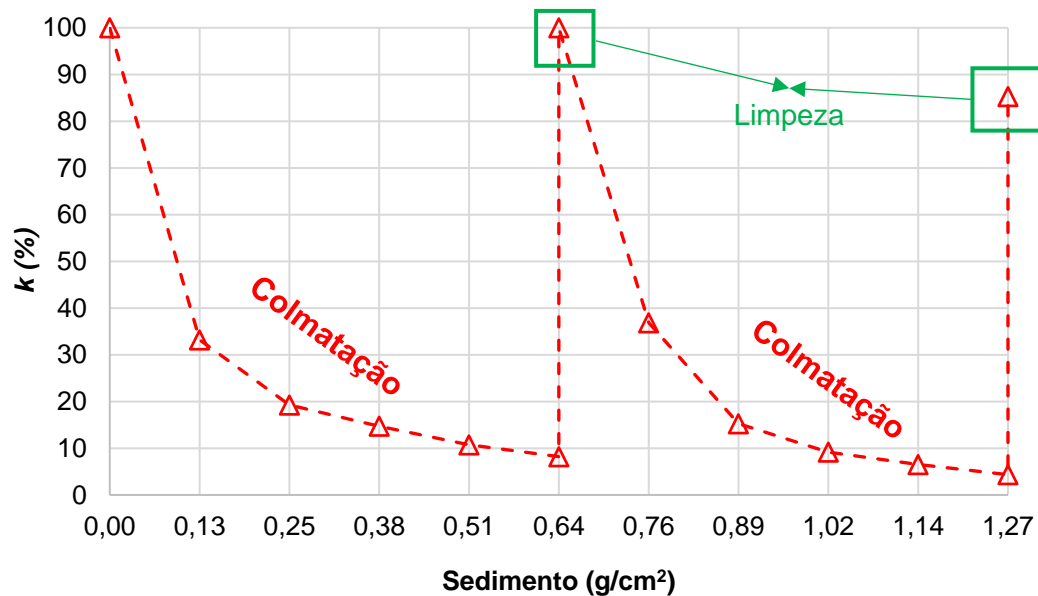


Fonte: O próprio autor

#### 4.6.1.2 Argila

Os resultados para a avaliação da periodicidade média de limpeza para o sedimento de argila são apresentados na Figura 58.

Figura 58 - Resultados de periodicidade média para o sedimento de argila



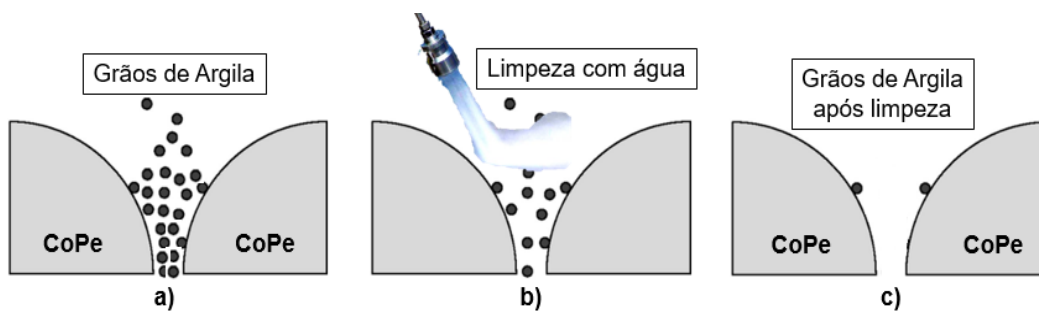
Fonte: O próprio autor

Após a adição das primeiras 5 frações (5/10) do sedimento, houve uma redução de 90% da permeabilidade inicial (Figura 58), o que é justificado pelo

tipo de sedimento utilizado e confirmado pelas campanhas experimentais 2 e 3. Após a limpeza com água (hidro lavagem), foi recuperado 100% da permeabilidade. Na segunda adição dos 5/10 de sedimento, houve uma redução da permeabilidade de 98%. Após a segunda limpeza, houve uma recuperação de 88% da permeabilidade.

A taxa de recuperação de permeabilidade é justificada pelo método de limpeza utilizado e pelo tamanho dos grãos de sedimento (argila). Desse modo, a pressão da água facilitou a desagregação dos grumos de argila formados na superfície das placas durante o processo de colmatação. Assim, uma parte dos sedimentos foi expulsa pela água, e outra parte forçada a deslocar-se para as camadas inferiores pela pressão da água. Como o diâmetro dos vazios do CoPe é representativamente maior do que o tamanho dos grãos de argila, isso facilitou o processo de limpeza (Figura 59).

**Figura 59 - Efeito nos grãos de sedimento: a) antes, b) durante e c) após a limpeza**

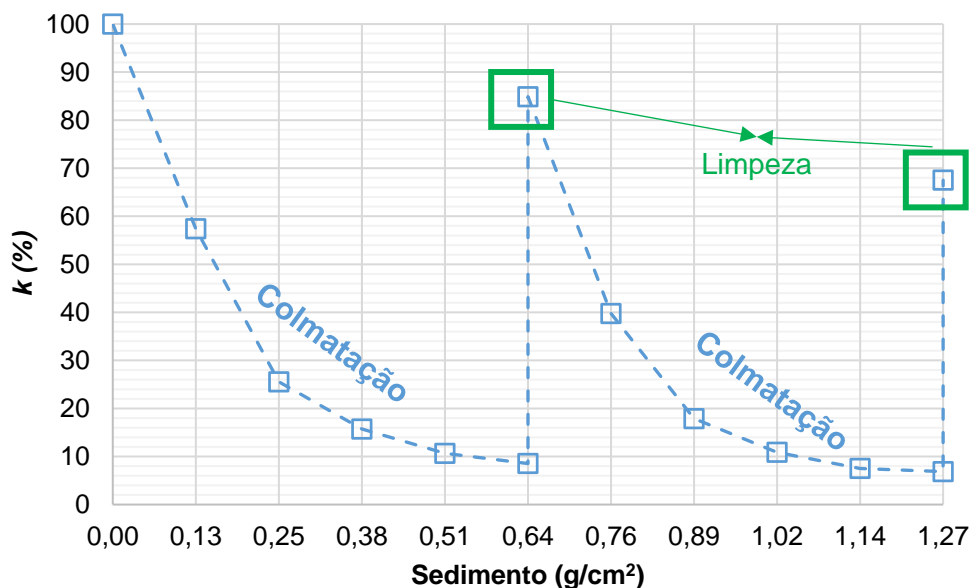


Fonte: O próprio autor

#### 4.6.1.3 Combinação

Os resultados para a avaliação da periodicidade média de limpeza para a combinação de sedimentos são apresentados na Figura 60.

**Figura 60 - Resultados de periodicidade média para a combinação de sedimentos**

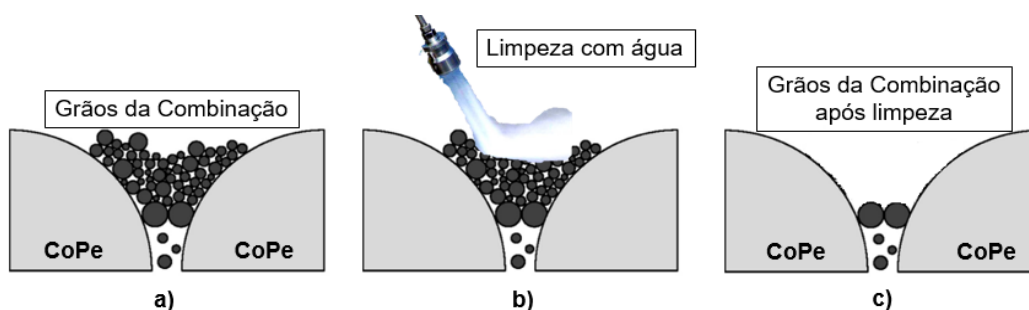


Fonte: O próprio autor

Após a adição dos 5/10 da combinação de sedimentos, houve uma redução na permeabilidade de 90% da inicial (Figura 60). Tal redução é explicada pela granulometria dos grãos de sedimento utilizados, pela quantidade dos mesmos e confirmada pela campanha experimental 3. Após a primeira limpeza, houve uma recuperação de permeabilidade de 83%. Na recolatação do CoPe com os 5/10 restantes, a redução de permeabilidade foi de 92% e, na segunda limpeza, o material recuperou quase 70% da permeabilidade inicial.

Na combinação de sedimentos, a recuperação foi aceitável, uma vez que o fenômeno da colmatação estava mais controlado pelo sedimento fino (argila). Após a limpeza com água, esse foi praticamente eliminado, alguns grãos de areia também conseguiram ser expulsos e outros ficaram retidos entre os vazios do CoPe, devido ao seu tamanho e a pressão da água (Figura 61).

Figura 61 - Efeito nos grãos de sedimento: a) antes, b) durante e c) após a limpeza



Fonte: O próprio autor

#### 4.6.1.3 Considerações da periodicidade média

Foi demonstrado que na limpeza dos sedimentos ocorre o contrário do fenômeno da colmatção, isto é, os grãos de sedimento fino (argila) são os que mais colmatam o material. Em contrapartida, após a limpeza, é mais fácil recuperar a permeabilidade. Devido a sua natureza plástica e o tamanho dos grãos, a água consegue romper as forças de atração entre as partículas e facilitar a sua remoção.

Por outro lado, na colmatção, os grãos de areia são os que menos prejudicam o CoPe. No entanto, na limpeza não é fácil sua remoção, pois uma parte deles consegue ser expulsa com ar, mas os grãos maiores ficam retidos nos vazios, diminuindo a seção dos vazios e dificultando, assim, a recuperação da permeabilidade.

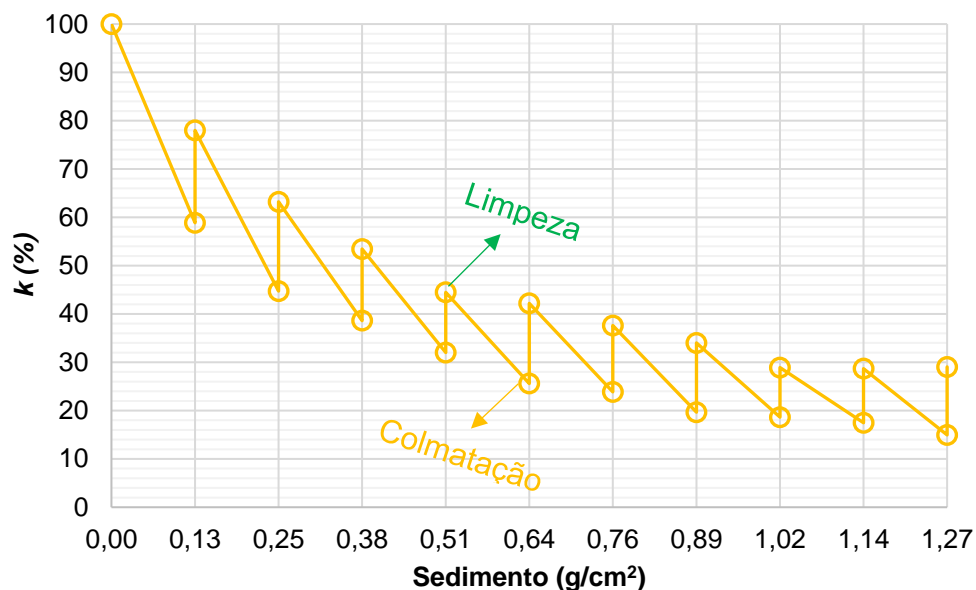
#### 4.6.2 Periodicidade Alta

Foram avaliadas duas placas colmatadas (velocidade crítica de colmatção) com areia, argila e a combinação de sedimentos no CE 2 (Figura 34), construído do lado ao laboratório de materiais da UEL. No eixo vertical, encontra-se a variação da permeabilidade ( $k$  (%)) e no eixo horizontal, a MSA ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ).

##### 4.6.2.1 Areia

Os resultados para a periodicidade de limpeza alta com o sedimento e areia encontram-se na Figura 62.

**Figura 62 - Resultados de periodicidade alta para o sedimento de areia**



**Fonte:** O próprio autor

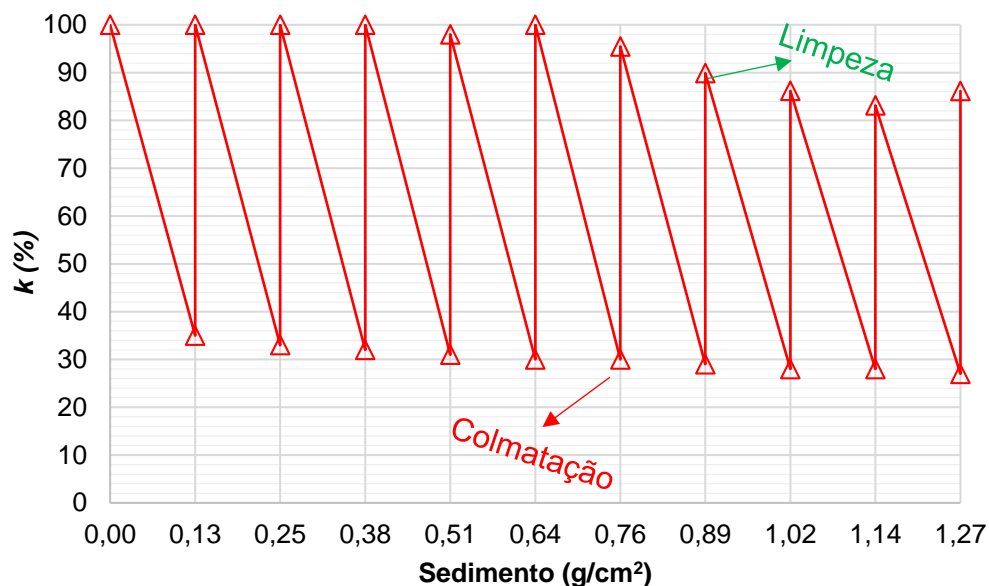
Desse modo, é possível constatar, pela Figura 62, que em cada adição de sedimento houve perda residual de permeabilidade acumulada (perda de permeabilidade após da limpeza da adição de cada fração de sedimento). Assim, o efeito de perda residual da permeabilidade foi crítico, chegando em uma permeabilidade mínima de aproximadamente 30%. Com a periodicidade alta, não foi possível recuperar de forma efetiva a permeabilidade inicial do material, e a tendência da recuperação da permeabilidade é análoga à tendência da colmatação do material.

Portanto, a baixa recuperação de permeabilidade está associada ao tipo de sedimento utilizado, sua granulometria, e o procedimento de limpeza escolhido. Em cada processo de limpeza, uma parte do sedimento conseguia ser expulso pelos vazios, mas outra parte acabava se fixando ou penetrando ainda mais no material, o que explica a pouca eficiência da limpeza.

#### 4.6.2.2 Argila

Os resultados para a avaliação da periodicidade alta de limpeza para o sedimento de argila são apresentados na Figura 63.

**Figura 63 - Resultados de periodicidade alta para o sedimento de argila**



**Fonte:** O próprio autor

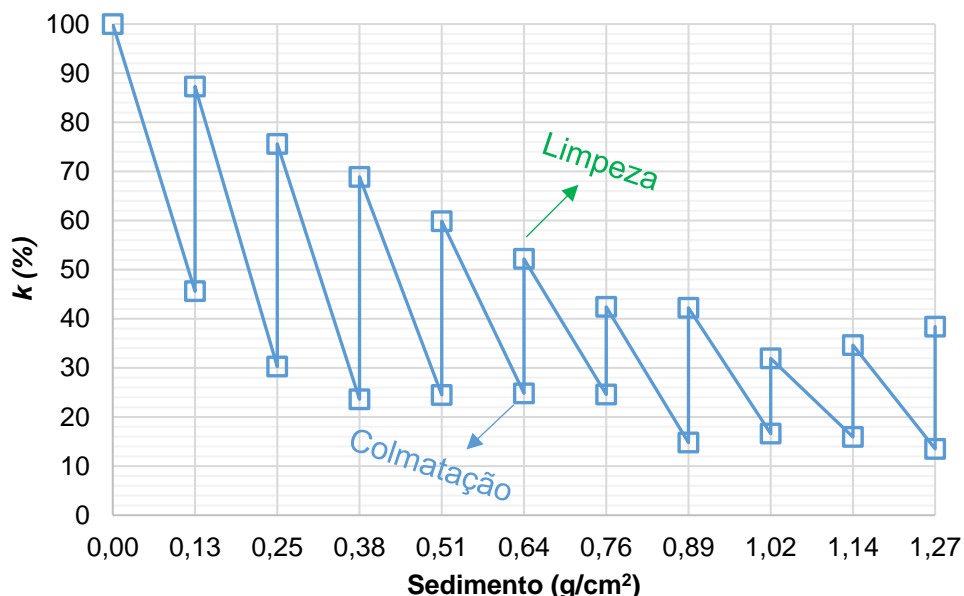
Dessa forma, é possível concluir que uma periodicidade alta de limpeza garante uma redução mínima da permeabilidade do CoPe. Na Figura 63, observa-se que no final da adição de sedimento também existiu uma perda residual de permeabilidade acumulada, chegando em uma permeabilidade mínima de 85% da inicial. Também foi verificado, que mantendo uma periodicidade de limpeza alta, a perda de permeabilidade é muito baixa (15%), visto que o valor final da mesma foi de aproximadamente 85% da inicial.

Essa recuperação elevada da permeabilidade pode ser explicada pelo fato da argila ser um solo coesivo, portanto ao entrar em contato com a água, as partículas tendem a se aglomerar (formação de grumos) e entupir os vazios superficiais do CoPe. A água retirou as partículas da superfície e possibilitou a liberação dos vazios interconectados.

#### 4.6.2.3 *Combinação*

Os resultados para a periodicidade de limpeza alta com a combinação de sedimentos encontram-se na Figura 64.

**Figura 64 - Resultados de periodicidade alta para o sedimento de combinação**



**Fonte:** O próprio autor

Observando a Figura 64, é correto afirmar que, de forma análoga ao sedimento de areia, a recuperação da permeabilidade não foi tão efetiva. Isso é explicado considerando que na limpeza do material os sedimentos mais grossos governam completamente o processo. Como a periodicidade alta não consegue recuperar de forma efetiva a permeabilidade inicial do material, a tendência da recuperação da permeabilidade é análoga a da colmatação do material.

Nesse caso, a água conseguiu limpar os grãos de sedimento fino, porém com os grãos de areia não foi tão eficiente, adentrando esses nos vazios internos e/ou fixando-os nos vazios e entupindo de forma efetiva o material. Esses resultados demonstram que a manutenção com periodicidade elevada consegue manter a permeabilidade o mais próxima da permeabilidade inicial podendo aumentar a durabilidade do material (Hu *et al.*, 2020).

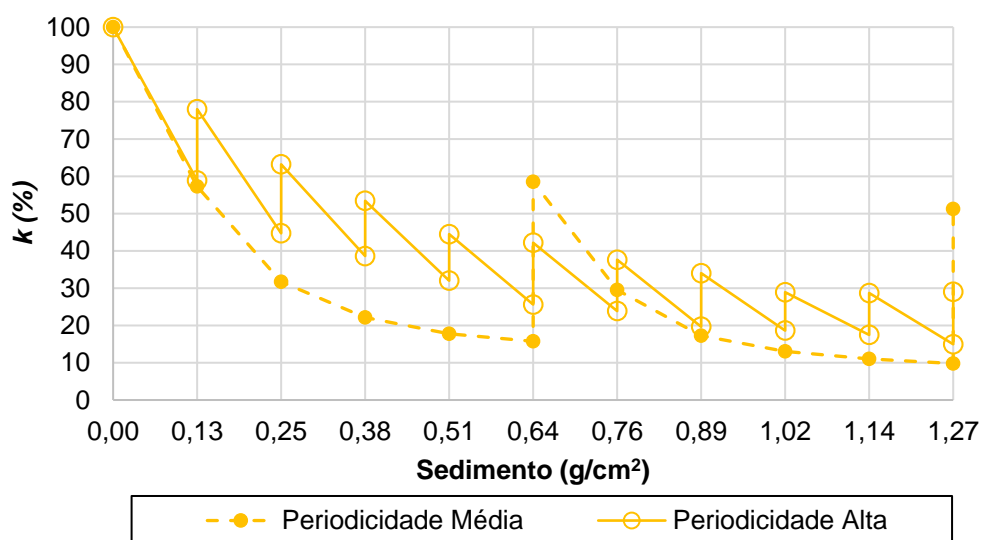
#### 4.6.3 Comparação das Periodicidades de Limpeza

Com a intenção de verificar a periodicidade de limpeza adequada para o CoPe segundo o tipo de sedimento, foram comparados os resultados encontrados para a periodicidade média e a periodicidade alta.

#### 4.6.3.1 *Areia*

A comparação de resultados para o sedimento de areia é apresentada na Figura 65.

**Figura 65 - Comparação das periodicidades de limpeza do sedimento de areia**



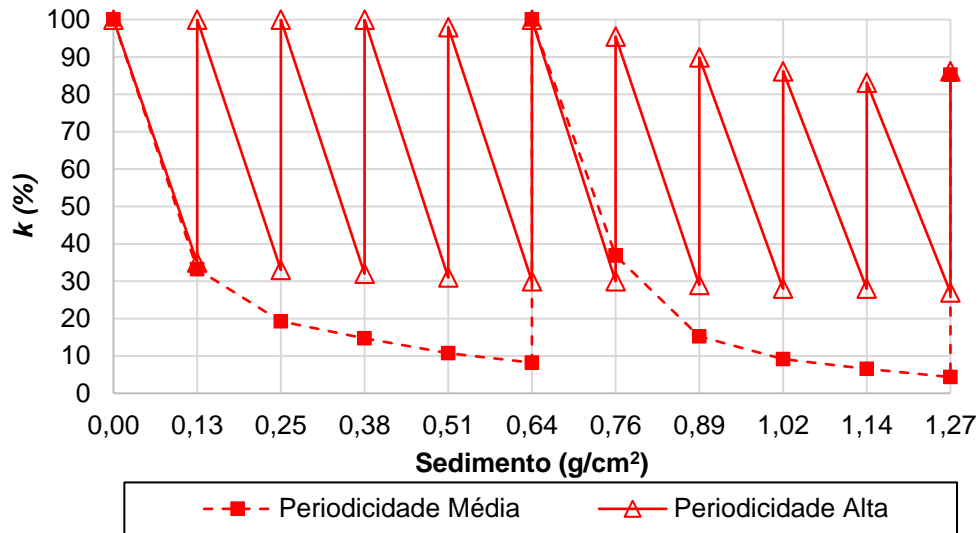
**Fonte:** O próprio autor

No caso do sedimento de areia, os resultados demonstraram que a periodicidade alta mostrou-se menos efetiva do que a periodicidade média, sendo essa última a mais recomendada para esse tipo de sedimento, isto pode ser explicado pelo efeito de obstrução dos vazios com cada limpeza realizada, mas as duas periodicidades mostraram-se eficientes em termos de restauração da permeabilidade.

#### 4.6.3.2 *Argila*

A comparação de resultados para o sedimento de argila é apresentada na Figura 66.

**Figura 66 - Comparação das periodicidades de limpeza do sedimento de argila**



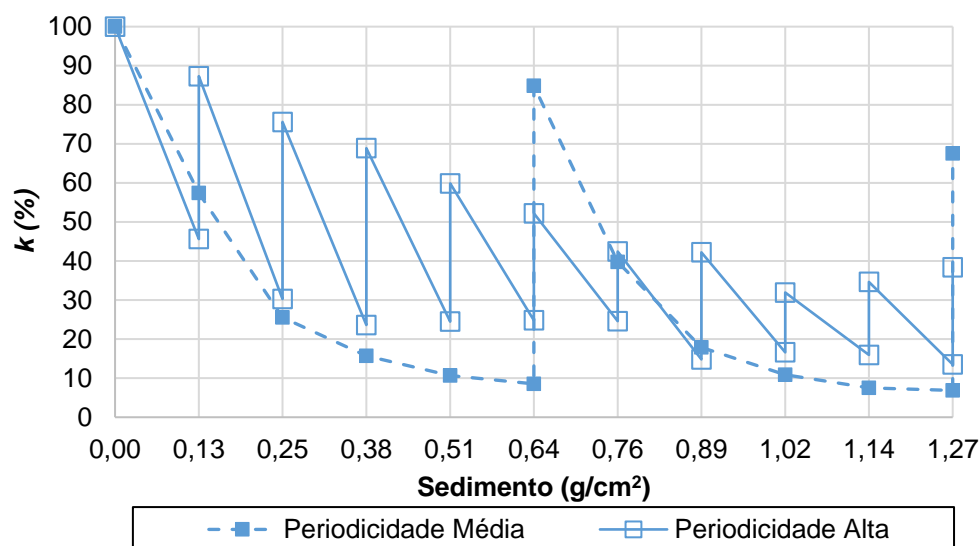
Fonte: O próprio autor

No caso do sedimento de argila, constata-se que pelo método de limpeza utilizado as duas periodicidades trabalhadas são altamente efetivas, pois ambas conseguem recuperar quase 85% da permeabilidade inicial do material. Contudo, foi escolhida a periodicidade média, visto que essa permite recuperar de forma efetiva a permeabilidade do material, mesmo com uma grande acumulação de sedimento.

#### 4.6.3.3 Combinação

A comparação de resultados para a combinação de sedimentos é apresentada na Figura 67.

**Figura 67 - Comparação das periodicidades de limpeza da combinação de sedimentos**



Fonte: O próprio autor

No caso da combinação de sedimentos, a comparação é análoga ao sedimento de areia, sendo a periodicidade alta a menos efetiva e a periodicidade média a recomendada. Na periodicidade alta também houve o efeito de obstrução dos vazios após cada limpeza o que levou a uma menor recuperação de permeabilidade.

Pode se concluir então que para as duas periodicidades estudadas, a periodicidade média apresentou os melhores resultados em termos de recuperação da permeabilidade para os 3 tipos de sedimentos utilizados. A periodicidade alta é efetiva porém, a cada limpeza existe uma perda residual de permeabilidade acumulada que acaba limitando a recuperação de permeabilidade, tal fenômeno é independente do procedimento de limpeza utilizado, esse se apresentou tanto para a limpeza com ar (sedimento de areia) quando para a limpeza com água (argila e combinação).

#### 4.7 MODELO DE RECUPERAÇÃO DE PERMEABILIDADE

Com os resultados encontrados na Quinta Campanha experimental (periodicidade média), foi analisado o potencial de remoção de sedimento de cada método de limpeza e a nova tendência de perda da permeabilidade após a limpeza.

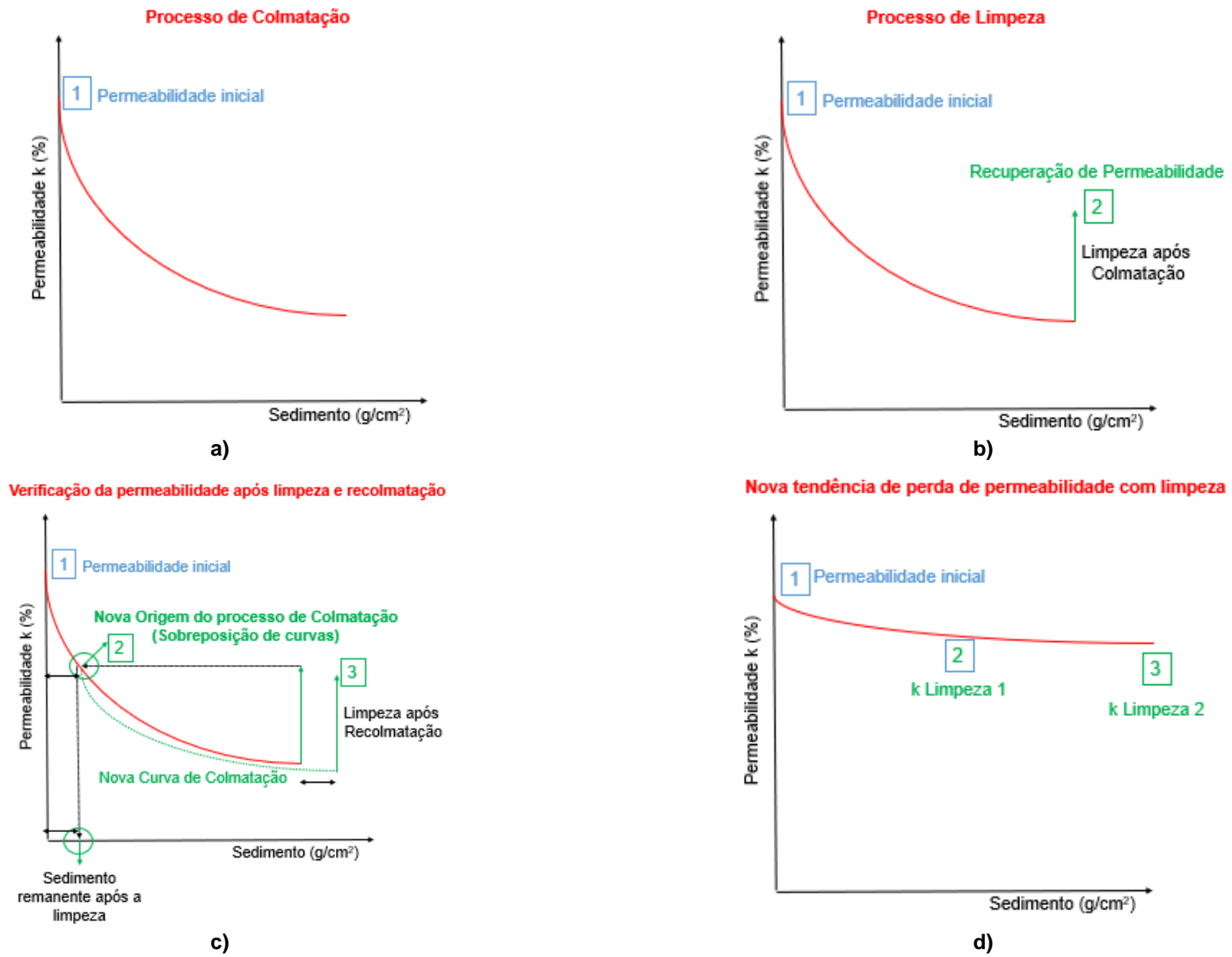
Primeiramente, foram plotados os resultados da avaliação da periodicidade de manutenção (periodicidade média), com esses dados foi utilizada a Equação 36 (modelo analítico de colmatação) para plotar as curvas de perda de permeabilidade e analisar o potencial de colmatação “c” de potencial de colmatação com limpeza. Na plotagem do gráfico (ábaco de recuperação) foram identificadas duas etapas: a primeira sendo a colmatação inicial (Colmatação 1) e, a seguir, a limpeza 1 do CoPe, e a recuperação de permeabilidade como ilustrado na Figura 68a e 68b. Após isso, a segunda etapa foi a recolmatação do CoPe e finalmente, a limpeza 2 (Figura 68c).

Depois da limpeza, ocorrerá uma recuperação de permeabilidade, por tanto a curva de recolmatação não terá o mesmo ponto de origem (100%) e sim o valor de recuperação de permeabilidade (ponto 2 Figura 68c). Graficamente será determinada a quantidade de sedimento correspondente a esse valor de permeabilidade.

A partir desse ponto, serão plotados os resultados correspondentes à recolmatação do material (Figura 68c). Para facilitar o entendimento do processo de recuperação de permeabilidade, a colmatação e recolmatação podem ser sobrepostas em um mesmo gráfico: a primeira curva exibe a colmatação inicial, portanto, a permeabilidade inicial sempre será de 100%, e se irá perdendo à medida que for acrescentada cada fração de sedimento (Figura 68d).

Finalmente, foi realizada a curva de nova tendência com três pontos: a permeabilidade inicial, a limpeza 1 e a limpeza 2, que explica o ganho de vida útil após a limpeza do material.

Figura 68 - Ábaco de Recuperação de Permeabilidade

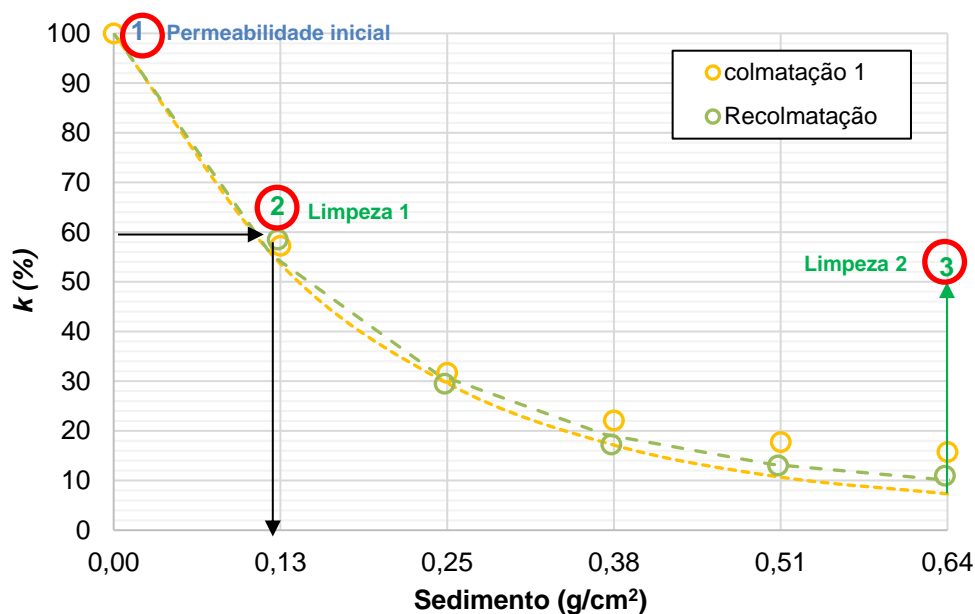


## 4.7.1 Modelo de Periodicidade Média

### 4.7.1.1 Areia

Na Figura 69, são exibidos os resultados de periodicidade de limpeza média para o sedimento de areia após aplicação do modelo de colmatação, sendo os pontos os resultados experimentais e as linhas a regressão não linear aplicada (Equação 36).

**Figura 69 - Modelo aplicado aos resultados de periodicidade da combinação de sedimentos**

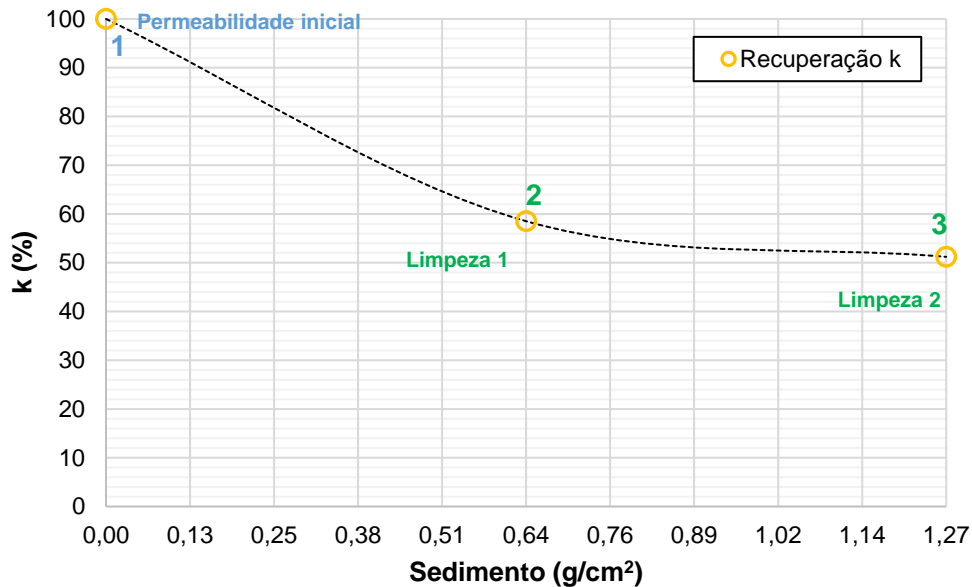


Fonte: O próprio autor

Após a aplicação do modelo de colmatação, a primeira limpeza muda a origem da curva ao ponto de 60% aproximadamente, demonstrando que a limpeza aplicada consegue remover aproximadamente 0,5g/cm<sup>2</sup> do sedimento. Posteriormente, na segunda limpeza, a origem da curva passa para o ponto de 50% aproximadamente, removendo também grande parte do sedimento e mantendo a mesma tendência da curva de perda da permeabilidade. A nova tendência de perda de permeabilidade para uma periodicidade média pode se visualizada na Figura 70,

onde os pontos mostram os resultados experimentais e a linha a regressão não linear aplicada (Equação 36).

**Figura 70 - Nova tendência de degradação de permeabilidade para a combinação de sedimentos**



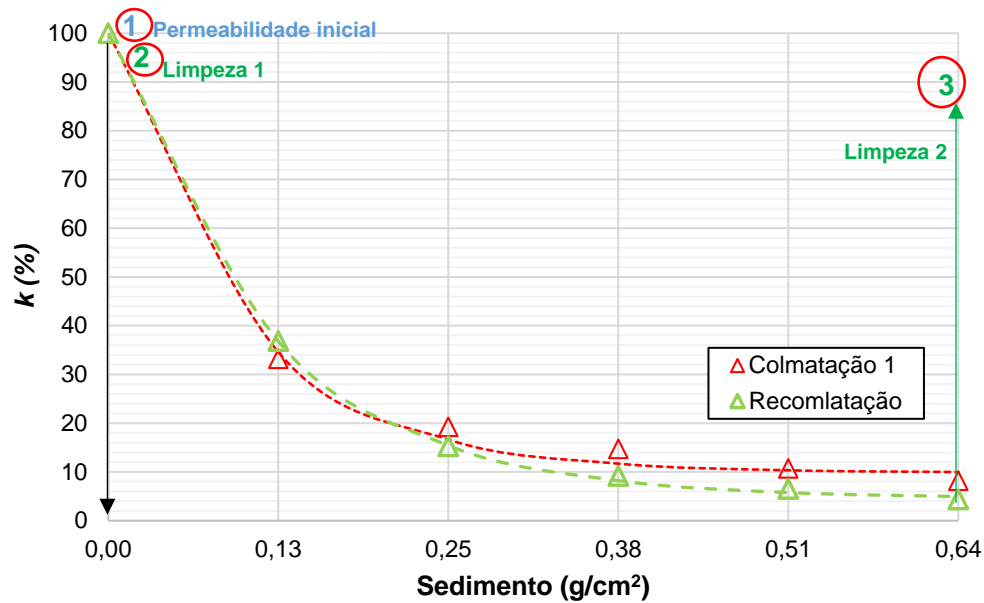
Fonte: O próprio autor

A nova tendência da perda da permeabilidade expõe que, depois de realizada a manutenção, o material perde somente 50% da sua permeabilidade após a adição do total do sedimento (Figura 70), aumentando a durabilidade do material de forma representativa.

#### 4.7.1.2 Argila

Na Figura 71, são exibidos os resultados de periodicidade de limpeza média após a aplicação do modelo de colmatção, sendo os pontos os resultados experimentais e as linhas a regressão não linear aplicada (Equação 36).

Figura 71 - Modelo aplicado aos resultados de periodicidade do sedimento de argila

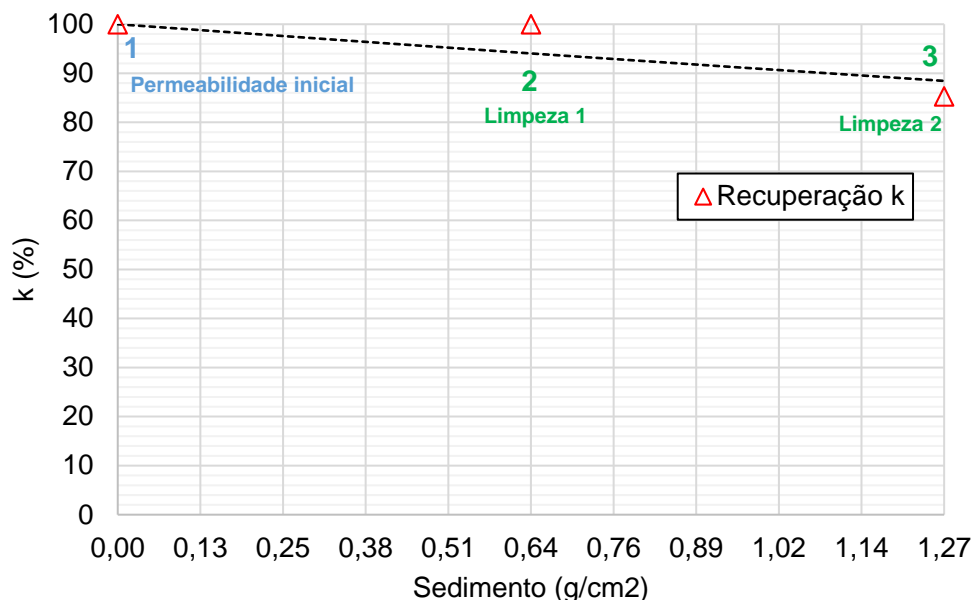


Fonte: O próprio autor

Após a aplicação do modelo de colmatação, é possível observar que a periodicidade média na primeira limpeza recupera quase 100% da permeabilidade do material, isto quer dizer que, é possível remover quase todo o sedimento dos vazios do material. Por outro lado, na segunda limpeza, a origem muda para 85% (ponto 2 - Figura 71), eliminando grande parte do sedimento e mantendo a mesma tendência da curva de degradação de permeabilidade.

A nova tendência de degradação de permeabilidade pode ser construída considerando os pontos de recuperação de permeabilidade após cada limpeza, como exibido na Figura 72, onde os pontos mostram os resultados experimentais e a linha a regressão não linear aplicada (Equação 36).

Figura 72 - Nova tendência de degradação de permeabilidade para o sedimento de argila



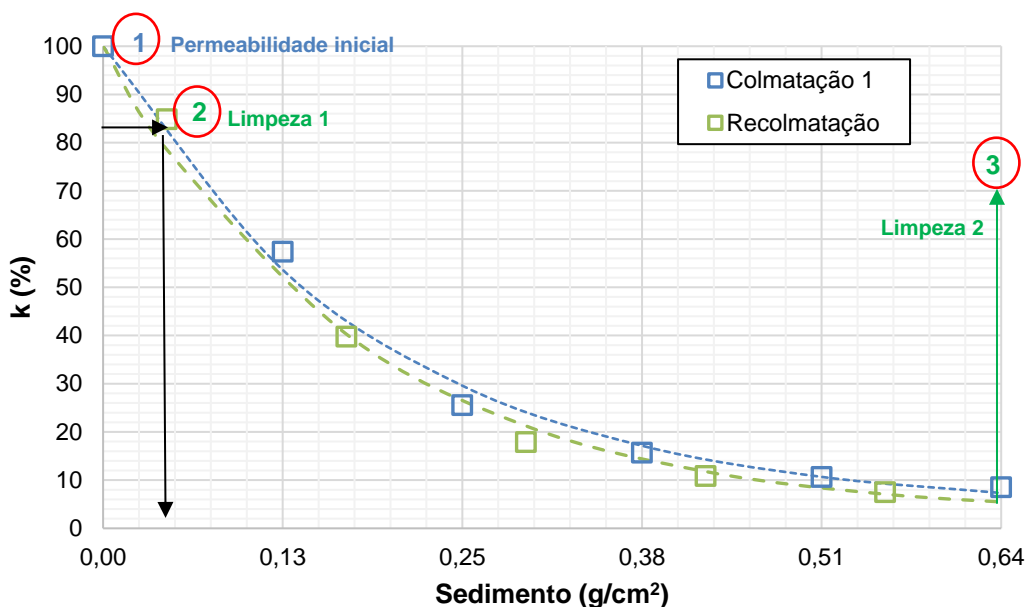
Fonte: O próprio autor

A nova tendência da perda da permeabilidade expõe que, depois de realizada a manutenção, o material perde somente 10% da sua permeabilidade após a adição do total do sedimento (Figura 72), aumentando a durabilidade do material de forma representativa.

#### 4.7.1.3 Combinação

Na Figura 73, são exibidos os resultados de periodicidade de limpeza média para areia após aplicação do modelo de colmatação (Equação 36). Os pontos representam os dados experimentais e as linhas as curvas de regressão não linear após a aplicação da Equação 36.

Figura 73 - Modelo aplicado aos resultados de periodicidade do sedimento de areia

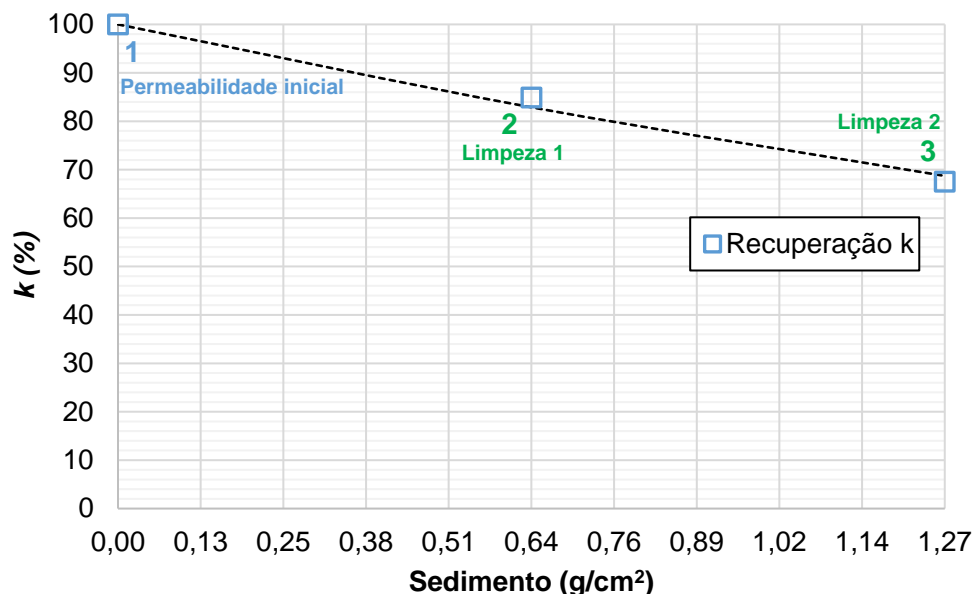


Fonte: O próprio autor

Após a aplicação do modelo de colmatação, a primeira limpeza (ponto 2) muda a origem da curva ao ponto de 83% aproximadamente, demonstrando que a limpeza aplicada remove por volta de 0,6 g/cm<sup>2</sup> do sedimento. Posteriormente, na segunda limpeza, a origem da curva passa para o ponto de 50% aproximadamente (ponto 3), removendo também grande parte do sedimento e mantendo a mesma tendência da curva de degradação da permeabilidade.

A nova tendência de degradação de permeabilidade pode ser construída considerando os pontos de recuperação de permeabilidade após cada limpeza, como exibido na Figura 74, onde os pontos mostram os resultados experimentais e a linha a regressão não linear aplicada (Equação 36).

Figura 74 - Nova tendência de degradação de permeabilidade para o sedimento de areia



Fonte: O próprio autor

A nova tendência da perda da permeabilidade expõe que, depois de realizada a manutenção, o material perde somente 30% da sua permeabilidade após a adição do total do sedimento (Figura 74), aumentando a durabilidade do material de forma representativa.

Na Tabela 14, são expostos os resultados da regressão não linear, utilizando a Equação 36 com os resultados de periodicidade de limpeza.

Tabela 14 - Coeficientes c quinta campanha

Condição	Sedimento	$c$ (cm <sup>2</sup> /g)	$k_{\infty}$ (mm/s)	R <sup>2</sup>
Colmatação	Areia	5,97	1,96E+02	0,99
	Argila	10,50	8,10E+01	0,99
	Combinação	10,88	8,80E+01	0,99
Limpeza com periodicidade média	Areia	2,73	1,96E+02	0,99
	Argila	0,10	8,10E+01	0,99
	Combinação	0,30	8,80E+01	0,99
Limpeza com periodicidade alta	Areia	2,67	2,64E-01	0,99
	Argila	0,11	1,20E-04	0,99

Condição	Sedimento	$c$ ( $cm^2/g$ )	$k_{\infty}$ (mm/s)	$R^2$
	Combinação	0,14	1,92E-01	0,99

Fonte: O próprio autor

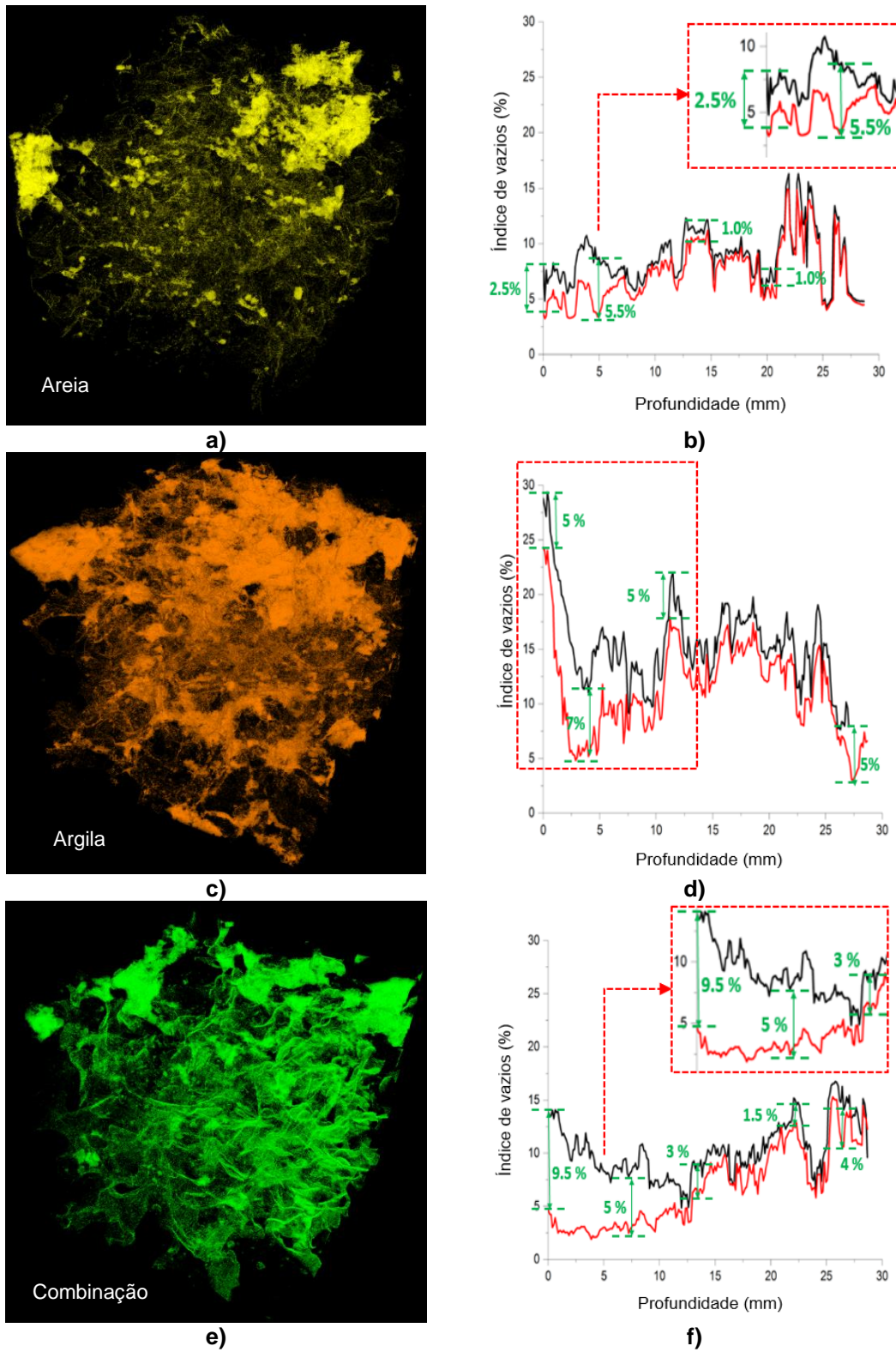
O coeficiente “ $c$ ” (potencial de colmatção) varia de forma representativa independente da periodicidade utilizada para recuperar a permeabilidade do CoPe, mostrando que o potencial de colmatção pode ser reduzido mantendo no mínimo uma periodicidade média. Nesse sentido a periodicidade média conseguiu diminuir mais o “ $c$ ”, aproximadamente 50% para o sedimento de areia, 99% para argila e 97% para a combinação de sedimentos. Portanto em termos de recuperação de permeabilidade é mais efetiva a periodicidade média.

#### 4.8 MICROTOMOGRAFIA 3D – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS SEDIMENTOS

Após os escaneamentos, o processo de reconstrução das imagens do ensaio de microtomografia-3D foi feito através do software NRecon. As imagens obtidas nas fases 1 e 2 foram sobrepostas no software DataViewer, sendo possível identificar, separar e salvar as imagens dos sedimentos. A análise quantitativa dos dados foi feita no software CTan e as imagens 3D no software CTVox. Esses softwares permitem analisar o mesmo volume de interesse em diferentes fases.

A Figura 75 mostra os resultados para a análise de microtomografia 3D no CoPe colmatado. Primeiramente, foram mostrados exemplos da distribuição espacial de sedimentos no CoPe colmatado com os sedimentos utilizados (75a para areia, 75c para argila e, finalmente, 75e para a combinação). A variação do índice de vazios ( $n=3$ ) na profundidade da análise também é mostrada na Figura 75 (75b para areia, 75d para argila e, finalmente, 75f para a combinação), onde as linhas pretas mostram o CoPe sem sedimento, e as vermelhas o CoPe com sedimento.

Figura 75 - Resultados Microtomografia-3D (VOI size – 35x35x30 mm)



Fonte: O próprio autor

No caso de sedimentos de areia (Figura 75a e b), houve um acúmulo de material no primeiro centímetro de profundidade, levando a uma redução nos vazios da superfície de 2,5% a 5,5%. Além disso, houve uma pequena redução no índice de vazios (1%) em profundidades superiores a 15 mm, alguns grãos de areia mais fina alojados nos poros internos do CoPe.

Como mostrado na Figura 75c, houve um grande acúmulo de sedimentos de argila na estrutura de vazios internos do CoPe. O sedimento argiloso acumulou-se principalmente nos poros da superfície do material, nas profundidades de 0 a 15 mm (Figura 75c e d), diminuindo o índice de vazios de 5% a 7% na profundidade analisada. Essa acumulação superficial é explicada pelas propriedades plásticas da argila, quando entra em contato com a água, as forças de van der Waals mantêm os sedimentos unidos, formando grumos de material que preenchem parcial ou totalmente os vazios, o que explica as altas reduções de permeabilidade durante o ensaio de colmatação.

Por fim, no caso da combinação de sedimentos (Figura 75e e f), houve acúmulo nos três primeiros centímetros de profundidade, na parte superficial (0-15 mm) associada à areia e na parte mais profunda à argila, sendo também o sedimento que mais diminuiu a porosidade superficial do material de forma instantânea (9,5%).

Esses resultados também suportam os resultados da variação da permeabilidade em função da MSA de sedimentos (Segunda e Terceira Campanha Experimental), onde os sedimentos de argila e a combinação foram os mais prejudiciais para o material, o que é explicado pelo alto acúmulo espacial na rede de vazios internos do CoPe.

Por outro lado, os resultados também justificam a efetividade dos procedimentos de limpeza utilizados, a hidrolavagem e a limpeza com ar (compressor) foram altamente efetivos devido a que a maior acumulação de sedimentos foi dada nos primeiros 30 mm de profundidade do material.

#### 4.9 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DO LOCAL DE UTILIZAÇÃO DO CoPe (EROSÃO)

Nas cinco Campanhas Experimentais realizadas foi estudado o fenômeno da colmatção no CoPe de forma independente (corpos de prova) e no sistema de pavimento permeável (campos experimentais), a perda de permeabilidade foi avaliada em função do tipo de sedimento, e da MSA que tem potencial de colmatar o material, e finalmente três procedimentos de limpeza para recuperar ao máximo sua permeabilidade inicial assim como sua periodicidade.

Para conseguir realizar uma estimativa da vida útil do CoPe foi necessário avaliar o potencial de colmatção do local onde o material será utilizado, o que pode ser feito conhecendo as condições do local (tipo de sedimento, condições do entorno, regime de chuvas, etc.) e aplicando modelos para determinar a erosão do solo descritos na revisão bibliográfica. Isso permitirá determinar quanto sedimento pode chegar ao CoPe por ano, o que possibilita a determinação de qual a vida útil do pavimento para um determinado local.

Nesta tese foi escolhida a Equação Universal de Perda do Solo USLE (Equação 9) para determinar o potencial de erosão em função da chuva. Esta equação tem sido amplamente estudada e aplicada na mecânica da erosão sendo uma alternativa viável quando conhecidas grande parte das suas variáveis.

##### 4.9.1 Equação Universal de Erosão do Solo (USLE)

Para estimar a quantidade de sedimento que pode ser carregado pelo escoamento superficial (erosão do solo), foi aplicada a Equação Universal de Perda de Solo USLE (Equação 9), a qual considera: a precipitação total mensal, o tipo de sedimento, as características de declividade, a distância entre os pontos analisados e as medidas de conservação do solo para evitar a erosão.

A USLE foi aplicada considerando duas condições de erosão do solo, em que a única variação foi a declividade do terreno. Sendo assim, a primeira condição considera uma declividade baixa (1%) e a segunda condição considera

uma declividade elevada (6% que foi a declividade de campo), com isso o fator LS da Equação 9 será a única variável do cálculo.

$$A = R * K * LS * C * P \quad (9)$$

Onde:

- $A$  = Representa a estimativa de perda média anual de solo em determinada área, em condições específicas de uso e ocupação do solo (t/ha.ano);
- $R$  = Erosividade da chuva calculada em função do regime de chuvas da região (Londrina);
- $K$  = Erodibilidade do solo (valor tomado da literatura);
- $L$  = Comprimento de rampa verificado segundo a topografia do local;
- $S$  = Declividade de rampa verificado segundo a topografia do local;
- $C$  = Uso e manejo do solo, valor tomado da literatura;
- $P$  = Práticas conservacionistas, valor tomado da literatura.

Para o cálculo do fator de erosividade da chuva  $R$ , foi utilizada a correlação proposta por Da Silva (2004) no item 2.5.2.1 da revisão e o regime de chuvas da cidade de Londrina (Dados SIMEPAR).

$$R = 68.73 * \left( \frac{Mx^2}{P} \right)^{0.841} \quad (16)$$

Onde:

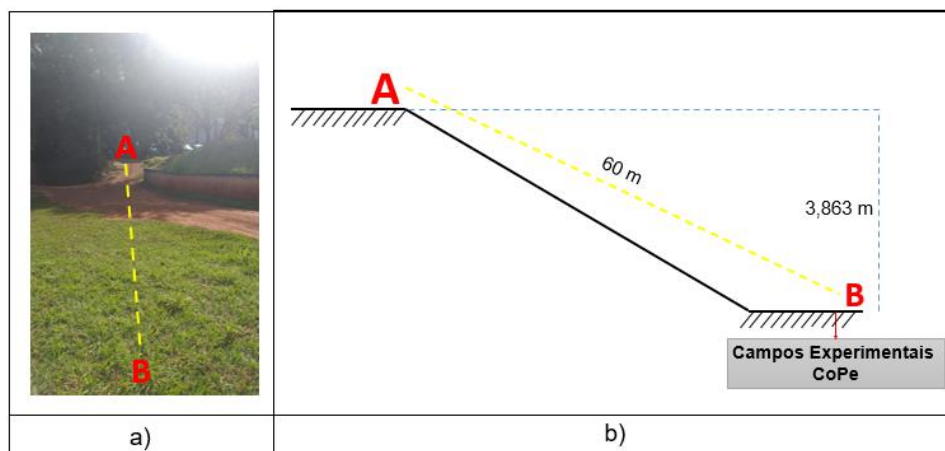
- $Mx$  = chuva média mensal (mm);
- $P$  = média de precipitação por ano (mm).

O parâmetro  $K$  (0,017) foi determinado utilizando valores tabelados da revisão (Quadro 8 da revisão bibliográfica) sugeridos para o tipo de solo do local. Os parâmetros de declividade, distância foram determinados em campo ( $LS$ ).

Os pontos analisados para aplicar a USLE são apresentados na Figura 76a (Localização Campos Experimentais). Para calcular a diferença de nível

entre os pontos “A” e “B” foi utilizado um nível ótico automático e uma mira, sendo o nível colocado em um tripé de alumínio em um ponto intermédio aos pontos em estudo e verificada a declividade e a distância entre os pontos, como explicado na Figura 76b.

**Figura 76 - Distância entre os pontos e a diferença de altura**



**Fonte:** O próprio autor

Como visualizado na Figura 76b, a distância entre os pontos foi de 60m e a diferença de altura de 3,863m. Logo, para calcular a declividade foi utilizada a Equação 38 e 39.

$$DN = 4,61 - 0,747 = 3,863 \text{ m} \quad (38)$$

$$\text{Declividade} = \frac{DN}{DH} * 100 = \frac{3,863 \text{ m}}{60 \text{ m}} * 100 = 6,44 \% \quad (39)$$

Utilizando o Quadro 9 da revisão e tendo como dados de entrada as duas condições de periodicidade de 1% e 6,44% foram interpolados os valores de *LS* do Quadro 10 da revisão, obtendo os resultados de 0,12 e 1,1668 respectivamente. Finalmente, os parâmetros de uso e conservação do solo ( $CP=0,1$ ) foram tomados da literatura (Quadro 10 revisão bibliográfica).

Com todas as variáveis da USLE definidas, e os dados da chuva de Londrina para o ano de 2018 (dados SIMEPAR), foi aplicada a equação USLE e calculada a erosão do solo nas duas condições de avaliação (declividades de 1% e 6,44%), esses resultados são expostos na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados da aplicação da USLE no ano de 2018 - Londrina

Mês	Chuva (mm/mês)	Argila – 1a Condição	Argila – 2a Condição	Areia – 1a Condição	Areia – 2a Condição	Combinação – 1a Condição	Combinação – 2a Condição
		A (g/cm <sup>2</sup> .ano)	A (g/cm <sup>2</sup> .ano)	A (g/cm <sup>2</sup> .ano)	A (g/cm <sup>2</sup> .ano)	A (g/cm <sup>2</sup> .ano)	A (g/cm <sup>2</sup> .ano)
jan-18	397	0,0071	0,0687	0,0029	0,0283	0,0050	0,0485
feb-18	97,2	0,0007	0,0064	0,0003	0,0027	0,0005	0,0045
mar-18	218,6	0,0026	0,0252	0,0011	0,0104	0,0018	0,0178
abr-18	10,8	0,0000	0,0002	0,0000	0,0001	0,0000	0,0001
mai-18	11,1	0,0000	0,0002	0,0000	0,0001	0,0000	0,0001
jun-18	11,4	0,0000	0,0002	0,0000	0,0001	0,0000	0,0001
jul-18	11,9	0,0000	0,0002	0,0000	0,0001	0,0000	0,0001
ago-18	205,8	0,0023	0,0227	0,0010	0,0094	0,0017	0,0161
set-18	109,2	0,0008	0,0078	0,0003	0,0032	0,0006	0,0055
out-18	264,2	0,0036	0,0346	0,0015	0,0143	0,0025	0,0244
nov-18	103,2	0,0007	0,0071	0,0003	0,0029	0,0005	0,0050
dez-18	51,2	0,0002	0,0022	0,0001	0,0009	0,0002	0,0015
	Σ	<b>0,0180</b>	<b>0,1755</b>	<b>0,0074</b>	<b>0,0722</b>	<b>0,0127</b>	<b>0,1238</b>

Fonte: O próprio Autor

Como mostrado na Tabela 15 os totais de sedimento produzido por ano considerando a primeira condição (1% de declividade) foi de 0,0180 g/cm<sup>2</sup>.ano para argila, de 0,0074 g/cm<sup>2</sup>.ano para areia e de 0,0127 g/cm<sup>2</sup>.ano para a combinação de sedimentos, em contrapartida para a segunda condição (6,44% de declividade) de declividade avaliada (declividade campos experimentais) foi de 0,1755 g/cm<sup>2</sup>.ano para argila, de 0,0722 g/cm<sup>2</sup>.ano para areia e de 0,1238 g/cm<sup>2</sup>.ano para a combinação de sedimentos.

Esses resultados demonstram que a erosão de sedimentos por ano está diretamente influenciada pela declividade do terreno, sendo a maior declividade (segunda condição 6,44%) a mais prejudicial, logo para continuar com a análise foram utilizados os totais de produção de sedimento por ano da segunda condição avaliada. Com os resultados para a declividade de campo foi realizada a seguinte regra de três simples (exemplo sedimento de argila) para determinar a equivalência em anos da MSA utilizada em laboratório:

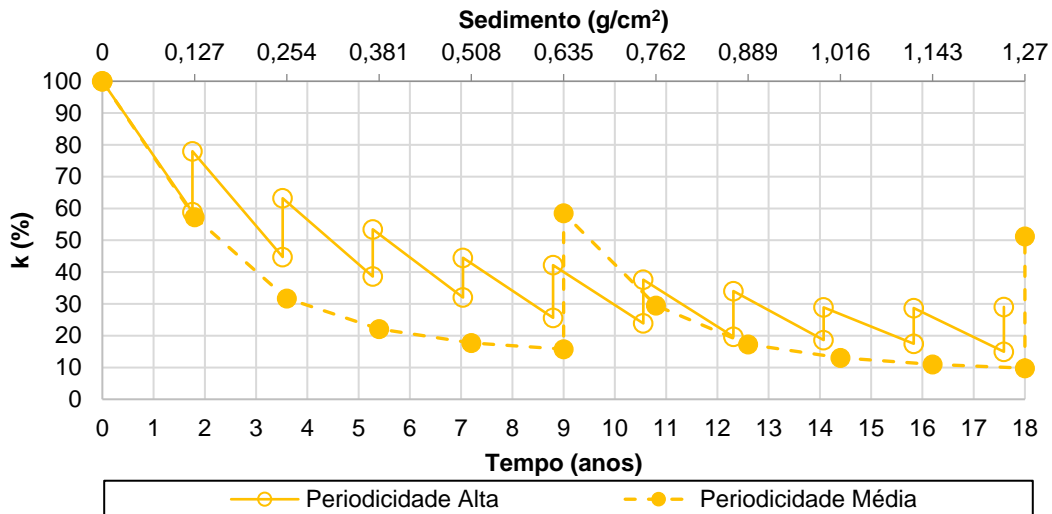
$$0,0722 \text{ g/cm}^2 \rightarrow 1 \text{ ano}$$

$$\rightarrow 1,27 \text{ g/cm}^2 \rightarrow x \text{ anos}$$

$$\rightarrow x = 17,59 \text{ anos}$$

Portanto utilizando a regra de três anteriormente explicada, a MSA de  $1,27 \text{ g/cm}^2$  equivale a 17,59 anos de uso com o sedimento de areia, a 7,23 anos de exposição para o sedimento de argila, e, finalmente, 10,25 anos para a combinação de sedimentos, esses resultados foram utilizados para plotar as Figuras 77, 78 e 79.

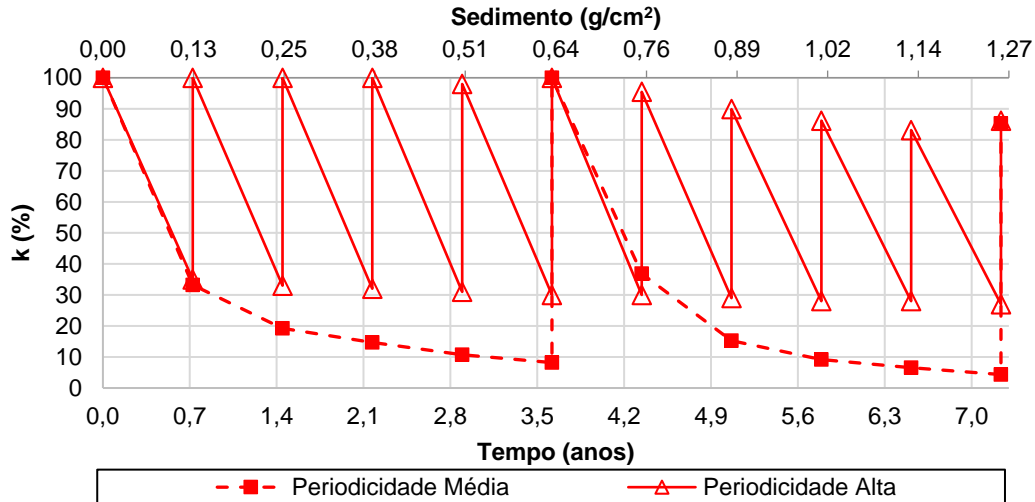
**Figura 77 - Perda da permeabilidade em função do tempo (areia)**



**Fonte:** O próprio Autor

Na Figura 77 é possível observar que o pavimento permeável com o CoPe apresentaria sem manutenção uma permeabilidade de cerca de 30% da inicial com cerca de 42 anos de uso neste local, já com manutenção média ou alta teoricamente poderia manter uma permeabilidade acima de 30 % da inicial por mais de 100 anos (lembrando que não se está considerando o desgaste mecânico do material).

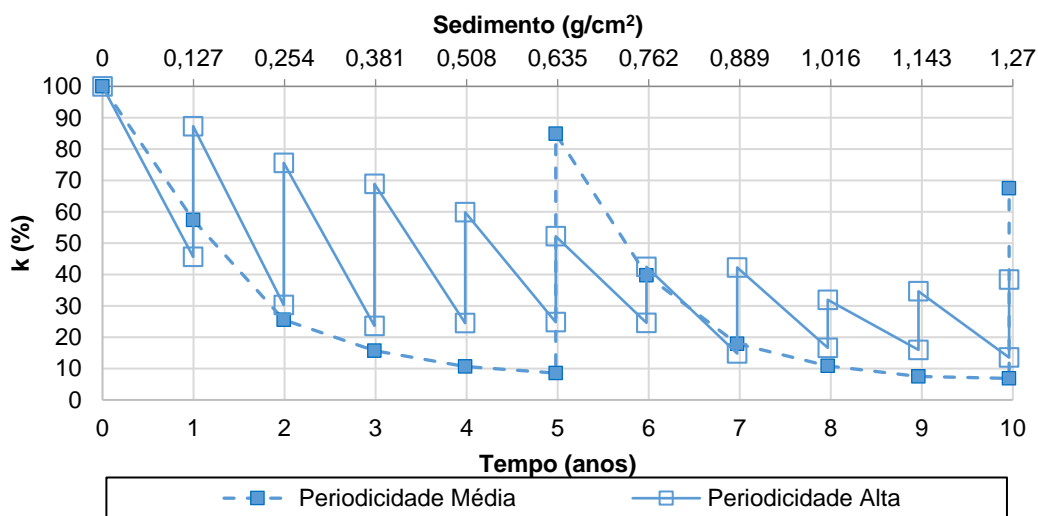
**Figura 78 - Perda da permeabilidade em função do tempo (argila)**



**Fonte:** O próprio Autor

Na Figura 78 é possível observar que o pavimento permeável com o CoPe apresentaria sem manutenção uma permeabilidade de cerca de 30% da inicial com cerca de 10 anos de uso neste local, já com manutenção com frequência média ou alta teoricamente poderia chegar a mais de 90 anos do ponto de vista das propriedades hidráulicas. Vale ressaltar que a vida útil também estará limitada ao desgaste mecânico do material, que não é tema de estudo deste trabalho.

**Figura 79 - Perda da permeabilidade em função do tempo (combinação)**



**Fonte:** O próprio autor

Na Figura 79 é possível observar que o pavimento permeável com o CoPe apresentaria sem manutenção uma permeabilidade de cerca de 30% da inicial com cerca de 24 anos de uso neste local, já com manutenção média ou alta teoricamente poderia manter uma permeabilidade acima de 30 % da inicial por mais de 100 anos (lembrando que não se está considerando o desgaste mecânico do material).

Em suma, o desempenho hidráulico do CoPe está dado em função do material utilizado, do tipo de sedimento (sendo os sedimentos finos mais prejudiciais na redução das suas propriedades hidráulicas e na durabilidade do material sem manutenção) e das condições específicas de cada local (Chuva, topografia, tipos de sedimento, erosão mecânica do solo).

#### 4.10 MODELO DE VIDA ÚTIL HIDRÁULICA

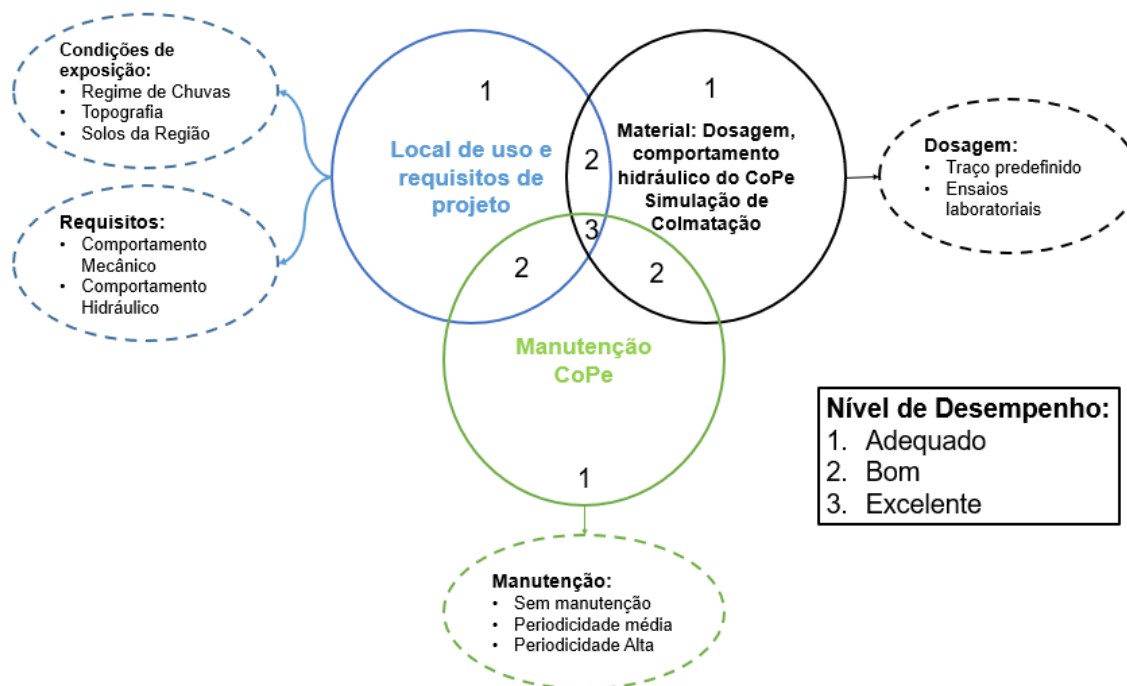
Nas Cinco Campanhas Experimentais realizadas foi verificada que a colmatação é um fenômeno natural ao qual está submetido o CoPe ao longo da sua vida útil, e que ocasiona uma perda de permeabilidade em função do tipo e quantidade de sedimento (MSA), e que essa perda de permeabilidade danifica a vida útil do material. Foi definido também um modelo analítico de colmatação que permite determinar numericamente a perda de permeabilidade e a construção de uma curva de desempenho hidráulico caracterizada pelo coeficiente “c” de potencial de colmatação.

Esse potencial de colmatação (c) pode ser reduzido, implementando algum procedimento de limpeza, e determinando a periodicidade do mesmo, ajudando assim a aumentar a vida útil hidráulica do material. Isto demonstra que nos projetos de CoPe, é de vital importância conhecer três fatores indispensáveis para o correto desenvolvimento do projeto:

- Local de uso e requisitos mínimos de projeto;
- Manutenção e periodicidade de manutenção;
- Dosagem do CoPe.

A interação desses três fatores garantirá a maior eficiência em termos de vida útil hidráulica para o material como exemplificado na Figura 80. O primeiro fator são as condições do local e os requisitos mínimos do projeto, dado que cada local terá características topográficas, mineralógicas e hidrológicas diferentes as quais devem ser consideradas no início do projeto. Também em função da utilização do CoPe este terá que cumprir com uma resistência mecânica mínima e uma permeabilidade mínima ao longo da vida útil hidráulica que seja igual ou superior ao estabelecido na norma.

**Figura 80 - Modelo conceitual da vida útil do CoPe**



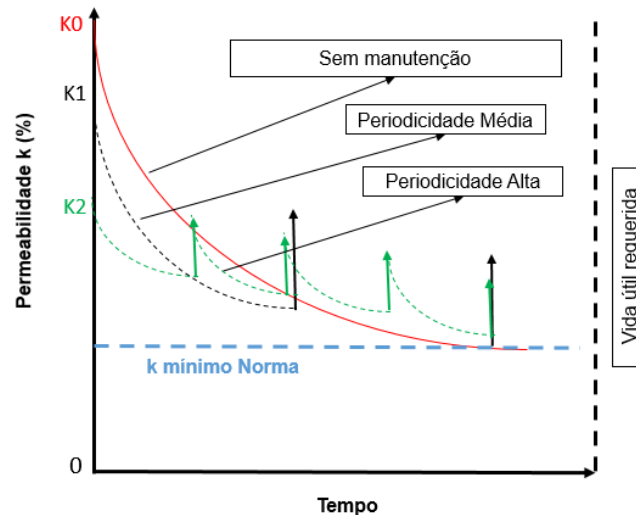
**Fonte:** O próprio autor

O Segundo fator a considerar é determinar se o material terá ou não manutenção, isto para definir logo no início a necessidade de permeabilidade mais elevada sem considerar manutenção ou uma permeabilidade mais baixa considerando uma periodicidade de manutenção.

Finalmente o terceiro fator será o estudo do material, para cumprir com os dois primeiros fatores, isto levará a escolha de um traço adequado e por meio de ensaios laboratoriais será feita uma verificação das propriedades mecânica

e hidráulicas. Assim, criou-se um nível de desempenho do CoPe relacionado a consideração desses 3 fatores na fase de projeto (Figura 80), sendo **excelente** (3) quando os três forem levados em conta, **bom** (2) quando pelo menos duas e **adequado** (1) quando somente um fator for utilizado. A segunda condição pode ser melhor entendida na Figura 81.

**Figura 81 -Condições de manutenção do CoPe**

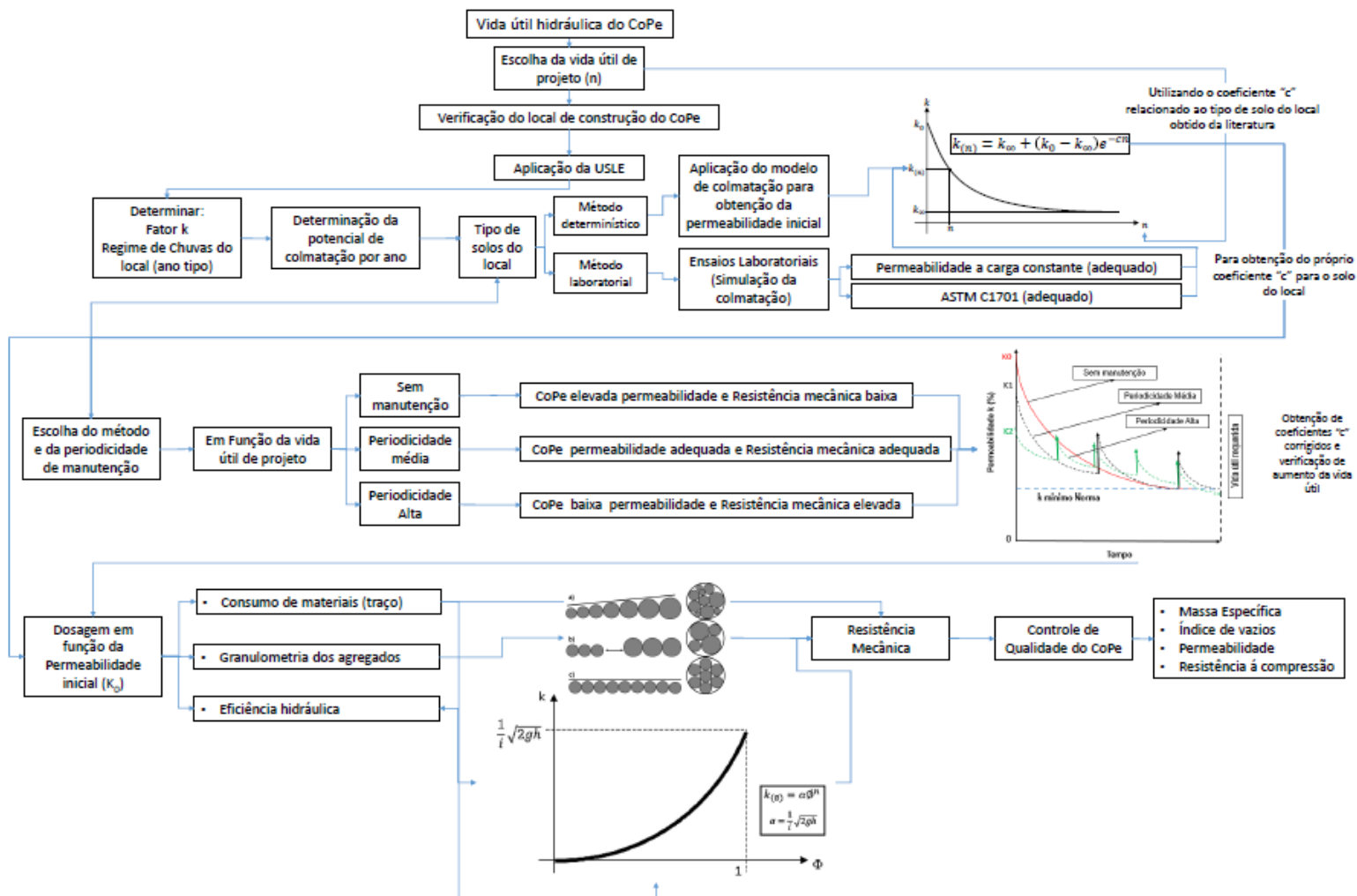


Fonte: o próprio autor

As condições de manutenção do CoPe são uns parâmetros fundamentais de projeto, sendo que se não for realizada uma manutenção mínima no material será preciso o uso de um material com uma permeabilidade muito elevada ( $k_0$ ), isto aumentará o tempo de perda hidráulica do material, por outro lado, se for considerada uma periodicidade mínima, a permeabilidade inicial pode ser mais baixa ( $k_1$ ) aumentando a vida útil do material de forma representativa, e finalmente se for considerada uma periodicidade alta a permeabilidade inicial poderia ser mais baixa ( $k_2$ ) e ainda estaria cumprindo com a exigência da norma.

Considerando o modelo conceitual de vida útil do CoPe da Figura 80, foi proposto o modelo de vida útil hidráulica para o CoPe o qual integra os três fatores indispensáveis no desenvolvimento do projeto do material, dito modelo encontra-se na Figura 82.

Figura 82 - Projeto do CoPe



Fonte: o próprio autor

Como mostrado na Figura 82 o primeiro dado de entrada do modelo é a escolha da vida útil hidráulica do CoPe ( $n$ ), para isto podem se seguir dois caminhos, o primeiro o uso do modelo analítico de colmatação, o qual precisa do coeficiente “ $c$ ” de potencial de colmatação que pode ser determinado da literatura, para assim determinar a permeabilidade inicial requerida no CoPe ( $k_0$ ).

O segundo caminho é a aplicação da USLE, para isto devem ser determinadas todas as variáveis da equação, verificado o regime de chuvas do local, e as condições topografias, com isso se obtêm a MSA do local e com ela aplicar o modelo analítico de colmatação ou realizar uma campanha experimental que verifique a perda de permeabilidade em função da quantidade e tipo de sedimento.

Determinada a MSA pode ser escolhida uma dosagem conhecida com uma permeabilidade inicial definida, seguidamente é utilizada a Equação 36, para determinar a vida útil do material variando o coeficiente “ $c$ ” em função da periodicidade de manutenção.

Finalmente é escolhida a dosagem que consiga satisfazer os parâmetros anteriormente mencionados, determinando assim o consumo de materiais, a granulometria dos agregados e a eficiência hidráulica que permita o melhor desempenho do CoPe ao longo do tempo.

#### 4.11 EXEMPLO DE APLICAÇÃO MODELO DE VIDA ÚTIL DO COPE

Para aplicar o modelo proposto, foi simulada a construção de um CoPe do lado do laboratório de materiais da UEL (Londrina, Paraná) par ser utilizado como estacionamento. Para isto utilizaram se as seguintes condições de contorno:

- Local de construção do CoPe: Londrina, Paraná, Brasil;
- Histórico de chuvas do local de um ano (2018);
- Com o regime de chuvas calcular o fator  $R$  de erosividade do solo com o uso da Equação 16 da revisão bibliográfica;

- Determinação do fator  $K$  (erodibilidade da chuva), em função do tipo de solo do local e auxílio do Quadro 8 da revisão bibliográfica;
- Condições topográficas do local (declividade, e distância entre o ponto mais alto e o CoPe) para assim determinar o fator  $LS$  com o uso do quadro 9 da revisão;
- Determinação do fator  $CP$  com o auxílio do quadro 10 da revisão bibliográfica;
- Uso da USLE para determinar a erosão dos sedimentos por ano (MSA);
- Utilizar o modelo analítico de manutenção (Equação 36) para determinar a vida útil do CoPe, segundo a MSA ( $k_{inicial}$  e  $k_{\infty}$ );
- Escolher a periodicidade de manutenção;
- Escolher o traço (eficiência hidráulica);
- Verificação do desempenho mecânico e hidráulico do material.

Para a validação do modelo foi necessário seguir os seguintes passos:

### Passo 1 – Aplicação da USLE

Para utilizar a USLE foram definidas todas suas variáveis, as quais se encontram na Tabela 16.

**Tabela 16 - Variáveis da USLE utilizadas no exemplo de aplicação**

Variável USLE	Valor	Método de cálculo
$R$	Valor em função da precipitação média por mês.	$R = 68.73 * \left(\frac{Mx^2}{P}\right)^{0.841}$
$K$	0,017	Quadro 8 Revisão Bibliográfica (Solo Argiloso)
$LS$	1,1668	Topografia do local, declividade (6,44%) e distância entre o ponto mais alto e o CoPe (60m) (Interpolação Quadro 9 Revisão Bibliográfica)
$CP$	0,1	Quadro 10 Revisão Bibliográfica

Fonte: o próprio autor

O resultado da USLE com as variáveis da Tabela 16 é mostrado na Tabela 17.

**Tabela 17 - Cálculo da MSA anual utilizando a USLE com os dados de chuva de Londrina**

Mês	Chuva (mm/mês)	Argila
		A (g/cm <sup>2</sup> .ano)
jan-18	397	0,0687
feb-18	97,2	0,0064
mar-18	218,6	0,0252
abr-18	10,8	0,0002
mai-18	11,1	0,0002
jun-18	11,4	0,0002
jul-18	11,9	0,0002
ago-18	205,8	0,0227
set-18	109,2	0,0078
out-18	264,2	0,0346
nov-18	103,2	0,0071
dez-18	51,2	0,0022
	<b>∑MSA</b>	<b>0,1755</b>

Fonte: o próprio autor

Após a aplicação da USLE encontrou-se que na região de construção do CoPe a MSA por ano é de 0,1755 g/cm<sup>2</sup>.ano.

## **Passo 2 – Determinação da vida útil hidráulica**

Utilizando o modelo de colmatção (Equação 36) é possível determinar a MSA tendo como parâmetros fixos a permeabilidade inicial ( $k_0$ ), a permeabilidade residual ( $k_\infty$ ) e a permeabilidade do CoPe colmatado ( $k_n$ ) que nesse caso a permeabilidade mínima de norma 1mm/s). Reescrevendo a Equação 36 para determinar a MSA para atingir a permeabilidade de mínima de norma obtém-se a Equação 40.

$$n = \frac{\ln\left(\frac{k_{(n)} - k_{\infty}}{k_0 - k_{\infty}}\right)}{-c} \quad (40)$$

Os dados de entrada para a Equação 40, considerando 3 periodicidades de manutenção encontram-se na Tabela 18

**Tabela 18 - Valores dos coeficientes  $c$ ,  $k_{\infty}$ , e  $n$  para as três periodicidades de limpeza estudadas**

Sem manutenção		Periodicidade média		Periodicidade alta	
$c$	10,5	$c$	0,1	$c$	0,11
$k_{\infty}$	0	$k_{\infty}$	0	$k_{\infty}$	0
$k_n$	1	$k_n$	1	$k_n$	1
$k_0$	Segundo a dosagem	$k_0$	Segundo a dosagem	$k_0$	Segundo a dosagem

Fonte: o próprio autor

Os coeficientes “ $c$ ” de potencial de colmatação foram os valores obtidos na Terceira e Quinta Campanha Experimental, sem considerar manutenção, considerando uma periodicidade média de manutenção e uma periodicidade alta. A permeabilidade residual ( $k_{\infty}$ ) foi considerada zero nos três casos estudados, tentando simular uma condição extrema na qual no final do fenômeno de colmatação o material não é mais permeável. O valor de  $k_n$  foi definido como 1 mm/s (permeabilidade mínima de norma).

### **Passo 3 – Previsão da vida útil do CoPe segundo a periodicidade de manutenção**

Com os resultados da Tabela 18 foi calculada a MSA necessária para levar cinco CoPe’s com permeabilidades iniciais diferentes (10, 8, 6, 4 e 2 mm/s) a atingir a permeabilidade mínima de norma. Foram escolhidos esses 5 CoPe’s visto que nas normas vigentes de CoPe ACI 522-10 e ABNT NBR 16416 (2015) existe uma grande lacuna no conhecimento em termos de dosagem de CoPe como verificado no item 2.2.5 da revisão, em vista disso a permeabilidade inicial do CoPe foi um parâmetro inicial conhecido. Na Tabela 19 são mostrados os resultados das simulações realizadas com a Equação 40 onde para calcular os anos de vida útil foi utilizada a erosão calculada com a USLE (0,1755 g/cm<sup>2</sup>.ano).

Tabela 19 - Previsão da vida útil em função da periodicidade de manutenção

Dosagens	$k_0$	$k_\infty$	Periodicidade	$c$	$n$ (g/cm <sup>2</sup> )	anos
A	10	0	Sem manutenção	10,5	0,28	1,3
			Periodicidade média	0,10	29,26	131,2
			Periodicidade alta	0,11	27,09	121,5
B	8	0	Sem manutenção	10,5	0,26	1,1
			Periodicidade média	0,10	26,90	118,5
			Periodicidade alta	0,11	24,90	109,7
C	6	0	Sem manutenção	10,5	0,23	1,0
			Periodicidade média	0,10	23,80	102,1
			Periodicidade alta	0,11	22,04	94,5
D	4	0	Sem manutenção	10,5	0,18	0,8
			Periodicidade média	0,10	19,29	79,0
			Periodicidade alta	0,11	17,86	73,1
E	2	0	Sem manutenção	10,5	0,10	0,4
			Periodicidade média	0,10	10,85	39,5
			Periodicidade alta	0,11	10,05	36,6

Fonte: o próprio autor

Como apresentado na Tabela 19 existe uma diferença significativa nos resultados da vida útil (anos) encontrados para as três periodicidades avaliada. Como esperado, o CoPe com permeabilidade inicial de 10 mm/s teve a maior vida útil sem manutenção (1,3 anos) e o CoPe com permeabilidade inicial de 2 mm/s a menor vida útil (0,4 anos), isto demonstra que para obter vidas úteis elevadas é preciso contar com CoPe's com permeabilidades elevadas.

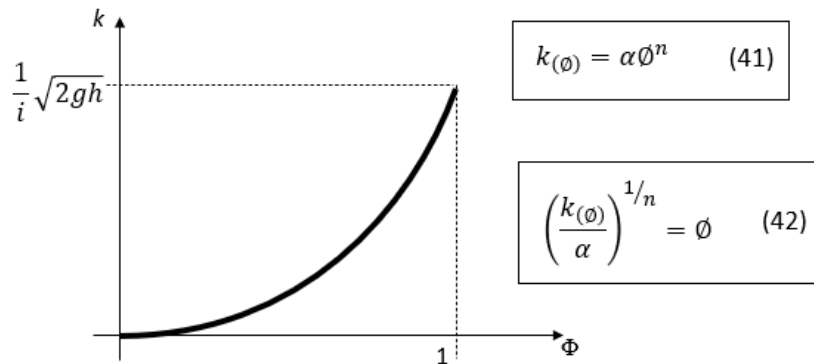
As duas periodicidades de manutenção utilizadas na simulação mostraram ser muito eficientes no aumento da vida útil do CoPe, levando a aumentos de aproximadamente 10000 vezes para a periodicidade média, e de aproximadamente 9000 vezes para a periodicidade alta de manutenção. Esses resultados demonstram que a implementação da manutenção no CoPe é indispensável no aumento da vida útil do material.

O CoPe com 2 mm/s de permeabilidade inicial demonstra ser uma excelente alternativa com manutenção, visto que uma permeabilidade tão baixa está associada a um índice de vazios baixo, o que em contrapartida acaba melhorando o seu comportamento mecânico.

#### Passo 4 – Determinação do índice de vazios ( $\phi$ ) e dosagem do CoPe

Na literatura têm sido propostas inúmeras correlações para a permeabilidade e o índice de vazios, Sandoval *et al.* (2019), pesquisaram e analisaram a correlação dessas duas variáveis de forma muito ampla, formulando uma correlação que pode ser observada na Figura 83 nas Equações 41 e 42.

**Figura 83- Correlação permeabilidade ( $k$ ) vs índice de vazios ( $\phi$ )**



**Fonte:** (Sandoval *et al.*, 2019)

A correlação da Equação 42 tem como dados de entrada dois coeficientes, o coeficiente “ $\alpha$ ” relacionado ao gradiente hidráulico utilizado no ensaio de permeabilidade a carga constante, e o coeficiente “ $n$ ” relacionado a dosagem e produção do CoPe em laboratório, para efeitos de cálculo esses parâmetros foram os apresentados na Tabela 20.

**Tabela 20 - Parâmetros Equação 42**

Parâmetros	Valor
$\alpha$	1417,29
$n$	3,274

**Fonte:** (Sandoval *et al.*, 2019)

Substituindo os  $k_0$  da Tabela 19 e os coeficientes “ $\alpha$ ” e “ $n$ ” da Tabela 20 obtém-se os índices de vazios para os CoPe’s (Tabela 21).

Tabela 21 - índices de vazios calculados com a Equação 42

$k_o$ (mm/s)	$\Phi$ (%)
10	22,0
8	20,6
6	18,8
4	16,6
2	13,5

Fonte: o próprio autor

Segundo os resultados da Tabela 21 encontraram-se índices de vazios variando na faixa de 13,3% a 22,0% tais valores estão dentro da faixa proposta pela ABNT NBR 16416 (2015). Cabe salientar que menores índices de vazios resultam em maiores resistências mecânicas, ou seja, ao aumentar a manutenção torna-se possível aplicar um CoPe com resistência mecânica mais elevada.

Para atingir os índices de vazios encontrados na Tabela 21 podem ser utilizadas dosagens conhecidas na literatura, ou seguir as recomendações da ACI 522R-10 de realizar testes experimentais até atingir os parâmetros desejados.

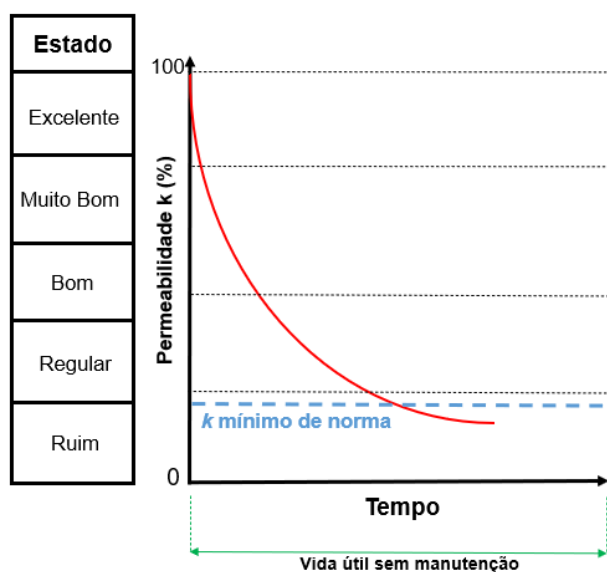
#### 4.12 SUGESTÃO DE PARÂMETROS DE MANUTENÇÃO PARA PAVIMENTOS EXISTENTES

Nos CoPe's existentes acontece uma perda natural da permeabilidade ao longo do tempo como comprovado na Segunda e Terceira Campanha Experimental, a magnitude da mesma está associada ao local de uso, o regime de chuvas, a topografia e o tipo de solo da região que possa colmatar os vazios do material.

Por tanto a permeabilidade do material deve ser verificada de forma a ter uma noção de como está acontecendo esta perda e verificar a possibilidade de manutenção para tentar manter as suas condições hidráulicas o mais próximas das iniciais. Para ter um parâmetro da medição do correto desempenho hidráulico

do CoPe foi realizada uma analogia com o ICP (índice de condição do pavimento) dos pavimentos, só que ao invés de verificar o desempenho mecânico das camadas será verificada a permeabilidade, assim foi estabelecido o índice de condição hidráulica (ICH) do CoPe como exemplificado na Figura 85.

**Figura 84 - Índice de condição hidráulica (IHC)**



**Fonte:** o próprio autor

O ICH representa a variação da permeabilidade e é avaliado em porcentagem sendo sempre 100% a condição hidráulica inicial de projeto, e a perda da permeabilidade será calculada sempre respeito a inicial, estabelecendo assim cinco estágios de funcionamento sendo estes: excelente, muito bom, bom, regular, ruim.

O estágio excelente varia de 80-100%, esta faixa percentual é respaldada pelos resultados da quinta campanha experimental onde é demonstrado que este funcionamento hidráulico faz relação ao primeiro ano de funcionamento onde a colmatação recém começa.

O estágio muito bom varia de 60-80% já que o material ainda apresenta um funcionamento hidráulico representativo e tem um bom potencial de recuperação de permeabilidade quando se encontra nesta faixa percentual.

O estágio bom varia de 40-60% representa o ponto a partir do qual ainda é possível recuperar uma boa parte da permeabilidade do material

O regular de 20-40% representa o ponto no qual o CoPe tem uma permeabilidade próxima ou igual a permeabilidade mínima de norma

Finalmente o ruim tudo o que foi inferior ao  $k$  mínimo de norma, visto que o material não é considerado mais permeável, por tanto precisaria de alguma medida de recuperação de permeabilidade que permitisse pelo menos atingir a permeabilidade mínima de norma.

Considerando que o CoPe deveria sempre apresentar no mínimo um estado bom em termos das suas condições hidráulicas iniciais esse índice não poderia ser inferior a 50% para pavimentos existentes, isto explicado pelos resultados das Segunda e Terceira Campanha Experimental onde até 50% a declividade da curva de perda de permeabilidade é mais acentuada, por tanto é o ponto a partir do qual é indispensável garantir a recuperação hidráulica do material, utilizando o procedimento de limpeza em função do tipo de sedimento que esteja colmatando os vazios.

## 5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nas 5 Campanhas Experimentais realizadas, verifica-se que foi possível propor um modelo de vida útil hidráulica do CoPe baseando-se no fenômeno da colmatação, sendo este colmatado com três tipos de sedimentos, areia, argila e uma combinação dos dois em iguais proporções.

Primeiramente verificou-se que o CoPe realizado cumpre com os parâmetros mínimos da ABNT NBR 16416 (2015) e a ACI 522R-10 para ser classificado como concreto permeável e que, segundo os resultados das suas propriedades mecânicas e hidráulicas, o material pode ser utilizado para a construção de caçadas.

Foi possível adequar os dois métodos de teste de permeabilidade para simular o processo de colmatação no CoPe (teste de permeabilidade a carga constante o teste definido pela ASTM C1701 para condições de laboratório e de campo respectivamente) de forma eficiente para avaliar a variação da permeabilidade em função do aumento da MSA de sedimento;

Em laboratório foi verificado que os sedimentos finos (argila e combinação) foram os mais prejudiciais em termos de perda de permeabilidade do material, por causa do tamanho do grão. Além disso, sua plasticidade afeta a permeabilidade devido às forças de Van der Waals, quando as partículas de argila se juntam formam flocos de argila. Ou seja, nas condições avaliadas o processo de colmatação foi controlado pelo tipo de sedimento;

Outro fator que influencia a colmatação é a velocidade na qual acontece o fenômeno, segundo os resultados (Segunda Campanha) foi possível determinar que a velocidade mais crítica em termos de colmatação foi a velocidade lenta (1/10), pelo fato das partículas ter um maior tempo de se rearranjar e entupir mais a seção dos vazios interconectados.

Em relação às adequações dos ensaios, o teste de permeabilidade a carga constante eventualmente pode apresentar perda de sedimentos durante

sua execução, enquanto o teste definido por ASTM C1701 não. As perdas de sedimentos que podem acontecer no teste de permeabilidade a carga constante podem ser reduzidas pela liberação gradual do fluxo de água sem causar grande turbulência;

Em campo foi verificado que a tendência da colmatação praticamente foi a mesma, para os três sedimentos utilizados para colmatar o CoPe, mostrando que existe uma correlação entre os resultados de laboratório e campo respectivamente.

Os resultados laboratoriais e de campo mantêm a proporção 1 para 4. Esta proporção é importante para entender a diminuição na permeabilidade que o CoPe possui em campo, o que justifica que o fenômeno de colmatação é mais acentuado, portanto a permeabilidade no laboratório deve ser ajustada com os valores de campo.

Com os resultados de colmatação de laboratório e campo foi proposto um modelo analítico de colmatação que é uma ferramenta útil para identificar o potencial de colmatação ( $c$ ), e a permeabilidade final (residual) que o CoPe pode atingir ( $k_{\infty}$ ), e prever com qual MSA de sedimento o material deixa de ser permeável.

O modelo proposto permitirá prever a vida útil do CoPe em função da perda da permeabilidade, bem como para estabelecer em que momento um procedimento de limpeza deve ser executado para manter o material permeável.

Com base nos resultados obtidos nas campanhas de colmatação conclui-se que fenômeno de colmatação é algo inevitável no CoPe, portanto, ter conhecimento em qual fase está a perda de permeabilidade é vital para estabelecer as possíveis medidas corretivas de recuperação hidráulica.

Em termos de limpeza foi possível recuperar de forma efetiva a permeabilidade do CoPe com dois dos três procedimentos utilizados, sendo estes a limpeza com compressor de ar e a hidrolavagem.

Na colmatação com sedimentos finos, a limpeza com água foi mais eficaz, devido à quebra das forças de tração entre as partículas de sedimento, o que facilitou sua expulsão.

No colmatação com sedimentos de areia, o ar foi o procedimento de limpeza que apresentou os melhores resultados, uma vez que permitiu a expulsão eficiente de os grãos de sedimento que foram depositados nos vazios internos do CoPe.

Os resultados de procedimentos de limpeza demonstram que para cada tipo de sedimento existe um procedimento de limpeza mais efetivo que permite a expulsão efetiva das partículas e o desentupimento dos vazios.

Durante a avaliação das duas periodicidades de limpeza verificou-se que as duas foram igualmente efetivas, e permitiram a recuperação da permeabilidade segundo os cenários analisados. Por tanto, é possível recuperar permeabilidade no pavimento permeável após ter sofrido grandes reduções, implementando uma periodicidade média ou alta;

Na avaliação da periodicidade aconteceu um efeito contrário ao fenômeno da colmatação, visto que, a recuperação da permeabilidade está diretamente ligada ao tipo de sedimento, sendo os sedimentos grossos (areia) os mais difíceis de expulsar com os procedimentos de limpeza utilizados.

Também verificou-se um efeito de perda residual de permeabilidade acumulada com os sedimentos grossos na periodicidade alta, mostrando um comportamento contrário aos sedimentos finos onde dito comportamento não foi tão acentuado.

Pode se concluir que a escolha da periodicidade dependerá das condições específicas de cada obra, visto que as duas periodicidades avaliadas foram igualmente efetivas, em termos de recuperação de permeabilidade.

Os resultados da a microtomografia-3D, mostraram que os sedimentos utilizados tendem a se acumular na superfície do CoPe, sendo os sedimentos mais finos os que apresentaram maior redução do índice de vazios do

material. Além disso o fato dos sedimentos de localizar na superfície do CoPe facilitou a sua expulsão, justificando a eficiência dos métodos de limpeza utilizados;

Os sedimentos em campo podem ser deslocados ao CoPe de forma natural pelos processos de erosão mecânica do solo, por tanto a MSA pode ser determinada em função da chuva, a topografia e as características dos sedimentos usando a Equação USLE.

Com o entendimento do fenômeno da colmatação e o estudo das condições do local foi possível determinar a vida útil do CoPe. Assim foi proposto um modelo de previsão de vida útil hidráulica, que considera a colmatação, as condições do local e a caracterização hidráulica do material a ser utilizado.

## 6 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Deve ser implementado um fator de segurança que permita aumentar a confiança dos resultados obtidos a partir dos modelos propostos, isto visando a obtenção de CoPe's com uma maior vida útil, e um melhor desempenho hidráulico.

Nas campanhas realizadas nos campos experimentais utilizou-se uma única estrutura de camadas inferiores ao CoPe, por tanto recomendasse um estudo que permita avaliar a variação das camadas inferiores e a sua interferência no fenômeno da colmatação e como consequência na vida útil hidráulica do material.

Também podem ser implementados estudos que visem analisar as propriedades mecânicas do CoPe para diferentes índices de vazios, com isso da mesma forma que pode ser calculada a vida útil do CoPe para uma permeabilidade conhecida, também poderia se adicionar o dado de resistência mecânica que facilite a tomada de decisão em função do tipo de aplicação do material.

Sugere-se um trabalho de monitoramento de sistemas de pavimento permeável existente que vise calibrar o ICH proposto com uma avaliação temporal da perda de permeabilidade do material.

Também se sugere a implementação de um trabalho experimental que vise determinar uma metodologia de dosagem que permita aumentar a eficiência hidráulica e mecânica do material.

## REFERÊNCIAS

AAMER RAFIQUE BHUTTA, M.; HASANAH, N.; FARHAYU, N.; HUSSIN, M. W.; TAHIR, M. B. M.; MIRZA, J. Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1243–1248, out. 2013.

ABNT NBR 16416. Pavimentos permeáveis de concreto- Requisitos e procedimentos. **ABNT**, v. 1, p. 21, 2015.

ACI 522-R10. **Report On Pervious Concrete (ACI 522-R10)**. [s.l: s.n.].

AGAR-OZBEK, A. S.; WEERHEIJM, J.; SCHLANGEN, E.; BREUGEL, K. VAN. Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 480–490, abr. 2013.

AKAND, L.; YANG, M.; GAO, Z. Characterization of pervious concrete through image based micromechanical modeling. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 547–555, 2016.

ALAM, A.; HASELBACH, L.; COFER, W. F. Three-Dimensional Finite Element Modeling of Pervious Concrete Pavement: Vertical Porosity Distribution Approach. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 02, n. 12, p. 767–777, 2013.

ALBERTA TRANSPORTATION AND UTILITIES. Pavement Design Manual. v. 1, p. 146, 1997.

AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D. DA; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. DE. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica usle, rusle e wepp para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 6, p. 1046–1049, 2010.

ANDRES-VALERI, V. C.; JULI-GANDARA, L.; JATO-ESPINO, D.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, J.; ANDRES-VALERI, VALERIO C., LUIS JULI-GANDARA., DANIEL JATO-ESPINO., J. R.-H. Characterization of the infiltration capacity of porous concrete pavements with low constant head permeability tests. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 4, 2018.

ANDRÉS-VALERI, V. C.; MARCHIONI, M.; SAÑUDO-FONTANEDA, L. A.; GIUSTOZZI, F.; BECCIU, G. Laboratory assessment of the infiltration capacity reduction in clogged porous mixture surfaces. **Sustainability (Switzerland)**, v. 8, n. 8, p. 1–11, 2016.

BARBOSA, A. F.; OLIVEIRA, E. F. DE; MIOTO, C. L.; CONCEIÇÃO, A.; FILHO, P. Aplicação da Equação Universal de Perda do Solo ( USLE ) em Softwares Livres e Gratuitos The Application of the Universal Soil Loss Equation by Using Free and Available Softwares. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 38, p. 170–179, 2015.

BARNHOUSE, P. W.; SRUBAR, W. V. Material characterization and hydraulic conductivity modeling of macroporous recycled-aggregate pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 89–97, 2016.

BHUTTA, M. A. R.; TSURUTA, K.; MIRZA, J.; THO-IN, T.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P.; JATURAPITAKKUL, C. Evaluation of high-performance porous concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 31, n. 325, p. 67–73, jun. 2012.

BONICELLI, A.; GIUSTOZZI, F.; CRISPINO, M. Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 102–110, 2015.

BRAJA, M. DAS. **Fundamentos de ingeniería geotécnica**, 2013.

BRAJA M, D. **Refuerzo del Suelo Principios de Ingeniería de Cimentaciones**, 1999.

BRAKE, N. A.; ALLAHADADI, H.; ADAM, F. Flexural strength and fracture size effects of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 536–543, 2016.

BROWN, ROBERT A.; BORST, M.; BROWN, R. A.; ASCE, A. M.; BORST, M.; BROWN, ROBERT A.; BORST, M.; BROWN, R. A.; ASCE, A. M.; BORST, M. Assessment of Clogging Dynamics in Permeable Pavement Systems with Time Domain Reflectometers. **JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING © ASCE**, v. 11, n. September, p. 1255–1265, 2013.

BROWN, R. A.; ASCE, A. M.; BORST, M. Evaluation of Surface Infiltration Testing Procedures in Permeable Pavement Systems. **Journal of Environmental Engineering**, v. 140, n. 3, p. 04014001, 2014.

BRUGIN, M.; MARCHIONI, M.; BECCIU, G.; GIUSTOZZI, F.; TORALDO, E.; ANDRÉS-VALERI, V. C.; BRUGIN, M.; MARCHIONI, M.; BECCIU, G.; GIUSTOZZI, F. Clogging potential evaluation of porous mixture surfaces used in permeable pavement systems. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 24, n. 5, p. 620–630, 2017.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Pervious concrete as a sustainable pavement material-Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 262–274, 2016a.

\_\_\_\_\_. Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 627–637, 2016b.

CHANG, J. J.; YEIH, W.; CHUNG, T. J.; HUANG, R. Properties of pervious concrete made with electric arc furnace slag and alkali-activated slag cement. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 34–40, 2016.

CHARLES, STANFORD; MBASIKA A., ONYANGO; TRICIA A., T. F. J. B. R. Innovative Materials and Design for Sustainable Transportation Infrastructure 58.

**ASCE**, p. 58–70, [s.d.].

CHEN, Y.; WANG, K.; WANG, X.; ZHOU, W. Strength, fracture and fatigue of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 97–104, maio 2013.

CHINDAPRASIRT, P.; HATANAKA, S.; CHAREERAT, T.; MISHIMA, N.; YUASA, Y. Cement paste characteristics and porous concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 5, p. 894–901, maio 2008.

CHOPRA, M.; ASCE, M.; KAKUTURU, S.; ASCE, A. M.; BALLOCK, C.; ASCE, A. M.; SPENCE, J.; ASCE, A. M.; WANIELISTA, M.; ASCE, M. Effect of Rejuvenation Methods on the Infiltration Rates of Pervious Concrete Pavements. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 15, n. 6, p. 426–433, 2010.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Hidrologia Aplicada**. [s.l: s.n.].

CHU, L.; FWA, T. F.; TAN, K. H. Laboratory Evaluation of Sound Absorption Characteristics of Pervious Concrete Pavement Materials. n. 2629, p. 91–103, 2017.

COLERI, E.; KAYHANIAN, M.; HARVEY, J. T.; YANG, K.; BOONE, J. M. Clogging evaluation of open graded friction course pavements tested under rainfall and heavy vehicle simulators. **Journal of environmental management**, v. 129, p. 164–172, 15 nov. 2013.

CONDITION, P.; BASICS, I.; CLASSIFICATION, R. D. PAVEMENT CONDITION INDEX 101. p. 30–33, [s.d.].

ĆOSIĆ, K.; KORAT, L.; DUCMAN, V.; NETINGER, I. Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 69–76, 2015.

COUGHLIN, J. P.; ASCE, M.; CAMPBELL, C. D.; MAYS, D. C.; ASCE, M. Infiltration and Clogging by Sand and Clay in a Pervious Concrete Pavement System. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 1, p. 68–73, 2012.

CUI, X.; ZHANG, J.; CHEN, D.; LI, S.; JIN, Q.; ZHENG, Y.; CUI, S. Clogging of pervious concrete pile caused by soil piping: An approximate experimental study. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 55, n. 7, p. 999–1015, 2018.

CUI, X.; ZHANG, J.; HUANG, D.; TANG, W.; WANG, L.; HOU, F. Experimental simulation of rapid clogging process of pervious concrete pavement caused by storm water runoff. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 20, n. 1, p. 24–32, 2019.

DEO, O.; ASCE, M.; SUMANASOORIYA, M.; ASCE, M.; NEITHALATH, N. Permeability Reduction in Pervious Concretes due to Clogging: Experiments and Modeling. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 7, p. 741–751, 2010.

DEO, O.; NEITHALATH, N. Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features. **Materials Science and Engineering: A**, v. 528, n. 1, p. 402–412, nov. 2010.

\_\_\_\_. Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 11, p. 4181–4189, nov. 2011.

DNIT. Manual de Conservação Rodoviária. p. 568, 2005.

DONG, Q. *et al.* Investigation into Laboratory Abrasion Test Methods for Pervious Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 5, n. 865, p. 120914003441001, 2012.

DOUGHERTY, MARK; HEIN, M.; MARTINA, B. A.; FERGUSON, B. K. Quick surface infiltration test to assess maintenance needs on small pervious concrete sites. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 137, n. 8, p. 553–563, 2011.

DOUGHERTY, M; HEIN, M.; MARTINA, B. A.; FERGUSON, B. K. Quick Surface Infiltration Test to Assess Maintenance Needs on Small Pervious Concrete Sites. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce**, v. 137, n. August, p. 553–563, 2011.

DRAKE, J.; BRADFORD, A. Assessing the potential for restoration of surface permeability for permeable pavements through maintenance. **Water Science and Technology**, v. 68, n. 9, p. 1950–1958, 2013.

EL-HASSAN, H.; KIANMEHR, P. Pervious concrete pavement incorporating GGBS to alleviate pavement runoff and improve urban sustainability. **Road Materials and Pavement Design**, v. 19, n. 1, p. 167–181, 2018.

EL-HASSAN, H.; KIANMEHR, P.; ZOUAOU, S. Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 164–175, 2019.

ELKINS, G. E.; THOMPSON, T. M.; GROEGES, J. L.; VISINTINE, B.; RADA, G. R. Reformulated Pavement Remaining Service Life Framework, FHWA-HRT-13-038. n. november, p. 84, 2013.

FERNANDO, P.; GONÇALVES, P. O Diagnóstico e a Manutenção dos Pavimentos (Notas de aula). 1999.

FWA, F.; LIM, E.; TAN, H. Comparison of Permeability and Clogging Characteristics of Porous Asphalt and Pervious Concrete Pavement Materials. n. 2511, p. 72–80, 2014.

GAEDICKE, C.; MARINES, A.; MIANKODILA, F. A method for comparing cores and cast cylinders in virgin and recycled aggregate pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 494–503, fev. 2014.

GAEDICKE, C.; TORRES, A.; HUYNH, K. C. T.; MARINES, A. A method to correlate splitting tensile strength and compressive strength of pervious concrete cylinders and cores. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 271–278, 2016.

GIUSTOZZI, F. Polymer-modified pervious concrete for durable and sustainable transportation infrastructures. **Construction and Building Materials**, v. 111, p.

502–512, 2016.

GONÇALVES, F.; SOUZA, C. H. U. DE; TAHIRA, F. S.; FERNANDES, F.; TEIXEIRA, R. S. Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. **Revista DAE**, v. 65, n. 205, p. 5–14, 2017.

GONZÁLEZ-ANGULLO, N.; CASTRO, D.; RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, J.; DAVIES, J. W. Runoff infiltration to permeable paving in clogged conditions. **Urban Water Journal**, v. 9006, 2008.

GUPTA, R. Monitoring in situ performance of pervious concrete in British Columbia - A pilot study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 1, p. 1–9, jan. 2014.

GUTHRIE, W. S.; DEMILLE, C. B.; EGGETT, D. L. Effects of Soil Clogging and Water Saturation on Freeze – Thaw Durability of Pervious Concrete. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2164, p. 89–97, 2010.

HASELBACH, L.; DUTRA, V. P.; SCHWETZ, P.; SILVA FILHO, L. C. P. A pervious concrete mix design based on clogging performance in Rio Grande do Sul Introduction Problem Statement. **International Conference on Best Practices for Concrete Pavements**, n. October, p. 1–11, 2015.

HASELBACH, L. M. Potential for Clay Clogging of Pervious Concrete under Extreme Conditions. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 15, n. 1, p. 67–69, 2010.

HASELBACH, L. M.; VALAVALA, S.; MONTES, F.; HASELBACH, L. M.; VALAVALA, S.; MONTES, F. Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. **Journal of Environmental Management**, v. 81, n. 1, p. 42–49, 2006.

HENDERSON, V.; TIGHE, S. Evaluation of pervious concrete pavement performance in cold weather climates. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 13, n. 3, p. 197–208, 2012.

HESAMI, S.; AHMADI, S.; NEMATZADEH, M. Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 680–691, fev. 2014.

HU, N.; ZHANG, J.; XIA, S.; HAN, R.; DAI, Z.; SHE, R.; CUI, X. A field performance evaluation of the periodic maintenance for pervious concrete pavement. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121463, 2020.

HUANG, B.; WU, H.; SHU, X.; BURDETTE, E. G. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 5, p. 818–823, maio 2010.

IBRAHIM, A.; MAHMOUD, E.; YAMIN, M.; PATIBANDLA, V. C. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 524–529, jan. 2014.

IBRAHIM, H. A.; ABDUL RAZAK, H. Effect of palm oil clinker incorporation on

properties of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 70–77, 2016.

ISO 13823. ISO 13823 - General principles on the design of structures for durability. **ISO 2008**, p. 13, 2008.

JIONG, Z.; GUODONG, M.; ZHAOXIA, D.; RUIPING, M.; XINZHUANG, C.; SHERUI; *et al.* Numerical study on pore clogging mechanism in pervious pavements. **Journal of Hydrology**, v. 565, n. August, p. 589–598, 2018.

JIONG, Z.; GUODONG, M.; ZHAOXIA, D.; RUIPING, M.; XINZHUANG, C.; RUI, S. Numerical study on pore clogging mechanism in pervious pavements. v. 565, n. August, p. 589–598, 2018.

JO, M.; SOTO, L.; AROCHO, M.; ST JOHN, J.; HWANG, S. Optimum mix design of fly ash geopolymer paste and its use in pervious concrete for removal of fecal coliforms and phosphorus in water. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 1097–1104, 2015.

KARBALLAEZADEH, N.; MOHAMMADZADEH S, D.; SHAMSHIRBAND, S.; HAJIKHODAVERDIKHAN, P.; MOSAVI, A.; CHAU, K. Prediction of remaining service life of pavement using an optimized support vector machine (case study of Semnan–Firuzkuh road). **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, v. 13, n. 1, p. 188–198, 2019.

KAYHANIAN, M.; ANDERSON, D.; HARVEY, J. T.; JONES, D.; MUHUNTHAN, B. Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. **Journal of Environmental Management**, v. 95, n. 1, p. 114–123, mar. 2012.

KAZMIERCZAK, C. DE S.; FABRÍCIO, M. M.; MOLIN, D. C. C. D.; MASUERO, A. B.; ANDRADE, J. J. DE O.; POSSAN, E.; MASUERO, J. R.; MENNUCCI, M. M. **Contribuição à Previsão da Vida Útil de Estruturas de Concreto**. [s.l: s.n.].

KEVERN, J. Maintenance and repair options for pervious concrete. **International Low Impact Development Conference**, v. 41099, n. April 2010, p. 113–125, 2010.

KEVERN, J. T. Evaluating Permeability and Infiltration Requirements for Pervious Concrete. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 43, n. 3, p. 20130180, 2015.

KEVERN, J. T.; SCHAEFER, V. R.; WANG, K. Predicting Performance of Pervious Concrete using Fresh Unit Weight J.T. Kevern 1 ,V.R. Schaefer 2 , and K. Wang 3 1. 2009.

KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C. R. Defining clogging potential for permeable concrete. **Journal of Environmental Management**, v. 220, n. May, p. 44–53, 2018.

\_\_\_\_\_. High-strength clogging resistant permeable pavement. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 0, n. 0, p. 1–12, 2019.

KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C. R.; ALALEA KIA, HONG S. WONG, C. R.

C. Clogging in permeable concrete: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 193, n. May, p. 221–233, 2017.

KIM, G. M.; JANG, J. G.; KHALID, H. R.; LEE, H. K. Water purification characteristics of pervious concrete fabricated with CSA cement and bottom ash aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 1–8, 2017.

KIM, H. K.; LEE, H. K. Acoustic absorption modeling of porous concrete considering the gradation and shape of aggregates and void ratio. **Journal of Sound and Vibration**, v. 329, n. 7, p. 866–879, mar. 2010.

KIM, Y. J.; GADDAFI, A.; YOSHITAKE, I. Permeable concrete mixed with various admixtures. **Materials & Design**, v. 100, p. 110–119, 2016.

KIRAN, V. K.; ANAND, K. B.; KASTRO KIRAN, V.; ANAND, K. B.; KIRAN, V. K.; ANAND, K. B.; KASTRO KIRAN, V.; ANAND, K. B. **Study on identically voided pervious concrete made with different sized aggregates** (Rao, CSP and Basavarajappa, S, Ed.) INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN MATERIALS AND MANUFACTURING APPLICATIONS (ICONAMMA-2017). **Anais...**: IOP Conference Series-Materials Science and Engineering.2018Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85043710335&doi=10.1088%2F1757-899X%2F310%2F1%2F012064&partnerID=40&md5=cefe5a251b539743974ecc55f07d6ec4>>

KUO, W.-T.; LIU, C.-C.; SU, D.-S. Use of washed municipal solid waste incinerator bottom ash in pervious concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 328–335, mar. 2013.

KURUPPU, U.; RAHMAN, A.; RAHMAN, M. A. Permeable pavement as a stormwater best management practice: a review and discussion. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 10, p. 1–20, 2019.

LEMING, MICHAEL L.;MALCOM, H. ROONEY;TENNIS, P. D. **Hydrologic Design of Pervious Concrete**. [s.l: s.n.]. v. 53

LI, H.; KAYHANIAN, M.; HARVEY, J. T. Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods. **Journal of Environmental Management**, v. 118, p. 144–152, 30 mar. 2013.

LIAN, C.; ZHUGE, Y.; BEECHAM, S. The relationship between porosity and strength for porous concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 11, p. 4294–4298, nov. 2011.

LIN, W.; PARK, DAE GEUN; RYU, S. W.; LEE, B. T.; CHO, Y. H. Development of permeability test method for porous concrete block pavement materials considering clogging. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 20–26, 2016.

LIN, W.; PARK, DAE-GEUN GEUN; WOO, S.; LEE, B. T.; CHO, Y. H.; RYU, S. W.;

LEE, B. T.; CHO, Y. H. Development of permeability test method for porous concrete block pavement materials considering clogging. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 20–26, 2016.

LIV HASELBACH, VANESSA FÁTIMA PASA DUTRA, PAULETE SCHWETZ, L. C. P. DA S. F. Laboratory Evaluations of Long-Term Hydraulic Performance and Maintenance Requirements for Pervious Concrete Mixes: A Case Study in Southern Brazil. **International Conference on Transportation and Development 2016**, p. 309–317, 2016.

MACIEL, M. M. Aplicação da equação universal de perdas de solo (usle) em ambiente de geoprocessamento e sua comparação com aptidão agrícola. **Dissertação (Mestrado)**, 2000.

MAHBOUB, K. C.; CANLER, J.; RATHBONE, R.; ROBI, T.; DAVIS, B.; ROBL, T.; DAVIS, B. Pervious concrete: Compaction and aggregate gradation. **ACI Materials Journal**, v. 106, n. 6, p. 523–528, 2009.

MANAHILOH, K. N.; MUHUNTHAN, B.; KAYHANIAN, M.; GEBREMARIAM, S. Y.; ASCE, S. M.; MUHUNTHAN, B.; ASCE, F.; KAYHANIAN, M.; ASCE, M.; GEBREMARIAM, S. Y.; ASCE, M. X-Ray Computed Tomography and Nondestructive Evaluation of Clogging in Porous Concrete Field Samples. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 8, p. 1103–1109, 2012.

MANOJ B. CHOPRA; ERIK STUART; AND MARTIN P. WANIELISTA. Pervious Pavement Systems in Florida – Research Results. **Low Impact Development 2010: Redefining Water in the City © 2010 ASCE**, p. 193–206, 2010.

MARCAIDA, A. K.; NGUYEN, T. H.; AHN, J. Investigation of particle-related clogging of sustainable concrete pavements. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 12, 2018.

MARTIN, W. D.; KAYE, N. B.; PUTMAN, B. J. Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 78–84, 2014.

MARTIN, W. D.; PUTMAN, B. J. Comparison of methods for measuring porosity of porous paving mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 299–305, 2016.

MARTIN, W. D.; PUTMAN, B. J.; KAYE, N. B. Using image analysis to measure the porosity distribution of a porous pavement. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 210–217, nov. 2013.

MATA, A. **Sedimentation of Pervious Concrete Pavement Systems**. [s.l.] North Carolina State University, 2008.

MATA, L. A.; LEMING, M. L. Vertical distribution of sediments in pervious concrete pavement systems. **ACI MATERIALS JOURNAL**, n. 109, p. 149–155, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. [s.l.: s.n.].

MISAEEL, E.; PÁEZ, A.; LOPES, S. B. ÍNDICE DE CONDIÇÃO DO PAVIMENTO PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE GERÊNCIA DE PAVIMENTOS URBANOS. **XXIX Congresso naClonal de Pesquisa em TransPorTe da anPeT ouro PreTo, 9 a 13 de novembro de 2015**, p. 101–112, 2015.

MOHAMED ABDULLAH, N. A.; ABDUL HASSAN, N.; MOHD SHUKRY, N. A.; MAHMUD, M. Z. H.; PUTRAJAYA, R.; HAININ, M. R.; NUR, N. I. Evaluating potential of diatomite as anti clogging agent for porous asphalt mixture. **Jurnal Teknologi**, v. 78, n. 7–2, p. 105–111, 2016.

MONTES, F.; HASELBACH, L. Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete. **Environmental Engineering Science**, v. 23, n. 6, p. 960–969, 2006.

MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion and Conservation**. Third Edit ed. [s.l: s.n.].

MRAKOVČIĆ, S.; ČEH, N.; JUGOVAC, V. Effect of aggregate gradation on pervious concrete properties. **Građevinar**, v. 66, n. 2, p. 107–113, 2014.

NBR 15575. ABNT NBR 15575-1. **ABNT NBR 15575**, 2015.

NEITHALATH, N.; WEISS, J.; OLEK, J. Characterizing Enhanced Porosity Concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 11, p. 2074–2085, 2006.

NEPTUNE, A. I.; PUTMAN, B. J. Effect of Aggregate Size and Gradation on Pervious Concrete Mixtures. **ACI Materials Journal**, n. 107, 2010.

NGUYEN, D. H.; BOUTOUIL, M.; SEBAIBI, N.; BARAUD, F.; LELEYTER, L. Durability of pervious concrete using crushed seashells. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 137–150, 2017.

NGUYEN, D. H.; BOUTOUIL, M.; SEBAIBI, N.; BARAUD, F.; LELEYTER, L.; HANH, D.; BOUTOUIL, M.; SEBAIBI, N.; BARAUD, F.; LELEYTER, L. Durability of pervious concrete using crushed seashells. **Construction and Building Materials**, v. 135, n. 2017, p. 137–150, 2017.

NGUYEN, D. H.; BOUTOUIL, M.; SEBAIBI, N.; LELEYTER, L.; BARAUD, F. Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 151–160, dez. 2013.

PATEL, P.; DOBRON, S.; FUENTESPINA, C.; SO, C.; KHOURY, N. Hydraulic Conductivity of Porous Plastic-Based Cementitious Material under Clogged and Unclogged Conditions. p. 3911–3919, 2012.

POSSAN, E. em ambiente urbano Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Edna Possan Porto Alegre. n. November, 2010.

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: Abordagem geral. **Revista técnico-científica**, v. 1, p. 1–18, 2013.

RAMA, M.; SHANTHI, V. M. EXPERIMENTAL STUDY ON SEDIMENTATION REMOVAL OF PERVIOUS CONCRETE. **ARCHIVES OF CIVIL ENGINEERING**, v.

64, n. 1, p. 181–195, 2018.

REGINATTO, G. M. P.; MACIEL, C. B.; CORSEUIL, C. W.; GRANDO, A.; MACCARINI, M.; HIGASHI, R. R.; FEILSTRECKER, L. B.; SCABURRI JÚNIOR, R. Avaliação das perdas de solo utilizando o modelo RUSLE integrado a um SIG. In: **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, SBRH, Maceió**, p. 1–11, 2011.

REHDER, B.; BANH, K.; NEITHALATH, N. Fracture behavior of pervious concretes: The effects of pore structure and fibers. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 118, p. 1–16, 2014.

SANDOVAL, G. F. B. **DESEMPENHO DO CONCRETO POROSO COM AGREGADOS SUSTENTÁVEIS**. [s.l.] Universidade Estadual de Londrina, 2014.

SANDOVAL, G. F. B. G. F. B. B.; GALOBARDES, I.; TEIXEIRA, R. S. R. S.; TORALLES, B. M. B. M. Comparison between the falling head and the constant head permeability tests to assess the permeability coefficient of sustainable Pervious Concretes. **Case Studies in Construction Materials**, v. 7, n. May, p. 317–328, 1 dez. 2017.

SANDOVAL, G. F. B.; GALOBARDES, I.; CAMPOS, A.; TORALLES, B. M. Assessing the phenomenon of clogging of pervious concrete (Pc): Experimental test and model proposition. **Journal of Building Engineering**, v. 29, n. January, 1 maio 2020.

SANDOVAL, G. F. B.; GALOBARDES, I.; SCHWANTES-CEZARIO, N.; CAMPOS, A.; TORALLES, B. M. Correlation between permeability and porosity for pervious concrete (PC). **DYNA (Colombia)**, v. 86, n. 209, p. 151–159, 1 abr. 2019.

SATA, V.; WONGSA, A.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 33–39, maio 2013.

SEHGAL, K.; DRAKE, J.; SETERS, T. VAN; LINDEN, W. K. VANDER. Improving restorative maintenance practices for mature permeable interlocking concrete pavements. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 11, 2018.

SEO, D.; YUN, T. S.; KIM, K. Y.; YOUM, K. S. Time-Dependent Drainage Capacity and Runoff of Pervious Block Subjected to Repeated Rainfall Simulation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 5, p. 04016273, 2017.

SETYAWAN, A.; NAINGGOLAN, J.; BUDIARTO, A. **Predicting the remaining service life of road using pavement condition index** *Procedia Engineering*, 2015.

SHU, X.; HUANG, B.; WU, H.; DONG, Q.; BURDETTE, E. G. Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3187–3192, ago. 2011.

SILVA, A. M. DA. Rainfall erosivity map for Brazil. **Catena**, v. 57, n. 3, p. 251–259, 2004.

SILVA, R. V.; BRITO, J. DE; DHIR, R. K. Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2171–2186, 2016.

SONEBI, M.; BASSUONI, M. T. Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 147–154, jan. 2013.

SOTO-PÉREZ, L.; HWANG, S. Mix design and pollution control potential of pervious concrete with non-compliant waste fly ash. **Journal of Environmental Management**, v. 176, p. 112–118, 2016.

SOUZA RISSON, K. **Proposta de Procedimento de moldagem de corpos de prova em laboratório para concretos permeáveis**. [s.l: s.n.]. v. 01

SRIRAVINDRARAJAH, R.; DO, H. M.; NGUYEN, L. D.; AOKI, Y. Effect of clogging on the water permeability of pervious concrete. **Incorporating Sustainable Practice in Mechanics of Structures and Materials - Proceedings of the 21st Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials**, n. September, 2010.

SUMANASOORIYA, M. S.; NEITHALATH, N. Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 8, p. 778–787, set. 2011.

SUOZZO, MARK J; DEWOOLKAR, M. M. Long-Term Field Monitoring and Evaluation of Maintenance Practices for Pervious Concrete Pavement in Vermont. n. 2292, p. 94–103, 2012.

SUOZZO, MARK J.; DEWOOLKAR, M. M. Long-term field monitoring and evaluation of maintenance practices for pervious concrete pavement in Vermont. **Transportation Research Record**, n. 2292, p. 94–103, 2012.

TAO, W.; WANG, Q.; LIN, H. An approximate analytical solution for describing surface runoff and sediment transport over hillslope. **Journal of Hydrology**, v. 558, p. 496–508, 2018.

TARBUCK, E. J.; LUTGENS, F. K. **Ciencias de la tierra una introducción a la geología física**. [s.l: s.n.].

TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. DE F.; DECHEN, S. C. F. The costs of soil erosion. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 287–298, 2011.

TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. **Pervious Concrete Pavements**. [s.l: s.n.].

THO-IN, T.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P.; JATURAPITAKKUL, C. Pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 30, n. 325, p. 366–371, maio 2012.

TONG, B. Clogging effects of portland cement pervious concrete. **Iowa State University**, p. 202, 2011.

TORRES, A.; HU, J.; RAMOS, A. The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 850–859, 2015.

VANCURA, M. E.; MACDONALD, K.; KHAZANOVICH, L. Location and Depth of Pervious Concrete Clogging Material before and after Void Maintenance with Common Municipal Utility Vehicles. **Journal of Transportation Engineering**, v. 138, n. 3, p. 332–338, 2012.

WALSH, S. P.; ROWE, A.; PH, D.; ASCE, A. M.; GUO, Q.; ASCE, M. Laboratory Scale Study to Quantify the Effect of Sediment Accumulation on the Hydraulic Conductivity of Pervious Concrete. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 140, n. 6, p. 1–7, 2014.

WEISS, P. T.; KAYHANIAN, M.; KHAZANOVICH, L.; GULLIVER, J. S. Permeable Pavements in Cold Climates: State of the Art and Cold Climate Case Studies. **Mn/Rc 2015-30**, n. June, p. 375, 2015.

WELKER, A. L.; ASCE, A. M.; JENKINS, J. K. G.; MCCARTHY, L.; ASCE, A. M.; NEMIROVSKY, E. Examination of the Material Found in the Pore Spaces of Two Permeable Pavements. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 139, n. 4, p. 278–284, 2013.

WERNER, B.; HASELBACH, L.; PH, D.; ASCE, M. Temperature and Testing Impacts on Surface Infiltration Rates of Pervious Concrete. v. 31, n. 2, p. 1–11, 2017.

WINSTON, R. J.; AL-RUBAEI, A. M.; BLECKEN, G. T.; VIKLANDER, M.; HUNT, W. F. Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate - The effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling. **Journal of Environmental Management**, v. 169, p. 132–144, 2016.

WU, H.; HUANG, B.; ASCE, M.; SHU, X.; DONG, Q. Laboratory Evaluation of Abrasion Resistance of Portland Cement Pervious Concrete. n. May, p. 697–702, 2011.

WU, H.; LIU, Z.; SUN, B.; YIN, J. Experimental investigation on freeze-thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC). **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 63–71, 2016.

WU, M. H.; LIN, C. L.; HUANG, W. C.; CHEN, J. W. Characteristics of pervious concrete using incineration bottom ash in place of sandstone graded material. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 618–624, 2016.

XIE, N.; AKIN, M.; SHI, X. Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. **JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION**, v. 210, p. 1605–1621, 2019.

YANG, J. Forecasting pavement remaining service life with limited causal data. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 4, n. 5, p. 301–306, 2011.

YANG, J.; JIANG, G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 2, p. 381–386, 2003.

YANG, Z.; MA, W.; SHEN, W.; ZHOU, M. The aggregate gradation for the porous concrete pervious road base material. **Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition**, v. 23, n. 3, p. 391–394, 12 jul. 2008.

YEIH, W.; FU, T. C.; CHANG, J. J.; HUANG, R. Properties of pervious concrete made with air-cooling electric arc furnace slag as aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 737–745, 2015.

YUAN, J.; CHEN, X.; LIU, S.; LI, S.; SHEN, N. Effect of water head, gradation of clogging agent, and horizontal flow velocity on the clogging characteristics of pervious concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 9, p. 1–10, 2018.

ZAETANG, Y.; SATA, V.; WONGSA, A.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 15–21, 2016.

ZAETANG, Y.; WONGSA, A.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. Use of lightweight aggregates in pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 585–591, nov. 2013.

ZHANG, J.; JIN, Q.; CUI, X. Experimental Study on Pore Clogging of a Porous Pavement under Surface Runoff. **Design, Analysis, and Asphalt Material Characterization for Road and Airfield Pavements**, p. 138–146, 2014.

ZHANG, J.; SHE, R.; DAI, Z.; MING, R.; MA, G.; CUI, X.; LI, L. Experimental simulation study on pore clogging mechanism of porous pavement. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 803–818, 2018.

ZHANG, Z.; ZHANG, Y.; YAN, C.; LIU, Y. Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 112–118, 2017.

ZHONG, R.; WILLE, K. Compression response of normal and high strength pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 177–187, 2016.

\_\_\_\_\_. Influence of matrix and pore system characteristics on the durability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 132–141, 2018.

ZHONG, R.; XU, M.; VIEIRA NETTO, R.; WILLE, K. Influence of pore tortuosity on hydraulic conductivity of pervious concrete: Characterization and modeling. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 1158–1168, 2016.

ZHOU, H.; LI, H.; ABDELHADY, A.; LIANG, X.; WANG, H.; YANG, B. Experimental investigation on the effect of pore characteristics on clogging risk of pervious concrete based on CT scanning. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 130–139, 2019.

ZICCARELLI, M.; VALORE, C. Hydraulic conductivity and strength of pervious concrete for deep trench drains. **Geomechanics for Energy and the Environment**, v. 18, p. 41–55, 2019.