RAFAEL BATEZINI

**Estudo das características hidráulicas e mecânicas de calçadas em concreto
permeável em pista experimental**

SAO PAULO

2019

RAFAEL BATEZINI

**Estudo das características hidráulicas e mecânicas de calçadas em concreto
permeável em pista experimental**

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção
do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Dr. José Tadeu Balbo, Prof. Titular

São Paulo
2019

RAFAEL BATEZINI

Engenheiro Civil, Universidade de Passo Fundo, 2009

Mestre em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, 2012

Estudo das características hidráulicas e mecânicas de calçadas em concreto permeável em pista experimental

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de Transportes

Orientador: Dr. José Tadeu Balbo, Prof. Titular

São Paulo

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência de seu orientador.

São Paulo, ____ de _____ de 2019

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Batezini, Rafael

Estudo das características hidráulicas e mecânicas de calçadas em concreto permeável em pista experimental / R. Batezini – versão corr. São Paulo, 2019
292 p.

Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Transportes

1. Pavimentação 2. Pavimento permeável 3. Concreto permeável
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Nadir (*in memoriam*) e Evani, e irmãos, André e Batista, pelo incentivo e apoio que se estendeu desde o início da minha etapa estudantil até os dias atuais.

Aos meus sobrinhos, Enzo, Kaynã, Lorenzo e Pedro, por todo o afeto que demonstram por mim, seja de maneira presencial, nos poucos momentos que conseguimos passar juntos, seja à distância quando estou em São Paulo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Tadeu Balbo, por ter se dedicado e se empenhado durante toda a etapa de doutorado. Foram de extrema valia todos os conselhos, conversas e discussões, além de seu apoio e confiança, e, acima de tudo, por acreditar no meu potencial.

À professora e grande especialista em concretos permeáveis, Dra. Liv Haselbach, pelo grande aprendizado recebido durante as etapas de trabalho realizadas em conjunto na USP em São Paulo e na *Washington State University (WSU)* nos EUA.

À Lafarge Holcim Brasil S/A e sua excelente equipe de engenheiros e laboratoristas, por disponibilizar os materiais, a infraestrutura e a mão de obra para a realização das moldagens e ensaios, além dos materiais para execução do revestimento das calçadas. Especial agradecimento ao Glauco, Alecsandra e Mário, pelo apoio e discussões técnicas de alto nível referente às dosagens e moldagens dos corpos de prova em laboratório;

Ao Sr. Cláudio Freitas, proprietário da empresa Engenharia de Pisos, por ter produzido o rolo de metal e disponibilizado mão de obra e demais equipamentos necessários para execução das calçadas experimentais;

À Prefeitura do Campus da Capital, em especial ao engenheiro Douglas Costa, pelo apoio técnico e fornecimento de equipamentos para escavação, execução das calçadas e realização ensaios de infiltração *in situ*;

À Grace Brasil que, por intermédio do Eng. Hideo, auxiliou no fornecimento dos aditivos para o concreto permeável, além de experiência técnica para definição dos teores preliminares dos aditivos a serem empregados;

À Odebrecht Ambiental pelo fornecimento do agregado reciclado utilizado como material de base das calçadas permeáveis;

À Ciber métrica e à Copavel, por terem disponibilizado equipamentos FWD para realização dos levantamentos deflectométricos;

Ao Laboratório de Tecnologia da Pavimentação da EPUSP e sua equipe, em especial ao Dr. Edson de Moura, pelo auxílio na realização das extrações de amostras de concreto permeável das calçadas.

À minha banca de qualificação, Prof. Dr. José Rodolfo Scarati e a Prof. Dra. Ana Elisabete Jacintho, pelos conselhos e válidas considerações feitas na etapa de qualificação;

Aos meus colegas de laboratório Andréia, Bruno, Eric, Filipe e Lucio, pelos auxílios em vários momentos de necessidade. Especial agradecimento ao Rodrigo, que não mediu esforços para auxiliar em etapa decisiva do trabalho;

Aos alunos de iniciação científica Beatriz, Domênico, Guilherme, Vivian e Wesley, pelo apoio nas etapas de laboratório e de campo da pesquisa;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de pesquisa concedida;

À minha sócia na empresa Projeta Infraestrutura, Ana Paula, por assumir as tarefas gerenciais e técnicas da nossa empresa enquanto eu necessitava voltar todo o meu tempo e dedicação ao doutorado;

À minha esposa Ana Patrícia pelo apoio e suporte durante toda a etapa de elaboração do doutorado, tendo papel essencial na produção de um texto conciso e claro.

Aos amigos inseparáveis de banda Brasília, Ceará, Cleiton, Lucas, pela parceria ao longo de todos esses anos morando em São Paulo;

Aos colegas Brandon, Quinn e Trace, pós-graduandos da WSU, que tive o prazer de dividir experiências e discussões sobre o tema de concretos permeáveis durante meu estágio nos EUA;

A todos vocês, minha profunda gratidão.

RESUMO

A presente pesquisa teve como objetivo principal a realização de estudos laboratoriais, de campo e numéricos, buscando viabilizar duas misturas de concreto permeável que foram utilizadas na construção de duas calçadas experimentais localizadas no *campus* da USP em São Paulo. Nas pistas experimentais foi realizado o acompanhamento da capacidade permeável ao longo do tempo, além da avaliação das suas respostas estruturais frente à aplicação de carregamentos dinâmicos por meio de equipamento FWD, considerando a variação do teor de umidade no interior das estruturas. Por fim, foram realizadas retroanálises com uso de diferentes *softwares* procurando entender qual das camadas da estrutura apresenta maior vulnerabilidade estrutural frente à presença de volumes excessivos de água. Os resultados da etapa laboratorial indicaram que há uma sensibilidade muito grande no comportamento das misturas em função do teor de aditivo superplastificante, uma vez que houve segregação severa da pasta de cimento no fundo dos corpos de prova quando esse teor ultrapassou determinado limite. Os resultados dos ensaios de taxa de infiltração em campo possibilitaram a proposição um modelo empírico para estimativa do desempenho da capacidade hidráulica para calçadas em concreto permeável executadas na região de São Paulo. Os resultados dos levantamentos deflectométricos e das retroanálises indicaram variação considerável na capacidade de suporte do conjunto base+subleito entre as calçadas, além de evidenciar considerável perda da capacidade de suporte dessas estruturas quanto submetidas à presença de elevados volumes de água no seu interior.

Palavras chave: concreto permeável, calçada, pavimento, taxa de infiltração, levantamento deflectométrico, análise estrutural, retroanálise.

ABSTRACT

The main goal of this research was to carry out laboratorial, field and numerical studies with the purpose of defining two feasible pervious concrete mixtures to be used as the surface layer of two experimental sidewalks in the campus of the University of Sao Paulo. The permeability capacity of the sidewalks was monitored along time, as well as its structural responses in terms of deflections due to application of FWD dynamic loadings, assessing how the structural behavior was impacted by the presence of high volumes of water into the permeable structure. A backcalculation procedure was used in order to assess the elastic behavior of the structure layers, as well as find out which layer of the structure is the most vulnerable in terms of mechanical behavior under the presence of excessive volumes of water. The results in the laboratory indicates that pervious concrete mixtures are considerable sensitives to the amount of superplasticizer additive, since a severe mortar segregation was observed on the bottom of the specimens casted using some of the mixtures produced. The results of infiltration tests in field made it possible to develop an empirical model capable of estimating the hydraulic performance of pervious concrete permeable sidewalks in Sao Paulo region. The results of the deflection measurements and the backcalculations indicated a considerable variation on the bearing capacity of the infrastructure (base+subgrade) between the two sidewalks. In addition, it is evident the loss of bearing capacity of the structure under the presence of excessive amount of water into the sidewalk.

Key words: pervious concrete, sidewalk, pavement, infiltration rate, deflection measurement, structural analysis, backcalculation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Comparação visual entre as superfícies dos pavimentos em concreto permeável e asfáltico convencional após evento de chuva.....	40
Figura 2.2: Amostra de CPCP	41
Figura 2.3: Curvas granulométricas típicas de misturas de concreto permeável	43
Figura 2.4: Avaliação da quantidade de água em função da consistência, onde:	48
Figura 2.5: Divisão da espessura do revestimento em concreto permeável em campo em termos de variação da porosidade	50
Figura 2.6: Permeâmetro de carga variável utilizado para medir a condutividade hidráulica de CPs de concreto permeável	52
Figura 2.7: Resistência à compressão (dividido por 10) e resistência à tração na flexão em função da variação da porosidade	56
Figura 2.8: Efeito da energia de compactação na resistência à compressão em CPs rompidos aos 7 dias	57
Figura 2.9: Efeito da energia de compactação na relação entre a resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral.....	58
Figura 2.10: Efeito da energia de compactação na variação da massa unitária	58
Figura 2.11: Efeito das adições na permeabilidade do CPCP.....	59
Figura 2.12: Efeito das adições na resistência à tração por compressão diametral do CPCP	60
Figura 2.13: Variação da relação entre as resistências à tração na flexão e à compressão em função da porosidade	61
Figura 2.14: Resultados dos ensaios de fratura.....	65
Figura 2.15: Comparação do comportamento à fadiga entre diferentes tipos de concretos.....	66
Figura 2.16: Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão de CPs de CPCP.....	69
Figura 3.1: Curva granulométrica dos agregados	77
Figura 3.2: Procedimento de diluição dos aditivos em água antes da preparação da mistura	84
Figura 3.3: Mistura dos componentes do concreto permeável.....	85
Figura 3.4: Teste tátil visual para controle de produção do concreto permeável.....	86
Figura 3.5: MC em 3 camadas	87

Figura 3.6: MCU com auxílio de neoprene e martelo	88
Figura 3.7: Método de compactação dos CPs prismáticos	88
Figura 3.8: Forma e lona de proteção para moldagem da placa	89
Figura 3.9: Rolo metálico de compactação manual.....	90
Figura 3.10: Compactação da placa com uso de rolo metálico	90
Figura 3.11: Procedimento para obtenção da massa específica aparente no estado fresco	93
Figura 3.12: Moldagem do CP para ensaio de abatimento do concreto.....	94
Figura 3.13: Cone formado no ensaio de abatimento da mistura Ra	94
Figura 3.14: Procedimento de pesagem submersa dos CPs	96
Figura 3.15: Procedimento de retificação dos CPs	97
Figura 3.16: Ensaio de resistência à compressão uniaxial.....	97
Figura 3.17: Ensaio de resistência à tração na flexão	99
Figura 3.18: Instalação do anel de PVC sobre a superfície	100
Figura 3.19: Execução do ensaio de infiltração em campo	101
Figura 3.20: Película plástica sendo aquecida e detalhe da altura de transposição de 2 cm sobre a superfície do CP	102
Figura 3.21: Execução do ensaio de taxa de infiltração em CP “não confinado”	103
Figura 3.22: Aspecto da superfície inferior dos CPs da mistura Ra	106
Figura 3.23: Esquerda - Detalhe da ruptura de canto; Direita: Detalhe da ruptura axial	107
Figura 3.24: Segregação da pasta nas misturas Rd e Re	110
Figura 3.25: Correlação entre os resultados de massa específica aparente no estado fresco e a porosidade das misturas Rb, Rc, Ri, Rj e RI.....	110
Figura 3.26: Correlação entre os resultados de massa específica aparente no estado endurecido e a porosidade das misturas Rb, Rc, Ri, Rj e RI.....	111
Figura 3.27: Variação dos parâmetros físicos em função do teor de superplastificante	114
Figura 3.28: Comparação entre os resultados de taxa de infiltração em laboratório	115
Figura 3.29: Relação entre a taxa de infiltração não confinada e confinada em função do tempo de infiltração dos ensaios confinados.....	117
Figura 3.30: Variação dos parâmetros de resistência aos 28 dias em função do teor de superplastificante	119

Figura 3.31: Resistência à compressão média aos 28 dias em função da variação da porosidade média para cada mistura	120
Figura 3.32: Resistência à tração na flexão média aos 28 dias em função da variação da porosidade média para cada mistura	120
Figura 3.33: Detalhe do fundo da placa executada com as misturas Ra e Rh.....	124
Figura 3.34: Detalhe da superfície resultante e cobertura dos agregados sendo a mistura Ra à esquerda e Rh à direita.....	125
Figura 4.1: Esquema de implantação da Calçada 1 (medidas em metro – sem escala)	131
Figura 4.2: Curva granulométrica do RCD 20-40 mm	134
Figura 4.3: Procedimento de escavação para implantação da estrutura da Calçada 1	134
Figura 4.4: Regularização da base e colocação das formas para implantação da estrutura da Calçada 1	135
Figura 4.5: Ajuste manual do concreto após lançamento.....	136
Figura 4.6: Compactação e proteção da camada de revestimento	137
Figura 4.7: Retirada do revestimento existente em blocos de concreto intertravados	140
Figura 4.8: Procedimento de escavação e regularização do subleito	141
Figura 4.9: Assentamento das guias	141
Figura 4.10: Instalação das mantas	142
Figura 4.11: Escavação, instalação da caixa de coleta, dreno e ligação com a boca de lobo existente	143
Figura 4.12: Lançamento e regularização da base reciclada	143
Figura 4.13: Procedimento de mistura dos materiais em usina.....	144
Figura 4.14: Adição manual de água e aditivos.....	145
Figura 4.15: Processo de umedecimento da base	145
Figura 4.16: Utilização do sarrafo de madeira e do rolo de compactação.....	146
Figura 4.17: Finalização com equipamento “bambolê” e detalhe da superfície finalizada	147
Figura 4.18: Esquema de distribuição das seções de concretagem (medidas em metro).....	148
Figura 4.19: Posicionamento do FWD sobre a Calçada 1	151
Figura 4.20: Posicionamento do FWD sobre a Calçada 2.....	151

Figura 4.21: Transbordamento de água através da superfície do CPCP	152
Figura 4.22: Representação da desagregação observada no segmento 2 da Calçada 2 na seção 6 de concretagem	156
Figura 4.23: Resultados de taxa de infiltração ao longo do tempo para a Calçada 1	158
Figura 4.24: Esquema de locação dos pontos onde foram realizados os ensaios de taxa de infiltração na Calçada 1	158
Figura 4.25: Resultados médios de taxa de infiltração ao longo do tempo para a Calçada 2	160
Figura 4.26: Esquerda: elevada quantidade de detritos provenientes das árvores e vegetação sobre a superfície da calçada; Direita: diferença de nível de implantação entre a calçada e o terreno adjacente	161
Figura 4.27: Esquerda: pouca densidade de vegetação e inexistência de árvores; Direita: diferença de nível de implantação entre a calçada e o terreno adjacente no bordo esquerdo da imagem.....	162
Figura 4.28: Detalhe da amostra com partículas de RCD aderidas ao revestimento	163
Figura 4.29: Ocorrência de segregação da pasta	163
Figura 4.30: Modelo desenvolvido (t, h e Vd) versus resultados de campo	166
Figura 4.31: Modelo desenvolvido (t e Vd) versus resultados de campo	167
Figura 4.32: Bacias de deflexão obtidas na Calçada 1	169
Figura 4.33: Bacias de deflexão obtidas na Calçada 2 – Segmento 1	170
Figura 4.34: Bacias de deflexão obtidas na Calçada 2 – Segmento 2	171
Figura 4.35: Gráfico <i>boxplot</i> referente aos resultados de deflexão máxima.....	173
Figura 4.36: Comparação entre Dsec e Dsat nas posições D0 e D120 para o segmento 1 da Calçada 2 e cargas de 4.100kgf e 6.600 kgf	176
Figura 4.37: Comparação entre Dsec e Dsat nas posições D0 e D120 para o segmento 2 da Calçada 2 e cargas de 4.100kgf e 6.600 kgf	176
Figura 5.1: Simulação da geometria no referente ao ensaio C2-2A.....	191
Figura 5.2: Entrada dos parâmetros referente ao ensaio C2-2A.....	192
Figura 5.3: Simulação do carregamento do ensaio C2-2A.....	192
Figura 5.4: Malha de elementos considerada para o ensaio C2-2A.....	193
Figura 5.5: Aproximação das bacias de deflexão do EverFE no ponto C2-2A.....	195
Figura 5.6: Retroanálise das bacias de deflexão no BAKFAA no ensaio C2-2A.....	198

Figura 5.7: Aproximação das bacias de deflexão do BAKFAA no ensaio C2-2A	199
Figura 5.8: Modelo 3D para análise no ABAQUS.....	200
Figura 5.9: Variação do tempo de análise em função da densidade da malha	201
Figura 5.10: Variação das deflexões em função da densidade da malha	201
Figura 5.11: Comparação entre os resultados de E	205
Figura 5.12: Comparação entre os resultados de k.....	205
Figura 5.13: Comparação entre os resultados de RMSE	206
Figura 5.14: Comparação entre os resultados de E da base - BAKFAA	206
Figura 5.15: Comparação entre os resultados de E do subleito - BAKFAA	207
Figura 5.16: Comparação entre os resultados médios de E do revestimento nas condições “seca” e “saturada”	213
Figura 5.17: Comparação entre os resultados médios de E da base nas condições “seca” e “saturada”	213
Figura 5.18: Comparação entre os resultados médios de E do subleito nas condições “seca” e “saturada”	215
Figura 5.19: Variação de RT para diferentes espessuras de placa e carregamentos em função da redução da capacidade de suporte do conjunto base+subleito	218
Figura 5.20: Variação do número N admissível para diferentes espessuras de placa e carregamentos em função da redução de k	219
Figura B.1: Planta de localização e acesso para caminhões	261
Figura B.2: Local de implantação da calçada 2 - Situação existente	262
Figura B.3: Local de implantação da calçada 2 - Situação projetada.....	263
Figura B.4: (a) Detalhe 1 – Segmento 2; (b) Corte AA; (c) Corte BB; (d) Corte CC	264
Figura B.5: (a) Detalhe 2 – Estrutura segmento 1; (b) Detalhe 3 – Estrutura segmento 2; (c) Detalhe 4 – Estrutura segmento 3; (d) Detalhe 5 – Ligação entre a caixa coletora e a boca de lobo existente; (e) Detalhe do fundo da caixa coletora; (f) Detalhe executivo das guias de transição entre os segmentos 1 e 2; (g) Indicação dos tipos de materiais que compõe a estrutura da calçada e demais elementos.....	265
Figura C.1: Localização dos pontos de execução dos levantamentos deflectométricos na Calçada 1 (dimensões em m).....	266
Figura C.2: Localização dos pontos de execução dos levantamentos deflectométricos no segmento 1 da Calçada 2 (dimensões em m)	266
Figura C.3: Localização dos pontos de execução dos levantamentos deflectométricos no segmento 2 da Calçada 2 (dimensões em m)	266

Figura E.1: Modelo de variação da permeabilidade em função do tempo versus resultados dos levantamentos de campo – Modelo Linear – $R^2=0,24$	269
Figura E.2: Modelo de variação da permeabilidade em função do tempo e da presença ou não de vegetação versus resultados dos levantamentos de campo – Modelo Linear – $R^2=0,65$	269
Figura E.3: Modelo de variação da permeabilidade em função do tempo versus resultados dos levantamentos de campo – Modelo logarítmico – $R^2=0,24$	270
Figura E.4: Modelo de variação da permeabilidade em função do tempo e da presença ou não de vegetação versus resultados dos levantamentos de campo – Modelo logarítmico – $R^2=0,65$	270

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Faixas de consumos e proporções típicas dos principais materiais empregados nas misturas de concreto permeável.....	42
Tabela 2.2: Faixas de consumo de aditivos químicos e fibras comumente aplicados em misturas de concretos permeáveis.....	47
Tabela 2.3: Propriedades de CPCP de acordo com a literatura.....	62
Tabela 2.4: Resultados dos ensaios de fadiga.....	66
Tabela 2.5: Resultados dos ensaios de fadiga (número N).....	73
Tabela 3.1: Resultados dos ensaios de caracterização do pedrisco (graduação comercial).....	77
Tabela 3.2: Características do CPIII 40 RS.....	79
Tabela 3.3: Características do CPV ARI RS	80
Tabela 3.4: Misturas e proporções dos materiais.....	83
Tabela 3.5: Quantidade de ensaios realizados	92
Tabela 3.6: Resultados dos ensaios para cada CP das misturas Ra, Rb e Rc.....	104
Tabela 3.7: Médias dos resultados das misturas Ra, Rb e Rc.....	105
Tabela 3.8: Resultados dos ensaios não destrutivos para as misturas Rf, Rg, Ri, Rj e RI.....	109
Tabela 3.9: Análise estatística dos resultados das características físicas para todas as misturas com exceção da mistura Rh	113
Tabela 3.10: Resultados do teste de hipótese para comparação da taxa de infiltração dos CP confinados e não confinados	116
Tabela 3.11: Resultados dos ensaios de resistência para as misturas Ra, Rb, Rc, Rf, Rg, Ri, Rj e RI.....	118
Tabela 3.12: Análise estatística dos resultados de resistência	119
Tabela 3.13: Resultados dos ensaios de infiltração e estimativa da porosidade das misturas Ra e Rh executadas na placa de 1,0 m x 1,0 m x 0,1 m.....	122
Tabela 4.1: Composição do CPCP empregado como revestimento da Calçada 1 ..	132
Tabela 4.2: Resultados da caracterização do RCD 20-40 mm.....	133
Tabela 4.3: Composição do CPCP empregado como revestimento dos segmentos 1 e 2 da Calçada 2	139
Tabela 4.4: Controle dos tempos de concretagem dos segmentos 1 e 2.....	148

Tabela 4.5: Resultados de resistência à compressão dos CPs para controle tecnológico	154
Tabela 4.6: Análise estatística dos resultados de resistência à compressão de CPs para controle tecnológico.	154
Tabela 4.7: Resultados dos ensaios para as amostras extraídas da Calçada 1	164
Tabela 4.8: Análise estatística referente aos resultados de deflexões máximas.....	172
Tabela 4.9: Resultados do teste de hipóteses “t”	173
Tabela 4.10: Análise estatística de Dsec e Dsat em D0 e D120	177
Tabela 4.11: Teste de hipótese das médias dos resultados de deflexão em D0 e D120 nas condições “seca” e “saturada” para carga de 4.100 kgf	178
Tabela 4.12: Teste de hipótese das médias dos resultados de deflexão em D0 e D120 nas condições “seca” e “saturada” para carga de 6.600 kgf	178
Tabela 4.13: Relação entre as deflexões nas posições D0 e D120 nas condições “seca” e “saturada”	178
Tabela 5.1: Resultados estimados de E e k para a Calçada 1	189
Tabela 5.2: Resultados estimados de E e k para a Calçada 2	189
Tabela 5.3: Exemplo do procedimento de retroanálise no EverFE para o ensaio C2-2A.....	194
Tabela 5.4: Exemplo do procedimento de retroanálise no BAKFAA para o ensaio C2-2A.....	198
Tabela 5.5: Parâmetros das camadas para a análise mecanicista	203
Tabela 5.6: Resultados da Retroanálise do valor de k	203
Tabela 5.7: Valores máximos e mínimos dos resultados das retroanálises	207
Tabela 5.8: Análise estatística dos resultados das retroanálises	208
Tabela 5.9: Resultados do teste “f” (equivalência das variâncias)	216
Tabela 5.10: Resultados do teste de hipóteses do segmento 1 da Calçada 2 para carregamento de 4.100 kgf.....	216
Tabela 5.11: Resultados do teste de hipóteses do segmento 2 da Calçada 2 para carregamento de 4.100 kgf.....	216
Tabela 5.12: Resultados do teste de hipóteses do segmento 1 da Calçada 2 para carregamento de 6.600 kgf.....	217
Tabela 5.13: Resultados do teste de hipóteses do segmento 2 da Calçada 2 para carregamento de 6.600 kgf.....	217

Tabela A.1: Análise de detecção de <i>outliers</i> dos dados de massa específica aparente no estado fresco	245
Tabela A.2: Análise de detecção de <i>outliers</i> dos dados de massa específica aparente no estado endurecido	247
Tabela A.3: Análise de detecção de <i>outliers</i> dos dados de porosidade	249
Tabela A.4: Análise de detecção de <i>outliers</i> dos dados de taxa de infiltração em condição confinada	251
Tabela A.5: Análise de detecção de <i>outliers</i> dos dados de taxa de infiltração em condição não confinada	253
Tabela A.6: Análise de detecção de <i>outliers</i> dos dados de resistência à compressão aos 28 dias	255
Tabela A.7: Análise de detecção de <i>outliers</i> dos dados resistência à tração na flexão aos 28 dias	257
Tabela A.8: Análise de detecção de <i>outliers</i> dos dados resistência à compressão aos 28 dias referente aos CPs para controle tecnológico das misturas dos segmentos 1, 2 e 3.	259
Tabela D.1: Resultados de taxa de infiltração na calçada 1	267
Tabela D.2: Resultados de taxa de infiltração no segmento 1 da calçada 2	267
Tabela D.3: Resultados de taxa de infiltração no segmento 2 da calçada 2	268
Tabela F.1: Resultados dos levantamentos deflectométricos na Calçada 1	271
Tabela F.2: Resultados dos levantamentos deflectométricos na Calçada 2 – Segmento 1	271
Tabela F.3: Resultados dos levantamentos deflectométricos na Calçada 2 – Segmento 2.	272
Tabela G.1: Resultados dos levantamentos deflectométricos na Calçada 2 – Segmento 1 na Condição “Seca”	273
Tabela G.2: Resultados dos levantamentos deflectométricos na Calçada 2 – Segmento 1 na Condição “Saturada”	274
Tabela G.3: Resultados dos levantamentos deflectométricos na Calçada 2 – Segmento 2 na Condição “Seca”	275
Tabela G.4: Resultados dos levantamentos deflectométricos na Calçada 2 – Segmento 2 na Condição “Saturada”	276
Tabela H.1: Resultados das retroanálises na Calçada 1 - EverFE.....	277
Tabela H.2: Resultados das retroanálises na Calçada 1 - BAKFAA	278

Tabela H.3: Resultados das retroanálises na Calçada 1 – ABAQUS.....	279
Tabela H.4: Resultados das retroanálises no segmento 1 da Calçada 2 - EverFE.....	280
Tabela H.5: Resultados das retroanálises no segmento 1 da Calçada 2 - BAKFAA	281
Tabela H.6: Resultados das retroanálises no segmento 1 da Calçada 2 - ABAQUS	282
Tabela H.7: Resultados das retroanálises no segmento 2 da Calçada 2 - EverFE.....	283
Tabela H.8: Resultados das retroanálises no segmento 2 da Calçada 2 - BAKFAA	284
Tabela H.9: Resultados das retroanálises no segmento 2 da Calçada 2 - ABAQUS	285
Tabela I.1: Resultados das retroanálises segmento 1 da Calçada 2 incluindo análise estatística básica – Condição “seca” para carga de 4.100 kgf.....	286
Tabela I.2: Resultados das retroanálises segmento 1 da Calçada 2 incluindo análise estatística básica – Condição “seca” para carga de 6.600 kgf.....	287
Tabela I.3: Resultados das retroanálises segmento 1 da Calçada 2 incluindo análise estatística básica – Condição “saturada” para carga de 4.100 kgf.....	288
Tabela I.4: Resultados das retroanálises segmento 1 da Calçada 2 incluindo análise estatística básica – Condição “saturada” para carga de 6.600 kgf.....	289
Tabela I.5: Resultados das retroanálises segmento 2 da Calçada 2 incluindo análise estatística básica – Condição “seca” para carga de 4.100 kgf.....	290
Tabela I.6: Resultados das retroanálises segmento 2 da Calçada 2 incluindo análise estatística básica – Condição “seca” para carga de 6.600 kgf.....	290
Tabela I.7: Resultados das retroanálises segmento 2 da Calçada 2 incluindo análise estatística básica – Condição “saturada” para carga de 4.100 kgf.....	291
Tabela I.8: Resultados das retroanálises segmento 2 da Calçada 2 incluindo análise estatística básica – Condição “saturada” para carga de 6.600 kgf.....	292

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ACPA	<i>American Concrete Pavement Association</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BMP	<i>Best Management Practice</i>
CPA	Camada Porosa de Atrito
CCP	Concreto de Cimento Portland
CRMCA	<i>Colorado Ready Mixed Concrete Association</i>
CP	Corpo de prova
CPCP	Concreto Permeável de Cimento Portland
CPs	Corpos de prova
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
EUA	Estados Unidos da América
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
LVDTs	<i>Linear Variable Differential Transformers</i>
MC	Método Convencional de Compactação
MCU	Método de Compactação em Camada Única
n/a	não avaliado
NBR	Norma Brasileira Registrada
NRMCA	<i>National Ready Mixed Concrete Association</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
RCD	Resíduo de Construção e de Demolição
TSCE	Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas
UHI	<i>Urban Heat Island effect</i> ou efeito de Ilha de Calor Urbana
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
a	Raio da carga circular
a/c	água/cimento
b	Largura média do corpo de prova
CV	Coeficiente de variação
d_0 ou D0	Deflexão no ponto de aplicação de carga
d_{20} ou D20	Deflexão a 20 cm do ponto de aplicação de carga
d_{30} ou D30	Deflexão a 30 cm do ponto de aplicação de carga
d_{45} ou D45	Deflexão a 45 cm do ponto de aplicação de carga
d_{60} ou D60	Deflexão a 60 cm do ponto de aplicação de carga
d_{90} ou D90	Deflexão a 90 cm do ponto de aplicação de carga
d_{120} ou D120	Deflexão a 120 cm do ponto de aplicação de carga
d_{calc_i}	Deflexão simulada
d_{campo_i}	Deflexão levantada em campo
Dsat	Deflexão na condição “saturada”
Dsec	Deflexão na condição “seca”
E	Módulo de elasticidade
E_e	Módulo de elasticidade estático
f_c	Resistência à compressão
$f_{c,e}$	Resistência à compressão estimada
$f_{ct,f}$	Resistência à tração na flexão
$f_{ct,f,e}$	Resistência à tração na flexão estimada
F_u	Carga de ruptura
h	Altura média do CP
h_p	Espessura da placa
I	Taxa de infiltração
I_C	Taxa de infiltração confinada
I_e	Taxa de infiltração estimada
$I_{N,e}$	Taxa de infiltração não confinada estimada
k	Módulo de reação do subleito
l	Distância entre os cutelos de suporte

l_r	Raio de rigidez relativa
M_c	Massa do corpo de prova mais massa do molde
M_m	Massa do molde
MR	Módulo de Ruptura do Concreto
M_s	Massa seca do corpo de prova
M_u	Massa submersa do corpo de prova
M_w	Massa da água infiltrada
nd	Número de pontos de leitura das deflexões
N_f	Número de repetições de carga admissível
P	Porosidade
$P_{Campo,e}$	Porosidade <i>in situ</i> estimada
P_{Centro}	Porosidade média no centro da amostra
P_e	Porosidade estimada
P_{Fundo}	Porosidade média no fundo da amostra
$P_{Média}$	Porosidade média da amostra coletada após a compactação
P_r	Probabilidade de ruptura da estrutura
P_{Topo}	Porosidade média no topo da amostra
q	Carga aplicada
RMSE	Erro médio quadrático percentual
RT	Relação entre a tensão de tração atuante na fibra inferior da camada de concreto e a resistência à tração na flexão ou módulo de ruptura do material
t	Tempo necessário para que a quantidade de água infiltre no concreto no ensaio de taxa de infiltração
t_l	Idade do pavimento em CPCP
V_d	Variável <i>dummy</i>
V_m	Volume do molde
$\emptyset$	Diâmetro médio do CP
γ_e	Massa específica aparente no estado endurecido
γ_f	Massa específica aparente no estado fresco
μ	Média
ρ_c	Massa unitária do concreto
ρ_w	Massa específica da água

ν

Coeficiente de Poisson

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	26
1.1	Justificativa e objetivos.....	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	37
2.1	Pavimentos de concreto permeável – Uma visão geral e principais características.....	37
2.1.1	Misturas de CPCP e materiais empregados.....	40
2.1.2	Relação a/c e trabalhabilidade	47
2.1.3	Propriedades do CPCP nos estados fresco e endurecido.....	48
2.1.4	Análise estrutural de pavimentos em concreto permeável	62
3	ETAPA LABORATORIAL – DEFINIÇÃO DAS MISTURAS ÓTIMAS	75
3.1	Materiais e métodos.....	76
3.1.1	Materiais	76
3.1.2	Misturas	81
3.1.3	Procedimentos de moldagem e cura dos CPs.....	83
3.1.4	Procedimentos de moldagem e cura da placa de CPCP.....	89
3.1.5	Dimensões e quantidades de CPs.....	91
3.2	Apresentação e discussão dos resultados da etapa de laboratório	104
3.2.1	Avaliação das metodologias de compactação dos CPs cilíndricos em laboratório considerando os resultados das misturas Ra a Rc	104
3.2.2	Análise dos resultados dos ensaios não destrutivos	108
3.2.3	Análise dos resultados dos ensaios destrutivos	117
3.2.4	Análise dos resultados de taxa de infiltração na placa de concreto.....	121
3.2.5	Definição das misturas ótimas.....	125
3.3	Considerações finais sobre a etapa de laboratório	127
4	ETAPA DE CAMPO – EXECUÇÃO DAS CALÇADAS E ENSAIOS <i>IN SITU</i> ...	130
4.1	Materiais e métodos.....	130
4.1.1	Calçada 1	131
4.1.2	Calçada 2	137
4.1.3	Ensaio de campo	149
4.2	Resultados da etapa de campo.....	153
4.2.1	Controle tecnológico do CPCP executado na Calçada 2.....	154
4.2.2	Inspeção visual da superfície – Tempo de trabalho.....	155

4.2.3	Taxa de infiltração	157
4.2.4	Modelo de variação da taxa de infiltração	165
4.2.5	Levantamentos deflectométricos – Etapa 1	168
4.2.6	Levantamentos deflectométricos – Etapa 2	175
4.3	Considerações finais sobre a etapa de campo	181
5	ETAPA NUMÉRICA – ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS CALÇADAS	185
5.1	Métodos	185
5.1.1	Retroanálise das bacias de deflexão para a primeira etapa dos levantamentos deflectométricos	186
5.1.2	Retroanálise das bacias de deflexão para as condições “seca” e “saturada”	202
5.1.3	Estimativa da redução da vida de fadiga de estruturas em CPCP em função da ocorrência da saturação	202
5.2	Resultados da etapa numérica	205
5.2.1	Resultados das retroanálises das bacias de deflexão para a primeira etapa dos levantamentos deflectométricos	205
5.2.2	Resultados das retroanálises das bacias de deflexão para as condições “seca” e “saturada” na Calçada 2	213
5.2.3	Resultados da estimativa da redução da vida de fadiga de revestimentos em CPCP	218
5.3	Considerações finais sobre a etapa numérica	220
	CONCLUSÕES	224
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	229
	APÊNDICE A – RESULTADOS DAS ANÁLISES PARA DETECÇÃO DE <i>OUTLIERS</i> DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO DE ACORDO COM A ASTM E178 (ASTM, 2002)	245
	APÊNDICE B – PROJETO EXECUTIVO DA CALÇADA 2	260
	APÊNDICE C – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE LEVANTAMENTO COM FWD	266
	APÊNDICE D – RESULTADOS DE TAXA DE INFILTRAÇÃO MEDIDOS NAS CALÇADAS 1 E 2 ENTRE O PERÍODO DE MAIO DE 2017 E DEZEMBRO DE 2018	267

APÊNDICE E – DEMAIS MODELOS EMPÍRICOS DE REDUÇÃO DE TAXA DE INFILTRAÇÃO GERADOS.....	269
APÊNDICE F – RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS DEFLECTOMÉTRICOS REALIZADOS NAS CALÇADAS – ETAPA 1	271
APÊNDICE G – RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS DEFLECTOMÉTRICOS REALIZADOS NA CALÇADA – ETAPA 2	273
APÊNDICE H – RESULTADOS DAS RETROANÁLISES REALIZADAS COM OS LEVANTAMENTOS DEFLECTOMÉTRICOS REALIZADOS NA ETAPA 1	277
APÊNDICE I – RESULTADOS DAS RETROANÁLISES REALIZADAS COM OS LEVANTAMENTOS DEFLECTOMÉTRICOS DA ETAPA 2	286

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O termo “desenvolvimento sustentável” foi definido em meados dos anos 80 pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, criado pela Organização das Nações Unidas (ONU), que associa o desenvolvimento econômico à capacidade de atender às necessidades dos seres humanos no presente sem comprometer as gerações futuras, garantindo um uso razoável dos recursos do planeta.

Antes dos anos 80, este conceito, apesar de já existir, não era muito conhecido ou difundido em ambientes educacionais e de pesquisa. Na atualidade, entretanto, a sustentabilidade é um tema que se tornou fator preponderante na tomada de decisões, especialmente na área de engenharia, que muitas vezes é responsável por grandes intervenções no meio ambiente, afetando diretamente o seu ciclo natural.

O desenvolvimento dos centros urbanos no Brasil ocorreu de maneira desordenada e sem preocupação com o meio ambiente. A falta de planejamento aliada à expansão descontrolada resultou em elevadas taxas de impermeabilização do solo. Principalmente nas grandes metrópoles, em decorrência dos elevados índices de impermeabilização do solo e da ocupação de várzeas, a ocorrência de inundações se dá com maior frequência, uma vez que os tempos de pico dos hidrogramas reduziram e as vazões aumentaram (PINTO, 2011).

A proliferação de superfícies impermeáveis possui também estreita relação com as alterações na qualidade das águas, uma vez que os poluentes e sedimentos que ficam depositados sobre essas superfícies são transportados aos corpos d'água pelas águas das chuvas. Ademais, problemas como erosão e assoreamento de rios também podem ser causados, em parte, pela impermeabilização das superfícies, que gera escoamentos com maior volume e velocidade do que se observa em superfícies naturais (ESTEVES, 2006).

Em se tratando do impacto originado pela impermeabilização dos solos, há uma demanda importante pelo desenvolvimento de tecnologias aplicáveis às necessidades

urbanas, que contribuam com a reversão ou, pelo menos, com a mitigação de seus efeitos. Neste contexto, vários tipos de sistemas podem ser empregados, como a implantação de trincheiras drenantes, valas de infiltração, poços de infiltração, telhados armazenadores, pavimentos permeáveis, entre outros (PINTO, 2011).

Destaca-se entre esses, os pavimentos permeáveis, que possuem duas funções básicas: servir de superfície pavimentada para o tráfego de pessoas, bicicletas e veículos; funcionar como um sistema alternativo de gerenciamento de águas provenientes das intempéries, auxiliando no controle do escoamento superficial.

Um dos principais benefícios ambientais referentes à utilização desse tipo de pavimento é o baixo impacto relativo causado por sua implantação, uma vez que a sua capacidade permeável reduz o efeito da pavimentação no ciclo natural das águas no local, com potencial de redução do escoamento superficial, a depender principalmente do nível de porosidade do sistema.

A redução do escoamento superficial em áreas cobertas por pavimentos permeáveis em comparação àquelas que utilizam pavimentos impermeáveis caracteriza o sistema como uma *Best Management Practice* (BMP), uma vez que é uma medida de controle que atua diretamente na fonte, podendo reduzir a transferência do problema para jusante, ao contrário do que naturalmente ocorre quando há a impermeabilização do solo (OBLA, 2007; ASADI *et al.*, 2012). De maneira mais direta, o uso de reservatórios subterrâneos caracterizados pela base porosa dos pavimentos permeáveis proporciona o armazenamento temporário de volumes precipitados de maneira eficaz, constituindo-se numa alternativa simples aos grandes reservatórios de detenção.

Vários são os tipos de revestimentos para pavimentos permeáveis, que se diferenciam em função dos materiais empregados em sua produção, ou do tipo de sistema de infiltração. A seguir estão listadas as principais variedades de revestimentos para pavimentos permeáveis:

- Concreto asfáltico poroso, mais conhecido no Brasil por Camada Porosa de Atrito (CPA). (PINTO, 2011);

- Blocos de concreto intertravado poroso (SALES, 2008), ou não poroso com infiltração através de juntas (ONO, 2018);
- Concreto Permeável de Cimento Portland (CPCP). (HOLTZ, 2011; BATEZINI, 2012).

Considerando os tipos de revestimento disponíveis, destaca-se o uso do CPCP moldado *in loco*, que tem despertado grande interesse de empresas de pavimentação em razão de suas características peculiares, em especial com relação à manutenção da sua capacidade permeável por mais tempo, sendo considerado um dos principais revestimentos empregados para pavimentos permeáveis em diversos países (BEAN *et al.*, 2015).

Além disso, pavimentos em CPCP possuem outras características que os diferem de seus principais concorrentes, em especial o CPA, como a redução das temperaturas ambientes e o aumento da refletância de luz, ambos relacionados tanto ao volume de poros quanto à cor clara característica de pavimentos em concreto de cimento Portland (KEVERN; HASELBACH; SCHAEFER, 2012). Segundo Henderson (2012), a temperatura em ambientes urbanos pode ser até 4°C maior que a temperatura em áreas rurais numa mesma região, o que demonstra a importância dessa característica do CPCP.

Em pesquisas realizadas na área ambiental, foi estudada a capacidade que pavimentos de CPCP possuem de remover partículas poluentes da água que percola através de sua estrutura. Os autores observaram que alguns dos poluentes característicos das águas pluviais são removidos durante o processo de infiltração nos vazios do concreto permeável, uma vez que este funciona como uma espécie de filtro para estas partículas (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

Outro benefício importante, agora em termos de segurança dos usuários em vias trafegadas por veículos, está relacionado à redução de ocorrência dos fenômenos de aquaplanagem e *spray*, visto que há redução ou eliminação da formação de poças d'água na superfície de pavimentos em concreto permeável que estejam em plenas condições de funcionamento.

1.1 Justificativa e objetivos

Existe uma grande diferença entre sistemas de pavimentos em concretos permeáveis e os métodos de pavimentação convencionais em concreto. Nesse contexto, é primordial para o desenvolvimento dessa tecnologia a definição da dosagem de misturas, das metodologias de execução, além estabelecimento de critérios para controle em obra que sejam específicos e adequados para os materiais e misturas envolvidos.

Ao longo dos últimos anos, foram elaborados diversos estudos sobre o comportamento de concretos permeáveis. A partir desses estudos, já é um consenso entre os pesquisadores que o CPCP produzido com materiais básicos (cimento, brita e água) apresenta comportamento tanto mecânico quanto hidráulico diretamente relacionado à porosidade característica do material. (HASELBACH *et al.*, 2016; KEVERN; SCHAEFER; WANG, 2011; SCHAEFER *et al.*, 2006). Apesar disso, considerando-se que os estudos disponíveis foram realizados principalmente nos Estados Unidos da América (EUA) e em alguns países europeus, há uma limitação de sua aplicabilidade direta em outras regiões do mundo, como o Brasil.

Considerando-se as peculiaridades do concreto permeável, não se pode descartar a possibilidade de que a variação, mesmo que pequena, das características dos tipos de agregados, bem como de sua graduação, tipo de cimento, uso ou não de aditivos especiais, além dos procedimentos e equipamentos disponíveis para execução do revestimento em campo, pode influenciar consideravelmente o comportamento do material no curto e no longo prazo. Fica claro então que a definição de misturas e métodos de execução compatíveis com a realidade de cada local específico deve ser avaliada com cuidado, de modo a garantir o sucesso da implantação desse sistema em larga escala.

Diversos órgãos estadunidenses, como o *American Concrete Institute* (ACI) e a *National Ready Mixed Concrete Association* (NRMCA), vêm desenvolvendo especificações para controle e aceitação de materiais, bem como critérios específicos de execução de pavimentos em CPCP moldado *in loco*. Com base nesses estudos, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou em 2015 a norma

NBR 16416: Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos e Procedimentos – (ABNT, 2015a), na qual há algumas especificações a serem seguidas para projeto e execução de pavimentos permeáveis em concreto, incluindo revestimento em blocos impermeáveis, blocos porosos, placas porosas, peças vazadas e concreto permeável moldado *in loco*.

Em análise às especificações contidas na NBR 16416 (ABNT, 2015a) para CPCP moldado *in loco*, observa-se que praticamente todas as definições, tanto de projeto quanto de controle de materiais e execução, além de serem limitadas, estão baseadas em normas e estudos realizados fora do Brasil (ACI, 2013), onde as características de execução, disponibilidade de tecnologia e de equipamentos, clima, tipos de materiais associados, entre outros, não condizem com a realidade brasileira.

Sendo o Brasil um país com grande potencial para aplicação desse tipo de sistema, principalmente em grandes cidades onde houve um crescimento desordenado e sem planejamento, como é o caso de São Paulo, por exemplo, observa-se a necessidade do avanço no desenvolvimento de estudos e pesquisas considerando os materiais locais disponíveis para a produção de CPCP, além dos critérios de execução e controle de obra.

Outro ponto importante a se considerar no tocante à novas tecnologias na área de pavimentação, se refere aos estudos que antecedem a produção de misturas e execução em campo, que englobam as etapas de projeto, análise estrutural e dimensionamento de estruturas de CPCP.

O desenvolvimento das metodologias de projeto e dimensionamento de pavimentos convencionais, diferentemente do que se observa em pavimentos permeáveis de CPCP, se encontra em uma etapa avançada, com variadas metodologias de dimensionamento já desenvolvidas e calibradas para diferentes situações de clima e tráfego, abarcando diversas regiões do mundo.

Na tentativa de suprir o *gap* da falta de procedimentos de projeto e dimensionamento de pavimentos de CPCP moldado *in loco*, a *American Concrete Pavement Association* (ACPA) desenvolveu o PerviousPave (RODDEN; VOIGT; GIERALTOWSKI, 2010).

Este *software* propõe modelos para a determinação das espessuras das camadas de estruturas de pavimento em concreto permeável que atendem tanto às necessidades hidráulicas e hidrológicas do local do projeto, em função da equação de chuva a ser definida pelo projetista, quanto aos critérios mecânicos, com base nas características mecânicas e elásticas dos materiais a serem utilizados frente às definições de tráfego de veículos.

Enquanto o modelo de dimensionamento hidráulico parece atender às demandas básicas hidrológicas de maneira racional, os modelos de análise estrutural e dimensionamento utilizados no *software* são os mesmos empregados para projeto e dimensionamento de pavimentos de concreto convencionais, que não representam a realidade do comportamento de concretos permeáveis, sendo esta limitação reconhecida inclusive pela própria ACPA (RODDEN; VOIGT; GIERALTOWSKI, 2010).

Em termos de análise estrutural, poucos autores apresentaram estudos envolvendo a avaliação do comportamento mecânico de pavimentos de CPCP, os quais indicam que as teorias de análise estrutural empregadas para concretos convencionais podem ser também aplicados para concretos permeáveis, dentro do contexto de suas pesquisas, para revestimentos em CPCP com espessuras maiores ou iguais a 15 cm (SULEIMAN; GOPALAKRISHNAN; KEVERN, 2011; VANCURA; MACDONALD; KHAZANOVICH, 2011). Entretanto, não se encontra na literatura internacional menção alguma à avaliação estrutural de pavimentos em CPCP para revestimentos com espessuras de 6 cm e 10 cm, que são as únicas espessuras de pavimento especificadas na NBR 16416 (ABNT, 2015a).

Outro ponto frágil em termos de estudos voltados para a análise estrutural e o dimensionamento de estruturas de pavimentos permeáveis, está relacionado à condição da elevada umidade a que estas estruturas são submetidas em função de servirem como reservatórios durante eventos de chuva.

Já é difundido na área de pavimentação que camadas de pavimentos convencionais compostas por materiais granulares possuem capacidade de suporte consideravelmente dependente da presença ou não de água nos seus vazios, sendo

este um dos pontos críticos considerados na prática para garantir o atendimento ao período de projeto a que são submetidas (BALBO, 2007).

No caso dos pavimentos permeáveis, caracterizados pela presença de camada de base de agregados graúdos com granulometria aberta, cuja estabilidade está diretamente relacionada ao atrito no contato entre estas partículas, a presença de água pode ser ainda mais crítica em comparação a bases granulares bem graduadas, que são empregadas em pavimentos convencionais.

Essa condição de comportamento justifica uma investigação em relação ao comportamento estrutural de pavimentos permeáveis submetidos a níveis elevados de umidade em sua estrutura, visto que, caso confirmada alguma alteração de comportamento, os critérios para projeto e dimensionamento que porventura assumam definições racionais e mecanicistas no futuro deverão levar em consideração os níveis de tensões e deformações em ambos os estados com e sem umidade elevada.

Ainda sobre o comportamento estrutural de pavimentos permeáveis, Batezini (2012) estudou a variação do módulo de elasticidade estático e dinâmico de algumas misturas de CPCP desenvolvidas em laboratório. Os resultados obtidos em estudos laboratoriais podem não representar a realidade do material aplicado *in situ*, dadas as diferenças de escala de moldagem no laboratório e da implantação em campo, as condições ambientais e a interação da camada de revestimento com as demais camadas da estrutura do pavimento, o que pode ser ainda mais acentuado no caso do CPCP, em função de suas características peculiares no estado fresco.

Nesse contexto, uma das técnicas não destrutivas mais empregadas na área de pavimentação para determinação das características elásticas das camadas de estruturas de pavimento executadas é o procedimento de retroanálise por meio de levantamentos deflectométricos. Este método normalmente é empregado para estudos de restauração de pavimentos ou como meio de controle de estruturas recém executadas, com a finalidade de garantir que as características especificadas em projeto sejam atendidas. O desenvolvimento de pistas experimentais, além de ser crucial para a definição e validação de critérios executivos, proporciona também a

possibilidade de avançar no estudo das características elásticas do CPCP em campo, podendo validar ou não os módulos de elasticidade medidos em laboratório.

Por fim, outro ponto importante a se levar em consideração diz respeito à manutenção das estruturas de pavimentos permeáveis, seja para restauração da condição superficial ou da condição de permeabilidade inicial.

Apesar dos benefícios correlatos ao emprego dessa tecnologia em termos ambientais, sociais e econômicos, o seu uso pode acarretar custos consideráveis de manutenção, uma vez que, ao longo dos últimos anos, foi observada a ocorrência de problemas de comportamento estrutural e de superfície em pavimentos executados para tráfego de veículos, tais como erosão superficial elevada e comportamento mecânico inadequado com rupturas prematuras da camada superficial permeável (GOEDE, 2009; HENDERSON, 2012; HENDERSON; TIGHE, 2012).

Além dos custos de produção das misturas e de execução dos pavimentos, é importante considerar também a ocorrência do *clogging* (entupimento dos vazios) no material de revestimento, uma vez que este fenômeno se contrapõe diretamente à viabilidade econômica a longo prazo do sistema de pavimentos permeáveis.

O *clogging* vem sendo estudado exaustivamente por diversos autores (COUGHLIN; CAMPBELL; MAYS, 2011; HASELBACH *et al.*, 2016; HASELBACH, 2010; HASELBACH; VALAVALA; MONTES, 2006; KAYHANIAN *et al.*, 2012) e é um problema que afeta todos os tipos de pavimentos permeáveis, independentemente do tipo de revestimento aplicado ou tipo de tráfego que irá utilizar o pavimento.

Curvo (2017) estudou a variação da taxa de infiltração de duas calçadas localizadas no *campus* Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira da Universidade de São Paulo (USP) e observou que há uma grande diferença na evolução do fenômeno de *clogging* dependendo do local de implantação das estruturas e da densidade de vegetação e árvores nos arredores da estrutura implantada. Os resultados apresentados em sua pesquisa consideraram um período de tempo inferior a dois anos, devendo ser complementados ao longo dos próximos anos.

Considerando o exposto acima, este estudo tem por objetivo principal a realização de estudos laboratoriais, de campo e numéricos com a finalidade de viabilizar misturas de CPCP a serem utilizadas como revestimento de calçadas permeáveis na região de São Paulo, entendendo os critérios executivos para implantação dessas estruturas. Na sequência, a pesquisa busca a continuação da avaliação hidráulica realizada por Curvo (2017), definindo-se um modelo empírico que descreva o desempenho hidráulico das calçadas ao longo do tempo para locais de implantação com baixa e alta densidade de vegetação e árvores. Finalmente, o estudo visa entender se há variação do comportamento estrutural das calçadas executadas para as condições de baixa e elevada umidade no interior da sua estrutura e qual das camadas do pavimento é mais susceptível à presença da água.

A seguir estão apresentados os objetivos específicos necessários à realização do objetivo principal dessa tese, divididos em três etapas:

- **Etapas de laboratório:**

- Desenvolver misturas de CPCP com variação da granulometria do agregado graúdo, tipo de cimento e diferentes porcentagens de aditivos superplastificante e retardador de pega;
- Definir porcentagens ideais limites para os aditivos superplastificante e retardador de pega em misturas de CPCP;
- Propor correlações entre os parâmetros físicos, hidráulicos e de resistência para as misturas produzidas em laboratório considerando os materiais disponíveis na região de São Paulo;
- Definir duas misturas ótimas para serem produzidas em betoneira e em caminhão betoneira com base nos aspectos da mistura no estado fresco e endurecido, além dos resultados dos ensaios de laboratório.

- **Etapas de Campo:**

- Executar duas calçadas de pavimentos permeáveis com revestimento em concreto CPCP em dois locais com diferentes densidades de vegetação, com variação da espessura do revestimento e diferentes sistemas de infiltração, buscando a validação dos métodos executivos disponíveis;

- Definir tempos de trabalho limites para execução em campo das misturas propostas com base na variação da trabalhabilidade do concreto no estado fresco ao longo do tempo, além da qualidade superficial do revestimento acabado observado após a construção;
 - Dar sequência aos ensaios de taxa de infiltração iniciados por Curvo (2017) nas calçadas executadas em concreto permeável com a finalidade de se observar a variação da permeabilidade ao longo do tempo para diferentes ambientes de implantação das calçadas;
 - Propor um modelo observacional para estimativa da redução da permeabilidade ao longo do tempo em função do tipo de ambiente de implantação de estruturas permeáveis em CPCP;
 - Realizar levantamentos deflectométricos com emprego do *Falling Weight Deflectometer* (FWD), analisando o comportamento das bacias de deflexão obtidas com a finalidade de subsidiar a etapa de retroanálise das calçadas executadas, observando também a variação das deflexões em função da presença da água no interior das estruturas.
- **Etapas numéricas:**
 - Retroanalisar os resultados de deflexão a partir dos softwares EverFE, BAKFAA e ABAQUS, com a finalidade de estimar os módulos de elasticidade característico do material executado em campo, comparando com os módulos obtidos em laboratório por (BATEZINI, 2012);
 - Comparar os módulos de elasticidade retroanalizados de cada camada das estruturas em função da presença ou não de água, indicando qual camada possui maior sensibilidade aos elevados índices de umidade;
 - Analisar se há variação das tensões na fibra inferior da camada de revestimento em função da presença ou não de água na estrutura do pavimento, verificando se a consideração dessa variável é ou não importante para definição de critérios racionais de dimensionamento;
 - Avaliar como se comporta a vida de fadiga de revestimentos de CPCP com variação da espessura e da carga de aplicação, empregando-se o modelo de fadiga disponível no *software* PerviousPave, considerando também as condições da presença da água na estrutura.

A apresentação da pesquisa realizada está sistematizada nos seguintes capítulos:

No capítulo 2 está apresentada uma revisão da literatura existente sobre o tema “pavimentos permeáveis” com foco em revestimentos de concretos permeáveis, discutindo suas principais características e alguns resultados já obtidos por diversos autores.

No capítulo 3 está apresentada a metodologia empregada na etapa laboratorial para definição das misturas ótimas, descrevendo detalhadamente a moldagem dos Corpos de Prova (CPs) no laboratório e a realização dos ensaios, bem como os resultados obtidos e sua discussão.

No capítulo 4 está apresentada detalhadamente a metodologia de produção do CPCP, além da descrição da execução das calçadas e os critérios de controle empregados. São também apresentados todos os ensaios realizados em campo, bem como os resultados obtidos nessa etapa.

No capítulo 5 são apresentados os modelos e metodologias aplicados, a descrição de todos os *softwares* utilizados, assim como os resultados obtidos na etapa numérica da pesquisa.

Os capítulos 3, 4 e 5 foram separados por etapa de estudo (laboratório, campo e numérico, respectivamente), sendo que cada um deles possui descrição metodológica, discussão de resultados e considerações finais referente ao seu respectivo assunto.

Ao final estão apresentadas as conclusões e recomendações para estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pavimentos de concreto permeável – Uma visão geral e principais características

Em muitos países desenvolvidos, como é o caso dos EUA, os pavimentos permeáveis são considerados como uma BMP, uma vez que possuem capacidade de auxiliar, associados a outros tipos de sistemas, no gerenciamento das águas das chuvas, podendo representar papel importante no desenvolvimento da drenagem urbana para o futuro, principalmente no que se refere aos grandes centros urbanos, onde a impermeabilização do solo ocorre em larga escala.

Segundo Li (2009), o uso do CPCP teve início há mais de 150 anos, embora a sua real aplicação somente tenha apresentado grande avanço há pouco mais de 25 anos, principalmente nos EUA. Recentemente, as pesquisas sobre o comportamento mecânico e hidráulico do CPCP, além de critérios específicos de dosagem, estão em foco, uma vez que o material demonstra bom desempenho e durabilidade quando utilizado como revestimento de pavimentos em áreas de tráfego leve, o que, aliado à sua capacidade drenante, permite o seu emprego como equipamento urbano de mitigação dos níveis de impermeabilização intensificados pela urbanização das cidades. Atualmente, os pavimentos em CPCP são empregados basicamente em áreas de estacionamentos, calçadas, ciclovias, viários residenciais etc.

Em pavimentos permeáveis, o revestimento é construído sobre base de pedra britada de granulometria descontínua aberta, com diâmetros variados. Bean *et al.* (2015) sugerem a utilização dos agregados relativos às peneiras #2 e #3 especificados pela Norma C 33 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) (ASTM, 1997) como material de base, que equivale a uma variação de diâmetros de 12,5 mm a 75 mm. Os mesmos autores sugerem ainda a utilização de uma camada de transição entre as camadas de revestimento e base de pedra britada, composta por agregado Número 57 (ASTM, 1997) que possui diâmetros variando entre 2,36 mm e 37,5 mm. Essa camada de transição, conhecida nos termos americanos como *choker course*, tem como objetivo garantir uma superfície suficientemente regular e plana para

assentamento da camada de revestimento. Além de possuir função estrutural e de acomodação do revestimento, a base de pedra britada atua também como um reservatório para contenção da água infiltrada, podendo requerer cuidados especiais com drenagem, a depender principalmente do tipo de solo de subleito existente no local de implantação.

Segundo Delatte (2007), existem três tipos de CPCP que podem ser classificados de maneira qualitativa em relação às suas características mecânicas e hidráulicas. O primeiro, conhecido como “concreto permeável hidráulico”, é um material com baixa resistência mecânica e elevada permeabilidade, utilizado para aplicações não estruturais, por exemplo em passeios e ciclovias. Já o “concreto permeável normal” possui resistência e permeabilidade intermediárias, e pode ser empregado para estacionamentos e vias de tráfego leve. Por fim, os autores definem também o “concreto permeável estrutural”, que possui elevada resistência mecânica e baixa permeabilidade, sendo caracterizado pela adição de materiais de granulometria reduzida na mistura, fibras das mais variadas composições, além de aditivos especiais para aumento da resistência. Em teoria, este último tipo poderia eventualmente ser utilizado em estacionamentos, ruas e avenidas que possuam tráfego de veículos pesados.

De acordo com Tennis, Leming e Akers (2004), concretos permeáveis podem ser empregados para coletar fluidos dos veículos, como óleos e combustíveis, e, a partir de um sistema de drenagem específico, direcionar os poluentes para tratamento ou para caixas de coleta de produtos perigosos para posterior destinação correta do material. Os mesmos autores apresentam resultados de dois estudos que mostram o elevado potencial de redução de poluentes das águas que infiltram em concretos permeáveis, atingindo valores de até 95% de remoção de sólidos suspensos. Outros autores também mostram resultados referentes à elevada capacidade de remoção de poluentes característica de concretos permeáveis (ASADI *et al.*, 2012; HORST; WELKER; TRAVER, 2011; WELKER; BARBIS; JEFFERS, 2012).

Outro benefício ambiental está relacionado à redução do efeito *Urban Heat Island* (UHI) ou efeito de Ilha de Calor Urbana, que é a designação para o fenômeno climático

que ocorre principalmente nas cidades com elevado grau de urbanização, onde a temperatura média costuma ser mais alta do que nas regiões rurais próximas.

Vários autores mostraram que há uma significativa redução do UHI proporcionada pela utilização de pavimentos de concreto permeável em comparação ao emprego de pavimentos convencionais (HASELBACH, 2009; HASELBACH *et al.*, 2011; KEVERN; HASELBACH; SCHAEFER, 2012). De maneira geral, a ocorrência desse fenômeno está diretamente ligada à elevada porosidade do CPCP, que de maneira similar às superfícies granulares, possuem maior capacidade de absorver e estocar energia, auxiliando na redução do UHI em comparação aos pavimentos convencionais.

O ruído causado pela interação pneu-pavimento é também um problema ambiental significativo em áreas urbanas populosas situadas nas proximidades de vias de tráfego elevado. Estudos mostram que revestimentos porosos para pavimentos possuem característica de reduzir os ruídos provenientes da interação pneu-pavimento, uma vez que, por possuírem uma estrutura aberta, permitem mais facilmente a propagação das ondas sonoras através de sua estrutura (OLEK, *et al.*, 2003)

Além dos benefícios ambientais, deve-se considerar adicionalmente o provável aumento da segurança para os usuários quando trafegam sobre superfícies de CPCP, uma vez que, além de apresentar elevado atrito superficial em comparação a revestimentos convencionais, pode evitar a formação de lâmina d'água na sua superfície após a ocorrência de chuvas, podendo reduzir os fenômenos de *spray* e também de aquaplanagem dos veículos.

Na Figura 2.1 pode ser observada a diferença entre a aparência superficial de um pavimento executado em concreto permeável em comparação a um pavimento convencional impermeável durante um evento de chuva, na qual fica clara a diferença entre o aspecto mais seco do revestimento em CPCP em comparação ao revestimento convencional.

Figura 2.1: Comparação visual entre as superfícies dos pavimentos em concreto permeável e asfáltico convencional após evento de chuva

Fonte: Bean *et al.* (2015)

2.1.1 Misturas de CPCP e materiais empregados

Uma mistura de CPCP deve ser projetada com a finalidade de se obter um material caracterizado por uma estrutura aberta que permita a infiltração da água através dos seus poros, bem como de atender às necessidades do tráfego em termos de resistência mecânica e durabilidade. Deverá garantir resistência mecânica suficiente para suportar, durante o período de projeto, as cargas do tráfego, assim como adequada durabilidade, mantendo uma superfície com características mínimas de trafegabilidade, tanto para veículos quanto para pedestres e bicicletas.

A chave para o atendimento das necessidades básicas de uma mistura de CPCP está diretamente relacionada à sua porosidade, que por sua vez possui um papel fundamental tanto na capacidade permeável quanto na resistência mecânica e durabilidade do material. Na Figura 2.2 está apresentada uma amostra cilíndrica de CPCP, onde é possível observar suas características de elevada porosidade e interconectividade entre os poros, bem como sua elevada capacidade de infiltração.

Figura 2.2: Amostra de CPCP

Fonte: www.geotechnology.com (2018)

Concretos permeáveis são normalmente produzidos com agregados graúdos, com diâmetro variando de 1,20 mm a 19,00 mm, cimento e água (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004). Podem também ser incorporados à mistura agregados miúdos e materiais finos em quantidades limitadas, com proporções variando de 5% a 10% da massa de agregado total (DELATTE; MRKAJIC; MILLER, 2009), a depender da finalidade de uso do material. Além destes materiais, podem ser incorporadas à mistura adições, aditivos e fibras, com a finalidade de melhorar o comportamento mecânico em ambos os estados fresco e endurecido do CPCP (LUND *et al.*, 2017).

As quantidades de água e de ligante hidráulico empregadas na composição do CPCP devem ser cuidadosamente controladas com a finalidade de se obter uma pasta que forme uma capa espessa ao redor das partículas dos agregados. A mistura deve possuir pouca ou nenhuma quantidade de agregado miúdo e finos, para garantir a obtenção de um material suficientemente poroso, que, com auxílio da interconectividade dos seus vazios, apresentará boas condições de drenabilidade.

As proporções dos materiais variam dependendo dos tipos de insumos disponíveis no local de uso, sendo a prática correta de sempre realizar experimentos e procedimentos de dosagem em laboratório, que servirão de subsídio para a melhor definição de tais proporções (dosagem racional). Na Tabela 2.1 são apresentadas

faixas típicas de consumo e proporções de materiais utilizados nas misturas de concreto permeável (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

Tabela 2.1: Faixas de consumos e proporções típicas dos principais materiais empregados nas misturas de concreto permeável

Materiais	Consumo/proporção
Ligante hidráulico (kg/m ³)	270 a 415
Agregado graúdo (kg/m ³)	1.190 a 1.700
Relação água/cimento (a/c) em massa	0,27 a 0,40
Relação cimento/agregado em massa	1:4,0 a 1:4,5
Relação agreg. miúdo/agreg. graúdo em massa	0 a 1:9

De acordo com a norma ACI 5221-13 (ACI, 2013) a relação cimento/agregado, a relação a/c e o procedimento de compactação ou adensamento a serem empregados na produção CPCP são alguns dos principais fatores que afetam diretamente as características mecânicas do material, devendo ser cuidadosamente dosados e planejados.

2.1.1.1 Aglomerantes

O principal ligante hidráulico utilizado como aglomerante em concretos permeáveis é o cimento Portland. Além deste, materiais suplementares como cinza volante, escória granulada de alto forno moída e sílica ativa, são também empregados com a finalidade de melhorar as características mecânicas e durabilidade do produto final (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004). Cabe lembrar que as proporções com que esses aditivos são incorporados à mistura devem ser cuidadosamente dosadas, uma vez que se deve garantir que o produto final possua porosidade suficiente e boa condutividade hidráulica, que garantam o pleno funcionamento do sistema.

De acordo com Tennis, Leming e Akers (2004) os tipos de cimento normalmente utilizados para a fabricação do concreto permeável são os mesmos aplicados em concretos convencionais, que atendem à ASTM C150/C150M (ASTM, 2018), além das adições suplementares. No Brasil não há especificação para os tipos de cimento a serem utilizados, entretanto, considerando a matriz aberta do CPCP e que haverá

fluxo de água no seu interior, é importante que se utilize aglomerantes resistentes ao ataque de sulfatos (BEAN *et al.*, 2015).

2.1.1.2 Agregados

As curvas granulométricas de agregados utilizadas nas misturas podem ser uniformes (diâmetro único), em que os diâmetros variam de 6,3 mm a 12,5 mm, ou descontínuas, com variação do diâmetro do agregado. Para as curvas descontínuas são comumente utilizadas graduações variando de 19,0 mm a 4,8 mm, 9,5 mm a 2,4 mm e 9,5 mm a 1,2 mm (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

Na Figura 2.3 são apresentados três curvas granulométricas já empregadas na produção de concreto permeável, em que o diâmetro máximo de agregado utilizado é de 19 mm (LI, 2009).

Figura 2.3: Curvas granulométricas típicas de misturas de concreto permeável

Adaptado de: Li (2009)

A viabilidade de produção e aplicação em larga escala de pavimentos em CPCP está, em parte, relacionada ao seu custo de implantação e manutenção. No tocante à produção do material, a definição da granulometria do agregado tem um papel fundamental, visto que os custos para a compra de agregados com granulometrias especiais, como é o caso dos agregados com diâmetro único no Brasil, podem ser consideravelmente mais elevados quando comparados aos custos com agregados

caracterizados por curvas granulométricas já comercializadas, como é o caso das britas 2, 1 e pedrisco, por exemplo.

Em contrapartida, apesar de os agregados com granulometria comercial supracitados possuírem uma granulometria mais uniforme e de má graduação, o que teoricamente poderia garantir a formação de uma estrutura aberta no concreto, eles também são caracterizados pela presença de agregados miúdos e material pulverulento (finos). Mesmo que em porcentagens pequenas, a presença desses materiais na mistura deve ser cuidadosamente avaliada, visto que pode influenciar diretamente nas características básicas do concreto permeável, como a sua capacidade permeável.

Batezini (2012), estudou três misturas de concretos permeáveis com diferentes composições de agregados com diâmetro variando de 4,8 mm a 12,5 mm. Os resultados mostraram que as três misturas não apresentaram variação considerável das características hidráulicas e mecânicas para praticamente todos os CPs avaliados no estudo, sendo que a faixa de variação do diâmetro máximo dos agregados empregada não influenciou no comportamento do material produzido.

2.1.1.3 Aditivos

A principal função dos aditivos é de modificar as propriedades físicas do concreto, de modo a facilitar seu manuseio e aplicação, além de melhorar as condições de resistência mecânica e durabilidade, oferecendo vantagens que não são obtidas com a confecção de traços convencionais. Dessa maneira, pela mesma razão que os aditivos químicos são empregados no Concreto de Cimento Portland (CCP), podem também ser incorporados nas misturas para produção de CPCP.

Segundo Tennis, Leming e Akers (2004), muitos dos problemas observados em concretos permeáveis estão ligados a relações a/c inapropriadas utilizadas nas misturas. Tipicamente, a relação a/c deve ser relativamente baixa, com a finalidade de garantir uma resistência mecânica minimamente aceitável à mistura, além de prevenir a ocorrência de colmatção dos vazios por segregação da pasta de cimento.

Como consequência à limitação da quantidade de água, o concreto permeável no estado fresco possui elevada viscosidade, com valores de *slump* normalmente variando de 0 mm a 20 mm, o que pode gerar dificuldades tanto para retirada do material do caminhão betoneira, quanto para as etapas de lançamento, compactação e acabamento do CPCP *in situ*, podendo resultar na produção de uma superfície de baixa resistência à abrasão, facilitando a desagregação precoce dos agregados.

Em contrapartida, a adição de água na mistura não representa uma solução interessante para o problema da alta viscosidade, uma vez que elevados teores de umidade em misturas de CPCP podem se traduzir em excesso de pasta, com consequente ocorrência de segregação, o que tende a comprometer os comportamentos mecânico e hidráulico, bem como a durabilidade do material. Nesse contexto, a inclusão de aditivos modificadores de viscosidade é uma das saídas para se obter uma mistura mais trabalhável e ao mesmo tempo viscosa o suficiente para garantir que não ocorra segregação da pasta do CPCP.

Aditivos retardadores de pega também possuem importante papel para produção em larga escala de concretos permeáveis. De acordo com Bean *et al.* (2015), misturas de concreto permeável produzidas em escala industrial devem ser transportadas e descarregadas em um intervalo máximo de uma hora após o contato entre a água e o ligante hidráulico. Com a incorporação de aditivo retardador de pega essa faixa de tempo pode aumentar em até 30 minutos, que representa um tempo total de trabalho para misturas de CPCP contendo o aditivo de até 90 minutos (BEAN *et al.*, 2015).

Aditivos incorporadores de ar também podem ser empregados em misturas de concreto permeável. Segundo Jin (2010), esse tipo de aditivo possui maior importância em regiões de clima temperado, pois atua buscando a produção de microbolhas de ar na mistura de CPCP, que tendem a flexibilizar a sua resposta a tensões geradas por ciclos de gelo e degelo, ampliando sua durabilidade em termos mecânicos.

Alguns tipos de fibras também podem ser empregados no intuito de aumentar a resistência mecânica do concreto permeável. Experimentos realizados por Schaefer *et al.* (2006) mostraram aumento de resistência à compressão de concretos

permeáveis em função da adição de fibras de látex na mistura. Yang e Jiang (2003) empregaram fibras poliméricas em misturas de CPCP e observaram também ganhos de resistência mecânica. Entretanto, em ambos os estudos a capacidade permeável das misturas foi reduzida em função do acréscimo das fibras.

Em visita realizada pelo autor deste trabalho no *Pervious Concrete Roast* em 2016 na cidade de Salt Lake City, Utah (EUA), que reuniu diversas exposições de experiências e discussões sobre o CPCP realizadas por representantes da indústria e pesquisa de diversos países, foi observado que para a grande maioria das experiências em países de clima temperado, a presença de fibras é essencial para um bom desempenho de misturas de CPCP.

Em termos de aditivos, observou-se no encontro que, sobretudo nos EUA, há uma grande preocupação com o desenvolvimento de aditivos específicos para a tecnologia de CPCP, os quais já estão, inclusive, em uso naquele país, o que representa um avanço importante no contexto de produção e aplicação dessas misturas em campo. Apesar de ser possível a importação de tais produtos para utilização em obras no Brasil, seu alto custo pode se caracterizar como um empecilho a mais na questão econômica de aplicação de pavimentos em CPCP, que atualmente já representa um ponto fraco para esta tecnologia em função dos elevados volumes de aglomerante necessário, além das necessidades de manutenção periódica da capacidade permeável.

Na Tabela 2.2 são apresentadas as faixas de teores de incorporação de aditivos químicos empregados em pesquisas anteriores (KEVERN; SPARKS, 2013; KEVERN; SCHAEFER; WANG, 2011; MCCAIN; DEWOOLKAR, 2010; SHU *et al.*, 2011; CUTLER *et al.*, 2010; KEVERN; FARNEY, 2012).

Os consumos de aditivos podem variar consideravelmente em decorrência de diversos fatores, tais como: clima, tipo de cimento e agregado, tipo de aditivo, entre outros. Dessa maneira, é imprescindível que a definição do teor ideal para cada tipo de aditivo seja obtida por meio de dosagem específica de CPCP em laboratório anteriormente à aplicação do material em campo, garantindo as características de

permeabilidade, resistência mecânica e durabilidade mínimas requeridas para o revestimento permeável.

Tabela 2.2: Faixas de consumo de aditivos químicos e fibras comumente aplicados em misturas de concretos permeáveis

Aditivo/Fibras	Unidade	Consumo
Modificador de viscosidade	(mL/m ³)	500 a 1.180
Retardador de pega	(mL/m ³)	1.180 a 2.750
Redutor de água	(mL/m ³)	470 a 1.160
Incorporador de ar	(mL/m ³)	390 a 700
Fibra Geotêxtil	(kg/m ³)	0,9 a 3,0

2.1.2 Relação a/c e trabalhabilidade

A relação a/c é um dos parâmetros mais importantes no que diz respeito à dosagem de concretos permeáveis. A quantidade de água na mistura influi diretamente tanto no comportamento no estado fresco, relativo principalmente à trabalhabilidade, quanto no estado endurecido, pois possui papel fundamental no comportamento mecânico e hidráulico do CPCP.

Segundo Tennis, Leming e Akers (2004) é comum a utilização de relações a/c entre 0,27 e 0,30 considerando o emprego de aditivos químicos nas misturas. Valores entre 0,34 e até 0,40 vem sendo empregados com sucesso para misturas sem incorporação de aditivos. Ainda de acordo com os autores, a relação a/c para misturas de CPCP pode ser calibrada visualmente, sendo que a quantidade correta de água está diretamente relacionada à aparência da mistura. Superfícies com brilho metálico e garantia da cobertura total dos agregados pela pasta de cimento são características que garantem quantidade de água suficiente na mistura. Os autores propõem ainda que a relação a/c ideal pode ser verificada de acordo com a consistência da mistura, conforme apresentado na Figura 2.4.

Em função principalmente do consumo limitado de água em misturas de CPCP, o seu comportamento no estado fresco é caracterizado por apresentar elevada consistência (baixa trabalhabilidade) quando comparado ao concreto convencional. O abatimento

da mistura, normalmente, é menor que 20 mm (ACI, 2010; TENNIS; LEMING; AKERS, 2004). São raros os casos em que se observam abatimentos superiores a 50 mm e esta condição estaria associada ao emprego de aditivos modificadores de viscosidade.

Figura 2.4: Avaliação da quantidade de água em função da consistência, onde:
a) pouca água; b) quantidade ideal de água; c) excesso de água

Fonte: Tennis, Leming e Akers (2004)

2.1.3 Propriedades do CPCP nos estados fresco e endurecido

2.1.3.1 *Massa específica, porosidade e textura*

O concreto permeável é caracterizado por apresentar uma textura superficial diferenciada quando comparado ao concreto convencional. Esta diferença está associada à pequena ou nula quantidade de agregados miúdos em sua composição, o que proporciona uma superfície mais rugosa, que tende a aumentar o coeficiente de atrito superficial.

Esse tipo de textura pode trazer benefícios relativos à segurança dos usuários, principalmente em períodos chuvosos ou em ocorrências de neve e gelo na pista, uma vez que, além do maior coeficiente de atrito atribuído à estrutura mais rugosa, a condição permeável do concreto pode ser bastante efetiva na diminuição dos riscos de aquaplanagem. Isso ocorre porque a água proveniente das intempéries percola pelo revestimento permeável do pavimento não permanecendo em sua superfície, o que evita a formação de poças d'água, diminuindo também a ocorrência do fenômeno de *spray*.

A massa específica e a porosidade característica do CPCP variam em função da proporção relativa de cada material constituinte da mistura, bem como do procedimento de compactação empregado. As massas específicas aparentes do concreto permeável no estado fresco variam de 1.300 kg/m³ a 2.000 kg/m³ (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

Em termos práticos, a massa específica do CPCP no estado fresco é o principal método de controle a ser empregado para execução da mistura em campo, visto que esta propriedade pode se correlacionar muito bem com a porosidade do material resultante, que por sua vez normalmente possui relação direta com as características hidráulicas e mecânicas do material no estado endurecido (ACI, 2010).

A porosidade do CPCP afeta diretamente nas características hidráulicas e mecânicas do material no estado endurecido. Pode ser considerado tanto de baixa porosidade, quando possui valores inferiores a 15%, quanto de elevada porosidade, quando os valores ultrapassam 30%. Tennis, Leming e Akers (2004) sugerem que se utilizem porosidades na ordem de 20% para garantir boas características de resistência e permeabilidade do concreto, simultaneamente.

Delatte, Mrkajic e Miller (2009) realizaram inspeções visuais além de diferentes tipos de ensaios laboratoriais em CPs extraídos de pistas em 20 diferentes locais revestidos com CPCP nos EUA. Os resultados mostraram que existem diferenças no valor de porosidade entre as partes superior e inferior da espessura do revestimento permeável, sendo que o valor observado na parte superior é, em geral, menor que a porosidade da parte inferior.

Haselbach e Freeman (2006) estudaram a variação da porosidade ao longo da profundidade por meio de comparação entre dados de amostras extraídas de pistas experimentais e CPs moldados em laboratório, e concluíram o oposto de Delatte, Mrkajic e Miller (2009). Os resultados mostraram que, considerando a metodologia de compactação em uma só camada do revestimento permeável desenvolvida pelos próprios autores de modo a simular a compactação de campo, a porosidade do material tende a aumentar ao longo da profundidade da camada de revestimento,

podendo ser diferenciada em três valores distintos, conforme apresentado na Figura 2.5.

Figura 2.5: Divisão da espessura do revestimento em concreto permeável em campo em termos de variação da porosidade

Adaptado de: Haselbach e Freeman (2006)

Segundo os autores as porosidades variam de acordo com as Equações 2.1, 2.2 e 2.3, apresentadas a seguir:

$$P_{Topo} = 1,07 \cdot P_{Média} - 7 \quad (2.1)$$

$$P_{Centro} = P_{Média} \quad (2.2)$$

$$P_{Fundo} = 0,93 \cdot P_{Média} + 7 \quad (2.3)$$

onde:

- P_{Topo} : porosidade média no topo, %;
- P_{Centro} : porosidade média no centro, %;
- P_{Fundo} : porosidade média no fundo, %;
- $P_{Média}$: porosidade média da amostra coletada após a compactação, %.

Haselbach e Freeman (2006) sugerem também que porosidades reduzidas na região da superfície do pavimento agregam efeito ambiental positivo ao sistema em termos de capacidade de filtração e manutenção das condições permeáveis do revestimento. Solos ou partículas poluentes provenientes das áreas de contribuição do pavimento são mais facilmente filtrados nessa região superficial do revestimento, reduzindo ou evitando a sua percolação para as demais camadas mais profundas da estrutura. Essa condição seria então favorável com relação ao funcionamento da estrutura do pavimento a longo prazo, devido ao fácil acesso dos equipamentos de limpeza à superfície do revestimento para fins de manutenção da condição hidráulica.

Entretanto, uma análise mais aprofundada deve ser considerada em termos de comportamento mecânico dos pavimentos em CPCP a depender do tipo de uso associado, visto que revestimentos de pavimentos em concreto em geral possuem limitação de comportamento frente à imposição de carregamentos cíclicos em função da resistência à tração na flexão na face inferior da placa. Nesse contexto, o aumento do volume de vazios nessa região pode ser crítico para o desempenho estrutural do pavimento, pois valores mais elevados de porosidade resultam em materiais com resistência mecânica menor, o que poderia limitar o emprego de compactação em camada única para pavimentos permeáveis em função do tipo de tráfego de projeto.

Para regiões de tráfego mais elevado, onde seria necessário a redução da porosidade no fundo da camada de revestimento para melhorar a sua condição mecânica, uma das maneiras de reduzir as diferenças entre as porosidades ao longo da profundidade estaria associada ao emprego de compactação em mais de uma camada ou ainda de aplicação de vibração na camada concretada, bem como o uso de aditivos para a melhoria dessa condição.

2.1.3.2 Parâmetros Hidráulicos

Condutividade hidráulica (ou taxa de percolação, ou coeficiente de permeabilidade) é um dos parâmetros mais importantes do concreto permeável, podendo ser também definida, dependendo da metodologia aplicada para sua determinação, como a taxa de infiltração da água através de sua estrutura.

Valores típicos de condutividade hidráulica de concretos permeáveis para revestimento de pavimentos variam entre 756 cm/h e 1.944 cm/h (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004). Bean, Hunt e Bidelspach (2007) determinaram valores de taxa de infiltração em campo variando de 252 cm/h a 2.772 cm/h. Segundo Delatte, Mrkajic e Miller (2009), a taxa de infiltração característica de concretos permeáveis varia normalmente entre 360 cm/h e 3.240 cm/h, embora este valor possa ser muito diferente, a depender principalmente da composição do concreto, porosidade e demais variáveis associadas ao processo executivo, como a metodologia e energia de compactação.

A condutividade hidráulica de misturas de CPCP pode ser determinada em laboratório. No início do desenvolvimento das pesquisas referentes a pavimentos permeáveis, a maioria dos autores utilizava permeômetros de carga variável em função de sua praticidade. Para este tipo de ensaio, o corpo de prova (CP) cilíndrico deve ser preparado tendo-se o cuidado de evitar perda de água pelas suas laterais, sendo que todo o volume de água deverá percolar somente entre as faces superior e inferior do CP. Na Figura 2.6 é apresentado o permeômetro desenvolvido por Batezini e Balbo (2015) para determinação da permeabilidade em CPs de CPCP.

Figura 2.6: Permeômetro de carga variável utilizado para medir a condutividade hidráulica de CPs de concreto permeável

Fonte: Batezini e Balbo (2015)

Segundo conceitos básicos de mecânica dos solos, sabe-se que, para materiais com elevada permeabilidade ($k > 10^{-3}$ cm/s), deve-se utilizar para determinação da condutividade hidráulica o ensaio de carga constante, em que a altura de coluna d'água não varia. Já os ensaios de carga variável devem ser aplicados aos materiais com nível de condutividade hidráulica muito baixo, uma vez que nesse caso se tornaria inviável manter a carga constante em razão do elevado tempo requerido para passagem da água por esses solos (PINTO, 2006). Dessa maneira, pode-se considerar que a determinação da condutividade hidráulica de concretos permeáveis, que possuem permeabilidade muito elevada, poderia também ser realizada em laboratório empregando-se ensaios de carga constante.

Batezini e Balbo (2015) apresentaram resultados comparando ambos os métodos de ensaio com carga constante e variável em CPs de concreto permeável. Os autores observaram que os resultados dos ensaios de permeabilidade por carga variável foram em média 4,5 vezes mais elevados que os resultados observados nos ensaios de carga constante para misturas de CPCP idênticas, indicando que, para fins de projeto e dimensionamento de estruturas permeáveis, seria mais conservador a utilização de ensaios de carga constante.

Com a finalidade de viabilizar o estudo da capacidade permeável dos pavimentos *in situ* foi recentemente desenvolvida uma metodologia que possibilita a determinação da “taxa de infiltração”, normalmente expressa em cm/h.

Apesar de a taxa de infiltração representar uma unidade de medida de velocidade de passagem da água no meio poroso, assim como no caso do coeficiente de permeabilidade, a execução do ensaio possui conceitos diferentes. Para este ensaio, deve-se manter uma altura de lâmina d’água entre 10 mm e 15 mm no interior de um anel plástico posicionado sobre a superfície do CPCP, no intuito de simular a ocorrência de um evento de chuva em que a coluna d’água não ultrapassa essa altura (assumindo-se que não haverá inundação). Além disso, a direção do movimento da água no ensaio realizado em campo só é vertical no interior do anel plástico junto a superfície do revestimento, podendo sofrer alteração de direção após esse ponto, diferentemente do que ocorre nos ensaios realizados em permeâmetros.

O procedimento detalhado para preparação e execução do ensaio em campo é preconizado pela norma ASTM C1701/C1701M (ASTM, 2009), e em laboratório pela ISO 17785 (ISO, 2016). Ambas as metodologias citadas para determinação da taxa de infiltração foram aplicadas nessa pesquisa e estão detalhadamente descritas no Capítulo 3.

Um dos principais problemas existentes em pavimentos com revestimento em CPCP diz respeito à redução da sua capacidade drenante ao longo do tempo, assunto amplamente abordado no âmbito de pavimentos permeáveis e que está relacionado com a selagem da superfície ou preenchimento dos poros internos do revestimento permeável. Este fenômeno é conhecido internacionalmente como *clogging*.

Bastante comum quando se trata de CPCP, o *clogging* ocorre principalmente ao longo do tempo de utilização do pavimento, geralmente decorrente da incrustação de partículas de areia ou solo nos poros do material. Essa condição pode resultar na redução considerável da capacidade permeável do revestimento, o que tende a prejudicar todo o funcionamento do sistema permeável (HASELBACH; FREEMAN, 2006).

Problemas relativos à capacidade hidráulica podem suceder também em razão de erros de dosagem do CPCP, ou, ainda, quando há excesso de compactação da superfície durante as etapas do processo construtivo. Sobre a dosagem, é possível a ocorrência de segregação da mistura por excesso de água ou aditivo modificador de viscosidade, sendo que a pasta tende a descer para o fundo da camada de CPCP logo após a execução, podendo reduzir consideravelmente a permeabilidade dessa região, caso a camada de base não seja aberta o suficiente para absorver a pasta segregada. Já para o caso de superfície selada decorrente de excessos de compactação, os vazios ficam entupidos em função da movimentação da pasta, podendo também reduzir a permeabilidade.

Segundo Kuang *et al.* (2007) a ocorrência do *clogging* deve ser controlada com a aplicação de procedimentos de manutenção e restauração da capacidade permeável, a serem executados com periodicidade máxima de seis meses. Ainda segundo os autores, ao se utilizar o sistema de limpeza de pavimento a vácuo, por exemplo, consegue-se recuperar mais de 95% da capacidade inicial de condutividade hidráulica do revestimento. Entretanto, devido aos importantes custos envolvidos, há mais coerência em atrelar a periodicidade máxima para manutenção em função de um valor mínimo de permeabilidade requerido para o sistema, que deve depender da relação entre a área de contribuição e a área de pavimento permeável, bem como das características hidrológicas de cada local específico.

A NBR 16416 (ABNT, 2015a), sugere que pavimentos permeáveis em concreto recém construídos devem apresentar coeficiente de permeabilidade¹ mínimo de 360 cm/h

¹ O termo “coeficiente de permeabilidade” empregado na NBR 16416 deveria ser tratado como “taxa de infiltração”, uma vez que a metodologia de ensaio descrita na norma resulta em resultados de taxa de infiltração e não de coeficiente de permeabilidade.

(10^{-3} m/s) e impõe que os pavimentos em uso devem sofrer manutenção sempre que o “coeficiente de permeabilidade” atingir 3,6 cm/h (10^{-5} m/s).

De acordo com Pinto (2011) dados históricos de chuva em São Paulo indicam intensidades máximas de aproximadamente 40 mm considerando chuva com duração de 10 minutos e período de retorno de 200 anos, que representaria uma capacidade permeável mínima necessária da superfície permeável de 24 cm/h, ou seja, ultrapassando o valor mínimo sugerido na NBR 16416. Na mesma linha, o valor de 3,6 cm/h é muito baixo em comparação ao valor de 100 cm/h, que normalmente é adotado como valor mínimo aceitável para pavimentos em concreto permeável em utilização nos EUA, abaixo do qual se faz necessário realizar algum tipo de manutenção para restauração da capacidade drenante original².

Além da crítica ao valor mínimo que justifica necessidade de manutenção preconizado pela NBR 16416, o valor de 360 cm/h, que limita a capacidade permeável mínima de um pavimento de concreto recém executado, pode ser considerado muito baixo quando se trata de pavimentos de concreto moldados *in loco*, uma vez que esses normalmente atingem taxas de infiltração consideravelmente mais elevadas, na ordem de 1.500 cm/h a 2.500 cm/h, considerando porosidades de 20% a 25%, em média. Para porosidades entre 25% e 35%, estes valores podem atingir até 10.000 cm/h (CURVO, 2017). Nesse contexto, o período requerido entre cada manutenção é menor para pavimentos com baixa taxa de infiltração inicial, o que justificaria o aumento da taxa de infiltração mínima especificada pela NBR 16416².

2.1.3.3 Resistência mecânica

Os critérios de resistência e durabilidade, assim como para pavimentos convencionais, são importantes para projeto e dimensionamento de pavimentos em concretos permeáveis. A NBR 16416 (ABNT, 2015a) especifica resistências mínimas à tração na flexão de 1 MPa e 2 MPa para concretos permeáveis moldados *in loco* considerando tráfegos de pedestre e de veículos leves, respectivamente.

² Comunicação pessoal. Prof. Liv Haselbach em 2016 na Washington State University nos EUA.

A resistência mecânica e as propriedades elásticas são características importantes para o comportamento estrutural do CPCP para uso como revestimento de pavimentos, sendo influenciadas por muitos fatores, com atenção especial à porosidade, que parece nortear boa parte das suas propriedades (GOEDE; HASELBACH, 2012).

Delatte, Mrkajic e Miller (2009) apresentam um estudo referente às características mecânicas do CPCP para diversas porosidades. Sobre às resistências à compressão e à tração na flexão, os autores demonstram que ambas são inversamente proporcionais à porosidade das misturas, ou seja, quanto maior a porosidade, menor será a resistência mecânica, conforme apresentado na Figura 2.7.

Figura 2.7: Resistência à compressão (dividido por 10) e resistência à tração na flexão em função da variação da porosidade

Adaptado de: Delatte, Mrkajic e Miller (2009)

Observa-se ainda boa correlação entre as resistências à compressão e à tração na flexão, que se manteve muito próxima a 10 para diferentes valores de porosidade estudados.

Schaefer *et al.* (2006) estudaram os efeitos da energia de compactação nas propriedades do concreto permeável. Os parâmetros estudados na pesquisa foram resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e massa unitária no estado endurecido.

Os CPs foram confeccionados no formato cilíndrico, empregando-se na sua compactação 25 golpes de um bastão de metal por camada, sendo que cada CP foi moldado em 3 camadas. Após a etapa de compactação, cada CP foi colocado em uma mesa vibratória pelo período de 5 segundos.

Para produzir as energias de compactação diferentes, foram empregadas duas diferentes amplitudes de vibração, de 0,000127 mm e 0,0000864 mm, identificadas no estudo por energia de compactação regular e baixa, respectivamente. Na Figura 2.8, na Figura 2.9 e na Figura 2.10 estão apresentados os resultados obtidos nesse estudo.

Figura 2.8: Efeito da energia de compactação na resistência à compressão em CPs rompidos aos 7 dias

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

Figura 2.9: Efeito da energia de compactação na relação entre a resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral

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

Figura 2.10: Efeito da energia de compactação na variação da massa unitária

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

Em geral, pode-se notar a partir da comparação entre os coeficientes de correlação apresentados nas diversas curvas, que os resultados obtidos para a energia de compactação regular se correlacionam melhor do que os resultados obtidos para energia de compactação baixa, podendo-se dizer que, para estes casos específicos, quanto menor a energia de compactação maior será a dispersão dos resultados. Além

disso, observa-se na Figura 2.8 que a distância entre as curvas é mais acentuada para menores valores de porosidade, ou seja, quanto maior a porosidade, menor se torna a diferença na resistência, para as duas energias de compactação testadas.

Huang, Shu e Dong (2010) realizaram estudos referentes às condições de permeabilidade e resistência de misturas de concreto permeável com adição de fibras e látex. O trabalho teve como objetivo avaliar o possível aumento da resistência do CPCP sem diminuir a sua capacidade permeável, com a finalidade utilizá-lo em vias de tráfego pesado. Para tanto, além do uso de agregado miúdo em pequenas quantidades, foram empregadas também fibras de polipropileno e látex na produção das misturas.

Os resultados apresentados pelos autores indicam que não foi possível obter um concreto com níveis de permeabilidade e resistência aceitáveis para utilização em vias caracterizadas por tráfego pesado, mesmo com a combinação de látex e areia na mistura.

Na Figura 2.11 e na Figura 2.12 são apresentados os resultados obtidos de condutividade hidráulica e resistência à tração por compressão diametral.

Figura 2.11: Efeito das adições na permeabilidade do CPCP

Adaptado de: Huang, Shu e Dong (2010)

Figura 2.12: Efeito das adições na resistência à tração por compressão diametral do CPCP

Adaptado de: Huang, Shu e Dong (2010)

Observa-se que, para todos os casos, a permeabilidade do concreto se manteve elevada, sendo que o menor valor encontrado foi de aproximadamente 4.500 cm/h para a mistura com diâmetro máximo de agregado de 4,8 mm contendo látex e areia em sua composição. No caso da resistência foi verificado valor mais elevado para a mistura também com diâmetro máximo do agregado de 4,8 mm, contendo, porém, somente o látex como adição. Nota-se ainda que a permeabilidade parece não variar em função do diâmetro máximo dos agregados utilizados, sendo que provavelmente o fator que mais influencia esse parâmetro é a interconectividade dos poros das misturas.

Cabe ressaltar que, mesmo que o concreto permeável com adições apresente resistências relativamente elevadas, que possam até se equiparar com a resistência de concretos convencionais, deve-se ter cautela com a sua utilização em vias de tráfego pesado, uma vez que, em função da sua elevada porosidade, este material pode apresentar características de tenacidade e resistência à fadiga insatisfatórias.

Alguns autores estudaram também diferentes misturas de concretos permeáveis com a finalidade de se obter comportamento mecânico melhorado, com manutenção da porosidade, a partir do uso de adições e aditivos.

Chen, Wang e Liang (2012) avaliaram resistência à compressão e a resistência à tração na flexão de concretos permeáveis com adições de sílica ativa, cinza volante e polímero, bem como aditivo superplastificante e uma mistura de polímero vinílico e emulsão acrílica, sendo que o CPCP resultante apresentou porosidades variando de 15% a 25%.

Apesar da elevada porosidade, os resultados apontaram elevada capacidade mecânica das misturas estudadas, com resistências à compressão variando de 32,1 MPa a 46,7 MPa e resistências à tração na flexão variando de 4,2 MPa a 7,4 MPa, todas medidas aos 28 dias.

Os autores observaram também que a relação entre as resistências à compressão e a tração na flexão reduzem com o aumento da porosidade dos materiais (Figura 2.13), sugerindo que resistência à tração na flexão é mais sensível à porosidade do que a resistência à compressão.

Figura 2.13: Variação da relação entre as resistências à tração na flexão e à compressão em função da porosidade
(SPC – Concreto permeável modificado com adição de materiais cimentícios; PPC – Concreto permeável com polímero)

Adaptado de: Chen, Wang e Liang (2012)

2.1.3.4 Faixa de valores dos principais parâmetros do CPCP

Na Tabela 2.3 está apresentado o resumo dos valores referente às principais propriedades dos concretos permeáveis no estado endurecido estudados por diversos autores pesquisados na literatura.

Tabela 2.3: Propriedades de CPCP de acordo com a literatura

Porosidade (%)	Massa específica aparente (kg/m³)	Condutividade Hidráulica (cm/h)	Consumo de cimento (kg/m³)	Resistência à compressão - 28 dias (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Referência
15 a 25	1.600 a 2.000	720 a 1.908	270 a 415	5,5 a 20,6	1,0 a 3,8	Tennis, Leming e Akers, 2004
15 a 35	n/a	n/a	n/a	n/a	2,5 a 3,9	Olek <i>et al.</i> , 2003
19	n/a	n/a	n/a	26,0	4,4	Beeldens, Van Gemert e Caestecker, 2003
20 a 30	1.890 a 2.080	n/a	n/a	17,6 a 32,1	3,9 a 5,7	Beeldens, 2001
11 a 15	n/a	108 a 648	n/a	n/a	4,2 a 7,5	Kajio <i>et al.</i> , 1998
n/a	n/a	n/a	n/a	19,0	n/a	Tamai e Yoshida, 2003
18 a 31	n/a	n/a	n/a	11,0 a 25,0	n/a	Park e Tia, 2004
n/a	n/a	n/a	n/a	31,0 a 54,0	n/a	Zaharieva <i>et al.</i> , 2003
n/a	n/a	n/a	275 a 350	14,0 a 27,0	n/a	Pindado, Aguado e Alejandro, 1999
3 a 29	1.856 a 2.227	10,8 a 792	344	7,5 a 18,8	n/a	Lee <i>et al.</i> , 2009
5 a 35	n/a	36 a 3.600	n/a	4,1 a 55,8	n/a	Delatte, Mrkajic e Miller, 2009
n/a	n/a	2.520 a 5.760	295 a 352	4,5 a 14,5	n/a	Huang, Shu e Dong, 2010
n/a	1.835 a 2.392	36 a 3.312	n/a	10,5 a 32,8	n/a	Henderson, Tighe e Norris, 2009
20 a 29	1.741 a 1.955	396 a 540	374	6,02 a 10,17	1,77 a 2,52	Batezini, 2012

n/a: não avaliado

2.1.4 Análise estrutural de pavimentos em concreto permeável

A grande maioria das pesquisas relacionadas a concretos permeáveis são direcionadas às características hidráulicas e às propriedades físicas, como massa

específica e porosidade, sendo o seu comportamento estrutural pouco discutido no meio acadêmico.

Considerando que pavimentos em CPCP parecem possuir comportamento estrutural semelhante ao comportamento de pavimentos de concreto convencionais (VANCURA; MACDONALD; KHAZANOVICH, 2011; SULEIMAN; GOPALAKRISHNAN; KEVERN, 2011), a definição dos parâmetros elásticos e de resistência para análise estrutural de pavimentos de concreto permeável é também necessária.

A indústria americana atuante em pavimentos de CPCP está atualmente desenvolvendo metodologias de ensaios específicos por meio da ASTM com a finalidade de padronizar os métodos para determinação das características mecânicas e elásticas específicas para concretos permeáveis. Estes parâmetros são necessários para modelagem estrutural em termos de fadiga para pavimentos rígidos sobre influência de carregamentos cíclicos.

A ACPA publicou algumas equações tanto para análise estrutural quanto para definição do comportamento de concretos permeáveis em relação à fadiga. Tais modelos possuem dados de entrada comparáveis em natureza – não em magnitude –, com aqueles empregados para análise estrutural de vida de fadiga em concretos convencionais. Com base nessas equações, foi desenvolvido o PerviousPave (RODDEN; VOIGT; GIERALTOWSKI, 2010), *software* comercial de propriedade da ACPA que possibilita o dimensionamento mecânico e hidráulico de estruturas de pavimentos em CPCP, considerando os parâmetros hidrológicos da região, o tráfego atuante em termos de número de passagens de um eixo padrão, e as características mecânicas e elásticas de todos os materiais que compõem a estrutura do pavimento.

O modelo empregado para dimensionamento estrutural da espessura da camada de revestimento em CPCP contido no PerviousPave é o mesmo modelo de fadiga desenvolvido para concretos convencionais, originalmente empregado no *software* StreetPave (TITUS-GLOVER *et al.*, 2005). Dessa maneira, a ACPA reconhece que tais considerações em termos de comportamento de concretos permeáveis não são

definitivas e deverão sofrer alterações consideráveis com o avanço das pesquisas sobre a vida de fadiga do CPCP.

2.1.4.1 Comportamento em relação à fadiga e fratura

Com base nas metodologias racionais para dimensionamento e projeto de pavimentos, fica clara a necessidade da evolução nos estudos do comportamento de CPCP a partir da ação de carregamentos cíclicos, com a finalidade de viabilizar modelos de desempenhos para este material a longo prazo.

Segundo Lee (1979), para o caso do CCP, a vida de fadiga diminui com o aumento da porosidade ou do volume de vazios do material. Assumindo que este comportamento poderia ser semelhante e considerando que o volume de poros pode ser muito variável no CPCP, modelos de fadiga específicos deverão ser cuidadosamente desenvolvidos de modo a atender diferentes faixas de porosidades.

Chen, Wang e Liang (2012) avaliaram o comportamento de concretos permeáveis com relação a energia de fratura e fadiga considerando misturas com adição de sílica ativa e cinza volante (SPC), polímero (PPC) e aditivo superplastificante. Para avaliação do comportamento à fadiga, foram empregados três níveis de carregamentos, de 0,70, 0,80 e 0,90 (relação entre tensão atuante e tensão de tração na flexão resistente) e frequência de aplicação de cargas de 10 Hz. Na Figura 2.14 estão apresentados os resultados dos ensaios de fratura realizados para os diferentes tipos de concretos testados, porém com misturas que apresentassem porosidades semelhantes (aproximadamente 19,5%).

Os resultados mostram que, no início do carregamento, a curva evolui linearmente, o que demonstra que todos os concretos permeáveis testados apresentam boa elasticidade quando solicitados por baixas tensões. Quando as cargas ultrapassam um certo limite, o comportamento dos materiais se altera para não linear. Observa-se que para uma carga de 17,3 kN referente à mistura de SPC por exemplo, que representa 94,2% da carga máxima de ensaio para esta mistura, a ruptura ocorre logo após a transição do comportamento linear para não linear, de acordo com a pequena

extensão da curva no estado de não linearidade, o que evidencia o comportamento frágil dessa mistura.

Figura 2.14: Resultados dos ensaios de fratura
(SJ-601 – Produto polimérico com suas respectivas dosagens)

Adaptado de: Chen, Wang e Liang (2012)

Em contraste, observa-se que o início do comportamento não linear para as misturas com adição de polímero tem início antes (entre 82% e 89% da carga de ruptura), indicando ainda que quanto maior a dosagem de polímero, melhor são as características de fluência plástica e dureza.

Os autores observaram também que as energias de fratura foram consideravelmente maiores para as misturas poliméricas em comparação à mistura sem adição de polímero, o que representa melhoria de resistência à fissuração e à propagação das fissuras, bem como necessidade de maior energia de fratura para alcançar a ruptura completa do material. Segundo os autores, esse ganho em termos de resistência à fratura está diretamente ligado ao aumento da resistência da zona de transição, modificando o modo de falha do concreto permeável, sendo que a fratura tende a acontecer nos agregados e não mais na zona de transição.

Na Tabela 2.4 são apresentados os resultados referentes ao número de aplicação dos carregamentos para as diferentes relações entre tensões empregadas no estudo, comparando os tipos de misturas avaliadas.

Tabela 2.4: Resultados dos ensaios de fadiga

Mistura	Relação entre tensões			Mistura	Relação entre tensões		
	0,9	0,8	0,7		0,9	0,8	0,7
SPC1	651	15.311	230.158	PPC1	1.054	-	604.121
SPC3	478	10.178	101.134	PPC3	815	14.331	371.580
SPC5	379	70.145	57.894	PPC4	707	12.067	248.741
SPC8	295	3.422	31.490	PPC6	426	9.015	112.055
SPC10	204	930	20.158	PPC7	315	3.088	30.851
SPC12	107	395	8.345	PPC9	187	801	12.334

Adaptado de: Chen, Wang e Liang (2012)

Observa-se que a vida de fadiga das misturas contendo o aditivo polimérico (PPC) é sempre maior que a vida de fadiga para as misturas sem inclusão de polímero (SPC), independentemente da relação entre tensões empregada. Além disso, os resultados mostram que quanto maior a porosidade (porosidade aumenta de acordo com a numeração das misturas) menor será a vida de fadiga do material.

Em complementação ao estudo anterior, Chen *et al.* (2013) apresentaram uma comparação entre as vidas de fadiga de ambos os materiais estudados (SPC e PPC) considerando uma probabilidade de ocorrência de falha de 50%, em relação a concretos permeáveis convencionais (*conventional pervious concrete*), concreto convencional para pavimentação (*conventional concrete*) e concreto magro (*lean concrete*). Os resultados estão apresentados na Figura 2.15.

Figura 2.15: Comparação do comportamento à fadiga entre diferentes tipos de concretos

Fonte: Chen *et al.* (2013)

Observa-se que para uma mesma probabilidade de falha, o concreto convencional possui a maior vida de fadiga dentre os materiais estudados, seguido do concreto magro, quando comparados ao concreto permeável convencional. Os concretos permeáveis modificados por adições e aditivos resultaram em comportamento à fadiga melhorado em relação ao concreto permeável convencional e, no caso do PPC, o comportamento resultante foi melhor do que aquele apresentado para o concreto magro.

Ressalta-se que as características específicas dos concretos convencional, magro e permeável convencional apresentados neste comparativo não foram avaliados pelo autor dessa tese uma vez que o artigo citado por Chen *et al.* (2013), que avalia especificamente estes materiais, não foi encontrado disponível. Além disso, os autores não indicam para qual nível de porosidade das misturas permeáveis as comparações foram realizadas, sendo que os resultados podem mudar consideravelmente para as diferentes porosidades, conforme apresentado na Tabela 2.4.

De qualquer maneira, tanto os resultados comparativos apresentados na Figura 2.15, como a variação da vida de fadiga em função da porosidade apresentada na Tabela 2.4 representam fortes indícios de que modelos de fadiga devem ser específicos para cada material, uma vez que seu comportamento pode mudar consideravelmente, podendo resultar em graves erros de projeto e dimensionamento de pavimentos em CPCP. Dessa maneira, o modelo sugerido pela ACPA e empregado no *software* PerviousPave deverá ser reavaliado de acordo com parâmetros de estudos relativos a concretos permeáveis, pois espera-se que não haja proporcionalidade entre os comportamentos à fadiga de concretos permeáveis e concretos convencionais.

2.1.4.2 Características elásticas do CPCP em laboratório e campo

Ainda é escasso o número de pesquisas que apresentam resultados de parâmetros elásticos de concretos permeáveis, o que dificulta a validação de modelos para realização de análises estruturais de pavimentos de CPCP. Dessa maneira, considera-se importante o desenvolvimento de metodologias tanto de campo quanto em laboratório para estimativa dessas propriedades em concretos permeáveis, com a

finalidade de viabilizar a realização de análises mecanicistas, assim como de um apropriado dimensionamento das espessuras do revestimento em CPCP, quando for o caso.

Goede (2009) determinou o módulo de elasticidade estático e o coeficiente de Poisson em ensaios de compressão em CPs cilíndricos de concreto permeável moldados com agregado de diâmetro único de 12,5 mm, relação a/c variando de 0,27 a 0,28 e porosidade média de 27%. Obteve como resultados valores variando entre 12.100 MPa e 15.100 MPa, menores, portanto, que aqueles característicos de concretos convencionais.

Batezini (2012) apresentou medidas de módulo de elasticidade em laboratório por meio da determinação da flecha em ensaio de tração na flexão. Os resultados mostraram módulo de elasticidade médio de aproximadamente 16.000 MPa para concretos permeáveis com porosidade média da ordem de 25%. Além disso, o autor determinou o módulo de elasticidade dinâmico por meio de equipamento ultrassom, que resultou em valores médios próximos a 23.000 MPa.

Para o CCP a ACI 318-11 (ACI, 2011) sugere que o módulo de elasticidade estático seja calculado a partir da Equação 2.4.

$$E_e = 33 \cdot \rho_c^{1,5} \cdot \sqrt{f_c} \quad (2.4)$$

onde:

- E_e : módulo de elasticidade estático;
- ρ_c : massa unitária do concreto;
- f_c : resistência à compressão do concreto.

Para o CPCP Ghafoori e Dutta (1995) experimentalmente desenvolveram uma equação similar (Equação 2.5) para determinação do módulo de elasticidade estático.

$$E_e = 32,88 \cdot \rho_c^{1,5} \cdot \sqrt{f_c} \quad (2.5)$$

Observa-se que a variação da constante 32,88, determinada por Ghafoori e Dutta (1995) para concreto permeável, é muito próxima da constante “33” preconizada pela ACI 318-11 (ACI, 2011) para concretos convencionais, porém os módulos se ajustam em função das variações da massa unitária do concreto, que são menores para o CPCP em comparação ao CCP.

A Equação 2.6 foi determinada por Goede (2009), também para concretos permeáveis. Pode-se notar que o valor da constante é maior que nas demais equações.

$$E = 39,1 \cdot \rho_c^{1,5} \cdot \sqrt{f_c} \quad (2.6)$$

Na Figura 2.16 é apresentada uma curva de correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão dos CPs, determinados em laboratório por Goede (2009).

Figura 2.16: Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão de CPs de CPCP

Adaptado de: Goede (2009)

Quanto ao coeficiente de Poisson, Goede (2009) determinou valores variando de 0,14 a 0,34, sendo que a média obtida foi de 0,22. Estes resultados são similares, porém apresentam maior variabilidade do que os resultados obtidos por Ghafoori e Dutta

(1995), que concluíram que o coeficiente de Poisson do CPCP é similar ao do CCP, variando de 0,15 a 0,20.

2.1.4.3 Análises mecanicistas de pavimentos permeáveis

Vários pesquisadores já utilizaram diversos tipos de modelagens para análise estrutural de pavimentos convencionais rígidos e flexíveis, com a finalidade de empregar tais modelos na previsão do desempenho dos pavimentos para projeto e dimensionamento. Existem diversos *softwares* fechados específicos para análise estrutural de pavimentos rígidos e flexíveis, que normalmente empregam modelos constitutivos simplificados, porém de grande aceitação para projeto e dimensionamento de estruturas na prática, como o EverFE (DAVIDS *et al.*, 2003), e o ISLAB (KHAZANOVICH *et al.*, 2000), ambos empregando o método dos elementos finitos.

Outros tipos de *softwares* abertos têm sido também muito utilizados para análise estrutural, por exemplo o *software* comercial ABAQUS (ABAQUS, 2001) nas suas diversas versões, que tem se destacado, principalmente no âmbito acadêmico, em diversas áreas da engenharia, uma vez que possui uma ampla gama de modelos e elementos disponíveis em sua biblioteca, o que permite, além das análises elásticas lineares clássicas, o uso de modelos constitutivos mais complexos, como comportamento elástico não linear, elastoplástico, viscoelástico, entre outros.

Com relação ao desenvolvimento de pesquisas em pavimentos flexíveis convencionais empregando-se o ABAQUS, foram propostos modelos em termos de previsão de deformação permanente (AL-KHATEEB; SAOUD; AL-MSOUTI, 2011), correlação entre tensão e deformação (RAHMAN; MAHMUD; AHSAN, 2011), além da comparação de resultados empregando modelagens em 2D, 3D e axissimétricas (SUKUMARAN *et al.*, 2004).

Já para pavimentos rígidos convencionais, modelagens foram realizadas na análise de comportamento à fratura de placas de concreto (GAEDICK; ROESLER, 2009), distribuição de tensões e deformações em pavimentos com concreto compactado a rolo (ZDIRI *et al.*, 2009), entre outros.

Um dos trabalhos mais completos em termos de elaboração de modelos de Elementos Finitos para aplicações em pavimentação foi desenvolvido por Zaghoul e White (1994). Os autores estudaram o comportamento de pavimentos rígidos e flexíveis convencionais empregando uma modelagem 3D elaborada no *software* ABAQUS, com a finalidade de desenvolver uma especificação para permissão de sobrecarga em veículos comerciais no estado de Indiana, nos EUA, por meio da criação de novos Fatores de Equivalência de Carga para estes veículos.

Nessa pesquisa foram avaliadas as respostas dos pavimentos em termos de carregamentos estático e dinâmico, assim como o efeito da aplicação cíclica das cargas considerando diversos modelos constitutivos para cada tipo de material, desde modelos elásticos convencionais, até aqueles mais complexos, como os modelos viscoelásticos para os materiais asfálticos, elastoplásticos com critério de ruptura Drucker-Prager para camadas granulares, entre outros. Os autores observaram que os modelos criados tiveram boa correlação com os modelos tradicionais empregados para análise estrutural de pavimentos.

Já para pavimentos permeáveis, ainda é recente a busca de modelos para análise estrutural, sendo que poucos autores apresentaram estudos nesse nível. De qualquer maneira, considerando-se os valores de módulo de elasticidade observados nas pesquisas citadas anteriormente, pode-se especular que o comportamento de pavimentos com revestimentos em CPCP seja semelhante àquele atribuído a pavimentos rígidos (VANCURA; MACDONALD; KHAZANOVICH, 2011; SULEIMAN; GOPALAKRISHNAN; KEVERN, 2011), que normalmente é tratado com base na teoria de placas de Wastergaard (BALBO, 2009).

Batezini (2012) realizou análises mecanicistas de pavimentos de concreto permeável pelo método dos elementos finitos através do *software* EverFE, considerando a aplicação de cargas do eixo simples de rodas duplas 80 kN, correspondente ao tráfego de veículos comerciais, e a de um eixo simples de roda simples de 22 kN, simulando também a passagem de veículos leves (van comercial). O estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade de emprego de concreto permeável com porosidade de 25% como revestimento de pavimentos para uso em estacionamento considerando o tráfego de veículos de passeio e comerciais.

Os resultados mostraram que, para atender a uma relação entre as tensões resistente e atuante menor que 0,45, que foi o parâmetro limitador para viabilizar ou não o uso do CPCP em relação à fadiga baseado em modelos específicos para concretos convencionais, a placa de concreto permeável necessitaria de espessura maior que 40 cm, considerando o eixo padrão de 80 kN, que pode ser considerado economicamente inviável na prática. Entretanto, o autor observou que para o tráfego de veículos leves, espessuras de aproximadamente 11 cm seriam suficientes para atender à vida de projeto sem ocorrência de ruptura por fadiga para o modelo de deterioração considerado.

Vancura, Macdonald e Khazanovich, (2011) realizaram análises estruturais de pavimentos em concreto convencional e permeável empregando a teoria de Wastergaard para placas medianamente espessas apoiadas sobre a fundação de Winkler, que caracteriza o solo como uma série de molas lineares-elásticas desconectadas, utilizando os modelos disponíveis no *software* ISLAB. As análises foram baseadas em resultados de deflexões em campo medidas por equipamento FWD em duas estruturas de pavimento em CPCP e três estruturas de pavimentos em CCP, com espessuras de revestimento e base semelhantes, todos executados no estado de Minnesota, nos EUA.

Os módulos de ruptura (MR) característicos dos concretos permeáveis estudados foram determinados em laboratório por meio de CPs moldados *in loco* durante a execução dos pavimentos e os resultados variaram de 2,3 MPa a 3,4 MPa. Os módulos de elasticidade foram retroanalizados e os valores obtidos variaram entre 14,4 GPa e 19,7 GPa para o CPCP e 31,7 GPa e 50,2 GPa para o CCP. Após avaliação dos resultados, os autores identificaram que, para os métodos empregados de análise estrutural, a teoria de placas de Wastergaard pode ser usada para análise de comportamento de pavimentos em CPCP.

Os autores realizaram também análises de fadiga empregando o modelo desenvolvido pela ACPA e utilizado nos *softwares* StreetPave e PerviousPave, originalmente desenvolvido para CCP. Este modelo foi selecionado para essa pesquisa visto que até o momento da realização do estudo não havia modelo de fadiga específico para

CPCP, assim como hoje ainda não há publicação de modelo efetivamente calibrado em pista.

Considerando-se uma probabilidade de falha de 90% dos pavimentos, os autores determinaram o número N admissível em termos do eixo padrão de 80 kN considerando as variações do módulo de ruptura do concreto permeável, das espessuras do revestimento e base, e do módulo de reação do subleito (k). Os resultados estão apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Resultados dos ensaios de fadiga (número N)

Módulo de Ruptura (MPa)	Espessura Revestimento (cm)	Base - 30 cm			Base - 60 cm		
		k (MPa/m)			k (MPa/m)		
		16	27	54	16	27	54
2,1	15	6	9	18	163	521	4.081
	20	53	128	629	1.131	479	73.782
	25	3.490	1.550	300.000	88.100	6,08E+05	3,09E+07
Módulo de Ruptura (MPa)	Espessura Revestimento (cm)	k (MPa/m)			k (MPa/m)		
		16	27	54	16	27	54
		16	27	54	16	27	54
2,8	15	28	62	234	15.700	1,41E+05	6,96E+06
	20	1.870	9.830	201.000	6,12E+05	9,44E+06	1,68E+09
	25	5,18E+06	8,75E+07	2,40E+10	2,35E+09	9,14E+10	1,57E+14
Módulo de Ruptura (MPa)	Espessura Revestimento (cm)	k (MPa/m)			k (MPa/m)		
		16	27	54	16	27	54
		16	27	54	16	27	54
3,4	15	241	868	7.760	7,71E+06	2,84E+08	1,72E+11
	20	2,35E+05	3,59E+06	5,10E+08	3,17E+09	2,83E+11	1,40E+15
	25	1,06E+11	1,10E+13	1,10E+17	2,43E+15	9,92E+17	2,09E+23

OBS: o valor grifado deve representar erro de resultado, visto que deveria estar entre os resultados que correspondem aos valores de k de 16 MPa/m e 54 MPa/m.

Adaptado de: Vancura, Macdonald e Khazanovich, (2011)

Observa-se que, segundo os resultados apresentados nessa pesquisa, para algumas das estruturas simuladas de acordo com o modelo de fadiga da ACPA (StreetPave), seria possível o emprego de pavimentos de concreto permeável para tráfego pesado a muito pesado, com valores de N maiores que 2×10^7 , até mesmo para o caso de módulos de ruptura do concreto permeável de 2,1 MPa.

No entanto, é importante ressaltar que o modelo de fadiga aplicado nessa análise não representa o comportamento de concretos permeáveis, e não deve ser tomado como parâmetro para projetos. Inclusive, Chen *et al.* (2013) demonstra, em estudo realizado

em laboratório, que há uma diferença considerável entre o comportamento em relação à fadiga do CCP em relação ao CPCP, sendo que os valores de número N apresentados por Vancura, Macdonald e Khazanovich, (2011) provavelmente são superestimados em relação ao número admissível de passagens do eixo padrão.

Cargnin *et al.* (2015) realizaram uma análise de sensibilidade da espessura da camada de revestimento de pavimentos em CPCP projetados para faixas exclusivas de ônibus. Para análise de sensibilidade foi adotado o modelo de fadiga utilizado no *software* PerviousPave, oriundo do StreetPave. Os resultados mostraram que, para concretos com resistência à tração na flexão média de 2,13 MPa (BATEZINI, 2012), a espessura de revestimento necessária para atendimento ao tráfego de projeto resultou em 50 cm, o que seria impraticável em termos de custo de implantação. Já para o caso da resistência à tração na flexão do CPCP ser de 5 MPa (CHEN *et al.*, 2013), a espessura do revestimento resultante foi de 24 cm.

Alam (2013) desenvolveu diversas análises estruturais de pavimentos de concreto permeável empregando o método dos elementos finitos por meio do ABAQUS. Após combinar os resultados das análises com critérios de ruptura de pavimentos permeáveis em uso, o autor propôs um gráfico de dimensionamento da espessura da camada de revestimento de pavimentos em CPCP baseado na resistência à tração na flexão do material.

Alam, Haselbach e Cofer (2014) simularam painéis de concreto permeável submetidos a carregamentos por eixo tandem de rodas duplas a partir de análises por elementos finitos. Foram consideradas posições das rodas no canto, centro e na borda das placas. As tensões críticas obtidas foram comparadas com resultados de resistência à tração na flexão (2 MPa) e compressão (21,3 MPa) em amostras extraídas de pistas experimentais, considerando diferentes espessuras de CPCP. O estudo mostrou que os painéis de concreto permeável projetados apresentam resistências suficientes para suportar as cargas utilizadas no estudo.

3 ETAPA LABORATORIAL – DEFINIÇÃO DAS MISTURAS ÓTIMAS

A etapa de laboratório teve por objetivo principal a avaliação de alguns tipos de misturas de concreto permeável envolvendo a variação de granulometrias de agregados, de tipos de cimento e de teores de superplastificante e de retardador de pega, visando a determinação de duas misturas ótimas que foram empregadas na etapa de campo da pesquisa.

As misturas foram desenvolvidas para atender a duas diferentes condições de produção e transporte do CPCP: 1 - produção em baixa escala, com betoneira manual e sem tempo de transporte antes da aplicação; 2 - produção em larga escala em caminhão betoneira, com tempo de transporte de uma hora entre a usina e o local de implantação.

Para atender aos objetivos dessa etapa, foram realizadas moldagens de CPs cilíndricos e prismáticos, além de uma placa de concreto permeável com dimensões de 1,0 m x 1,0 m x 0,1 m. Os ensaios realizados buscaram a determinação da porosidade, massas específicas aparentes nos estados fresco e endurecido, taxa de infiltração, resistência à compressão e resistência à tração na flexão dos CPs. Após a análise dos resultados, foram definidas duas misturas de CPCP para serem empregadas como revestimento permeável de duas calçadas experimentais executadas no *campus* da USP.

Todos os materiais, equipamentos, espaço físico e mão de obra necessários para execução das moldagens e ensaios foram fornecidos pela empresa Lafarge-Holcim, cujo laboratório está localizado na cidade de Santo André no estado de São Paulo. A mão de obra utilizada na moldagem da placa de CPCP foi fornecida pela empresa Engenharia de Pisos, porém a sua moldagem foi também realizada nas dependências da Lafarge-Holcim.

A seguir estão apresentadas as metodologias adotadas para moldagem e cura dos CPs, além dos ensaios realizados. Na sequência são também apresentados os

resultados obtidos e os critérios utilizados para definição das misturas mais adequadas, além das considerações finais da etapa de laboratório.

3.1 Materiais e métodos

Nos subitens apresentados a seguir estão descritos os materiais utilizados, as proporções de misturas testadas, os ensaios de laboratório e a metodologia de execução da placa de CPCP.

3.1.1 Materiais

3.1.1.1 Agregado

Os agregados empregados nesta pesquisa são do tipo graníticos, originados da Pedreira Holcim Mairiporã, localizada em SP. Foram utilizadas duas diferentes faixas granulométricas no intuito de observar as possíveis variações de comportamento do concreto permeável em função dos tamanhos e proporções dos agregados.

Batezini (2012), estudou três misturas de concreto permeável com diferentes graduações de agregado, com diâmetros variando entre 4,8 mm e 12,5 mm. O autor observou que não houve diferenças significantes entre as misturas no que diz respeito às suas características mecânicas, hidráulicas e de porosidade. Mesmo assim, o emprego de agregados com 100% do material com diâmetro entre 6,3 mm e 9,5 mm é sugerido (GOEDE; HASELBACH, 2012; TENNIS; LEMING; AKERS, 2004), pois possibilita um maior controle na produção de CPCP com porosidades variando entre 20% e 25%, que são normalmente utilizadas em projetos.

Considerando-se que o uso de faixas granulométricas especiais tende a aumentar os custos para produção de concretos permeáveis, visto que o sistema de separação dos agregados necessita de alterações específicas para se atender a uma granulometria desse padrão, optou-se por estudar também a possibilidade de utilização de uma graduação já comercializada na maioria das pedreiras no Brasil, na tentativa de reduzir os custos atribuídos à produção do concreto e elevar sua competitividade.

Dessa maneira, as graduações utilizadas nesta pesquisa foram:

- Graduação Especial (E): agregado com graduação contínua, sendo 100% do material com diâmetro entre 6,3 mm e 9,5 mm, sem lavagem;
- Graduação Comercial (C): Pedrisco.

Na Figura 3.1 estão apresentadas as curvas granulométricas de ambas as graduações empregadas e na Tabela 3.1 os demais resultados dos ensaios de caracterização do pedrisco. Estes ensaios foram realizados ao longo da segunda quinzena de junho de 2015, em data próxima à de realização das moldagens das misturas de CPCP, e os resultados foram fornecidos pela Lafarge-Holcim.

Gentileza: Lafarge-Holcim

Tabela 3.1: Resultados dos ensaios de caracterização do pedrisco (graduação comercial)

Determinações	Resultados por Amostra	Norma Empregada para Execução dos Ensaios
Módulo de Finura	6,046	NBR NM 248 (ABNT, 2003a)
Dimensão Máxima	12,5 mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003a)
Massa Específica Real	2,72 kg/dm ³	NBR NM 52 (ABNT, 2009a)
Massa Unitária Seca	1,33 kg/dm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Material Pulverulento	0,54%	NBR NM 46 (ABNT, 2003b)

Gentileza: Lafarge-Holcim

De acordo com a curva granulométrica, o pedrisco possui diâmetro máximo de 12,5 mm, com 95,5% de agregado graúdo (retido na peneira 4,8 mm) e 4,5% de agregado miúdo (passante da peneira 4,8 mm), segundo definições da NBR 7211 (ABNT, 2009b). Observa-se ainda que a granulometria característica do pedrisco não difere muito da graduação especial utilizada (Figura 3.1), o que justifica seu emprego nos testes realizados.

A decisão para a escolha das graduações estudadas foi baseada em resultados de pesquisas já desenvolvidas em outros países (BUSH *et al.*, 2008; DELATTE, 2007; DEO; NEITHALATH, 2010; HENDERSON; TIGHE; NORRIS, 2009; KEVERN; HASELBACH; SCHAEFER, 2012; MCCAIN; DEWOOLKAR, 2009; TENNIS; LEMING; AKERS, 2004), inclusive no Brasil (BATEZINI, 2012; HOLTZ, 2011; SANTOS, 2014), que sugerem o emprego de agregados com graduação contínua e pouca quantidade de materiais finos, com a finalidade de auxiliar na produção de um concreto com porosidade suficiente para atender os critérios mecânicos e hidráulicos de desempenho.

Cabe destacar que a decisão sobre a granulometria dos agregados teve como base a finalidade de aplicação do concreto permeável em duas calçadas localizadas no *campus* da USP, que faz parte de um projeto de pesquisa do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Escola Politécnica da USP (EPUSP). Assumindo-se que os critérios de resistência são de menor importância para este caso, onde haverá exclusivamente tráfego de pedestres, a granulometria proposta deverá atender às necessidades para o CPCP sem problemas. Porém, em casos mais específicos, onde as cargas de tráfego são importantes, a granulometria dos agregados deverá ser cuidadosamente avaliada, pois está diretamente ligada a todas as demais propriedades do concreto permeável.

3.1.1.2 Cimento

Os ligantes hidráulicos usados na produção do concreto permeável para esta pesquisa foram o Cimento Portland de Alto-Forno (CPIII 40 RS) e o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV ARI RS).

O CPIII foi inicialmente escolhido porque, além de atender a todas as especificações mínimas preconizadas pelas NBR 16697 (ABNT, 2018), possui elevada resistência ao ataque de sulfatos (assim como o CPV ARI RS utilizado) e velocidade de hidratação reduzida quando comparado ao CPV ARI. Na Tabela 3.2 são apresentadas as principais características do CPIII 40 RS.

Tabela 3.2: Características do CPIII 40 RS
(Ensaio Realizados pela Lafarge-Holcim entre 14/11/2015 e 09/12/2015)

Característica	Unid.	Valor
Percentual passante na # 400	%	3,9
Superfície específica – <i>Blaine</i> – NBR 16372 (ABNT, 2015b)	cm ² /g	4.073
Tempo de pega - NBR 16607 (ABNT, 2017)	min	196-258
Resistência à compressão – NBR 7215 (ABNT, 1997)	MPa	10,4 (1 dia) 25,1 (3 dias) 32,7 (7 dias) 48,0 (28 dias)
Perda ao fogo – 1.000°C - NBR NM 18 (ABNT, 2012a)	%	3,05
Resíduo insolúvel - NBR NM 15 (ABNT, 2012b)	%	1,24

Gentileza: Lafarge-Holcim

O CPV ARI RS foi também estudado, pois, para produção do CPCP em grande escala, este era o único tipo de cimento disponível dentro do sistema da Lafarge-Holcim, que foi a responsável pela produção do concreto em caminhão betoneira.

Este tipo de cimento, que atende também às especificações das NBR 16697 (ABNT, 2018), possui a peculiaridade de atingir elevadas resistências já nos primeiros dias, que vem a ser uma característica importante para os cimentos aplicados em pavimentação, dada a constante necessidade da rápida liberação do pavimento ao tráfego, dependendo do local de implantação. Em contrapartida, a sua condição de alta velocidade de hidratação pode provocar a redução do tempo de trabalho do CPCP, que é limitado por pesquisadores e órgãos americanos em no máximo 90

minutos (ACI, 2010; BEAN *et al.*, 2015), sendo este um fator importante a se levar em consideração no caso de grandes distâncias de transporte entre a usina e o local de aplicação.

Na Tabela 3.3 são apresentadas as suas principais características.

Tabela 3.3: Características do CPV ARI RS
(Ensaio Realizados pela Lafarge-Holcim entre 10/02/2016 e 07/02/2016)

Característica	Unid.	Valor
Percentual passante na # 400	%	2,4
Superfície específica – <i>Blaine</i> – NBR 16372 (ABNT, 2015b)	cm ² /g	4.505
Tempo de pega - NBR 16607 (ABNT, 2017)	min	146-197
Resistência à compressão – NBR 7215 (ABNT, 1997)	MPa	18,6 (1 dia) 33,3 (3 dias) 41,0 (7 dias) 53,0 (28 dias)
Perda ao fogo – 1.000°C - NBR NM 18 (ABNT, 2012a)	%	2,15
Resíduo insolúvel - NBR NM 15 (ABNT, 2012b)	%	0,89

Gentileza: Lafarge-Holcim

3.1.1.3 Superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado nessa pesquisa foi o ADVA CAST 585, fornecido pela empresa Grace, e teve como objetivo melhorar a trabalhabilidade do CPCP sem elevação da relação a/c. É um aditivo produzido à base de policarboxilatos, originalmente desenvolvido e comercializado para uso em concretos autoadensáveis, buscando a redução da quantidade de água das misturas e promovendo, consequentemente, maior resistência ao concreto, além de melhorar as condições de trabalhabilidade.

Suas características atendem a NBR 11768 (ABNT, 2011) como aditivo SP II, a ASTM C 494 (ASTM, 2015a) como aditivo Tipos A e F, e a ASTM C1017 (ASTM, 2013) como aditivo Tipo I. Possui massa específica de 1,06 g/cm³ de acordo com o catálogo do fabricante.

3.1.1.4 Retardador de Pega

O aditivo retardador de pega tem como principal objetivo prolongar o tempo fluido de concretos convencionais, com aumento do tempo de pega. O aditivo atua retardando a dissolução dos cátions e ânions do cimento, especialmente aqueles com alta velocidade de dissolução inicial, que é o caso do CPV ARI RS. Suas substâncias comuns são: carboidratos, ácidos hidroxí-carboxílicos e dicarboxílicos, fosfatos e sais de chumbo e de zinco.

O aditivo usado nessa pesquisa foi o Recover, também fornecido pela Empresa Grace. É classificado segundo a ASTM C 494 (ASTM, 2015a) como aditivo Tipo B. Pela NBR 11768 (ABNT, 2011) é classificado como Aditivo Tipo R. Segundo catálogo do fabricante, o aditivo possui massa específica de 1,100 g/cm³ a 1,014 g/cm³, com valor médio de 1,057 g/cm³.

O retardador de pega empregado nessa pesquisa teve como objetivo auxiliar no controle do processo de hidratação do cimento CPV ARI RS, retardando-o. Seu uso foi necessário pela conveniência de se aumentar o tempo de início de pega do CPCP, em razão da elevada distância entre a usina de concreto e o local de implantação da calçada no *campus* da USP, com tempo de transporte de aproximadamente uma hora.

3.1.2 Misturas

Foram desenvolvidas um total de onze misturas, buscando definir duas dosagens ótimas para o concreto permeável, sendo uma para produção do concreto em baixa escala, com mistura em betoneira e sem tempo de transporte, e outra para produção de alta escala, com mistura em caminhão betoneira e tempo de transporte elevado de aproximadamente uma hora. As misturas foram produzidas com variação da granulometria dos agregados, dos tipos de cimento, bem como com diferentes teores de superplastificante e retardador de pega.

Os consumos de cimento e agregado utilizados foram fixados em 374 kg/m³ e 1.660 kg/m³, respectivamente, representando uma proporção cimento/agregado de

1:4,44. A relação a/c foi mantida constante em 0,3. Estas definições foram baseadas em estudos já desenvolvidos anteriormente (BATEZINI, 2012; MCCAIN; DEWOOLKAR, 2009) que obtiveram resistências à compressão e à tração na flexão variando de 8 MPa a 12 MPa e de 1,0 MPa a 2,0 MPa, respectivamente, além de porosidades variando entre 20% e 30%. Considerando-se que, de acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015a) estas resistências do concreto são apropriadas para tráfego de pedestre, optou-se por manter esses consumos constantes em todas as misturas estudadas.

As calçadas experimentais executadas nesta pesquisa possuem algumas diferenças conceituais entre si, que estão detalhadas no Capítulo 4 desta tese. Entretanto, para definição das misturas ótimas, foram levadas em consideração principalmente as dimensões de cada uma das calçadas, de modo a definir o tipo de processo executivo a ser utilizado.

A Calçada 1, que possui dimensões de 1,00 m x 8,65 m, foi executada com a produção do concreto permeável *in situ* com auxílio de betoneira manual. Para este caso, buscando-se o máximo de economia para a mistura, não foi considerada inclusão de retardador de pega, pois não haveria tempo considerável de transporte do CPCP entre a finalização da mistura em betoneira e a sua execução em pista. Dessa maneira, optou-se por definir uma mistura ótima contendo os insumos convencionais, com adição exclusiva de aditivo superplastificante para melhoria da trabalhabilidade do concreto sem alteração da relação a/c fixada em 0,3. Para esta etapa foram produzidas as misturas Ra a Rh, dentre as quais foi definida a primeira mistura ótima.

Já na Calçada 2, que possui dimensões de 1,50 m x 84,80 m, a metodologia de produção e lançamento do concreto foi definida em escala industrial, com uso de caminhão betoneira para produção e lançamento do CPCP. Considerando-se que a distância entre o local de produção e o local de execução é consideravelmente elevada, com tempos de trajeto de uma hora, em média, optou-se por incluir nas misturas o aditivo retardador de pega, para aumentar o tempo de trabalho do CPCP. Para esta etapa, foram produzidas as misturas Ri a Rl, dentre as quais foi definida a segunda mistura ótima. Na Tabela 3.4 estão apresentados os tipos e as proporções dos materiais empregados para cada mistura.

Tabela 3.4: Misturas e proporções dos materiais

Identificação das misturas	Graduação dos agregados	Tipo de cimento	Teor de superplastificante (%)***	Teor de retardador de pega (%)***
Ra	E*	CPIII	0,70 (2.470 mL/m ³)	-
Rb	E*	CPIII	0,00	-
Rc	E*	CPIII	0,35 (1.235 mL/m ³)	-
Rd	E*	CPIII	0,45 (1.588 mL/m ³)	-
Re	E*	CPIII	0,55 (1.940 mL/m ³)	-
Rf	C**	CPIII	0,25 (882 mL/m ³)	-
Rg	C**	CPIII	0,35 (1.235 mL/m ³)	-
Rh	E*	CPIII	0,47 (1.658 mL/m ³)	-
Ri	C**	CPV	0,45 (1.588 mL/m ³)	0,2 (708 mL/m ³)
Rj	C**	CPV	0,35 (1.235 mL/m ³)	0,4 (1.415 mL/m ³)
Rl	C**	CPV	0,45 (1.588 mL/m ³)	0,4 (1.415 mL/m ³)

* 100% dos agregados com diâmetro entre 6,3 mm e 9,5 mm

** Pedrisco

*** Porcentagem em relação a massa de cimento e entre parênteses o volume de aditivo por metro cúbico de CPCP

3.1.3 Procedimentos de moldagem e cura dos CPs

Inicialmente foi realizado o peneiramento para separação do agregado na graduação especial. Para tanto, foi utilizado um peneirador elétrico contendo as peneiras correspondentes às aberturas de 9,5 mm e de 6,3 mm.

Para estudo do primeiro conjunto de misturas, foram moldados seis CPs cilíndricos e seis a oito CPs prismáticos para cada mistura, dependendo do volume de material disponível. Os CPs cilíndricos foram usados para determinação da porosidade, massas específicas aparentes, capacidade de infiltração e resistência à compressão, enquanto os CPs prismáticos para determinação da porosidade, massas específicas aparentes e da resistência do CPCP à tração na flexão.

Schaefer *et al.* (2006) estudaram diferentes processos de mistura para confecção de CPs de concreto permeável em laboratório. Os autores concluíram que a ordem de mistura dos componentes altera as características do produto final e estabeleceram então um procedimento pelo qual foi obtido um material com melhores propriedades mecânicas e hidráulicas.

Este procedimento é semelhante ao utilizado na presente pesquisa, com exceção da metodologia de mistura do superplastificante e do retardador de pega na água (Figura 3.2), bem como da maneira como a água e os aditivos foram adicionados na mistura de maneira parcial. Optou-se por adicionar parcialmente os materiais líquidos, uma vez que os aditivos específicos empregados não haviam sido utilizados em outras pesquisas em CPCP até o momento, e foi necessário calibrar se a quantidade adicionada não iria causar segregação no concreto em estado fresco.

Figura 3.2: Procedimento de diluição dos aditivos em água antes da preparação da mistura

Fonte: acervo pessoal

A seguir está apresentada a sequência empregada para mistura dos materiais:

- a) Adicionar superplastificante e/ou retardador de pega na água;
- b) Adicionar todo o agregado e cimento na betoneira;
- c) Misturar por 2 minutos;
- d) Adicionar aproximadamente 50% do volume de água e aditivos;
- e) Misturar por 3 minutos;
- f) Adicionar o restante do volume de água e aditivos;

g) Misturar por mais 3 minutos.

Na Figura 3.3 são apresentados os materiais já misturados em betoneira.

O controle das misturas de concreto em laboratório foi realizado por meio da massa específica aparente no estado fresco de acordo com a ASTM C1688 (ASTM, 2014) e pela visualização do aspecto do material após término do tempo de mistura.

Figura 3.3: Mistura dos componentes do concreto permeável

Fonte: acervo pessoal

Além da determinação da massa específica aparente no estado fresco, foi realizada uma análise visual da mistura pronta, que é um dos métodos utilizados na prática para controle da produção do concreto permeável. Nessa metodologia, se observa, após o término do tempo de mistura, se as partículas estão inteiramente cobertas de argamassa e se a mistura apresenta um aspecto brilhoso.

Foi realizado também um teste tátil visual, igualmente indicado na literatura, que consiste em apertar uma porção da mistura com a mão e verificar se há a formação de uma pequena aglomeração de partículas (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004). Na Figura 3.4 é apresentada a realização do teste tátil visual.

Figura 3.4: Teste tátil visual para controle de produção do concreto permeável

Fonte: acervo pessoal

Para moldagem dos CPs cilíndricos foram inicialmente empregados dois métodos de compactação. O primeiro método, nomeado nesse texto de Método Convencional (MC), consiste na aplicação de 45 golpes por CP utilizando-se uma haste metálica em concordância com a NBR 5738 (ABNT, 2016). Os golpes foram divididos em três camadas de espessuras iguais, sendo um total de 15 golpes por camada (Figura 3.5).

O Método de Compactação em Camada Única (MCU), segundo método empregado na presente pesquisa, é caracterizado pela compactação do CP em camada única, com a finalidade de representar melhor a metodologia de execução de concretos permeáveis em campo, que na grande maioria das vezes são executados em camada única (GUPTA, 2014; BEAN *et al.*, 2015; HASELBACH; VALAVALA; MONTES, 2006; HASELBACH *et al.*, 2011; KEVERN; HASELBACH; SCHAEFER, 2012).

Essa condição de compactação em campo tende a promover a variação da porosidade ao longo da profundidade da camada de concreto, sendo que a tendência é de que a região da superfície apresente porosidades menores que aquelas observadas mais ao fundo da placa de concreto (ALAM; HASELBACH, 2014; ALAM; HASELBACH; COFER, 2013; HASELBACH; FREEMAN, 2006).

Figura 3.5: MC em 3 camadas

Fonte: acervo pessoal

Para viabilização do procedimento em laboratório, foi inicialmente calculada a massa necessária de concreto no estado fresco a ser colocada no interior do molde com volume conhecido, visando a obtenção de um valor de porosidade pré-definido. Considerando-se uma porosidade alvo de 25%, a massa de concreto a ser colocada no molde de 10 cm x 20 cm é de aproximadamente 2,82 kg, baseado em uma massa específica de 1.848 kg/m³ (BATEZINI, 2012).

A MCU foi realizada por meio da aplicação de golpes de marreta sobre um anel de neoprene posicionado no topo do CP (Figura 3.6), forçando toda a massa de material fresco para o interior do molde.

Foram moldados 3 CPs cilíndricos para cada tipo de metodologia de compactação para as misturas Ra, Rb e Rc. Após análise dos resultados, todos os CPs cilíndricos produzidos para as demais misturas foram moldados de acordo com a MCU. Os motivos para escolha estão apresentados na análise dos resultados da etapa laboratorial.

Figura 3.6: MCU com auxílio de neoprene e martelo

Fonte: acervo pessoal

Os CPs prismáticos foram moldados também em camada única, aplicando-se a compactação por rolagem de um soquete, originalmente utilizado para realização do ensaio de Proctor normal, sobre os CPs, conforme pode ser observado na Figura 3.7. Este procedimento adotado tem por finalidade simular a compactação em campo, normalmente realizada por meio de um rolo metálico, porém sem controle das cargas empregadas.

Figura 3.7: Método de compactação dos CPs prismáticos

Fonte: acervo pessoal

Todos os CPs foram mantidas por 7 dias nos moldes com sua superfície protegida por material plástico, a fim de se evitar a perda excessiva de água nas primeiras idades do concreto. Antes e depois de serem desmoldados, os CPs foram mantidos em local sem controle de umidade, simulando-se assim um processo de cura menos rigoroso, que se assemelha ao de campo.

3.1.4 Procedimentos de moldagem e cura da placa de CPCP

Todo o procedimento de preparação e mistura dos insumos para execução da placa de CPCP de 1,0 m x 1,0 m x 0,1 m foi realizado seguindo os mesmos procedimentos apresentados no item 3.3.1. Para execução da placa foram empregadas as misturas Ra e Rh, sendo cada mistura aplicada em 50% da área total da placa.

A placa foi executada diretamente sobre um pavimento asfáltico existente, nas proximidades do laboratório da Lafarge-Holcim em Santo André/SP. Previamente à execução, foram instaladas formas de madeira para contenção do CPCP fresco. Foi empregada uma lona plástica no fundo da placa, com a finalidade de melhorar as condições de cura do concreto (Figura 3.8). A mesma lona foi utilizada para cobrir a placa de concreto após sua execução por 7 dias.

Figura 3.8: Forma e lona de proteção para moldagem da placa

Fonte: acervo pessoal

O concreto foi lançado nas formas manualmente, com auxílio de pá e colher de pedreiro. Para compactação foi empregado um rolo metálico (Figura 3.9) de rolagem manual construído especificamente para esta pesquisa. O rolo possui característica de ser vazado e parcialmente preenchido com material arenoso, podendo atender a diferentes carregamentos.

Figura 3.9: Rolo metálico de compactação manual

Fonte: acervo pessoal

Na Figura 3.10 está apresentada a compactação sendo realizada com uso do rolo metálico.

Figura 3.10: Compactação da placa com uso de rolo metálico

Fonte: acervo pessoal

3.1.5 Dimensões e quantidades de CPs

A antiga NBR 7583 (ABNT, 1986) determinava que os CPs prismáticos de concreto a serem utilizados no controle tecnológico para pavimentação através de ensaios de tração na flexão devem ter dimensões 15 cm x 15 cm x 50 cm. Todavia, a adoção de CPs com estas dimensões implica no uso de elevadas quantidades de insumos, bem como na dificuldade de manuseio dos CPs em razão de seu elevado peso (aproximadamente 27 kg após desmoldados) (CERVO, 2004).

Dessa maneira, foram utilizados CPs de 10 cm x 10 cm x 40 cm, sendo gerada economia de cerca de 64% de materiais. O valor da carga requerido para a ruptura do CP fica reduzido de 34% a 39% do valor da carga normalmente requerido para o CP convencional, considerando-se que as tensões de ruptura são estatisticamente equivalentes para os dois casos, como demonstrou Cervo (2004).

Para os CPs cilíndricos, foram utilizadas as dimensões padrão de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura.

Previamente à execução dos ensaios, foram realizadas três medições de diâmetro e altura, no caso dos CPs cilíndricos, bem como de comprimento e de faces transversais dos CPs prismáticos, para determinação dos seus valores médios. Vale a pena ressaltar que, em função das irregularidades existentes nos CPs devido a sua elevada porosidade, os resultados das medições podem ter sofrido alguma dispersão, ainda que pequena.

Para as misturas de Ra a Rg foram previstos um número mínimo de seis CPs de cada formato, sendo que esse valor foi de até sete ou oito por conta do aproveitamento de eventual sobra de material fresco durante as moldagens. Para as demais misturas, em que foram adicionados diferentes teores de aditivo retardador de pega e alterado o tipo de cimento, foi prevista a produção de nove CPs cilíndricos, para determinação da porosidade, massas específicas aparentes e taxa de infiltração, além da resistência à compressão simples nas idades de 24 horas, 7 dias e 28 dias, e três CPs prismáticos, para avaliação da resistência à tração na flexão.

Foram moldados no total setenta e um CPs cilíndricos, cinquenta e sete CPs prismáticos e uma placa de CPCP. Na Tabela 3.5 está apresentada a quantidade de ensaios realizados na etapa laboratorial desta pesquisa.

Tabela 3.5: Quantidade de ensaios realizados

Ensaio	Misturas											Norma
	Ra	Rb	Rc	Rd	Re	Rf	Rg	Rh	Ri	Rj	RI	
Massa Específica Aparente no Estado Fresco	13*	13*	14*	14*	14*	12*	12*	-	13*	13*	13*	ASTM C1754 (ASTM, 2012)
Massa Específica Aparente no Estado Endurecido	13*	13*	14*	14*	14*	12*	12*	-	13*	13*	13*	ASTM C1754 (ASTM, 2012)
Tração na flexão	7	7	8	7	7	6	6	-	3	3	3	NBR 12142 (ABNT, 2010a)
Compressão Uniaxial	6	6	6	7	7	6	6	-	9	9	9	NBR 5739 (ABNT, 2007)
Taxa de Infiltração	7**(**)	6*	6*	7*	7*	6*	6*	1(**)	9*	9*	9*	ASTM C1701 (ASTM, 2009) ISO 7785-1 (ISO, 2016)
Porosidade	6*	6*	6*	7*	7*	6*	6*		9*	9*	9*	ASTM C1754 (ASTM, 2012)

*Ensaio sobre os mesmos CPs

** CP extra considerando a execução de ensaios na placa de CPCP de 1,0 m x 1,0 m x 0,1 m

3.1.5.1 Ensaios de massa específica no estado fresco, abatimento de cone e avaliação do tempo de trabalho do CPCP

Uma vez que a massa específica está diretamente relacionada à porosidade do material, que por sua vez é um dos principais parâmetros de caracterização de concretos permeáveis, normalmente controla-se a produção de misturas por meio da medida de massa unitária no estado fresco (BEAN *et al.*, 2015). Este controle foi realizado para todas as misturas anteriormente à moldagem dos CPs.

A massa específica aparente no estado fresco foi determinada de acordo com a ASTM C1688 (ASTM, 2014) empregando-se a Equação 3.1.

$$\gamma_f = \frac{M_c - M_m}{V_m} \quad (3.1)$$

onde:

- γ_f : massa específica aparente no estado fresco (kg/m^3);
- M_c : massa da amostra mais massa do molde (kg);
- M_m : massa do molde (kg);
- V_m : volume do molde (m^3).

A ASTM C1688 preconiza que o ensaio seja realizado em um cilindro com volume interno de 7 litros. A compactação do CPCP no estado fresco deve ser realizada em duas camadas com espessuras iguais, com aplicação de 20 golpes do soquete Proctor normal por camada.

Uma vez que para esta pesquisa não havia disponibilidade de um cilindro com dimensões suficientes para atendimento do volume preconizado, o ensaio foi realizado empregando-se um cilindro de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura, com volume de 75% daquele preconizado pela norma. Em função dessa diferença volumétrica, optou-se por reduzir a quantidade de golpes para 15 por camada, equivalente também a 75% do número de golpes originalmente sugerido pela ASTM C1688. Na Figura 3.11 está apresentado o procedimento de obtenção da massa específica aparente no estado fresco.

Figura 3.11: Procedimento para obtenção da massa específica aparente no estado fresco

Fonte: acervo pessoal

Além dessa metodologia de controle, foi realizada também a determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998). Esta metodologia foi usada somente na mistura “Ra”, pois os resultados mostraram que, para esta mistura, que deveria apresentar o maior abatimento dentre as demais por possuir a maior quantidade de superplastificante, não houve abatimento. Dessa maneira, essa metodologia de controle foi descartada para as demais misturas. Na Figura 3.12 e na Figura 3.13 está apresentada a metodologia empregada para avaliação do abatimento do concreto.

Figura 3.12: Moldagem do CP para ensaio de abatimento do concreto

Fonte: acervo pessoal

Figura 3.13: Cone formado no ensaio de abatimento da mistura Ra

Fonte: acervo pessoal

Para as misturas Ri a RI, além do controle das misturas pela massa específica aparente no estado fresco, foi realizada também uma verificação qualitativa visual do tempo de trabalho em termos de variação da viscosidade das misturas, no intuito de validar os teores de retardador de pega propostos. Este ensaio consistiu em manter o CPCP no estado fresco em betoneira pelo período de 2 horas após o início do processo de mistura já descrito anteriormente, observando-se possíveis variações bruscas na trabalhabilidade do material.

3.1.5.2 Massa específica aparente e porosidade no estado endurecido

Para determinação da massa específica aparente e da porosidade no estado endurecido foi empregada a ASTM C1754 (ASTM, 2012), utilizando-se as Equações 3.2 e 3.3, respectivamente, apresentadas a seguir.

$$\gamma_e = \frac{M_s}{\emptyset^2 * h} \quad (3.2)$$

onde:

- γ_e : massa específica aparente no estado endurecido (kg/m³);
- M_s : massa seca da amostra (kg);
- $\emptyset$: diâmetro médio do CP (m);
- h : Altura média da amostra (m).

$$P = \left[1 - \left(\frac{M_s - M_u}{\rho_w * \emptyset^2 * h} \right) \right] * 100 \quad (3.3)$$

onde:

- P : porosidade (%);
- M_s : massa seca da amostra (kg);
- M_u : massa submersa da amostra (kg);
- ρ_w : massa específica da água (kg/m³);
- $\emptyset$: diâmetro médio do CP (m);
- h : altura média da amostra (m).

Para pesagem submersa foram utilizados um tanque d'água e uma balança munida com acessório específico para pesagens submersas. Anteriormente à pesagem, os CPs foram mantidos submersos pelo período mínimo de 30 minutos. Na Figura 3.14 está apresentado o procedimento de pesagem submersa dos CPs.

Figura 3.14: Procedimento de pesagem submersa dos CPs

Fonte: acervo pessoal

3.1.5.3 Resistência à compressão uniaxial

Os ensaios de compressão uniaxial foram executados de acordo com NBR 5739 (ABNT, 2007). Para realização dos ensaios foi utilizada uma prensa eletro-hidráulica com capacidade de 100 tf, com precisão de 0,01 tf. Para garantir maior uniformidade na distribuição das tensões, os CPs foram retificados em ambas as faces superior e inferior (Figura 3.15). A tensão de ruptura à compressão foi calculada pela Equação (3.4), apresentada a seguir:

$$f_c = \frac{F_u}{\left(\frac{\pi \cdot \phi^2}{4}\right)} \quad (3.4)$$

onde:

- f_c : resistência à compressão (MPa);
- F_u : carga de ruptura (N);
- ϕ : diâmetro médio do CP (mm).

Figura 3.15: Procedimento de retificação dos CPs

Fonte: acervo pessoal

Na Figura 3.16 são apresentados a montagem da prensa para realização do ensaio de compressão uniaxial.

Figura 3.16: Ensaio de resistência à compressão uniaxial

Fonte: acervo pessoal

3.1.5.4 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão pautou-se pela norma NBR 12142 (ABNT, 2010a) que descreve o ensaio de dois cutelos em CP prismático. Este ensaio se mostra de maior preferência quando comparado com o ensaio de 1 cutelo, em função de que, neste último, já existe uma predefinição da seção de ruptura do CP, localizada exatamente no seu centro.

Já no caso do ensaio de dois cutelos, existe a possibilidade de o CP ser rompido em diferentes posições no espaço entre os cutelos, revelando assim a sua seção efetivamente mais frágil. A resistência à tração na flexão foi então calculada pela equação (3.5) a seguir:

$$f_{ct,f} = \frac{F_u \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (3.5)$$

onde:

- $f_{ct,f}$: resistência à tração na flexão (MPa);
- F_u : carga de ruptura (N);
- l : distância entre os cutelos de suporte igual a 36 cm;
- b : largura média do CP na seção de ruptura (mm);
- h : altura média do CP na seção de ruptura (mm).

Na Figura 3.17 está apresentada a montagem do equipamento e posicionamento da amostra para realização do ensaio de resistência à tração na flexão.

Figura 3.17: Ensaio de resistência à tração na flexão

Fonte: acervo pessoal

3.1.5.5 Taxa de infiltração

A taxa de infiltração foi determinada para a placa de concreto empregando-se a norma ASTM C1701 (ASTM, 2009) para determinação da taxa de infiltração de concretos permeáveis *in situ*.

O procedimento consiste na instalação de um anel de PVC com diâmetro de 30 cm na superfície onde se deseja determinar o parâmetro, com aplicação de massa de calafetar em toda a circunferência interna e externa do anel para se evitar a ocorrência de vazamentos de água, garantindo que a infiltração ocorra exclusivamente pela área pré-determinada pelo diâmetro do anel.

Na sequência realiza-se a pré-molhagem da área com uma massa total de água de 3,6 kg, cronometrando-se o tempo necessário para que a superfície do concreto

permeável fique aparente após a infiltração. A massa de água a ser utilizada no ensaio é dependente do nível de permeabilidade do sistema, sendo que, caso o tempo para infiltração de toda a água de pré-molhagem seja maior ou igual a 30 segundos, o ensaio é realizado com uma massa total de água de 3,6 kg. Caso o tempo seja inferior a 30 segundos, a massa de água a ser empregada para o ensaio é de 18 kg.

O ensaio consiste na determinação do tempo necessário para que a massa total de água infiltre por completo através da superfície do concreto permeável, sendo mantida uma altura de coluna d'água no interior do anel variando entre 1,0 cm e 1,5 cm. O tempo deve ser inicialmente cronometrado desde o momento em que a água toca a superfície do revestimento, sendo somente finalizado quando toda a superfície aparente do concreto esteja completamente livre da película d'água.

Na Figura 3.18 e na Figura 3.19 estão apresentados os procedimentos para realização do ensaio de infiltração em campo.

Figura 3.18: Instalação do anel de PVC sobre a superfície

Fonte: acervo pessoal

Figura 3.19: Execução do ensaio de infiltração em campo

Fonte: acervo pessoal

Para determinação da taxa de infiltração nos CPs cilíndricos em laboratório foi empregado um procedimento modificado para determinação da taxa de infiltração de acordo com a normativa ISO 17785-1 (ISO, 2016). Para este caso, a quantidade de água empregada é de 1 litro, devido ao tamanho reduzido dos CPs em comparação ao ensaio de campo.

Para realização do ensaio os CP foram inicialmente revestidos por uma película plástica, que foi levemente aquecida nas laterais com a finalidade de garantir a passagem de água exclusivamente pela área da seção transversal da amostra e não pela sua lateral. Para permitir uma altura d'água de até 1,5 cm sobre a superfície da amostra tal como no ensaio de campo, a película foi posicionada sobressaindo-se à altura do CP em, no mínimo, 2 cm, conforme pode ser observado na Figura 3.20.

Esse procedimento de garantir que o fluxo da água se dê de maneira vertical é muito empregado por vários pesquisadores em estudos de taxas de infiltração ou sobre coeficientes de permeabilidade para diversos tipos de materiais, uma vez que este método restringe qualquer fluxo de água em direções horizontais.

Figura 3.20: Película plástica sendo aquecida e detalhe da altura de transposição de 2 cm sobre a superfície do CP

Fonte: acervo pessoal

Concretos permeáveis apresentam pequenos canais interconectados que tendem a imitar um sistema de tubulações, o qual, diferentemente dos solos, que normalmente são modelados com microporos interconectados, apresenta um fluxo de água muito mais rápido. Além disso, ao se observar os canais interconectados em placas de CPCP, fica claro que o fluxo de água não se restringe à direção vertical somente, sendo que, para testes de laboratório considerando o fechamento da superfície lateral dos CP, os valores de taxa de infiltração tendem a ser menores que aqueles observados em campo (HASELBACH *et al.*, 2016).

Nesse contexto, foi proposta a retirada da película plástica das laterais dos CPs, de modo a liberar o fluxo horizontal da água nas demais direções da amostra. A película foi mantida somente no topo do CP, para garantir que a infiltração no início do CP ocorresse ao longo de sua área superficial. Essa condição foi chamada de “não confinada”. Na Figura 3.21 está apresentado o CP na condição “não confinada” e o ensaio sendo realizado.

Figura 3.21: Execução do ensaio de taxa de infiltração em CP “não confinado”

Fonte: acervo pessoal

Para determinação da taxa de infiltração tanto no campo quanto no laboratório foi empregada a Equação 3.6, apresentada a seguir:

$$I = \frac{M_w}{\rho_w * \emptyset^2 * t} \quad (3.6)$$

onde:

- I : taxa de infiltração (cm/h);
- M_w : massa da água infiltrada (g);
- ρ_w : massa específica da água (g/cm³);
- $\emptyset$: diâmetro médio do CP (cm);
- t : tempo necessário para que a quantidade de água utilizada no ensaio infiltre no concreto (h).

3.2 Apresentação e discussão dos resultados da etapa de laboratório

3.2.1 Avaliação das metodologias de compactação dos CPs cilíndricos em laboratório considerando os resultados das misturas Ra a Rc

Para avaliação das diferenças entre ambas as metodologias de moldagem – MC e MCU – dos CP cilíndricos, foram moldados três CPs para cada metodologia em cada uma das misturas Ra, Rb e Rc, que se diferenciam entre si em função do teor de aditivo superplastificante, conforme descrito na metodologia da etapa de laboratório. Na Tabela 3.6 estão apresentados os resultados dos ensaios realizados para cada mistura e na Tabela 3.7 estão apresentados os resultados médios.

Tabela 3.6: Resultados dos ensaios para cada CP das misturas Ra, Rb e Rc

Mistura – Método de Compactação	CP	Massa Específica Aparente no Estado Fresco (kg/m³)	Massa Específica Aparente no Estado Endurecido (kg/m³)	Porosidade em Laboratório (%)	Taxa de Infiltração - Condição Confinada (cm/h)	Taxa de Infiltração - Condição Não Confinada (cm/h)	Resistência à Compressão aos 28 Dias (MPa)
Ra – MCU*	1	1783	1769	-	-	-	8,75
	2	1821	1813	-	-	-	12,21
	3	1846	1838	-	-	-	14,83
Ra – MC**	4	1897	1895	-	-	-	16,67
	5	1935	1908	-	-	-	17,65
	6	1961	1908	-	-	-	13,23
Rb – MCU*	1	1795	1790	29,86	4.450	4.825	5,00
	2	1770	1765	30,66	4.450	5.556	5,56
	3	1783	1760	30,40	4.607	5.093	5,97
Rb – MC **	4	1744	1728	32,41	7.393	8.568	4,30
	5	1719	1707	30,54	6.893	9.260	6,10
	6	1795	1775	30,29	7.106	9.964	6,76
Rc – MCU*	1	1859	1855	26,09	2.505	2.929	8,28
	2	1808	1872	25,58	2.471	2.720	5,21
	3	1872	1861	25,64	2.252	2.627	11,85
Rc – MC **	4	1833	1828	28,06	5.624	6.741	11,26
	5	1846	1842	27,23	5.330	7.393	10,77
	6	1770	1832	27,43	5.556	7.704	9,85

* Compactação superficial em camada única (MCU)

** Compactação convencional em três camadas (MC)

Tabela 3.7: Médias dos resultados das misturas Ra, Rb e Rc

Mistura - Método de Compactação	Massa Específica Aparente no Estado Fresco (kg/m³)	Massa Específica Aparente no Estado Endurecido (kg/m³)	Porosidade Laboratório (%)	Taxa de Infiltração - Condição Confinada (cm/h)	Taxa de Infiltração - Condição Não Confinada (cm/h)	Resistência à Compressão aos 28 Dias (MPa)
Ra – MCU	1.816	1.807	-	-	-	11,93
Ra – MC	1.931	1.904	-	-	-	15,85
Rb – MCU	1.783	1.772	30,31	4.502	5.158	5,51
Rb – MC	1.753	1.737	31,08	7.131	9.264	5,72
Rc – MCU	1.846	1.863	25,77	2.409	2.759	8,44
Rc – MC	1.816	1.834	27,57	5.503	7.279	10,63

Previamente à determinação das médias, foi realizado um tratamento dos dados obtidos em laboratório considerando a remoção dos valores de maior discrepância (*outliers*), de acordo com o procedimento descrito na ASTM E178 (ASTM, 2002). Os resultados das análises de detecção de *outliers* bem como indicação dos dados descartados para cada parâmetro analisado estão apresentados no Apêndice A. Não foi determinado coeficiente de variação para estes resultados, visto que só foram testados três CPs para cada mistura.

Os CPs moldados com a mistura Ra foram testados somente para parâmetros de massa específica e resistência mecânica pois houve segregação nessa mistura, caracterizada por um movimento descendente da pasta durante e/ou após a compactação dos CPs, provocando um fechamento de praticamente 100% da área da sua superfície inferior, conforme apresentado na Figura 3.22. Tal fenômeno ocorreu devido à baixa consistência resultante da pasta relacionada à combinação do teor de superplastificante (0,70% em relação à massa de cimento) e à relação a/c de 0,3.

Os CPs moldados pela MCU das misturas Rb e Rc sofreram redução dos valores médios de porosidade e taxa de infiltração quando comparados àqueles moldados pela MC. É possível notar também que esses resultados são consistentes com os valores médios das massas específicas aparentes nos estados fresco e endurecido, que aumentaram para o MCU.

Figura 3.22: Aspecto da superfície inferior dos CPs da mistura Ra

Fonte: acervo pessoal

Assumindo-se que a resistência mecânica do concreto deveria aumentar com a redução da porosidade, correlação inversa ocorreu para os resultados de resistência à compressão, uma vez que a média dos resultados para as misturas Rb e Rc foi menor considerando a metodologia de compactação superficial. Essa ocorrência poderia ser explicada em função dos diferentes tipos de ruptura observados nos CPs após os ensaios – ruptura de canto e ruptura axial –, conforme apresentado na Figura 3.23.

Na grande maioria dos CP cilíndricos a ruptura aconteceu no canto. Foi também observado que as resistências à compressão foram menores nos CPs com ruptura no canto em comparação àqueles com ruptura axial, indicando que é mais comum este tipo de ruptura em CPs com baixa resistência.

Na mistura Rb, onde os resultados de resistência à compressão tiveram valores inferiores a 7 MPa, todos os CPs apresentaram ruptura no canto. Foi observado também que para resistências maiores que 13 MPa, não se verificou ruptura no canto dos CPs.

Figura 3.23: Esquerda - Detalhe da ruptura de canto; Direita: Detalhe da ruptura axial

— indicação das fissuras axiais e ruptura de canto
 Fonte: acervo pessoal

Nos casos em que a ruptura ocorreu no canto do CP, a capacidade de carga do material pode não ter sido completamente mobilizada, podendo ter resultado na redução dos resultados de resistência à compressão. Considerando que a estrutura aberta de concretos permeáveis pode gerar maior probabilidade de ocorrência de rupturas em pontos críticos, como seria o caso da ruptura de canto, e também que CPs cilíndricos não representam a mesma distribuição de tensões que uma placa executada em campo, os cilindros com dimensões de 10 cm x 20 cm podem não ser a melhor opção para caracterização da resistência à compressão de concretos permeáveis em laboratório.

Com relação aos ensaios de infiltração, assim como observado para o caso das porosidades, os valores foram menores para a MCU. Esse resultado era esperado, visto que a porosidade é diretamente proporcional à taxa de infiltração em concretos permeáveis (BATEZINI, 2012; GOEDE, 2009; HOLTZ, 2011; BENTZ, 2008; HASELBACH; VALAVALA; MONTES, 2006; HENDERSON; TIGHE, 2011; MARTIN; KAYE; PUTMAN, 2014; MCCAIN; DEWOOLKAR, 2009; NEITHALATH; SUMANASOORIYA; DEO, 2010).

Observa-se também que os resultados dos ensaios de infiltração das misturas Rb e Rc indicam que a condição não confinada resulta em maiores valores de taxas de infiltração quando comparada à condição confinada. Esse resultado já era esperado, uma vez que não há restrição de fluxo na direção horizontal, o que deve representar melhor o comportamento hidráulico do material em campo (HASELBACH *et al.*, 2016).

Uma vez que a porosidade é um dos parâmetros mais importantes considerados no controle de concretos permeáveis, pois se correlaciona com todos os demais parâmetros desse material, e que os resultados de porosidade foram menores considerando o procedimento de compactação superficial dos CPs, que inclusive simula melhor o procedimento de compactação empregado em campo em camada única com compactação superficial, este foi o método empregado para o restante das moldagens realizadas nesta pesquisa.

3.2.2 Análise dos resultados dos ensaios não destrutivos

Na Tabela 3.8 são apresentados os resultados dos ensaios realizados para os CPs moldados com as misturas Rd a RI, com exceção das misturas Ra, Rb e Rc, que estão apresentadas na Tabela 3.6, e Rh, que está apresentada em item específico mais a diante. As misturas Rd e Re, moldadas respectivamente com teor de 0,45% e 0,55% de superplastificante, foram descartadas, pois ocorreu o mesmo problema da mistura Ra, com segregação da pasta de cimento e fechamento do fundo dos CPs (Figura 3.24).

Na Figura 3.25 estão apresentados os resultados da porosidade em função da massa específica aparente no estado fresco de todos os CPs ensaiados, referentes às misturas Rb, Rc, Ri, Rj e RI.

Cabe ressaltar que todos os resultados de análises estatísticas ou modelos desenvolvidos a partir do item 3.2.2 consideram somente os resultados dos ensaios para os CPs moldados conforme a metodologia de compactação em camada única, no caso das misturas Rb e Rc.

Tabela 3.8: Resultados dos ensaios não destrutivos para as misturas Rf, Rg, Ri, Rj e Ri

Mistura	CP	Massa Específica Aparente no Estado Fresco (kg/m³)	Massa Específica Aparente no Estado Endurecido (kg/m³)	Porosidade (%)	Taxa de Infiltração - Condição Confinada (cm/h)	Taxa de Infiltração - Condição Não Confinada (cm/h)
Rf*	1	1.770	1.756	30,91	4.604	4.947
	2	1.770	1.735	31,97	5.393	5.020
	3	1.744	1.717	32,86	6.322	7.316
	4	1.757	1.699	33,79	6.872	6.456
	5	1.706	1.690	34,24	9.279	9.451
	6	1.770	1.745	31,46	5.171	5.880
Rg*	1	1.795	1.782	29,56	5.424	5.597
	2	1.821	1.802	28,57	4.696	7.334
	3	1.821	1.803	28,52	5.031	5.621
	4	1.859	1.845	26,38	3.965	3.953
	5	1.846	1.845	26,36	4.217	4.474
	6	1.846	1.838	26,72	3.262	3.264
Ri	1	1.770	1.757	-	-	-
	2	1.795	1.791	29,11	6.015	6.520
	3	1.846	1.843	26,73	6.406	6.914
	4	1.833	1.838	26,90	6.194	6.726
	5	1.821	1.819	27,76	5.194	6.120
	6	1.859	1.845	26,77	6.619	6.483
	7	1.846	1.826	27,55	6.067	7.453
	8	1.833	1.821	27,73	7.937	8.207
	9	1.846	1.833	27,32	6.791	8.798
	10	1.833	1.820	27,88	7.025	8.747
Rj	1	1.872	1.859	-	-	-
	2	1.897	1.883	24,20	5.305	6.128
	3	1.872	1.860	25,28	6.470	7.156
	4	1.833	1.829	26,89	7.101	8.480
	5	1.757	1.757	29,88	7.441	8.178
	6	1.846	1.843	26,15	7.769	8.632
	7	1.783	1.766	29,55	6.786	8.091
	8	1.910	1.904	23,64	6.003	6.465
	9	1.859	1.855	25,88	6.429	6.877
	10	1.833	1.819	27,27	6.731	7.334
Ri	1	1.897	1.884	-	-	-
	2	1.884	1.874	24,52	5.964	6.529
	3	1.872	1.868	24,73	5.001	6.292
	4	1.897	1.885	23,97	5.476	5.984
	5	1.897	1.890	23,83	4.856	5.992
	6	1.884	1.890	23,81	4.572	6.055
	7	1.884	1.901	22,71	4.561	5.415
	8	1.897	1.892	23,69	4.173	4.963
	9	1.872	1.873	25,00	5.610	6.258
	10	1.884	1.882	24,31	5.012	5.687

* As porosidades das misturas Rf e Rg foram estimadas por meio da Equação 3.8, apresentada a seguir

Figura 3.24: Segregação da pasta nas misturas Rd e Re

Fonte: acervo pessoal

Figura 3.25: Correlação entre os resultados de massa específica aparente no estado fresco e a porosidade das misturas Rb, Rc, Ri, Rj e RI

Com base nos resultados e na correlação linear apresentados na Figura 3.25, foi proposto um modelo (Equação 3.7) que pode ser empregado para estimativa da porosidade de CPs moldados em laboratório com base nos resultados da massa específica aparente no estado fresco, considerando os mesmos critérios de moldagem, dosagens e materiais aplicados na presente pesquisa.

$$P_e = 119,02 - 0,0501 * \gamma_f \quad (3.7)$$

onde:

- P_e : porosidade estimada (%);
- γ_f : massa específica aparente no estado fresco (kg/m^3).

Na Figura 3.26 estão apresentados os resultados de porosidade em função da massa específica aparente no estado endurecido de todos os CPs ensaiados referentes às misturas Rb, Rc, Ri, Rj e RI.

Figura 3.26: Correlação entre os resultados de massa específica aparente no estado endurecido e a porosidade das misturas Rb, Rc, Ri, Rj e RI

A equação 3.8 pode ser empregada para estimativa da porosidade de CPs moldados em laboratório considerando os mesmos métodos de moldagem, dosagens e materiais aplicados na presente pesquisa.

$$P_e = 120,1 - 0,0508 * \gamma_e \quad (3.8)$$

onde:

- P_e : porosidade estimada (%);
- γ_e : massa específica aparente no estado endurecido (kg/m^3).

Observa-se que as massas específicas aparentes nos estados fresco e endurecido possuem boa correlação com os valores de porosidade dos CPs analisados. Como na equação 3.8 o valor de R^2 foi mais elevado, igual a 0,97, optou-se por determinar as porosidades das misturas Rf e Rg por meio do uso da Equação 3.8. Esse procedimento foi necessário pois os ensaios de porosidade não foram realizados para essas duas misturas por dificuldades de planejamento, sendo que os CPs tiveram que ser rompidos no prazo de 28 dias.

Em conceitos práticos, esses tipos de correlações propostas possuem importantes condicionantes para fins de produção e controle de misturas de CPCP em obra. Nesse contexto, observa-se que o parâmetro de massa específica aparente no estado fresco, que é de fácil obtenção em campo, possui boa correlação com a porosidade do material no estado endurecido, que por sua vez comanda praticamente todas as propriedades mecânicas e hidráulicas de concretos permeáveis produzidos com insumos convencionais (KEVERN; SCHAEFER; WANG, 2011; TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

Considerando-se que o CPCP normalmente possui porosidade variando de 20% a 30% para ser utilizado como revestimento em calçadas, os valores correspondentes em termos de massa específica aparente no estado fresco do CPCP, produzido nessa pesquisa, considerando a extrapolação da curva, deverão se encaixar numa faixa de variação entre 1.990 kg/m³ e 1.770 kg/m³, desde que produzidos de maneira semelhante às condições aqui apresentadas.

Na Tabela 3.9 estão apresentados os valores médios e os coeficientes de variação desconsiderando os *outliers*, referente aos parâmetros determinados em laboratório, cujo resultados foram apresentados na íntegra na Tabela 3.6 e na Tabela 3.8. Ressalta-se que para as misturas Ra a Rc não foram determinados coeficientes de variação dada a limitação no número de CPs. Importante ressaltar novamente que os valores médios aqui apresentados para essas três misturas se referem somente aos CPs moldados considerando a MCU.

Tabela 3.9: Análise estatística dos resultados das características físicas para todas as misturas com exceção da mistura Rh

Misturas	Massa Específica Aparente no Estado Fresco (kg/m ³)		Massa Específica Aparente no Estado Endurecido (kg/m ³)		Porosidade (%)***		Taxa de Infiltração - Condição Confinada (cm/h)		Taxa de Infiltração - Condição Não Confinada (cm/h)	
	μ^*	CV**	μ^*	CV**	μ^*	CV**	μ^*	CV**	μ^*	CV**
Ra	1.816		1.807		-	-	-	-	-	-
Rb	1.783		1.772		30,31		4.502		5.158	
Rc	1.846		1.863		25,77		2.409		2.759	
Rf***	1.762	0,65%	1.724	1,51%	32,53	4,05%	6.273	26,83%	6.512	26,02%
Rg***	1.831	1,28%	1.819	1,48%	27,69	4,95%	4.433	17,61%	5.040	28,84%
Ri	1.828	1,48%	1.826	0,90%	27,33	1,72%	6.472	11,80%	7.330	13,92%
Rj	1.846	2,58%	1.838	2,55%	26,53	8,10%	6.670	11,13%	7.482	12,08%
Rl	1.887	0,53%	1.884	0,53%	24,06	2,83%	5.025	11,36%	5.908	8,19%

* Média aritmética

** Coeficiente de variação

*** As porosidades médias das misturas Rf e Rg foram calculadas por meio das estimativas das porosidades individuais de cada CP, utilizando-se a Equação 3.8

Pode ser observado que os resultados de massa unitária nos estados fresco e endurecido apresentaram valores médios variando de 1.724 kg/m³ a 1.887 kg/m³, com coeficientes de variação muito baixos, o que representa boa correlação entre os resultados dos ensaios. As porosidades variaram de 24,06%, para a mistura RI a 32,32%, para a mistura Rf. Para todos esses parâmetros de interesse, as misturas produzidas se enquadram dentro das faixas de valores esperados conforme critérios de dosagem e tipos de materiais empregados, em comparação aos valores apresentados no Capítulo 2.

Na Figura 3.27 está apresentada a variação dos valores médios das massas específicas aparentes nos estados fresco e endurecido e da porosidade, em relação ao teor de superplastificante empregado nas misturas Ra (0,70%), Rb (0,00%) e Rc (0,35%), que foram produzidas com cimento CIII e graduação especial com diâmetro único. A porosidade da mistura Ra, que não foi medida em laboratório em função da segregação ocorrida, foi estimada através da Equação 3.8 e está destacada em vermelho.

Figura 3.27: Variação dos parâmetros físicos em função do teor de superplastificante (Linha destacada em vermelho indica porosidade estimada por meio da Equação 3.8, visto que não foi medida em laboratório)

Observa-se aumento das massas específicas dos CPs e redução da porosidade com a adição de 0,35% de superplastificante (Rc) em relação à mistura sem o aditivo (Rb). Ao se analisar também os valores médios de taxa de infiltração constantes na Tabela 3.9, é possível observar a mesma tendência da porosidade para as misturas Rb e Rc, conforme esperado.

Em contrapartida, há uma redução dos valores de massa específica aparente e aumento da porosidade estimada na mistura com 0,70% de superplastificante. Assumindo-se que a dosagem deve garantir uma menor porosidade dentro da faixa prevista para determinado uso do CPCP, essa ocorrência representa um primeiro indício físico de que o limite do teor do aditivo a ser empregado para a mistura ótima seja maior ou igual a 0,35% e menor que 0,70%, considerando-se o CPCP produzido com CP III, agregado na graduação especial, e demais insumos e técnicas de moldagens aplicadas nessas misturas.

Os aditivos superplastificantes agem na redução da viscosidade da pasta de cimento, melhorando a sua trabalhabilidade, o que tende a promover um melhor preenchimento nos vazios dos CP no momento da compactação, reduzindo-se sua porosidade com o consequente aumento da massa específica aparente em ambos os estados fresco

e endurecido. Entretanto, os resultados demonstram que há uma limitação para o teor do aditivo, indicando que o valor de 0,70% em relação à massa de cimento já está acima de um valor máximo admissível considerando a composição das misturas analisadas, o que já era de conhecimento qualitativo prévio em razão da constatação visual da segregação ocorrida nos CPs em laboratório com a mistura Ra. Nesse contexto, é razoável alegar que a segregação seja a responsável pelo aumento da porosidade e pela respectiva redução das massas específicas dos CP produzidos com a mistura Ra.

Na Figura 3.28 está apresentada a comparação entre os resultados de taxa de infiltração dos CPs ensaiados nas condições “confinada” e “não confinada”

Figura 3.28: Comparação entre os resultados de taxa de infiltração em laboratório

Os resultados médios de taxa de infiltração variaram entre 2.409 cm/h e 7.482 cm/h nas condições confinada e não confinada, respectivamente, que representam elevada capacidade permeável do CPCP produzido com todas as misturas, inclusive muito acima do valor de 360 cm/h preconizado pela NBR 16416 (ABNT, 2015a) para pavimentos permeáveis em concreto recém executados.

Em 100% das médias calculadas, as taxas de infiltração resultaram mais elevadas no ensaio sem confinamento lateral, quando em comparação com os resultados considerando confinamento lateral.

Para comparação entre as médias de taxa de infiltração de todas as misturas estudadas, foi realizado um teste de hipóteses seguindo a distribuição t de *student*, tomando-se como hipótese nula que as médias das taxas de infiltração nas condições confinada e não confinada são estatisticamente iguais. Anteriormente à aplicação do teste “t”, as variâncias das amostras foram testadas para verificação de sua equivalência ou não por meio do teste estatístico de Fisher (teste “f”).

Na Tabela 3.10 estão apresentados os resultados do teste “t” e os resultados indicam que, para um nível de significância de 5%, as médias dos resultados de taxa de infiltração são, de fato, estatisticamente diferentes.

Tabela 3.10: Resultados do teste de hipótese para comparação da taxa de infiltração dos CP confinados e não confinados

Parâmetros Teste “t”	CP Confinado	CP Não Confinado
Média	5.522	6.212
Variância	2.133.070	2.647.038
Observações	45	45
Stat t	2,12	
t crítico	1,66	
Valor p	0,0185043	
Nível de Significância	0,0500000	
Resultado	Rejeita H0	

Na Figura 3.29 está apresentada a variação da razão entre as infiltrações com e sem confinamento, em relação ao tempo de infiltração na condição confinada.

Com base nos dados, foi possível gerar o modelo apresentado na Equação 3.9, que proporciona a estimativa da taxa de infiltração na condição não confinada em função da taxa de infiltração na condição confinada.

$$I_{N,e} = 1,13 * I_C \quad (3.9)$$

onde:

- $I_{N,e}$: taxa de infiltração não confinada estimada (cm/h)
- I_C : taxa de infiltração confinada (cm/h)

Figura 3.29: Relação entre a taxa de infiltração não confinada e confinada em função do tempo de infiltração dos ensaios confinados

Modelo similar foi obtido por Haselbach *et al.* (2016) para uma maior faixa de tempos de infiltração, que avalia, além das porosidades semelhantes às aquelas apresentadas na presente pesquisa, concretos permeáveis com porosidades próximas a 15%, sendo que o fator de correlação obtido pelos autores foi de 1,20, ou seja, pouco maior que o apresentado na Equação 3.9, de 1,13.

Com relação ao tempo de trabalho das misturas Ri a Rl, não foram observadas alterações visuais na viscosidade das misturas ao longo do tempo de duas horas, a contar do primeiro contato entre o cimento CPV e a água.

3.2.3 Análise dos resultados dos ensaios destrutivos

Na Tabela 3.11 são apresentados os resultados de resistência à compressão e à tração na flexão para todas as misturas, com exceção de Rd e Re, que foram descartadas, e Rh, que foi empregada somente para determinação da taxa de infiltração em campo na placa de concreto. Os resultados de resistência à compressão das misturas Ra, Rb e Rc referentes ao MCU foram reproduzidos novamente para facilitar a comparação entre todos os resultados.

Tabela 3.11: Resultados dos ensaios de resistência para as misturas Ra, Rb, Rc, Rf, Rg, Ri, Rj e Ri

Parâmetro	CP	Misturas							
		Ra	Rb	Rc	Rf	Rg	Ri	Rj	Ri
Compressão (MPa)	CP1	8,7	5,0	8,3	6,4	6,1	4,1*	9,04*	6,88*
	CP2	12,2	5,6	5,2	6,2	7,0	9,0**	14,77**	12,86**
	CP3	14,8	6,0	11,8	4,9	8,7	11,7**	13,37**	13,75**
	CP4	-	-	-	5,7	9,7	10,4**	10,82**	13,87**
	CP5	-	-	-	4,5	9,3	8,66	7,13	11,20
	CP6	-	-	-	6,3	10,0	7,13	10,44	12,73
	CP7	-	-	-	-	-	8,28	6,88	11,33
	CP8	-	-	-	-	-	7,64	10,44	11,08
	CP9	-	-	-	-	-	8,79	10,19	9,68
	CP10	-	-	-	-	-	7,13	7,26	10,82
Tração na Flexão (MPa)	CP1	1,34	1,37	1,67	1,98	1,46	3,60***	2,16	1,44
	CP2	2,75	0,94	2,16	1,59	1,32	3,60***	1,80	2,88
	CP3	2,48	1,86	1,42	1,40	1,43	1,44	1,80	1,80
	CP4	2,25	1,39	1,59	1,24	1,70	-	-	-
	CP5	2,63	1,30	1,16	1,29	1,29	-	-	-
	CP6	2,85	1,80	1,82	1,05	1,74	-	-	-
	CP7	2,79	1,20	1,48	-	-	-	-	-
	CP8	-	-	2,52	-	-	-	-	-

* Ensaios realizados em 24 horas

** Ensaios realizados em 7 dias

*** Para os resultados de resistência à tração na flexão da mistura Ri, os valores obtidos referentes aos CP 1 e 2 foram desconsiderados para cálculo da média ou análises posteriores, visto que não se encaixam em resultados esperados para a condição média de porosidade dessa mistura, que é na ordem de 27%, indicando, em função de os ensaios terem sido realizados em sequência, possível falha na coleta de ambos os dados.

Na Tabela 3.12 são apresentados os resultados médios obtidos para cada mistura bem como os coeficientes de variação observados para cada tipo de ensaio de resistência, considerando a análise de detecção e retirada de *outliers* apresentada no Apêndice A.

Na Figura 3.30 está apresentada a variação das resistências médias aos 28 dias, em relação ao teor de superplastificante empregado nas misturas Ra (0,70%), Rb (0,00%) e Rc (0,35%), que foram produzidas com cimento CIII e graduação especial com diâmetro único.

Tabela 3.12: Análise estatística dos resultados de resistência

Misturas	Resistência à Compressão 24 hs (MPa)		Resistência à Compressão aos 7 dias (MPa)		Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)		Resistência à Tração na Flexão (MPa)	
			μ	CV	μ	CV	μ	CV
Ra	-	-	-	-	11,93		2,44	21,70%
Rb	-	-	-	-	5,51		1,41	22,96%
Rc	-	-	-	-	8,45		1,61	19,61%
Rf	-	-	-	-	5,67	13,94%	1,43	22,85%
Rg	-	-	-	-	8,46	18,59%	1,49	12,70%
Ri	4,07*	-	10,40	12,85%	7,94	9,34%	1,44*	-
Rj	9,04*	-	12,99	15,42%	8,72	20,60%	1,92	10,83%
RI	6,88*	-	13,49	4,09%	11,14	8,82%	2,04	36,74%

* Resultado de CP único (Ver Apêndice A para resistência a tração na flexão da mistura Rj)

Figura 3.30: Variação dos parâmetros de resistência aos 28 dias em função do teor de superplastificante

Corroborando as tendências já discutidas na Figura 3.27, as resistências médias são maiores em função do aumento do teor de superplastificante de 0,00% para 0,35%, que é uma consequência da redução da porosidade atribuída à melhoria da trabalhabilidade das misturas de CPCP.

Exceção é observada para a mistura com teor de aditivo de 0,70%, na qual a tendência segue em alta, se contrapondo ao observado nas massas específicas e porosidade estimada na Figura 3.27. Essa ocorrência pode estar associada a uma espécie de

reforço estrutural causado pela presença da pasta segregada no fundo dos CPs, possivelmente densificando esta região e auxiliando em um ganho de resistência fictício. Esta consideração é mais óbvia no caso da resistência à tração na flexão, em que as tensões são mobilizadas principalmente na fibra inferior do CP.

Na Figura 3.31 está apresentada a correlação entre os resultados médios de resistência à compressão e, na Figura 3.32 os resultados de resistência a tração na flexão, ambos aos 28 dias e em função da variação das porosidades médias para as misturas Rb, Rc, Rf, Rg, Ri, Rj e Ri.

Figura 3.31: Resistência à compressão média aos 28 dias em função da variação da porosidade média para cada mistura

Figura 3.32: Resistência à tração na flexão média aos 28 dias em função da variação da porosidade média para cada mistura

Ambas as resistências se correlacionam razoavelmente com as porosidades médias, sendo o R^2 mais expressivo para a resistência à compressão, que resultou em 0,87. Com base nas correlações, são apresentados nas Equações 3.10 e 3.11 dois modelos que podem ser empregados, única e exclusivamente, para estimativa das resistências à compressão e à tração na flexão médias, respectivamente, em função dos valores de porosidade média dos CPs de CPCP moldados em laboratório considerando os mesmos métodos de moldagem, dosagem e materiais aplicados na presente pesquisa.

$$f_{c,e} = 25,59 - 0,63.P \quad (3.10)$$

$$f_{ct,f,e} = 3,50 - 0,07.P \quad (3.11)$$

onde:

- $f_{c,e}$: resistência à compressão estimada (MPa);
- $f_{ct,f,e}$: resistência à tração na flexão estimada (MPa);
- P : porosidade (%).

3.2.4 Análise dos resultados de taxa de infiltração na placa de concreto

Na Tabela 3.13 estão apresentados os resultados dos ensaios de infiltração *in situ* realizados na placa de concreto, bem como os valores médios observados. Além disso, estão apresentadas as porosidades estimadas a partir da Equação (3.12) apresentada a seguir, desenvolvida por Haselbach *et al.* (2016) para estimativa da porosidade *in situ* em concretos permeáveis recém executados em função das taxas de infiltração medidas em campo.

$$P_{Campo,e} = (0,0020 * I + 20) \quad (3.12)$$

onde:

- $P_{Campo,e}$: porosidade *in situ* estimada (%);
- I : taxa de infiltração *in situ* (cm/h).

Tabela 3.13: Resultados dos ensaios de infiltração e estimativa da porosidade das misturas Ra e Rh executadas na placa de 1,0 m x 1,0 m x 0,1 m

Ensaio	Taxa de Infiltração <i>In Situ</i> (cm/h)		Estimativa da Porosidade <i>In Situ</i> (%) Haselbach <i>et al.</i> (2016)	
	Mistura Ra	Mistura Rh	Mistura Ra	Mistura Rh
1	5.375	2.075	30,75	24,15
2	5.333	2.572	30,67	25,14
3	7.219	2.315	34,44	24,63
Média	5.976	2.321	31,95	24,64

A nova tentativa de se aplicar a mesma mistura Ra em campo se deu em função de avaliar se a eventual evaporação da água da mistura no momento da moldagem em ambiente aberto, simulando execução do CPCP em campo, seria suficiente para evitar a ocorrência da segregação da pasta com teor de 0,70% de superplastificante. A porção da placa executada com a mistura Ra apresentou taxa de infiltração e porosidade estimada mais elevadas que aquelas observadas e estimadas na porção executada com a mistura Rh.

Essa ocorrência se deve ao elevado teor de superplastificante utilizado na mistura Ra, de 0,70% em relação ao teor de cimento, que, quando combinado com a relação a/c de 0,3, gerou novamente a ocorrência de segregação da pasta de cimento, assim como já havia sido observado para os CPs moldados com a mesma mistura em laboratório. Os valores médios das massas específicas aparentes nos estados fresco e endurecido, além da porosidade estimada para a mistura Ra apresentados na Figura 3.27, corroboram os resultados aqui apresentados, considerando que a mistura Rh foi executada contendo 0,47% de aditivo superplastificante.

Apesar de o fundo da placa estar praticamente todo fechado no lado da mistura Ra, a maior taxa de infiltração nesse caso é atribuída, além da maior porosidade da mistura, à espessura da placa, que foi suficiente para absorver o volume de água usado no ensaio, e pela direção de fluxo horizontal livre, com possibilidade de saída da água pelas laterais da placa e não necessariamente pelo fundo.

Outro ponto importante, agora em termos da reprodução das misturas moldadas em laboratório frente àquelas efetivamente executadas em campo, está na diferença entre as porosidades de campo e laboratório estimadas para a mistura Ra. Com base nas

estimativas, é possível indicar que houve um aumento na porosidade média de campo, de 31,95%, em relação à porosidade média estimada da mistura Ra moldada em laboratório, de 27,90%, indicando que a metodologia de compactação com rolo metálico pode não ser bem representada pela metodologia de moldagem dos CPs cilíndricos em laboratório. Relação semelhante (em tendência não em magnitude) já foi observada por Haselbach *et al.* (2016), que comparou porosidades e taxa de infiltração medidas em CPs moldados em laboratório e extraídos de campo para misturas igualmente dosadas.

Importante frisar que essa última colocação, apesar de importante, é meramente especulativa nesse momento, visto que as porosidades médias utilizadas na comparação foram estimadas com base em modelos que empregam variáveis com parâmetros diferentes, apesar de dependentes, sendo que as porosidades não foram efetivamente determinadas, tanto em campo quanto em laboratório, para a mistura Ra. Há ainda que se levar em consideração que a pasta da mistura Ra segregou, o que impacta consideravelmente na sua porosidade, sendo que esse impacto pode possuir diferentes magnitudes em campo e em laboratório, não sendo possível associar qualquer diferença de resultado somente ao emprego do rolo metálico na compactação.

No caso da mistura Rh, com teor de superplastificante de 0,47%, os resultados de taxa de infiltração determinados e porosidade estimados ficaram dentro de uma faixa de valores frequentemente citada na literatura para aplicação de concretos permeáveis como revestimento de calçadas e passeios públicos (BEAN *et al.*, 2015; TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

Apesar disso, ao se comparar os resultados da mistura Rh com as taxas de infiltração medidas em laboratório (Tabela 3.9), observa-se que a mistura Rh possui taxa de infiltração menor que todas as médias de laboratório, se aproximando unicamente da mistura Rc, cuja média das taxas de infiltração dos CPs é menor que 3.000 cm/h.

Assim como na seção contendo a mistura Ra, foram também observados, mesmo que em menor quantidade, pequenos focos de segregação da pasta no fundo da placa na metade executada com a mistura Rh (Figura 3.33), indicando que este teor de superplastificante está ainda acima do teor ótimo para as condições de dosagens aplicadas à mistura Rh. Essa observação pode ser corroborada ao analisar os CPs produzidos com a mistura Rd em laboratório com teor de 0,45% de superplastificante, que foram descartados em função das segregações observadas no fundo dos CP.

Figura 3.33: Detalhe do fundo da placa executada com as misturas Ra e Rh

Fonte: acervo pessoal

Mesmo levando em consideração que os estudos em concretos permeáveis possuem como uma das principais finalidades garantir taxas de infiltração elevadas, este valor deve sempre ser limitado, uma vez que taxas muito elevadas estão associadas a porosidades muito elevadas, prejudicando a resistência mecânica e durabilidade dos revestimentos em CPCP³. Além disso, a ocorrência de segregação da pasta é inaceitável, visto que, devido às pequenas quantidades de pasta característica desse material, qualquer tipo de segregação tende a reduzir consideravelmente a cobertura das partículas do agregado, prejudicando consequentemente a durabilidade do

³ Comunicação pessoal. Prof. Liv Haselbach em 2015 no Campus da USP em São Paulo/SP.

revestimento em termos de abrasão. Na Figura 3.34 está apresentada a comparação visual entre a superfície resultante da placa executada utilizando as misturas Ra e Rh, onde é possível notar menor cobertura de agregados da mistura Ra em comparação à mistura Rh.

Figura 3.34: Detalhe da superfície resultante e cobertura dos agregados sendo a mistura Ra à esquerda e Rh à direita

Fonte: acervo pessoal

Vale comentar também que o teor ótimo de superplastificante parece ser dependente do tipo de cimento aplicado, visto que para as misturas produzidas com CPIII esse teor foi limitado em 0,35%, enquanto para as misturas produzidas com o CPV, não houve segregação nos CPs mesmo para teores de superplastificante de 0,45%. Para o caso das misturas com o CPV, não foi definido valor limite de incorporação do aditivo nessa pesquisa.

3.2.5 Definição das misturas ótimas

Conforme já descrito, as misturas propostas foram estudadas buscando a definição de duas misturas ótimas para produção de CPCP em pequena e larga escala, que foram empregadas como revestimento de duas calçadas executadas no *campus* da USP. Tomando-se por base que todos os resultados de taxa de infiltração das misturas estudadas ficam acima dos valores mínimos esperados para concretos permeáveis recém moldados (BEAN *et al.*, 2015) a definição sobre a escolha das misturas ótimas foi avaliada principalmente em termos das massas específicas aparentes, das

porosidades e das características mecânicas resultantes para cada mistura, além das faixas granulométricas testadas.

O primeiro grupo de misturas (Ra a Rh) foi desenvolvido para produção do concreto em betoneira e aplicação na Calçada 1, com lançamento e compactação realizados rapidamente após a finalização do tempo de mistura. Para este grupo foi empregado CPIII, com duas diferentes graduações de agregados e variação do teor de superplastificante.

Ao se comparar os resultados obtidos considerando as misturas não descartadas por conta da segregação (Rb, Rc, Rf e Rg), as menores porosidades e maiores resistências mecânicas foram observadas para as misturas Rc e Rg, ambas com teor de superplastificante de 0,35%. Em termos de resistência, por mais que a mistura Rc tenha apresentado resistência à tração na flexão levemente superior e consequentemente menor porosidade em comparação à mistura Rg, optou-se por definir a Rg como mistura ótima.

A definição sobre a aceitação técnica da resistência menos expressiva da mistura Rg é justificada em função da graduação do material pétreo empregada, que para a mistura Rg foi do tipo comercial, ou seja, com menor custo atribuído na sua produção, o que, de fato, considerando a aplicação restrita do material como revestimento de calçadas na presente pesquisa, parece ser mais importante do que a própria diferença entre as resistências à tração na flexão e porosidades observadas nas misturas. Em termos de especificação, as duas misturas atendem a resistência à tração na flexão de 1 MPa para tráfego de pedestres e taxa de infiltração mínima de 360 cm/h, ambas preconizadas pela NBR 16416 (ABNT, 2015a).

Para o caso das comparações entre as misturas Ri a RI, elaboradas para produção de concreto em larga escala, a mistura considerada ótima foi a RI com teores de superplastificante e de retardador de pega de 0,45% e 0,40%, respectivamente, uma vez que apresentou resultados de porosidade, massas específicas aparentes e de resistência aos 28 dias mais atraentes do que as demais misturas. A mistura RI apresentou também melhores condições de estabilidade e trabalhabilidade,

constatadas qualitativamente em laboratório após o período de 120 minutos a partir do início do contato entre o cimento e a água.

3.3 Considerações finais sobre a etapa de laboratório

A etapa laboratorial teve como objetivo principal a definição de duas misturas ótimas para produção de concretos permeáveis como revestimento de calçadas experimentais. Para tanto, foram analisados os resultados das propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas de onze misturas de CPCP com variação do procedimento de compactação em laboratório, dos tipos de cimento, da granulometria dos agregados e dos teores de aditivos superplastificante e retardador de pega.

A seguir estão apresentadas as considerações finais dessa etapa:

- Ao analisar os resultados comparando ambas as metodologias de compactação dos CPs cilíndricos em laboratório, foi possível observar que a metodologia de compactação superficial em camada única resulta em CPs de porosidade média reduzida, além de aparentemente representar melhor a compactação de campo executada com rolo metálico. Por esse motivo, essa metodologia de compactação é sugerida para futuras pesquisas em laboratório com misturas de CPCP;
- Foram observados dois tipos de ruptura durante os ensaios de resistência à compressão nos CPs das misturas Ra, Rb e Rc. Os resultados mostram que a ruptura de canto ocorreu nos CPs de menor resistência, enquanto a ruptura axial nos de maior resistência. Com base nos resultados de resistência à compressão frente aos parâmetros de porosidade e massa específica aparente seca dos CPs analisados, é possível supor que, para os casos em que a ruptura ocorreu no canto do CP, a capacidade de carga dos CPs não tenha sido completamente mobilizada, resultando na redução dos resultados de resistência à compressão. Essa ocorrência pode estar relacionada à elevada porosidade do CPCP em estudo, indicando que os cilindros com dimensões de

10 cm x 20 cm podem não ser a melhor opção para caracterização da resistência à compressão de CPCP em laboratório;

- Os resultados das massas específicas aparentes nos estados fresco e endurecido possuem forte correlação com as porosidades determinadas para os CPs avaliados, com valores de R^2 de 0,87 e 0,97, respectivamente, sugerindo que ambos os parâmetros podem ser empregados para estimativa da porosidade de CPs moldados em laboratório;
- Em termos de resistência mecânica, os resultados obtidos demonstram correlações razoáveis entre os parâmetros analisados, indicando que o comportamento mecânico médio do CPCP produzido é diretamente dependente da porosidade média dos CPs, em especial para a resistência a compressão, com valor de R^2 de 0,87. Já para a resistência à tração na flexão, o R^2 resultante foi menor, de 0,56;
- Após analisar os resultados dos ensaios realizados nos CPs moldados empregando-se as misturas Rb e Rc, foi possível observar que o acréscimo no teor de superplastificante de 0,00% para 0,35% gera uma redução da porosidade, aumento das massas específicas aparentes nos estados fresco e endurecido, além da elevação das resistências à compressão e à tração na flexão. Já para a mistura Ra, na qual o teor de superplastificante foi de 0,70%, houve redução das massas específicas aparentes determinadas em laboratório, indicando que o teor de 0,70% está acima do limite tolerável para misturas de CPCP moldadas com cimento C-III e demais condicionantes empregadas na etapa de laboratório dessa pesquisa;
- Para produção do CPCP manualmente em betoneira para a Calçada 1, foi definida a mistura Rg como ótima, produzida com C-III RS, agregado comercial e teor de superplastificante de 0,35% em relação à massa de cimento ou 1.235 mL/m³ em relação ao volume de CPCP produzido;

- Para produção do CPCP em escala industrial com mistura em caminhão betoneira para uso na Calçada 2, foi definido como mistura ótima a RI, com uso do CPV ARI RS, agregado comercial e teor de superplastificante e de retardador de pega de 0,45% e 0,40% em relação à massa de cimento, respectivamente, representando volumes de aditivos de 1.588 mL/m³ e 1.415 mL/m³ em relação ao volume de CPCP produzido;
- Observou-se que para emprego do cimento CPIII RS, o teor máximo de aditivo superplastificante é de 0,35% em relação à massa de cimento, visto que para todas as misturas em que este valor foi aumentado (Ra, Rd, Re e Rh), até um limite de 0,70%, ocorreu segregação da pasta com o consequente fechamento do fundo dos CPs. Diferente comportamento foi observado para o caso do CPV ARI RS, em que o teor de superplastificante foi aumentado para 0,45% sem ocorrência de segregação, o que demonstra que há influência do tipo de cimento em relação ao teor ótimo de superplastificante, assim como em concretos convencionais. Não foram detectados limites para teor de superplastificante com uso do CPV ARI RS dentro das porcentagens testadas;
- Dentre todas as misturas estudadas, foi observado que a mistura RI apresentou os menores valores de porosidade dentre as demais, com média de 24%, resistência à compressão média na ordem de 11 MPa e taxa de infiltração de quase 6.000 cm/h, atendendo a todas as expectativas mecânicas e hidráulicas para ser aplicada como revestimento de calçadas, podendo eventualmente ser empregada para pavimentos de tráfego leve de acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015a), por possuir resistência à tração na flexão média maior que 2 MPa;
- As misturas ótimas definidas apresentaram resultados de porosidade, massas específicas aparentes, taxa de infiltração e resistência mecânica dentro das faixas de parâmetros apresentadas por outros autores citados na presente pesquisa, que empregaram os mesmos tipos de insumos para produção das suas misturas. Esses resultados indicam que os processos utilizados na produção do CPCP em laboratório foram bem-sucedidos, assim como a escolha dos materiais e procedimentos de dosagem.

4 ETAPA DE CAMPO – EXECUÇÃO DAS CALÇADAS E ENSAIOS *IN SITU*.

O presente trabalho de doutorado se desenvolveu como parte de uma pesquisa mais ampla intitulada “ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE CALÇADAS COM CONCRETOS PERMEÁVEIS NA DRENAGEM SUPERFICIAL URBANA E NA MITIGAÇÃO DE EFEITOS DE CHUVAS INTENSAS EM SÃO PAULO”, outorgada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio do Processo No. 457853/2014-0, do Edital Universal 2014, com financiamento concedido ao Prof. Dr. José Tadeu Balbo e realizada no âmbito do Laboratório de Mecânica de Pavimentos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

A etapa de campo da presente pesquisa teve como principal objetivo a implantação de duas calçadas com revestimento em CPCP, além da realização de ensaios para estudo das características hidráulicas e mecânicas das calçadas executadas.

A Calçada 1, com dimensões de 1,00 m x 8,65 m, foi executada em dezembro de 2015 nas proximidades do prédio da Engenharia Civil, no *campus* da USP. A Calçada 2, com dimensões de 1,50 m x 84,80 m, foi executada na Praça do Pôr do Sol, localizada na Avenida Luciano Gualberto, nas proximidades da Faculdade de Odontologia, também no *campus* da USP. Teve sua preparação, antes das concretagens, realizada entre 09/05/2016 e 13/05/2016 (segmentos 1 e 2) e entre 16/05/2016 e 20/05/2016 (segmento 3), sendo que os revestimentos foram executados nos dias 14/05/2016 (segmentos 1 e 2) e 21/05/2016 (segmento 3). Posteriormente, foram realizadas inspeções visuais para análise da qualidade do revestimento executado, ensaios de taxa de infiltração *in situ* para avaliação do comportamento hidráulico ao longo do tempo e levantamentos deflectométricos para avaliação do comportamento mecânico das calçadas.

4.1 Materiais e métodos

A seguir estão descritos os materiais e metodologia aplicados na execução das calçadas experimentais em CPCP.

4.1.1 Calçada 1

A Calçada 1 foi executada na EPUSP, nas proximidades do prédio da Engenharia Civil. O sistema de funcionamento hidráulico empregado foi o de infiltração total, com 100% da água coletada pelo revestimento em CPCP infiltrando no subleito, sem a utilização de um sistema de drenagem específico para coleta e remoção da água.

Embora a ABNT 16416 indique o uso de 6 cm de espessura de revestimento para tráfego de pedestres, optou-se por utilizar a espessura mínima empregada em calçadas de CPCP nos EUA⁴. Dessa maneira, a estrutura executada é composta por uma camada de 10 cm de CPCP, assentada sobre 15 cm de base granular reciclada, que por sua vez está posicionada diretamente sobre o subleito. Não foi instalado nenhum tipo de manta geotêxtil para proteção das camadas do pavimento na Calçada 1. Na Figura 4.1 está apresentado um esquema de implantação indicando as dimensões usadas para execução da calçada.

Figura 4.1: Esquema de implantação da Calçada 1 (medidas em metro – sem escala)

⁴ Comunicação pessoal. Prof. Liv Haselbach em 2015 no Campus da USP em São Paulo/SP.

4.1.1.1 Materiais

Para produção do revestimento em CPCP da Calçada 1 foi empregada a mistura Rg, conforme definido no Capítulo 3, utilizando-se os mesmos materiais e dosagem usados na etapa de estudo laboratorial, conforme reapresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Composição do CPCP empregado como revestimento da Calçada 1

Consumo/Relação/Teor	Proporções
Consumo de cimento CPIII RS	374 kg/m ³
Consumo de agregado comercial (pedrisco)	1.660 kg/m ³
Relação a/c	0,30
Teor de superplastificante	0,35% (1.235 mL/m ³)

Como material de base, foi utilizado agregado reciclado de Resíduo de Construção e de Demolição (RCD), fornecido pela empresa Odebrecht Ambiental. Para produção do agregado reciclado, o RCD passa por um processo de trituração, separação e classificação, podendo atender diversas faixas granulométricas.

Para esta pesquisa, foi utilizada a graduação nomeada pelo fornecedor de “20-40 mm”, que atende à faixa de diâmetros aplicadas para a bases de pavimentos em CPCP nos EUA de 12,5 mm a 75 mm (BEAN *et al.*, 2015).

Na Tabela 4.2 e na Figura 4.2 estão apresentadas a caracterização detalhada do RCD e sua curva granulométrica, respectivamente.

4.1.1.2 Metodologia executiva da Calçada 1

A primeira etapa de construção da Calçada 1 foi caracterizada pela escavação do solo, que atingiu uma profundidade de 0,25 m. Na sequência, o topo do subleito foi regularizado para garantir a uniformidade da espessura escavada, porém sem aplicação de nenhum tipo de compactação em sua superfície.

Tabela 4.2: Resultados da caracterização do RCD 20-40 mm

Ensaio	Resultados	Valor Limite	Norma de Especificação
Módulo de Finura - NBR NM 248 - (ABNT, 2003a)	7,73	-	-
Dimensão Máxima - NBR NM 248 - (ABNT, 2003a)	37,50 mm	-	-
Abrasão "Los Angeles" - NBR NM 51 (ABNT, 2001)	34,70%	≤ 50 mm	NBR 7211 (ABNT, 2009b)
Ensaio Tretton - DNER ME 399 (DNIT, 1999)	7,50%	-	-
Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis - NBR 7218 (ABNT, 2010b)	0,20	Concreto aparente - ≤ 1%	NBR 7211 (ABNT, 2009b)
		Concreto submetido a desgaste superficial - ≤ 2%	
		Outros concretos - ≤ 3%	
Material Pulverulento - NBR NM 45 (ABNT, 2006)	3,90	Concreto aparente - ≤ 1%	NBR 7211 (ABNT, 2009b)
		Concreto submetido a desgaste superficial - ≤ 3%	
		Outros concretos - ≤ 5%	
Massa Específica do Agregado Seco - NBR NM 52 (ABNT, 2009a)	2,63 g/cm ³	-	-
Massa Específica do Agregado Saturado e Superfície Seca - NBR NM 52 (ABNT, 2009a)	2,40 g/cm ³	-	-
Massa Específica Aparente do Agregado - NBR NM 52 (ABNT, 2009a)	2,27 g/cm ³	-	-
Absorção NBR NM 52 (ABNT, 2009a)	6,10%	-	-
Massa Unitária no Estado Seco - NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,29 g/cm ³	-	-
Porosidade - NBR NM 45 (ABNT, 2006)	50,80%	-	-
Índice de Forma pelo Método do Paquímetro - NBR – 7809 (ABNT, 2008)	1,90	≤ 3,0	NBR 7211 (ABNT, 2009b)
Composição - Pasta de Cimento Endurecida - NBR 15116 (ABNT, 2004)	37,12%	-	-
Composição - Rochas - NBR 15116 (ABNT, 2004)	57,82%	-	-
Composição - Cerâmica Branca ou Vermelha - NBR 15116 (ABNT, 2004)	2,32%	-	-
Composição - Orgânicos - NBR 15116 (ABNT, 2004)	2,74%	-	-

Gentileza: Odebrecht Ambiental

Figura 4.2: Curva granulométrica do RCD 20-40 mm

O subleito não foi compactado buscando manter o maior nível de permeabilidade possível do solo, visto que a estrutura implantada se caracteriza pelo sistema de infiltração total. A falta de compactação nesse caso não é considerada um problema em termos de capacidade de suporte, pois a calçada receberá somente cargas do tráfego de pedestres, que são extremamente limitadas em magnitude. Na Figura 4.3 está apresentado o procedimento de escavação para abertura da caixa da calçada.

Figura 4.3: Procedimento de escavação para implantação da estrutura da Calçada 1

Fonte: acervo pessoal

Após abertura da caixa, foi realizado o lançamento da base reciclada de 15 cm de espessura com posterior regularização da sua superfície. O nivelamento da camada foi realizado com nível eletrônico, de modo a garantir uma maior homogeneidade da sua espessura. A base também não foi compactada com a finalidade de manter os maiores níveis de permeabilidade possíveis, visto que a sua estabilidade mecânica não é prioritária para tráfego de pedestres, assim como no caso do subleito. Após finalização da base reciclada, foram instaladas formas metálicas para posterior execução da camada de revestimento. Na Figura 4.4 está apresentado o detalhe da execução da base e das formas.

Figura 4.4: Regularização da base e colocação das formas para implantação da estrutura da Calçada 1

Fonte: acervo pessoal

Na etapa seguinte foi executada a mistura do CPCP, lançamento e compactação da camada de revestimento. Para produção do concreto permeável empregou-se uma betoneira com capacidade de 350 litros. O procedimento de mistura dos insumos seguiu o mesmo descrito no Capítulo 3, e o controle da mistura foi realizado para cada betonada com a determinação da massa específica aparente no estado fresco, de acordo com a ASTM C1688 (ASTM, 2014).

Anteriormente ao lançamento do concreto, a base reciclada foi umedecida, buscando-se a redução da perda de água do concreto fresco para os agregados da base do pavimento, auxiliando na cura do CPCP. Após lançamento, o concreto foi espalhado

manualmente com ajustes de preenchimento utilizando colher de pedreiro no contato com as formas, conforme apresentado na Figura 4.5.

Figura 4.5: Ajuste manual do concreto após lançamento

Fonte: acervo pessoal

Para a compactação e finalização do concreto permeável foi empregado um rolo de metal leve vazado. O rolo de metal foi preenchido com material arenoso atingindo uma massa de 68 kg por metro linear, produzindo uma pressão de 0,07 MPa, conforme sugestão da *Colorado Ready Mixed Concrete Association* (CRMCA) (BUSH *et al.*, 2008).

Após o lançamento e regularização manual da camada, o concreto foi compactado com aproximadamente 10 passadas do rolo. O número de passadas foi variável, dependendo da necessidade de ajuste de ondulações, o que foi controlado visualmente durante a execução.

Logo após a compactação de cada segmento de lançamento, com extensão de aproximadamente 1 m cada, o segmento foi coberto com uma lona plástica, reduzindo ao máximo a ocorrência de evaporação da água da mistura. Na Figura 4.6 é apresentado o procedimento de compactação da camada de revestimento e proteção com a lona plástica.

Figura 4.6: Compactação e proteção da camada de revestimento

Fonte: acervo pessoal

4.1.2 Calçada 2

A Calçada 2 foi executada na Praça do Pôr-do-Sol, no *campus* da USP, em São Paulo. A preparação do local e execução da calçada foram realizadas no mês de maio de 2016.

A etapa de preparação incluiu os serviços de remoção do revestimento existente em blocos intertravados de concreto, escavação, regularização do subleito, ajuste das inclinações, assentamento das guias, instalação das mantas e tubulação, execução da caixa coletora e lançamento da base granular.

Como a empresa responsável pelo fornecimento do concreto localiza-se a 39 km do local de implantação da Calçada 2, as etapas de concretagem foram realizadas aos sábados, de modo a se evitar os congestionamentos semanais no trajeto entre a usina e o local de implantação, o que acarretaria em tempos de percurso maiores que o tempo de trabalho do CPCP.

A calçada, inicialmente projetada com 1,90 m x 84,80 m foi idealizada com três diferentes segmentos. Após início da etapa de preparação, houve necessidade de reduzir a largura da calçada para 1,50 m em razão da existência de interferências com

redes de fibra ótica enterradas no local. O detalhamento do projeto de implantação está apresentado no Apêndice B.

O primeiro segmento, com dimensões de 1,50 m x 21,45 m, foi implantado considerando o sistema de infiltração total, com revestimento em CPCP de 10 cm de espessura apoiado sobre 15 cm de base reciclada. Para separação da base reciclada e do solo do subleito, foi implantada uma manta geotêxtil para evitar a contaminação da base por eventuais bombeamentos de finos do solo do subleito.

O segundo segmento, com dimensões de 1,50 m x 19,85 m, foi executado com sistema sem infiltração, com revestimento de CPCP de 15 cm de espessura apoiado sobre 15 cm de base reciclada. Para este segmento a base foi separada do subleito com o emprego de uma lona plástica impermeabilizante.

Para coleta das águas das intempéries foi definido um ponto baixo localizado no centro do segmento 2, onde foi posicionado um dreno que, após coletar a água, tem o papel de direcioná-la para uma caixa de coleta intermediária. Essa caixa possui uma saída no fundo e também um extravasor posicionado a uma altura de 30 cm do fundo da caixa. Após passagem pela caixa de coleta a água é direcionada a uma boca de lobo existente no local, para finalmente ser descartada na rede pluvial.

Essa caixa foi implantada no sistema prevendo-se um estudo futuro de vazões e análises químicas, a ser realizado em outra etapa de pesquisa. Para detalhamento da caixa de coleta, ver Apêndice B.

No terceiro segmento, com dimensões de 1,50 m x 42,90 m, as características de implantação são iguais às do segmento 1, com exceção do tipo de material de revestimento, além de também não ser aplicado nenhum tipo de proteção entre as camadas de subleito e base reciclada. Como revestimento foi empregada uma mistura comercial fornecida pela empresa Lafarge-Holcim, com características específicas de dosagem que não serão discutidas nessa pesquisa.

4.1.2.1 Materiais

Como revestimento permeável nos segmentos 1 e 2 foi utilizada a mistura RI, contendo os mesmos materiais e dosagem definidos no Capítulo 3, que estão reproduzido na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Composição do CPCP empregado como revestimento dos segmentos 1 e 2 da Calçada 2

Consumo/Relação/Teor	Quantidades
Consumo de cimento - CPV ARI RS	374 kg/m ³
Consumo de agregado comercial (pedrisco)	1.660 kg/m ³
Relação a/c	0,307
Teor de superplastificante (%)	0,45% (1.588 mL/m ³)
Teor de retardador de pega (%)	0,40% (1.415 mL/m ³)

Para evitar a ocorrência de contaminação da base ou até mesmo do revestimento de CPCP no segmento 1, foi empregada uma manta geotêxtil para separação entre a camada de base e subleito. A manta utilizada é do tipo não tecida, de filamentos contínuos, 100% poliéster, com resistência à tração de 7,0 kN/m e permeabilidade de aproximadamente 1.500 cm/h, que representa uma grandeza semelhante ao valor previsto de taxa de infiltração do CPCP utilizado.

Apesar das mantas para pavimentação serem normalmente especificadas de acordo com a ET-DE-H00/013 (DER/SP, 2013), os parâmetros mínimos preconizados não estão sendo atendidos neste caso específico, visto que o projeto consiste em uma calçada para tráfego de pedestres, não sendo necessários valores elevados de resistência mecânica.

No segmento 2, construído com sistema sem infiltração, foi utilizada uma camada dupla de lona plástica com espessura de 200 micras sobre o subleito, garantindo-se a sua impermeabilização.

Foram também utilizadas guias de concreto pré-moldado com fck de 20 MPa posicionadas em todos os limites da calçada, bem como para separação entre os três segmentos implantados. As guias apresentaram, ademais, função de nivelar a calçada durante a execução da camada de revestimento, sendo também utilizadas como superfície de apoio para aplicação da compactação por meio do rolo metálico.

Para demais informações referentes aos materiais utilizados, ao projeto e aos detalhes executivos, ver Apêndice B.

4.1.2.2 Metodologia executiva da Calçada 2 anteriormente à concretagem

Inicialmente, foi realizada a remoção dos blocos de concreto que originalmente revestiam o passeio existente. Na sequência deu-se início à escavação, sendo que a profundidade da cota final de terraplenagem foi controlada a cada 5 metros com auxílio de uma guia de madeira e trena. Após a finalização do procedimento de escavação, o subleito foi regularizado.

Na Figura 4.7 está apresentado o processo de remoção dos blocos intertravados e na Figura 4.8 o procedimento de escavação para implantação da estrutura do passeio.

Figura 4.7: Retirada do revestimento existente em blocos de concreto intertravados

Fonte: acervo pessoal

Figura 4.8: Procedimento de escavação e regularização do subleito

Fonte: acervo pessoal

Posteriormente, foi realizado o assentamento das guias. O nivelamento superficial foi controlado com base no alinhamento rua existente, com uso de uma guia de madeira e nível. As guias foram assentadas sobre um lastro de areia e rejuntadas com argamassa nos encontros. Para fins de melhorar a sua estabilidade, foram implantados apoios de concreto nas juntas das guias. Na Figura 4.9 está apresentado o processo de assentamento das guias.

Figura 4.9: Assentamento das guias

Fonte: acervo pessoal

Na etapa seguinte foram instaladas as mantas nos segmentos 1 e 2, conforme descrito anteriormente. As mantas foram instaladas sobre o subleito cobrindo as faces das guias até praticamente o seu topo, garantindo a melhor proteção possível da base no caso da manta geotêxtil implantada no segmento 1, e a impermeabilização completa do subleito no caso do segmento 2. Na Figura 4.10 está apresentado o procedimento de instalação das mantas.

Figura 4.10: Instalação das mantas

Fonte: acervo pessoal

Concomitantemente ao assentamento das guias e das mantas, foi executada a escavação para implantação da caixa de coleta de água e também do dreno no ponto baixo do segmento 2. Inicialmente no projeto estava prevista a execução de uma caixa de concreto moldada *in loco*. Entretanto, a empresa executora disponibilizou uma caixa pré-moldada em concreto, que, por fins de velocidade de aplicação, foi utilizada em substituição à caixa originalmente projetada.

Como a boca de lobo existente estava completamente assoreada, foi efetuada a sua limpeza para garantir a continuidade hidráulica do sistema. Na Figura 4.11 estão apresentadas a escavação para implantação da caixa, a instalação dos drenos e tubos de ligação com a boca de lobo existente, bem como o registro instalado para acionamento do esgotamento da água após a coleta.

Figura 4.11: Escavação, instalação da caixa de coleta, dreno e ligação com a boca de lobo existente

Fonte: acervo pessoal

Na sequência, deu-se início ao lançamento do material reciclado para a base, com posterior espalhamento e regularização. O controle da espessura da base foi realizado com auxílio de uma guia de madeira e nível. Vale ressaltar que tanto o subleito quanto a camada de base não foram compactados, por motivos já discutidos na metodologia de implantação da Calçada 1. Na Figura 4.12 está apresentada a etapa de lançamento e regularização da base.

Figura 4.12: Lançamento e regularização da base reciclada

Fonte: acervo pessoal

4.1.2.3 Mistura do CPCP em usina e procedimento de concretagem

As concretagens foram realizadas em duas etapas. Na primeira etapa que ocorreu em 14/05/2016, foram concretados os segmentos 1 e 2. A segunda etapa ocorreu em 21/05/2016 e foi concretado o segmento 3.

Para a concretagem dos segmentos 1 e 2, foi necessário utilizar dois caminhões betoneira para suprir o volume de concreto. O controle das quantidades do cimento, parte da água e dos agregados foi realizado de maneira automatizada na central da usina, sendo que somente as quantidades dos aditivos e do restante da água foram controladas manualmente. Na Figura 4.13 está apresentado o início do procedimento de mistura na central da usina.

Figura 4.13: Procedimento de mistura dos materiais em usina

Fonte: acervo pessoal

Na primeira etapa, foi misturada 50% do total de água prevista na dosagem. Em etapa seguinte, foram adicionadas as totalidades dos aditivos de maneira manual (Figura 4.14) e o CPCP foi avaliado visualmente para verificação de sua trabalhabilidade e teor de umidade. A água foi adicionada aos poucos até a mistura atingir um nível inicial de trabalhabilidade satisfatório. O controle da umidade nesse caso foi realizado de maneira visual e tátil visual, seguindo os procedimentos já descritos na metodologia aplicada à fase de laboratório dessa pesquisa.

Figura 4.14: Adição manual de água e aditivos

Fonte: acervo pessoal

Na sequência o concreto foi transportado para o local de aplicação. Antes de iniciar o lançamento o teor de umidade foi verificado novamente, sendo que para ambos os caminhões utilizados na primeira etapa, foi necessário ajustar a umidade após o transporte do material da usina ao local de aplicação. Após ajuste, a relação a/c resultante foi de 0,31, ou seja, pouco maior que a relação a/c teórica de laboratório, de 0,30. Ainda antes do lançamento, a base reciclada foi umedecida para evitar perda da água de hidratação do CPCP para a base, conforme apresentado na Figura 4.15.

Figura 4.15: Processo de umedecimento da base

Fonte: acervo pessoal

Após o lançamento do CPCP foi realizado o espalhamento e pré-nivelamento com auxílio de um sarrafo de madeira. A compactação inicial, por meio do rolo metálico, foi realizada em seções de concretagem de aproximadamente 7 metros cada, com um total de 4 passadas do rolo por seção, conforme pode ser observado na Figura 4.16. Importante ressaltar que, pela baixa quantidade de água característica da mistura de concretos permeáveis, houve a necessidade de umedecer a superfície do rolo constantemente, com a finalidade de evitar que os agregados se aderissem à sua superfície.

Figura 4.16: Utilização do sarrafo de madeira e do rolo de compactação

Fonte: acervo pessoal

Após a execução da Calçada 1, a qual foi finalizada somente com o rolo metálico, foi observado que, para a consistência da mistura produzida, a superfície acabada do revestimento apresentou leves ondulações, que foram consideradas inadequadas para a finalidade de uso da calçada. Essa ocorrência está, em parte, atribuída à baixa trabalhabilidade da mistura e ao procedimento de compactação leve empregado, que, por sua vez, prioriza a manutenção das elevadas permeabilidades no revestimento endurecido.

Considerando o problema de nivelamento ocorrido na Calçada 1, optou-se por utilizar um procedimento extra de finalização após passagem do rolo metálico, com auxílio de uma acabadora de pisos, conhecida popularmente como “bambolê”. Diferentemente dos pisos em concretos convencionais, em que este equipamento é empregado com a finalidade de polimento da superfície sendo aplicado após endurecimento do concreto, o bambolê foi aplicado no revestimento de CPCP logo

após a passagem do rolo, tendo em vista dar um melhor acabamento à superfície e eliminar eventuais imperfeições de nivelamento.

O equipamento foi utilizado em rotação reduzida quando comparada à rotação de pisos em CCP e a sua aplicação foi limitada em somente uma passagem, de modo a evitar eventual fechamento da superfície do CPCP por excesso de compactação. Na Figura 4.17 está apresentado o equipamento sendo utilizado, bem como um detalhe da superfície do CPCP após acabamento.

Figura 4.17: Finalização com equipamento “bambolê” e detalhe da superfície finalizada

Fonte: acervo pessoal

Após terminada a regularização, a superfície foi rapidamente coberta com uma lona plástica para evitar a perda de água e promover a cura do concreto.

Para fins de validação do tempo de trabalho do CPCP em campo, foi realizado o controle do tempo de execução para cada seção de concretagem dos segmentos 1 e 2. Dessa maneira, ambos os segmentos foram divididos em 6 seções de concretagem, conforme apresentado na Figura 4.18.

Foram anotados os horários relativos a toda a etapa de execução, desde o início da mistura na usina bem como o início do lançamento (tempo inicial) e o momento de finalização da compactação com o rolo metálico (tempo final). Na Tabela 4.4 estão apresentados os tempos necessários para a execução de cada seção de concretagem, incluindo tempo de trajeto entre a central de concreto e o local de implantação da Calçada 2.

Figura 4.18: Esquema de distribuição das seções de concretagem (medidas em metro)

Tabela 4.4: Controle dos tempos de concretagem dos segmentos 1 e 2

Segmento 1	Hora		Tempo (h:min)	Segmento 2	Hora		Tempo (h:min)
	Inicial	Final			Inicial	Final	
Mistura na central	07:46	08:01	00:15	Mistura na central	09:00	09:19	00:19
Trajetos	08:01	09:04	01:03	Trajetos	09:19	10:18	00:59
Seção 1	09:04	09:26	00:22	Tempo de espera	10:18	10:24	00:06
Seção 2	09:36	09:58	00:22	Seção 4	10:24	10:46	00:22
Seção 3	09:58	10:24	00:26	Seção 5	10:46	11:09	00:23
				Seção 6	11:09	11:35	00:26
Tempo total de concretagem			02:28	Tempo total de concretagem			02:35

Para fins de controle da resistência mecânica dos materiais executados, foram moldados um total de vinte e quatro CPs cilíndricos, sendo doze para os segmentos 1 e 2 e doze para o segmento 3. Os CPs foram moldados no máximo 2 horas após o início da mistura em central, de acordo com o tempo de trabalho estudado na etapa de dosagem em laboratório para a mistura empregada nos segmentos 1 e 2. Foi empregado procedimento de moldagem MCU, conforme detalhado na etapa de laboratório.

Todos os CPs foram mantidos por três dias no próprio local de execução cobertos com lona plástica e o restante dos dias em laboratório, porém sem controle de temperatura e umidade, de modo a simular o processo de cura idêntico ao da calçada executada. Os CPs foram rompidos aos 28 dias no laboratório da Lafarge-Holcim em Santo André/SP.

4.1.3 Ensaios de campo

A seguir estão descritos os ensaios realizados em campo para avaliação da capacidade permeável e respostas mecânicas aos carregamentos dinâmicos em ambas as calçadas implantadas.

4.1.3.1 Ensaio de taxa de infiltração

O ensaio de taxa de infiltração em campo foi realizado de acordo com a ASTM C1701 (ASTM, 2009). O procedimento detalhado para realização do teste em campo está descrito no item 3.1.5.5 da etapa de laboratório.

Para realização dos ensaios definiram-se pontos específicos sobre as calçadas e os ensaios foram repetidos no intuito de observar a ocorrência do *clogging* ao longo do tempo no revestimento em CPCP. A localização dos pontos testados em ambas as calçadas está detalhada em Curvo (2017).

Os ensaios foram realizados entre o período de dezembro de 2015 e janeiro de 2017 por Curvo (2017), sendo então complementados entre o período de maio de 2017 e dezembro de 2018 na presente pesquisa.

4.1.3.2 Levantamentos deflectométricos

Este ensaio de campo teve por objetivo subsidiar a avaliação do comportamento estrutural das calçadas executadas em concreto permeável em termos de medidas de deflexões recuperáveis.

Para realização dos levantamentos deflectométricos foram empregados dois equipamentos do tipo *Falling Weight Deflectometer* (FWD), ambos do modelo KUAB 90 de procedência sueca. O FWD é um deflectômetro de impacto projetado para simular o efeito de carregamentos de veículos em movimento sobre pavimentos. A aplicação da carga é realizada pela queda de um conjunto de massas a partir de alturas pré-fixadas sobre um sistema de amortecedores de borracha, que por sua vez

transmitem a força aplicada a uma placa circular de 30 cm de diâmetro apoiada no pavimento.

Os deslocamentos recuperáveis gerados na superfície do pavimento são medidos por sete *Linear Variable Differential Transformers* (LVDTs) instalados na placa de carga e ao longo de uma barra metálica. Os espaçamentos dos LVDTs utilizados nessa pesquisa foram de 0 cm, 20 cm, 30 cm, 45 cm, 60 cm, 90 cm e 120 cm em relação ao ponto de aplicação da carga, possibilitando a análise dos deslocamentos por meio de uma bacia de deflexões gerada ao longo desse espaçamento.

Na Calçada 2 os ensaios foram realizados somente nos segmentos 1 e 2, visto que não há informações sobre a dosagem do material aplicado no segmento 3. A locação dos pontos em ambas as calçadas está apresentada no Apêndice C. Na Figura 4.19 e na Figura 4.20 está apresentada a realização dos ensaios nas Calçadas 1 e 2.

Os levantamentos deflectométricos foram divididos em duas etapas, que estão definidas a seguir.

Etapas 1

Os levantamentos da primeira etapa consistiram na realização dos ensaios considerando aplicação de carga aproximada de 4.100 kgf. Estes ensaios foram realizados em 08/04/2016 e 10/10/2017 para as Calçadas 1 e 2, respectivamente, totalizando oito pontos na Calçada 1 e quinze pontos da Calçada 2, sendo realizados dois golpes por ponto ensaiado.

Para a Calçada 1 os históricos de chuva para o município de São Paulo apontam ocorrência de leve precipitação somente no dia 01/04/2016, indicando provável baixa umidade das camadas de base e subleito da estrutura do pavimento durante a execução do levantamento. Já para a Calçada 2, foi observado ocorrência de chuvas nos dias 01, 03, 04, 07 e 08/10/2017, sugerindo condição de umidade mais elevada na base e subleito do pavimento.

Figura 4.19: Posicionamento do FWD sobre a Calçada 1

Fonte: acervo pessoal

Figura 4.20: Posicionamento do FWD sobre a Calçada 2

Fonte: acervo pessoal

Etapa 2

Considerando-se que este tipo de pavimento está sujeito à presença de água nas camadas de sua estrutura durante eventos de chuva, na segunda etapa dos levantamentos deflectométricos foram realizados ensaios nas condições “seca” e “saturada” nos segmentos 1 e 2 da Calçada 2.

Esse procedimento teve como objetivo avaliar se a presença de grandes volumes de água no interior da estrutura do pavimento permeável exerce influência no seu

comportamento estrutural. Embora fosse possível empregar os resultados obtidos dos levantamentos defletoométricos da etapa 1 para a “condição seca”, optou-se por repetir os ensaios em função das possíveis variações de calibração atribuídas aos diferentes tipos de equipamentos utilizados em cada etapa.

Na busca de garantir um nível de umidade baixo que simulasse a condição “seca”, o levantamento foi realizado em julho de 2018, que representa um dos períodos mais secos da região de São Paulo, em pleno inverno, estação com os menores níveis de umidade ao longo do ano.

Após o levantamento defletoométrico na condição “seca”, o pavimento foi encharcado manualmente com auxílio de um caminhão pipa, de modo a representar uma condição de maior umidade possível na estrutura do pavimento. Na sequência, os ensaios foram repetidos exatamente nos mesmos pontos em que ensaios na condição “seca” foram realizados.

Para evitar eventual possibilidade de saída da água do interior da estrutura do pavimento, os levantamentos defletoométricos na condição “saturada” foram realizados somente após o transbordamento de água na superfície do concreto, verificada após determinando tempo de enchimento, sendo que o fluxo de água foi mantido constante até a finalização dos ensaios. Na Figura 4.21 pode ser observado o transbordamento da água pela estrutura do pavimento no início do segmento 1 da Calçada 2, que é caracterizado pelo sistema de infiltração total.

Figura 4.21: Transbordamento de água através da superfície do CPCP

Fonte: acervo pessoal

Considerando que houve transbordamento, confirma-se que a vazão de entrada é maior que a vazão de saída pelo fundo e pelas laterais da calçada, o que corrobora a consideração de elevada umidade no interior do sistema durante a execução dos ensaios na “condição saturada”. Para o caso do segmento 2 da Calçada 2 que possui uma tubulação de coleta e direcionamento da água no interior da estrutura da calçada, optou-se por tampar o tubo de saída durante a realização dos ensaios.

Importante observar que tanto a condição “seca” quanto a condição “saturada” a que foi submetida a estrutura da calçada receberam esta nomenclatura por se referirem a condições de extremo oposto, e não devem ser consideradas como condições literais, pois obviamente há presença de umidade na condição “seca”, em função da presença, ao menos, de umidade higroscópica, além de não ser possível garantir uma saturação completa do sistema na condição “saturada”, devido à inclinação do local de implantação e da existência de diversos caminhos possíveis para saída da água tanto no fundo (segmento 1) quanto pelas laterais da estrutura em ambos os segmentos.

Para esta etapa dos levantamentos deflectométricos foram empregados dois níveis de carregamento, com cargas de aproximadamente 4.100 kg e 6.600 kg. O acréscimo da magnitude de carga de 6.600 kgf teve por objetivo forçar uma maior mobilização do sistema, buscando-se uma possível maior evidenciação das diferenças de comportamento em ambas as condições de umidade.

No total, foram ensaiados os mesmos 15 pontos testados anteriormente na Calçada 2, considerando dois ensaios para cada ponto por carga aplicada, que totalizam quatro ensaios por ponto.

4.2 Resultados da etapa de campo

A seguir estão apresentados os resultados referentes aos levantamentos de campo realizados nessa pesquisa.

4.2.1 Controle tecnológico do CPCP executado na Calçada 2

Na Tabela 4.5 estão apresentados os resultados da resistência à compressão aos 28 dias dos CPs referentes aos concretos empregados nos 3 segmentos da Calçada 2 e na Tabela 4.6 estão apresentados os resultados da análise estatística realizada para os resultados obtidos. A análise de detecção de *outliers* está apresentada no Apêndice A.

Tabela 4.5: Resultados de resistência à compressão dos CPs para controle tecnológico

CP	Segmentos 1 e 2 - Mistura RI		Segmento 3 - Mistura Comercial Lafarge-Holcim	
	Carga (kN/N)	Resistência à Compressão (MPa)	Carga (kN/N)	Resistência à Compressão (MPa)
CP1	70	8,91	56	7,13
CP2	102	12,99	125	15,92
CP3	72	9,17	70	8,91
CP4	92	11,71	72	9,17
CP5	85	10,82	100	12,73
CP6	87	11,08	87	11,08
CP7	62	7,89	55	7,00
CP8	100	12,73	107	13,62
CP9	115	14,64	84	10,70
CP10	69	8,79	63	8,02
CP11	122	15,53	98	12,48
CP12	68	8,66	63	8,02

Tabela 4.6: Análise estatística dos resultados de resistência à compressão de CPs para controle tecnológico.

Mistura	Resistência à Compressão (MPa)	
	μ	CV
Segmentos 1 e 2	11,08	22,61%
Segmento 3	10,40	27,26%

Observa-se que o resultado médio de resistência à compressão, ficou muito próximo da resistência média à compressão dos CPs moldados em laboratório para a mistura RI, que foi de 11,14 MPa, conforme pode ser observado na Tabela 3.12. Entretanto, o coeficiente de variação observado em função da moldagem realizada em campo foi maior que aqueles representativos das moldagens em laboratório, provavelmente

associado às condições climáticas menos controladas relativas às moldagens em campo.

Nota-se também que os resultados do concreto empregado no segmento 3 mostram menor resistência à compressão média que o concreto utilizado nos demais segmentos, além de apresentar maior variabilidade.

4.2.2 Inspeção visual da superfície – Tempo de trabalho

Observa-se que todas as seções de concretagem dos segmentos 1 e 2 da Calçada 2 tiveram sua concretagem finalizada com tempos de trabalho acima de 90 minutos, o que de acordo com diversos pesquisadores e órgãos (ACI, 2013; BEAN *et al.*, 2015), seria o tempo máximo para aplicação do CPCP, mesmo com emprego de aditivos retardadores de pega.

Em análise visual durante a execução das concretagens e após 7 dias de cura foi possível notar ocorrência de desagregação e perda de agregados em todas as seções de implantação. No caso das seções 1, 2 e 4, foi observada baixa ocorrência de desagregação e perda de agregados, em pontos localizados especificamente nos cantos da calçada, junto às guias de concreto. Já para as seções 3, 5 e 6, foi observada ocorrência considerável de desagregações em diversos pontos da superfície.

Durante a etapa executiva, a mistura de CPCP já não apresentava o brilho característico de concretos permeáveis quando foi lançada e compactada nas seções 3, 5 e 6, indicando que o tempo de trabalho disponível para uso da mistura já havia sido ultrapassado, o que justifica a ocorrência da desagregação mais severa nessas seções. Na Figura 4.22 está apresentado um exemplo de desagregação na seção 6 localizada no segmento 2 da calçada.

Após 7 dias de execução da Calçada 2, foi realizada uma lavagem a jato de água em toda a superfície da calçada, sendo observada perda de agregados decorrentes da

pressão de água, que ocorreu especificamente em pontos localizados nas seções 3, 5 e 6.

Figura 4.22: Representação da desagregação observada no segmento 2 da Calçada 2 na seção 6 de concretagem

Fonte: Kalleder (2017)

Essa condição afeta o desempenho dos revestimentos de diversas maneiras, como a qualidade de trafegabilidade e possível perda de resistência mecânica e durabilidade. Não menos importante, uma vez sendo consenso entre os pesquisadores da área que revestimentos em CPCP devem sofrer manutenção periódica para fins de garantir suas condições de permeabilidade, a perda de agregados em função da aplicação de determinado tipo de pressão sobre a superfície é inaceitável.

Dentre as seções 1, 2 e 4, observou-se que o tempo máximo transcorrido desde a mistura em usina até a finalização da compactação com o rolo foi de 122 minutos. Considerando-se que as desagregações mais graves ocorreram nas seções 3, 5 e 6 de concretagem, nas quais o concreto foi compactado com tempos acima de 122 minutos, é fato que a mistura RI empregada no revestimento dos segmentos 1 e 2 possui tempo de trabalho inferior a 122 minutos e não pode ser empregada caso esse tempo seja excedido para condições semelhantes de execução utilizadas na presente pesquisa.

Considerando os resultados das inspeções visuais, onde mesmo para as seções 1, 2 e 4 foram observados pequenos focos de desagregação, sugere-se que a limitação de 90 minutos sugerida pela comunidade internacional (ACI, 2013; BEAN *et al.*, 2015). seja atendida em caso de emprego da mistura RI em campo. Caso não seja possível em função de distância elevada entre a usina e o local de implantação, tempos de até 120 minutos poderiam ser considerados, desde que o teor de aditivo retardador de pega seja cuidadosamente reajustado, para evitar inclusive os pequenos focos de desagregação observados.

Importante considerar que os resultados obtidos sobre tempo de pega e sua correlação com a ocorrência de desagregação estão atrelados à mistura RI, produzida com cimento CPV ARI RS, que é caracterizado por elevada velocidade de hidratação em comparação a outros tipos de cimento disponíveis no mercado brasileiro, como é o caso do CPIII RS. Nesse contexto, como possibilidade de melhorar a condição de execução após elevado tempo de mistura e evitar possível ocorrência de desagregação, poderá ser considerada a substituição do tipo de cimento para auxiliar no retardo da pega e garantir maior tempo de trabalho à mistura.

4.2.3 Taxa de infiltração

Na Figura 4.23 estão apresentados os resultados das medições de taxa de infiltração realizadas na Calçada 1 entre o período de dezembro de 2015 e janeiro de 2017 (CURVO, 2017), com a inclusão de novas medições realizadas em maio de 2017, setembro de 2018 e dezembro de 2018. As novas medições realizadas após aquelas empreendidas por Curvo (2017) estão indicadas nos marcadores em formato de triângulo.

Nota-se que há uma variação considerável nos valores de taxa de infiltração inicial entre os 6 pontos analisados, provavelmente em função de variações no número de passadas do rolo de metal nas diferentes posições da calçada durante a execução, visto que os pontos 5 e 6, que possuem os maiores valores de taxa de infiltração, estão localizados na extremidade final da calçada, enquanto os demais pontos estão localizados na primeira metade da estrutura, conforme apresentado na Figura 4.24.

Figura 4.23: Resultados de taxa de infiltração ao longo do tempo para a Calçada 1 (Valores obtidos em Curvo (2017) indicados pelos marcadores circulares e os marcadores triangulares se referem aos resultados obtidos na presente pesquisa)

Figura 4.24: Esquema de locação dos pontos onde foram realizados os ensaios de taxa de infiltração na Calçada 1

Adaptado de: Curvo (2017)

Em relação aos resultados de taxa de infiltração dos CPSs moldados com a mistura Rg, que foi utilizada como revestimento da Calçada 1, os valores médios obtidos foram de 4.433 cm/h e 5.040 cm/h para as condições confinada e não confinada de ensaio. Observa-se que os resultados obtidos no primeiro ensaio de campo em janeiro de 2016 são menores para todos os pontos, em especial para os pontos 1 ao 4.

Os resultados dos levantamentos de campo demonstram que ocorreu uma redução considerável da capacidade permeável ao longo dos primeiros 4 meses para todos os pontos, com posterior estabilização dos resultados, com exceção dos pontos 5 e 6, onde a variação é um pouco mais acentuada da segunda para a terceira medição. A

redução considerável observada entre os meses de dezembro de 2015 e abril de 2016 pode ter correlação direta com o período chuvoso da região de São Paulo, que ocorre no mesmo período, somada a elevada densidade de vegetação e árvores existentes no terreno adjacente da calçada (CURVO, 2017).

Entre o período de setembro de 2016 e maio de 2017 nota-se uma elevação das taxas de infiltração em alguns pontos, como é o exemplo do ponto 5, que em julho de 2016 estava menos permeável que em setembro do mesmo ano. Segundo Curvo (2017), o ensaio para obtenção da taxa de infiltração preconizado pela ASTM C1701 (ASTM, 2009) pode resultar em significativa variabilidade dos resultados, visto que há uma sensibilidade muito grande do valor de taxa de infiltração em função do tempo cronometrado, sendo que qualquer desajuste no momento de acionar ou finalizar a contagem do tempo no cronômetro pode influenciar consideravelmente nos resultados. Além disso o autor indica que o operador que lança a água durante o ensaio também está suscetível a cometer erros, dada a dificuldade de manter uma lâmina d'água com altura variando de 1,0 cm a 1,5 cm no interior do anel, principalmente quando o ensaio é realizado com massa de água de 18 kg.

Importante esclarecer que, com exceção do uso de vassoura para limpeza superficial, nenhum tipo de manutenção da capacidade permeável foi realizado em nenhuma das calçadas durante o período das medições realizadas.

As medições realizadas entre maio de 2017 e dezembro de 2018 buscaram o atendimento criterioso das especificações do ensaio além da manutenção dos mesmos operadores, tanto no cronômetro quanto para lançamento da água. Os resultados demonstram uma maior coerência, com redução da capacidade permeável ao longo do intervalo de tempo de 19 meses, o que indica a evolução da ocorrência do *clogging*.

Os resultados de taxa de infiltração da Calçada 2 são apresentados entre o período de julho de 2016 e janeiro de 2017 (CURVO, 2017) com a inclusão de novas medições realizadas em 2017 e 2018, indicadas com marcadores em formato de triângulo na Figura 4.25. Com relação aos resultados da calçada 2, como o número de pontos analisados foi muito grande, utilizaram-se as médias dos valores para cada um dos

três segmentos. Os valores individuais levantados entre maio de 2017 e dezembro de 2018 para cada ponto estão apresentados no Apêndice D. A continuação dos levantamentos do segmento 3 não foi considerada nessa pesquisa visto que não se tem informações disponíveis sobre a dosagem do material empregado neste segmento, por se tratar de um produto comercial.

Figura 4.25: Resultados médios de taxa de infiltração ao longo do tempo para a Calçada 2 (Médias obtidas em Curvo (2017) estão indicadas pelos marcadores circulares e os marcadores triangulares se referem aos resultados médios obtidos na presente pesquisa) (A indicação “linear” na legenda se refere à linha de tendência linear para cada segmento)

Ao avaliar os resultados médios da Calçada 2, pode-se notar que a queda da taxa de infiltração ao longo do tempo foi menos expressiva quando comparada aos percentuais médios da Calçada 1. Ao se comparar o percentual total de redução da taxa de infiltração entre os segmentos 1 e 2, nota-se que os valores foram de 54% e 58% para o período total de 29 meses, respectivamente, ou seja, menor que as reduções de até 72% e 94% observadas na Calçada 1 ao longo de 32 meses e 36 meses, respectivamente.

A variação nas taxas de redução da capacidade permeável entre ambas as calçadas pode estar associada a diferentes fatores. O fator mais importante neste contexto de acordo com Curvo (2017), se refere às diferenças entre os locais de implantação entre as calçadas. A Calçada 1 está localizada em um ambiente com elevada densidade de

árvores e vegetação, ficando suscetível à presença de detritos e matéria orgânica na sua superfície.

Além disso, a superfície da calçada está nivelada em alguns pontos um pouco abaixo do nível do terreno existente, permitindo que as águas das intempéries transportem significativas quantidades de partículas sobre a superfície do revestimento. Ambas as situações podem ser observadas na Figura 4.26.

Figura 4.26: Esquerda: elevada quantidade de detritos provenientes das árvores e vegetação sobre a superfície da calçada; Direita: diferença de nível de implantação entre a calçada e o terreno adjacente

Fonte: Curvo (2017)

No caso da Calçada 2, é possível notar que também há diferença de nível, pois a superfície da calçada está posicionada alguns centímetros abaixo do nível do terreno adjacente, assim como a Calçada 1, o que indica situações semelhantes de implantação nesse caso. Entretanto, situação oposta em termos de densidade de vegetação e árvores é observado no local de implantação da Calçada 2 (Figura 4.27), resultando em menor quantidade de matéria orgânica e detritos sendo transportada sobre a superfície do CPCP, o que parece ter gerado uma redução na velocidade de ocorrência do *clogging* nessa calçada.

Outra possível explicação que influencia também nas diferenças observadas entre a velocidade de redução da taxa de infiltração das calçadas pode estar atribuída à

diferença no valor inicial de permeabilidade observado em cada calçada, pois é possível que menores taxas de infiltração iniciais, como é o caso da Calçada 1 frente a Calçada 2, estejam relacionadas a uma menor porosidade do CPCP, conduzindo o revestimento a um processo de *clogging* mais agressivo⁵.

Figura 4.27: Esquerda: pouca densidade de vegetação e inexistência de árvores; Direita: diferença de nível de implantação entre a calçada e o terreno adjacente no bordo esquerdo da imagem

Fonte: acervo pessoal

Para avaliar o nível de porosidade do CPCP da Calçada 1, foram extraídas três amostras cilíndricas com uma serra rotativa fornecida pelo Laboratório de Tecnologia da Pavimentação (LTP) da EPUSP. Ao avaliar as amostras extraídas foi possível notar que uma espessura significativa da base de RCD estava aderida no fundo da camada de revestimento, conforme apresentado na Figura 4.28.

Uma análise mais aprofundada das amostras coletadas sugere que houve segregação da pasta do CPCP para a base no momento da execução da calçada, o que explica a ocorrência da aderência das partículas da base de RCD à camada de revestimento. Na Figura 4.29 (obtida com câmera fotográfica simples) é possível observar a presença de pasta envolvendo parte das faces das partículas da base, comprovando a ocorrência da segregação.

⁵ Comunicação pessoal. Prof. Liv Haselbach em 2015 no Campus da USP em São Paulo/SP.

Figura 4.28: Detalhe da amostra com partículas de RCD aderidas ao revestimento

Fonte: acervo pessoal

Figura 4.29: Ocorrência de segregação da pasta

— Indicação da presença de pasta
Fonte: acervo pessoal

No LTP foram realizados ensaios de porosidade seguindo a metodologia apresentada no Capítulo 3. As amostras ensaiadas foram serradas com espessura de 5 cm a partir da superfície superior de cada CP extraído. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.7.

É possível observar que as porosidades de campo para o CPCP executado na Calçada 1 estão próximos aos valores observados em laboratório para a mistura Rg, que foi empregada para produção do concreto *in situ*, cujo valores variaram de 26,24% a 29,39%.

Tabela 4.7: Resultados dos ensaios para as amostras extraídas da Calçada 1

CP	Porosidade (%)
1	30,62
2	31,48
3	25,55

Assumindo-se que a porosidade do revestimento da Calçada 2 seja também semelhante às porosidades da mistura RI em laboratório, que variaram de 22,71% a 25,00%, e que as porosidades determinadas para as amostras extraídas da Calçada 1 são ainda maiores que essas, é possível sugerir que o revestimento da Calçada 1 não deveria sofrer uma redução mais expressiva da permeabilidade ao longo do tempo pelo simples critério de porosidades diferentes. Partindo desse pressuposto, e assumindo-se que ambas as calçadas possuem a mesma condição de nivelamento em relação ao terreno, fica fortalecida a consideração de que a ocorrência *clogging* foi acelerada na Calçada 1 em função da elevada densidade de vegetação e árvores existentes no terreno adjacente.

Na Calçada 2 não foram extraídas amostras por impossibilidade de uso da rotativa pela inexistência de pontos de energia próximos ao local e da indisponibilidade de um gerador de energia móvel. Sendo assim, não é possível confirmar a ocorrência ou não de segregação da pasta nesse caso, além da porosidade do material executado *in situ*, o que poderia explicar as diferenças entre as taxas de infiltração iniciais entre as calçadas.

No caso do segmento 3 da Calçada 2, que possui também espessura de revestimento de 10 cm como no segmento 1, observou-se redução da taxa de infiltração de 38% para o período de julho de 2016 até maio de 2017, ou seja, consideravelmente mais elevada em comparação à redução ocorrida no segmento 1 de 21% para o mesmo período. Essa diferença pode estar associada à presença da manta permeável empregada na separação entre a camada de base e o subleito no segmento 1, sendo que no caso do segmento 3 a base foi construída diretamente sobre o subleito. A presença da manta permeável tende a evitar a ocorrência de bombeamento de finos do subleito para o revestimento poroso, auxiliando na redução *clogging* (TENNIS; LEMING; AKERS, 2004).

Outra consideração pode ser feita em termos das diferentes misturas usadas para os revestimentos dos segmentos 1 e 3. Os agregados empregados no revestimento do segmento 3 possuem diâmetro visualmente menor que aqueles utilizados nos demais segmentos da Calçada 2, o que pode influenciar na taxa de redução da capacidade permeável das estruturas. Maiores análises envolvendo o segmento 3 não foram realizadas, uma vez que não se dispõe dos critérios de dosagem do material aplicado para este segmento, visto ser um material comercial.

Para maiores detalhes sobre as análises realizadas em termos de taxas de infiltração em campo, consultar Curvo (2017).

4.2.4 Modelo de variação da taxa de infiltração

Com base nos resultados de taxa de infiltração levantados ao longo do tempo nas Calçadas 1 e 2, foi observada que para ambas as calçadas, houve uma tendência de redução da capacidade permeável com o passar do tempo, relacionada diretamente com a ocorrência de *clogging* no CPCP.

De modo a avaliar a consistência dos resultados em termos de tendência, foram testados diversos modelos de regressão, buscando as melhores correlações para o conjunto de dados disponível, além de proporcionar um maior entendimento sobre como cada variável do sistema influencia nessa correlação.

Os modelos considerados para avaliação da tendência foram do tipo linear, logarítmico e exponencial. Foram considerados todos os dados levantados ao longo do tempo para ambas as calçadas, incluindo as medições realizadas por (CURVO, 2017), com exceção do segmento 3 da calçada 2, cujo revestimento possui características de dosagem diferentes.

Com relação às variáveis, o modelo proposto buscou preliminarmente a estimativa da taxa de infiltração (I_e) em relação ao tempo (t_i) em que a estrutura foi submetida ao uso. Numa tentativa de melhorar o R^2 do modelo, outras variáveis foram então atribuídas na análise, por exemplo a espessura do revestimento (h) de 10 cm e 15 cm,

além do local de implantação de cada calçada, com ou sem presença de vegetação e árvores. Esta última variável foi inserida no modelo em formato de variável *dummy* (Vd), sendo atribuídos os valores 1 e 0 para locais com e sem presença de alta densidade de vegetação e árvores, respectivamente.

Dentre os modelos testados, a melhor correlação foi obtida considerando uma equação logarítmica natural em formato exponencial, empregando-se como variáveis o tempo, a espessura da placa de CPCP e a existência ou não de elevada densidade de vegetação, que resultou em um valor de R^2 igual a 0,73 considerando os 36 meses de levantamentos disponíveis. Na Figura 4.30 estão apresentadas as curvas do modelo gerado extrapoladas para um período de 10 anos, plotadas juntamente com os resultados das medições realizadas em campo para cada calçada ao longo do tempo.

Figura 4.30: Modelo desenvolvido (t, h e Vd) versus resultados de campo

Ao analisar o modelo gerado fica novamente clara a diferença considerável existente entre os resultados atribuídos às calçadas 1 e 2, sendo possível indicar que a diferença mais importante em termos de comportamento hidráulico ao longo do tempo para os experimentos aqui apresentados está relacionada, além do tempo de desde

a implantação da estrutura, à existência ou não de elevada densidade de vegetação e árvores adjacentes ao local de implantação.

Já para o caso da espessura de revestimento, é possível afirmar que essa variável possui menor influência no comportamento do modelo para as condições estudadas nessa pesquisa, sendo mais importante nas idades iniciais da calçada. Além disso, o modelo indica que a redução da permeabilidade é maior para espessuras de 15 cm, visto que a curva referente a essa condição vai se aproximando da curva que representa espessura de 10 cm, mostrando que o *clogging* pode ser mais crítico quanto maior a espessura da camada de CPCP.

Buscando a simplificação do modelo, optou-se por remover a variável “espessura”, mantendo-se somente a variação do tempo e o local de implantação da calçada. O novo modelo gerado resultou em um valor de R^2 de 0,72, ou seja, muito próximo ao fator de correlação obtido no modelo anteriormente.

Na Figura 4.31 estão apresentados os resultados considerando o modelo definitivo supracitado, frente aos resultados de campo.

Figura 4.31: Modelo desenvolvido (t e Vd) versus resultados de campo

Na Equação 4.1 está apresentado o modelo final proposto.

$$I_e = 8270,724 * e^{(-0,03307*t_l)} * e^{(-2,07806*Vd)} \quad (4.1)$$

onde:

- I_e : taxa de infiltração estimada (cm/h);
- t_l : idade do pavimento (mês);
- Vd : variável *dummy* (com vegetação $Vd = 1$; sem vegetação $Vd = 0$)

Nota-se que, apesar da elevada dispersão dos resultados medidos em campo em relação às curvas, o modelo gerado tem condições de representar razoavelmente as tendências de redução da capacidade permeável ao longo do tempo para as condições propostas nessa pesquisa, indicando, inclusive, que há uma redução da taxa de infiltração de aproximadamente 3% ao mês. É também coerente considerar que, para pavimentos com revestimento em CPCP executados há mais de 10 anos e que não passem por processo de manutenção, haja uma tendência de redução da capacidade permeável para valores próximos de 0.

Cabe ressaltar que o modelo desenvolvido representa única e exclusivamente um método que pode ser aplicado para estimativa da variação da capacidade permeável ao longo do tempo especificamente direcionada para calçadas em CPCP executadas sob as mesmas condições daquelas consideradas na presente pesquisa, incluindo até mesmo as condições climáticas locais da cidade de São Paulo, mais especificamente do Bairro Butantã, onde as calçadas foram executadas.

Para gráficos referentes aos demais modelos testados com seus respectivos valores de R^2 , ver Apêndice E.

4.2.5 Levantamentos deflectométricos – Etapa 1

A codificação utilizada para nomenclatura dos ensaios, por exemplo “C1-5A”, seguiu a seguinte lógica:

- “C1” significa que o ensaio foi realizado na Calçada 1. Para a calçada 2, o início da codificação é C2;
- “5” é número do ponto ensaiado de acordo com a numeração indicada no Apêndice C;
- “A” e “B” indicam primeiro e segundo golpes no ponto, respectivamente, para carga de 4.100 kgf. As letras “C” e “D”, empregadas somente na segunda etapa dos levantamentos deflectométricos, se referem ao primeiro e segundo golpes para carga de 6.600 kgf.

Os valores individuais dos levantamentos deflectométricos realizados na primeira etapa para cada ponto estão apresentados no Apêndice F. As bacias de deflexão levantadas na Calçada 1 estão apresentadas na Figura 4.32.

Figura 4.32: Bacias de deflexão obtidas na Calçada 1

Na Figura 4.33 e na Figura 4.34 estão apresentadas as bacias de deflexão dos segmentos 1 e 2 da Calçada 2, respectivamente.

Figura 4.33: Bacias de deflexão obtidas na Calçada 2 – Segmento 1

Figura 4.34: Bacias de deflexão obtidas na Calçada 2 – Segmento 2

Ao analisar os resultados da Calçada 1, observa-se que os ensaios C1-1A e C1-1B resultaram em deflexões muito elevadas quando comparados aos demais pontos. Além disso, para os pontos C1-5, C1-6 e C1-8, pelo menos uma das tentativas de ensaio gerou resultados que não condizem com a realidade, com deflexões mais elevadas em distâncias maiores do ponto de aplicação da carga. Dessa maneira,

estas bacias foram descartadas das análises subsequentes. Para as demais curvas, nota-se que as deflexões ocorridas no ponto de aplicação da carga (D0) variaram entre $87,1 \times 10^{-2}$ mm e $173,2 \times 10^{-2}$ mm, indicando grande variação dos resultados.

As deflexões máximas em D0 resultantes para o segmento 1 da Calçada 2 variaram de $58,8 \times 10^{-2}$ mm a $95,1 \times 10^{-2}$ mm aproximadamente, desconsiderando-se as medições realizadas no ponto C2-1, que apresentou também deflexão máxima muito elevada, provavelmente por estar localizado no início deste segmento, onde pode ter ocorrido pequena redução da espessura do revestimento para ajuste da inclinação no encontro com a calçada existente. Esse ponto, assim como aqueles já discutidos da Calçada 1, foi também desconsiderado nas análises subsequentes.

Os valores mínimos e máximos obtidos no segmento 2 da Calçada 2 em D0 foram $38,4 \times 10^{-2}$ mm e $74,5 \times 10^{-2}$ mm, respectivamente, não sendo necessária a remoção de nenhum dos resultados observados em campo para as análises seguintes.

Na Tabela 4.8 estão apresentados o resumo da variação das deflexões em D0 observadas para cada segmento em estudo, média e coeficiente de variação dos resultados obtidos, desconsiderando-se os pontos discutidos acima para cada local.

Tabela 4.8: Análise estatística referente aos resultados de deflexões máximas.

Local	Deflexão em D0 (10^{-2} mm)	μ (10^{-2} mm)	CV (%)
Calçada 1	87,1 a 173,2	124,9	20%
Calçada 2 - Segmento 1	58,8 a 95,1	78,4	13%
Calçada 2 - Segmento 2	38,4 a 74,5	52,7	24%

Na Figura 4.35 está apresentado o gráfico “*boxplot*” com base nos dados obtidos, de modo a possibilitar uma análise descritiva mais apurada dentro do espaço amostral avaliado. A detecção de *outliers* nesse caso foi realizada empregando-se a metodologia descrita por Tukey (1993).

Figura 4.35: Gráfico *boxplot* referente aos resultados de deflexão máxima.

Buscando a validação estatística das diferenças entre as deflexões obtidas na Calçada 1 e no segmento 1 da Calçada 2, que possuem as mesmas espessuras das camadas implantadas, foi realizado um teste de hipóteses seguindo a distribuição “t” de *student* (teste “t”). Para tanto, foi fixado um valor de significância de 5%, assumindo-se como hipótese nula que as médias comparadas são estatisticamente iguais, sendo a hipótese alternativa que existe diferença entre as médias. Anteriormente à realização do teste “t”, foi aplicado o teste “f” para avaliação das equivalências entre as variâncias de cada conjunto de dados. Os resultados do teste “t” estão apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Resultados do teste de hipóteses “t”

Parâmetros Teste “t”	Deflexões em D0 (10^{-2} mm)	
	Calçada 1	Segmento 2 - Calçada 2
Média	125	78
Variância	619	106
n	12	14
Stat t	6,05	
t crítico	1,76	
Valor p	0,0018593	
Nível de Significância	0,0500000	
Resultado	Rejeita H0	

Ao comparar os resultados de deflexão da Calçada 1 e do segmento 1 da Calçada 2, que possuem estruturas de igual espessura em termos de revestimento e base, observa-se que a deflexão média em D0 é aproximadamente 60% mais elevada na Calçada 1. O teste de hipóteses realizado confirma também que as médias são estatisticamente diferentes para um nível de significância de 5%.

Essa diferença pode estar associada às condições de implantação entre as estruturas, tipos de compactação e finalização empregados, aplicação ou não de elemento para separação física entre as camadas de base e subleito das calçadas e condições de contorno das estruturas.

A execução do revestimento utilizado na Calçada 1 foi realizada em pequenas seções com mistura em betoneira e lançamento manual do concreto, diferentemente do processo utilizado na Calçada 2, onde todo o procedimento de mistura e lançamento foi realizado em caminhão betoneira. Além disso, apesar de a mistura empregada ser semelhante para ambas as calçadas em termos de porosidade e características mecânicas, além do tipo de cimento diferente, foi também necessário adicionar o retardador de pega na mistura empregada na Calçada 2. Nesse caso, as diferenças descritas podem provocar variações entre o comportamento mecânico das estruturas.

O revestimento da Calçada 1 foi compactado e finalizado somente com emprego do rolo metálico, enquanto na Calçada 2 foi empregada, além do rolo, a acabadora de pisos, com a finalidade de melhorar a qualidade do acabamento do revestimento. Esse tipo de procedimento pode ter gerado, mesmo que de maneira sutil, uma maior compactação da camada de CPCP, aumentando a sua densidade e rigidez, podendo ter auxiliado na redução dos valores de deflexões.

A base da Calçada 1 foi executada diretamente sobre o subleito existente, diferentemente do segmento 1 da Calçada 2, onde foi empregada uma manta geotêxtil permeável na separação entre a base e o subleito. Essa diferença pode também ajudar a explicar parcialmente os resultados obtidos, visto que a presença da manta geotêxtil auxilia na manutenção da integridade física do subleito ao longo do tempo por meio da redução da perda de materiais finos pelo fluxo de água. Isso faz com que capacidade de suporte da estrutura seja mantida, resultando em deflexões menores.

Outro ponto que auxilia na justificativa é uma possível redução das deflexões medidas no segmento 1 da Calçada 2 em comparação à Calçada 1 é a existência das guias pré-moldadas empregadas adjacentes à calçada 2, que naturalmente conduz a uma maior estabilização da estrutura, que ocorre pelo melhor confinamento da base ou até mesmo da placa de CPCP, quando comparado ao sistema de placa em borda totalmente livre empregado na Calçada 1.

O segmento 2 da Calçada 2, que possui revestimento com 15 cm de espessura, apresentou resultados de deflexão em D0 variando entre $38,4 \times 10^{-2}$ mm e $74,5 \times 10^{-2}$ mm, representando a menor deflexão média observada nos estudos, no valor de $52,7 \times 10^{-2}$ mm, o que era obviamente esperado em função da maior rigidez da placa de CPCP em comparação aos demais segmentos analisados, que possuem 10 cm de espessura.

Suleiman, Gopalakrishnan e Kevern (2011) apresentam resultados de levantamentos deflectométricos em pavimentos permeáveis com revestimento em concreto permeável com espessura de 15 cm e observaram deflexões máximas médias de 26×10^{-2} mm a 42×10^{-2} mm para carga aplicada de 40 kN e espessuras de base granular de 30 cm e 45 cm, respectivamente. Os autores não descrevem o tipo de material empregado na base dos pavimentos testados. Apesar de os valores serem menores que o valor médio de $52,7 \times 10^{-2}$ mm observado no segmento 2 da Calçada 2, essa diferença se justifica pelas maiores espessuras da base granular e pela compactação das camadas de base e subleito.

4.2.6 Levantamentos deflectométricos – Etapa 2

Na Figura 4.36 estão apresentados os resultados das deflexões nas condições “seca” (Dsec) e “saturada” (Dsat) em D0 e a 120 cm do ponto de aplicação da carga (D120) referente aos resultados obtidos no segmento 1 da Calçada 2, onde o revestimento em CPCP possui espessura de 10 cm.

Na Figura 4.37, estão apresentadas as mesmas comparações, mas para o segmento 2 da Calçada 2, onde a espessura do revestimento permeável é de 15 cm.

Em ambos os gráficos foram apresentadas as deflexões relativas aos dois níveis de carregamento de 4.100 kgf e 6.600 kgf. As deflexões D0 nos ensaios 1 e 2 são menores que aquelas apresentadas nos ensaios 3 e 4 por conta dos diferentes níveis de carregamento aplicados nos ensaios 1 e 2 (4.100 kgf), em comparação àqueles aplicados nos ensaios 3 e 4 (6.600 kgf). A mesma lógica ocorre para os demais pontos ensaiados. Os resultados individuais dos levantamentos para cada calçada estão apresentados no Apêndice G.

Figura 4.36: Comparação entre Dsec e Dsat nas posições D0 e D120 para o segmento 1 da Calçada 2 e cargas de 4.100kgf e 6.600 kgf

Figura 4.37: Comparação entre Dsec e Dsat nas posições D0 e D120 para o segmento 2 da Calçada 2 e cargas de 4.100kgf e 6.600 kgf

Exceção ocorre somente para os ensaios 31 e 32 da Figura 4.36, onde as deflexões na condição saturada não sofreram alteração em relação aos ensaios 29 e 30, pois a carga aplicada não seguiu o nível de carregamento de 6.600 kgf, conforme planejamento inicial, mas sim de 4.100 kgf.

Na Tabela 4.10 está apresentada a análise estatística dos resultados de Dsec e Dsat nas posições D0 e D120, desconsiderando-se os resultados destacados em vermelho no Apêndice G.

Tabela 4.10: Análise estatística de Dsec e Dsat em D0 e D120

Parâmetros	Segmento 1		Segmento 2	
	4.100 kgf	6.600 kgf	4.100 kgf	6.600 kgf
μ Dsec em D0 (10^{-2} mm)	60,8	121,5	44,7	72,8
CV Dsec em D0 (%)	11,4%	18,7%	30,1%	29,9%
μ Dsat em D0 (10^{-2} mm)	91,6	148,5	62,0	98,6
CV Dsat em D0 (%)	24,8%	22,5%	24,8%	28,5%
μ Dsec em D120 (10^{-2} mm)	9,0	11,6	10,6	16,4
CV Dsec em D120 (%)	25,7%	34,7%	40,4%	49,0%
μ Dsat em D120 (10^{-2} mm)	8,4	11,3	14,9	23,0
CV Dsat em D120 (%)	20,9%	20,5%	26,7%	32,0%

Na Tabela 4.11 e na Tabela 4.12 estão apresentados os resultados dos testes de hipótese, empregando-se os mesmos parâmetros descritos no item anterior, referente às deflexões nas condições “seca” e “saturada” para as cargas de 4.100 kgf e 6.600 kgf.

Observa-se que para ambos os segmentos, Dsec e Dsat em D0 são consideradas estatisticamente diferentes, independente da espessura do revestimento e do carregamento aplicado. As médias de Dsat em D0 excedem Dsec em 51% e 39% para os segmentos 1 e 2, respectivamente, com nível de carregamento de 4.100 kgf.

Na Tabela 4.13 está apresentada a relação entre Dsat e Dsec. Nota-se para ambos os segmentos que a diferença entre Dsat e Dsec em D0 é menor para o carregamento de 6.600 kgf quando comparado ao carregamento de 4.100 kgf.

Tabela 4.11: Teste de hipótese das médias dos resultados de deflexão em D0 e D120 nas condições “seca” e “saturada” para carga de 4.100 kgf

Parâmetros Teste "t"	Deflexões Segmento 1 - Calçada 2 (10 ⁻² mm)				Deflexões Segmento 2 - Calçada 2 (10 ⁻² mm)			
	D0 Seco	D0 Saturado	D120 Seco	D120 Saturado	D0 Seco	D0 Saturado	D120 Seco	D120 Saturado
Média	61	92	9	8	45	62	11	15
Variância	48	515	5	3	180	236	18	16
Observações	16	18	16	14	14	14	14	14
Stat t	5,20		0,86		3,17		2,75	
t crítico	1,69		1,70		1,71		1,71	
Valor p	0,0000056		0,1995190		0,0019592		0,0053092	
Nível de Significância	0,0500000		0,0500000		0,0500000		0,0500000	
Resultado	Rejeita H0		NÃO Rejeita H0		Rejeita H0		Rejeita H0	

Tabela 4.12: Teste de hipótese das médias dos resultados de deflexão em D0 e D120 nas condições “seca” e “saturada” para carga de 6.600 kgf

Parâmetros Teste "t"	Deflexões Segmento 1 - Calçada 2 (10 ⁻² mm)				Deflexões Segmento 2 - Calçada 2 (10 ⁻² mm)			
	D0 Seco	D0 Saturado	D120 Seco	D120 Saturado	D0 Seco	D0 Saturado	D120 Seco	D120 Saturado
Média	122	149	12	11	73	99	16	23
Variância	515	1.113	16	5	475	787	64	54
Observações	16	14	16	14	14	14	14	14
Stat t	2,55		0,33		2,71		2,26	
t crítico	1,72		1,71		1,71		1,71	
Valor p	0,0091099		0,3728687		0,0061100		0,0162322	
Nível de Significância	0,0500000		0,0500000		0,0500000		0,0500000	
Resultado	Rejeita H0		NÃO Rejeita H0		Rejeita H0		Rejeita H0	

Tabela 4.13: Relação entre as deflexões nas posições D0 e D120 nas condições “seca” e “saturada”

Relação	Segmento 1		Segmento 2	
	4.100 kgf	6.600 kgf	4.100 kgf	6.600 kgf
Dsat/Dseco em D0	51%	22%	39%	35%
Dsat/Dseco em D120	-7%	-3%	41%	40%

A camada de base da calçada possui granulometria sem variação do tamanho dos agregados, sendo caracterizada como uma base granular aberta. Este tipo de material possui uma condição de estabilidade diretamente dependente do atrito entre as partículas por conta do elevado volume de vazios em seu interior (BALBO, 2007; PINTO, 2006). Dessa maneira, o aumento das deflexões tem relação direta com a redução do atrito interno da camada de base, que ocorre em função do excesso de lubrificação das partículas pela presença de água no interior da estrutura. Essa condição intrínseca ao comportamento dos materiais granulares explica o aumento de D_{sat} em relação a D_{sec} na posição D0.

Na posição D120 foi observado no segmento 1 que os valores de D_{sat} foram levemente menores que D_{sec} , sendo que as médias resultantes são estatisticamente iguais de acordo com o teste de hipóteses, diferentemente do que acontece para o segmento 2 em D120, onde as médias resultantes em ambas as condições de ensaio são estatisticamente diferentes, assim como os resultados em D0.

Esta diferença na variação do comportamento em D120 pode ser explicada em função do tipo de solo que compõe o subleito, dos diferentes tipos de sistemas de infiltração empregados em ambos os segmentos da Calçada 2 e pelo tipo de carregamento utilizado para medição das deflexões, nesse caso, o carregamento dinâmico.

Com base no resultado de medidas de deflexão em diversas distâncias do ponto de aplicação da carga, é possível estabelecer parâmetros importantes referentes ao pavimento como um todo, mas também com relação a cada camada específica do pavimento, e, por este motivo, esse tipo de estudo é corriqueiramente utilizado em projetos de restauração de pavimentos, onde é extremamente importante se entender o comportamento de cada camada do pavimento existente individualmente.

Na mecânica dos pavimentos em geral, sabe-se que as deflexões medidas em D120 normalmente possuem correlação muito mais próxima com as características elásticas da sub-base e subleito do que com as camadas mais superficiais do pavimento (BALBO, 2007). Para pavimentos em concreto permeável essa correlação também já foi sugerida (SULEIMAN; GOPALAKRISHNAN; KEVERN, 2011).

A pressão neutra, ou poro-pressão, é uma parcela de pressão que ocorre em função da existência de água nos vazios do solo, que influi na distribuição das tensões e na ocorrência de deformações no solo. Um excesso de poro-pressão se refere a um aumento nos valores de pressão neutra em função da ocorrência de carregamentos dinâmicos aplicados rapidamente (carregamento não drenado), comum de ocorrer em solos com características de baixa permeabilidade, como argilas e siltes argilosos (PINTO, 2006).

No segmento 1 da Calçada 2 foi adotado sistema de infiltração total, sendo que a água lançada no pavimento, após infiltrar-se na sua estrutura, foi direcionada para o solo do subleito, que por sua vez foi caracterizado por análise táctil visual como solo argiloso. Considerando-se que o solo local possui baixa permeabilidade e que provavelmente estava em condição próxima da saturação no momento da execução do ensaio na condição “saturada”, a leve redução das deflexões neste segmento pode estar associada à ocorrência de um singelo excesso de poro-pressão, visto que o carregamento aplicado pelo FWD é do tipo dinâmico.

O excesso de poro-pressão está diretamente relacionado à incapacidade do solo de baixa permeabilidade de expulsar rapidamente água dos seus vazios, o que resulta em uma redução das deformações por conta da aplicação de um determinado carregamento dinâmico no momento da aplicação da carga, dada a incompressibilidade da água, o que explica a redução das deflexões em D120, mesmo que estatisticamente as médias sejam consideradas iguais. O mesmo não ocorreu para o segmento 2, uma vez que o sistema não permite a infiltração da água no solo em função da existência da lona plástica entre a base e o subleito, fazendo com que a saturação da base fosse a responsável pelo aumento das deflexões ao longo de todos os pontos de medição, inclusive em D120.

Em resumo, os resultados demonstram que há redução considerável na capacidade de suporte geral da estrutura do pavimento quando a mesma está exposta a elevados graus de umidade ou próxima da condição de saturação. Este efeito observado é de grande importância no contexto da capacidade estrutural dos revestimentos, uma vez que o aumento das deflexões está diretamente relacionado ao aumento das tensões de tração na fibra inferior da camada do CPCP, que por sua vez é diretamente

proporcional à sua vida de fadiga. Dessa maneira, fica claro que as estruturas de pavimento em CPCP devem ser tratadas considerando diferentes graus de saturação para fins de projeto, visto que a elevação das tensões provoca aumento nos consumos de fadiga, o que tende a reduzir a vida útil dessas estruturas.

4.3 Considerações finais sobre a etapa de campo

A etapa de campo teve por objetivo a execução de duas calçadas experimentais empregando-se como material de revestimento as duas misturas ótimas definidas na etapa de laboratório dessa pesquisa, buscando também um maior entendimento referente a viabilidade dos critérios executivos, além do tempo de trabalho máximo para as misturas desenvolvidas. Foram realizados ensaios de taxa de infiltração ao longo do tempo, buscando a determinação de um modelo empírico preliminar para simular o comportamento hidráulico de pavimentos em CPCP executados em local com ou sem a presença de vegetação densa e árvores. Por fim, foram realizados levantamentos deflectométricos nas calçadas para avaliação das respostas estruturais das placas de CPCP frente aos carregamentos propostos, avaliando-se ainda se a presença de elevados volumes de água no interior da estrutura do pavimento permeável influencia em seu comportamento mecânico.

A seguir estão apresentadas as considerações finais dessa etapa:

- O processo de mistura realizado tanto em betoneira quanto em caminhão betoneira indicou trabalhabilidade adequada das misturas para serem produzidas *in situ*. Além disso, os resultados referentes ao controle tecnológico realizado na Calçada 2 atestaram a viabilidade de utilização da mistura RI em termos de resistência à compressão. Entretanto, foi possível observar problemas de segregação da pasta do revestimento em CPCP da Calçada 1 que não havia sido detectada em laboratório nos estudos realizados na mistura Rg, indicando que, apesar de exequível em termos de trabalhabilidade, a mistura necessita de ajuste de dosagem para ser utilizada *in situ*;

- As técnicas empregadas para execução dos revestimentos das calçadas se mostraram parcialmente satisfatórias. Em termos de processos de compactação e acabamento, foi observado que o emprego somente do rolo metálico com rolagem manual não foi suficiente para produzir uma superfície perfeitamente plana na Calçada 1, onde foram observadas pequenas ondulações no revestimento. Já na Calçada 2, essa condição foi contornada com a aplicação da acabadora de pisos para finalização do acabamento logo após as passagens do rolo metálico, que resultou em uma superfície melhor nivelada em comparação à resultante na Calçada 1, inclusive sem gerar problemas de fechamento ou entupimento dos vazios superficiais do CPCP;
- Durante as inspeções visuais realizadas para avaliação da qualidade de superfície da calçada 2, foram observadas que as seções executivas 1,2 e 4 apresentaram qualidade superficial aceitável, sem a ocorrência de perdas importantes de agregado. Já para as seções 3, 5 e 6, foi observada qualidade de superfície inadequada, denotada pela desagregação acentuada dos agregados. Nesse contexto, foi possível observar que a qualidade de superfície do revestimento em CPCP está diretamente relacionada ao tempo de trabalho do CPCP;
- Após análise da qualidade da superfície em relação ao tempo de execução de cada seção da Calçada 2, sugere-se que se mantenha a limitação de 90 minutos para uso da mistura RI, atendendo às sugestões da comunidade internacional (ACI, 2013; BEAN *et al.*, 2015). Caso não seja possível em função de distância elevada entre a usina e o local de implantação, tempos de até 120 minutos poderiam ser considerados, desde que o teor de aditivo retardador de pega seja cuidadosamente reajustado. Nesse mesmo contexto, sugere-se a utilização do cimento tipo CPIII para produção de CPCP, devido às suas características de tempo de pega maior quando comparado ao CPV;
- Com base nos resultados de taxa de infiltração, foi possível observar que houve redução da capacidade permeável ao longo do tempo em ambas as calçadas, sendo a queda mais expressiva observada na Calçada 1. Após análise das porosidades resultantes das amostras extraídas na calçada 1, foi possível

sugerir que a diferença das quedas de permeabilidades entre as Calçadas está relacionada com as características do local de implantação, sendo que na Calçada 1, localizada em um terreno com elevada densidade de vegetação e árvores, a queda na taxa de infiltração foi mais expressiva;

- O modelo gerado para simulação da redução da taxa de infiltração ao longo do tempo resultou em um coeficiente de correlação de 0,72, indicando uma correlação razoável para o conjunto de dados disponível. As comparações referentes aos demais modelos gerados demonstram que as principais variáveis que explicam a redução da taxa de infiltração para as condições de implantação dessa pesquisa são o tempo decorrido desde a instalação da estrutura e a existência ou não de vegetação densa e árvores na área adjacente ao local de implantação. Secundariamente, a espessura da placa de CPCP também parece influenciar na queda da taxa de infiltração, sendo que quanto maior a espessura, mais rápido acontece o *clogging*;
- Nota-se que, apesar da elevada dispersão dos resultados medidos em campo em relação às curvas, o modelo gerado tem condições de representar razoavelmente bem as tendências de redução da capacidade permeável ao longo do tempo para as condições da presente pesquisa. É também coerente considerar que, para pavimentos com revestimento em CPCP executados há mais de 10 anos e que não passem por processo de manutenção, que haja uma tendência de redução da capacidade permeável para valores próximos a 0, assim como representado pelo modelo;
- As deflexões médias em D0 foram 60% mais elevadas na Calçada 1 do que no segmento 1 da Calçada 2, que possuem igual espessura em todas as camadas da estrutura, sendo que a diferença estatística entre as médias das deflexões foi confirmada por meio do teste de hipóteses realizado. Essa diferença está atribuída principalmente às condições de implantação de cada trecho, tipos de compactação empregados no revestimento, existência ou não de manta permeável separadora entre a base e o subleito e condições de contorno;

- Houve redução considerável na capacidade de suporte geral da estrutura da Calçada 2 na condição “saturada” em comparação à condição “seca”, com aumento da deflexão média em D0 de até 51% na condição “saturada”, sendo que as médias das deflexões são estatisticamente diferentes de acordo com o teste de hipóteses realizado. Em D120, no segmento 2 da Calçada 2, o teste de hipóteses indicou que as médias também são estatisticamente diferentes, com valores de até 41% maiores na condição “saturada em relação à condição” seca”;
- Apesar de estatisticamente equivalentes frente ao teste de hipóteses, as deflexões médias medidas na condição “saturada” foram curiosamente menores em relação à condição “seca” no segmento 1 da Calçada 2. Tal ocorrência está provavelmente associada ao excesso de poro-pressão, causado pela saturação do subleito, que pode ter ocorrido durante a aplicação do carregamento dinâmico e existência de solo argiloso, o que tende a reduzir as deformações no local.

5 ETAPA NUMÉRICA – ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS CALÇADAS

O comportamento estrutural dos pavimentos em CPCP ainda não é consenso entre os pesquisadores da área. Apesar de existirem alguns poucos estudos avaliando o comportamento de CPCP em comparação ao concreto convencional por meio de retroanálise de bacias de deflexão (SULEIMAN; GOPALAKRISHNAN; KEVERN, 2011; VANCURA; MACDONALD; KHAZANOVICH, 2011), além do desenvolvimento de modelos preliminares de laboratório de resistência à fadiga de concretos permeáveis (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2017; CHEN *et al.*, 2013; PINDADO; AGUADO; ALEJANDRO, 1999), há ainda muito a se desenvolver nesse meio.

Nesse contexto, a etapa numérica desta pesquisa busca a avaliação do comportamento estrutural de concretos permeáveis para as diferentes espessuras de revestimento empregadas nas pistas experimentais. Além disso, procura entender como se comporta individualmente cada camada da estrutura nas condições “seca” e “saturada”, uma vez que já se comprovou que há um aumento considerável na deflexão máxima quando a estrutura do pavimento está exposta a elevados índices de umidade.

A seguir estão apresentadas metodologia, discussão dos resultados e considerações finais associadas a essa etapa.

5.1 Métodos

Inicialmente, foi realizada uma retroanálise baseada nos resultados de deflexão obtidos em campo durante a etapa 1 dos levantamentos deflectométricos por meio do ensaio FWD, de modo a estimar os parâmetros elásticos do concreto permeável, bem como das demais camadas que compõem o pavimento.

As retroanálises foram realizadas com emprego dos *softwares* EverFE, específico para análise de pavimentos rígidos de concreto convencional, e também do *software* BAKFAA, desenvolvido pela *Federal Aviation Administration* (FAA), que emprega a

Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas (TSCE), normalmente empregado para pavimentos flexíveis. De modo a melhor entender as limitações existentes nos modelos considerados nos *softwares* supracitados para análises em estruturas de concreto permeável, optou-se também por desenvolver uma modelagem auxiliar numérica em 3D empregando-se o *software* comercial ABAQUS.

5.1.1 Retroanálise das bacias de deflexão para a primeira etapa dos levantamentos deflectométricos

O procedimento de retroanálise na área de pavimentação é uma técnica baseada em modelos analíticos ou numéricos empregado para estimar o módulo de elasticidade equivalente das camadas de um determinado pavimento em relação à sua resposta estrutural em termos de deflexões originadas por um carregamento aplicado.

No processo, busca-se o ajuste teórico das bacias de deflexão, obtidas por meio dos levantamentos deflectométricos realizados em campo, com o emprego de *softwares* específicos de análise estrutural. Para realização do ajuste, faz-se necessário a determinação iterativa das bacias de deflexão simuladas por meio da variação dos parâmetros elásticos correspondentes às camadas do pavimento, considerando-se a retroanálise finalizada após atingir um determinado critério de erro máximo, a ser definido de acordo com a necessidade do projeto ou pesquisa.

Para fixação do critério, foi empregado o parâmetro Erro Médio Quadrático Percentual (RMSE) conforme descrito na norma ASTM D5858 (ASTM, 2015b), e representado na Equação 5.1.

$$RMSE = 100 * \left\{ \frac{1}{nd} * \sum_{i=1}^n [(dcalc_i - dcampo_i)/dcampo_i]^2 \right\}^{0,5} \quad (5.1)$$

onde:

- *RMSE*: erro médio quadrático percentual (%);
- *dcalc_i*: deflexão simulada (10⁻² mm);
- *dcampo_i*: deflexão levantada em campo (10⁻² mm);
- *nd*: número de pontos de leitura das deflexões.

A ASTM D5858 sugere que o valor de RMSE deve ser menor que 2%, de modo a validar os resultados da retroanálise realizada. Entretanto, essa norma se refere ao processo de retroanálise específico para pavimentos flexíveis e semirrígidos com revestimentos asfálticos, sendo que o critério de 2% não seria necessariamente mandatário para outros tipos de materiais e estruturas de pavimento, como é o caso dos pavimentos em CPCP, em que os erros podem inclusive ser mais elevados em razão das maiores descontinuidades características dos revestimentos permeáveis de elevada porosidade.

A retroanálise pode ser realizada por diversos métodos, como iterações, equações simultâneas empregando-se equações de regressão não-linear, entre outros (ASTM, 2015b), sendo que a definição do tipo de método a ser empregado para análise estrutural de pavimentos varia de acordo com variados fatores, por exemplo a teoria empregada no desenvolvimento do método, além do tipo de sistema de pavimento a ser analisado.

Segundo Vancura, Macdonald e Khazanovich (2011) o comportamento de pavimentos rígidos com revestimento em concreto convencional é normalmente modelado utilizando-se a teoria de Wastergaard, que tem como base a teoria de placas elásticas de espessura mediana, apoiadas sobre um subleito líquido muito denso que tende a reagir aos esforços aplicados sobre a sua superfície como um conjunto de molas idênticas, sem ocorrência de transmissão de esforços de cisalhamento entre elas, seguindo assim a hipótese de Winkler-Zimmermann, definindo-se o parâmetro “k”, ou seja, “módulo de reação do subleito” (BALBO, 2003). No estudo, os autores sugerem que pavimentos em concreto permeável podem ser analisados de maneira similar aos pavimentos de concreto convencional, baseado em análises estruturais comparativas em termos de deflexão.

Para estimativa inicial dos parâmetros elásticos dos materiais do pavimento, utilizaram-se os estudos desenvolvidos por Hall (1991) e Croveti (1994) com base no conceito de raio de rigidez relativa (l_r) da placa para estimativa preliminar dos módulo de elasticidade (E) e k, conforme detalhado por Balbo (2009) e descrito nas Equações 5.2 e 5.3.

$$l_r = \left[\frac{\ln\left(\frac{36-AREA}{1812,279133}\right)}{-2,55934} \right]^{4,387009} \quad (5.2)$$

$$AREA = 6 * \left(1 + \frac{2d_{30}}{d_0} + \frac{2d_{60}}{d_0} + \frac{d_{90}}{d_0}\right) \quad (5.3)$$

O parâmetro AREA representa a área da bacia de deflexões normalizada pela deflexão máxima (d_0) em relação a uma carga de FWD aplicada em uma placa de diâmetro de 30 cm sobre a estrutura do pavimento, sendo esta carga aplicada na região central da placa. Os demais parâmetros d_{30} , d_{60} e d_{90} se referem às deflexões nas distâncias de 30 cm, 60 cm e 90 cm em relação ao ponto de aplicação da carga, respectivamente.

A partir da determinação de l_r , é possível empregar as equações de Wastergaard para estimativa dos valores k e E do revestimento (CROVETTI, 1994), conforme Equações 5.4 e 5.5.

$$k = \frac{q}{8*d_0*l_r^2} * \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2*v}\right) * \left[\ln\left(\frac{a}{2*l_r}\right) - 0,67278436 \right] * \left(\frac{a}{l_r}\right)^2 \right\} \quad (5.4)$$

$$E = \frac{12*(1-\pi^2)*k*l^4}{h_p^3} \quad (5.5)$$

Onde:

- q : carga aplicada (libras-força);
- a : raio da carga circular aplicada (polegadas);
- v : coeficiente de Poisson;
- h_p : espessura da placa (polegadas);

Na Tabela 5.1 e na Tabela 5.2 estão apresentados os parâmetros calculados para as Calçadas 1 e 2. Cabe destacar que os valores de k aqui determinados estão atribuídos ao topo da camada de base, representando a resposta às deflexões de ambas as camadas de base e subleito das estruturas analisadas.

Tabela 5.1: Resultados estimados de E e k para a Calçada 1

Ensaio	Carga (Kgf)	AREA	I (pol)	k (MPa/m)	E (MPa)
C1-2A	4.099	30,000	33,814	5	28.791
C1-2B	4.140	29,964	33,659	5	31.410
C1-3A	4.109	27,381	25,365	9	18.358
C1-3B	4.140	27,449	25,531	10	21.067
C1-4A	4.058	25,195	20,989	10	9.013
C1-4B	4.120	25,360	21,267	11	10.760
C1-7A	4.058	26,206	22,812	15	18.860
C1-7B	4.109	26,046	22,503	17	20.938

Tabela 5.2: Resultados estimados de E e k para a Calçada 2

Ensaio	Carga (Kgf)	AREA	I (pol)	k (MPa/m)	E (MPa)
C2-2A	4.068	20,909	15,612	35	9.927
C2-2B	4.148	20,512	15,245	42	10.695
C2-3A	4.086	21,267	15,959	38	11.839
C2-3B	4.146	20,844	15,552	44	12.349
C2-4A	4.049	20,102	14,881	39	9.065
C2-4B	4.136	19,568	14,431	46	9.457
C2-5A	4.079	21,735	16,434	34	11.945
C2-5B	4.149	21,356	16,047	39	12.341
C2-6A	4.044	21,490	16,182	32	10.439
C2-6B	4.132	21,179	15,873	36	10.884
C2-7A	4.036	21,741	16,441	28	9.851
C2-7B	4.080	21,418	16,110	31	9.965
C2-8A	4.120	25,694	21,851	26	27.763
C2-8B	4.177	25,276	21,123	29	27.684
C2-9A	4.122	23,082	17,962	31	4.573
C2-9B	4.172	22,715	17,520	35	4.612
C2-10A	4.176	26,022	22,457	33	11.887
C2-10B	4.197	25,879	22,190	36	12.442
C2-11A	4.180	26,465	23,332	35	14.650
C2-11B	4.212	26,203	22,807	39	14.824
C2-12A	4.195	25,000	20,669	44	11.189
C2-12B	4.213	24,795	20,343	47	11.256
C2-13A	4.145	25,423	21,375	34	10.029
C2-13B	4.167	25,134	20,887	37	9.983
C2-14A	4.069	24,738	20,255	28	6.630
C2-14B	4.100	24,689	20,178	28	6.599
C2-15A	4.090	27,793	26,400	18	12.465
C2-15B	4.148	27,502	25,661	20	12.429

5.1.1.1 EverFE

Inicialmente para a realização das retroanálises foi empregado o Método dos Elementos Finitos (MEF), que permite avaliar os efeitos de cargas de veículos em estruturas de pavimentos em termos de tensões, deformações e deflexões. Baseado na comparação entre os comportamentos estruturais dos pavimentos de CPCP e convencionais discutidas anteriormente, o programa utilizado foi o EverFE, originalmente desenvolvido para análise estrutural de concretos convencionais em placas. Esse programa foi desenvolvido na Universidade de Maine – EUA, sendo um *software* livre (DAVIDS; TURKIYYAH; MAHONEY, 1998).

O EverFE, primeiramente apresentado em 1998 e hoje em sua versão 2.25, permite a realização de simulações numéricas por elementos finitos de provas de carga, com a possibilidade de simular testes reais em pavimentos de concreto, baseado no conhecimento da geometria da estrutura a ser analisada, bem como no módulo de elasticidade do concreto (E), coeficiente de Poisson e no módulo de reação do subleito (k).

Apesar de o programa ter sido desenvolvido especificamente para pavimentos de concreto simples, é possível simular outros tipos de estruturas em placas, desde que conhecidas suas configurações geométricas, tendo sido empregado para análise estrutural em outros tipos de estruturas, como pavimentos de concreto continuamente armados (SALLES, 2013) e pavimentos permeáveis de CPCP moldados *in loco* (BATEZINI, 2012; CARGNIN *et al.*, 2015).

Para a simulação do pavimento de CPCP no EverFE, primeiramente, foram lançadas as propriedades geométricas das placas. Para a Calçada 1, a análise foi realizada considerando-se a placa de 1,00 m x 8,65 m como uma placa única. Para a Calçada 2, cada segmento foi modelado em separado, desconsiderando-se a existência das guias de concreto posicionadas adjacentes às placas. No caso da Calçada 2, sua geometria foi simulada com extensão máxima de 5 metros para cada lado do ponto de aplicação da carga, de modo a reduzir o tempo de análise do *software*.

O comprimento mínimo da placa na Calçada 2 e a densidade da malha de elementos finitos empregada nas retroanálises de ambas as calçadas foram determinados por meio da realização de diversas análises preliminares, observando-se a variação das deflexões resultantes em função da variação do comprimento da placa e da densidade da malha de elementos finitos. A aceitação do comprimento mínimo e da densidade mínima da malha ocorreu no momento em que as deflexões resultantes não sofreram mais variações significantes, mediante a alteração destes parâmetros.

O coeficiente de Poisson foi fixado em 0,22 de acordo com estudos anteriores em concretos permeáveis com porosidades semelhantes às aquelas características do CPCP utilizado como revestimento das estruturas analisadas (GOEDE, 2009; GOEDE; HASELBACH, 2012). Já para a massa específica foi empregado o valor de 1.850 kg/m^3 , dentro da faixa de valores dos resultados obtidos na presente pesquisa em laboratório. O coeficiente de expansão térmica foi mantido de acordo com o *default* do software, visto que não foram considerados gradientes térmicos nas análises. Nas Figuras 5.1 a 5.4 é apresentado o exemplo de simulação do ponto C2-2A no EverFE.

Figura 5.1: Simulação da geometria no referente ao ensaio C2-2A

Figura 5.2: Entrada dos parâmetros referente ao ensaio C2-2A

Figura 5.3: Simulação do carregamento do ensaio C2-2A

Figura 5.4: Malha de elementos considerada para o ensaio C2-2A

Com base em valores aproximados resultantes das estimativas de E e k expostos nas Tabelas 5.1 e 5.2, deu-se início ao procedimento de retroanálise no EverFE, considerando a placa de CPCP, definida em termos de comportamento estrutural por E e pelo coeficiente de Poisson, diretamente apoiada sobre a fundação de Winkler, definida por sua vez pelo valor de k , que nesse caso representa a interação entre a base e o subleito da estrutura dos pavimentos.

Sabendo-se que o aumento dos valores de E e k geram um acréscimo da rigidez da estrutura como um todo (BALBO, 2007), foi possível, a partir da primeira análise estrutural realizada, observar a necessidade de aumento ou redução desses parâmetros em função dos resultados das deflexões, buscando-se sempre a redução do RMSE.

Na Tabela 5.3 e na Figura 5.5 estão exemplificados respectivamente, o processo iterativo de determinação das retroanálises realizadas para cada ponto, e o gráfico de ajuste das bacias de deflexão simuladas.

Tabela 5.3: Exemplo do procedimento de retroanálise no EverFE para o ensaio C2-2A

Bacia Tentativa	E (MPa)	k (MPa/m)	0	20	30	45	60	90	120	Erro Total (%)	RMSE (%)
			85,4	72,8	59,8	48,3	36,4	19,8	11,5		
C2-2A1	10.500	44,0	89,0	77,7	68,4	53,5	40,0	19,7	8,5	72,58	12,90
		Erro	4,2%	6,7%	14,4%	10,8%	9,9%	0,5%	26,1%		
C2-2A2	12.500	44,0	83,3	73,4	65,2	52,0	39,6	20,2	9,4	49,05	8,96
		Erro	2,5%	0,8%	9,0%	7,7%	8,8%	2,0%	18,3%		
C2-2A3	12.500	50,0	77,0	67,3	59,4	46,7	35,1	17,5	7,7	69,60	14,17
		Erro	9,8%	7,6%	0,7%	3,3%	3,6%	11,6%	33,0%		
C2-2A4	12.500	40,0	88,4	78,3	69,9	56,2	43,3	23,0	10,9	84,65	13,47
		Erro	3,5%	7,6%	16,9%	16,4%	19,0%	16,2%	5,2%		
C2-2A5	13.500	44,0	5,3%	1,6%	6,9%	6,2%	8,2%	5,1%	14,8%	48,06	7,82
		Erro	81,0	71,2	63,1	50,1	38,0	19,4	8,8		
C2-2A6	12.500	46,0	5,2%	2,2%	5,5%	3,7%	4,4%	2,0%	23,5%	46,49	9,64
		Erro	84,0	73,2	64,4	50,3	37,4	18,3	7,9		
C2-2A7	11.000	47,0	1,6%	0,5%	7,7%	4,1%	2,7%	7,6%	31,3%	55,65	12,67
		Erro	5,3%	1,6%	6,9%	6,2%	8,2%	5,1%	14,8%		

Foi observado claramente durante o ajuste das bacias de deflexão que o valor de k possui maior influência nas deflexões mais afastadas do ponto de aplicação da carga, ou seja, para os geofones posicionados a 60 cm, 90 cm e 120 cm do ponto de aplicação. Já para os LVDTs mais próximos ao ponto de aplicação, observou-se que a variação do módulo de elasticidade do material de revestimento possui maior influência nas deflexões. Tais verificações, que já foram discutidas na análise dos resultados do Capítulo 4 e foram também observadas em diversos outros estudos (BALBO, 2007; SALLES, 2013; SULEIMAN; GOPALAKRISHNAN; KEVERN, 2011; VANCURA; MACDONALD; KHAZANOVICH, 2011), auxiliaram na realização das demais retroanálises.

No caso do exemplo apresentado, observa-se que a tentativa número 5, que representa o par de valores de E e k de 13.500 MPa e 44 MPa/m, respectivamente, resultou em um valor de RMSE igual a 7,82%, ou seja, o menor dentre as sete tentativas realizadas, sendo esta então aceita para representar os parâmetros da estrutura referentes às deflexões de campo obtidas no ponto C2-2A.

Figura 5.5: Aproximação das bacias de deflexão do EverFE no ponto C2-2A

Cabe ressaltar que o valor máximo de RMSE especificado pela ASTM D5858 (ASTM, 2015b) de 2% não foi considerado como limitante para a validação das retroanálises, dada a provável ocorrência de descontinuidades importantes na estrutura do pavimento permeável, diferentemente do que normalmente ocorre em pavimentos asfálticos, o que justifica a aceitação de valores mais elevados de RMSE.

5.1.1.2 BAKFAA

Com base nos resultados das deflexões obtidos durante os levantamentos de FWD em campo, observou-se que os valores das deflexões resultaram de 3 a 7 vezes maiores, aproximadamente, que aqueles observados normalmente em pavimentos rígidos de concreto simples, que normalmente não ultrapassam valores de 20×10^{-2} mm nas primeiras idades de uso. Nesse contexto, aparentemente as deflexões obtidas se assemelham mais às deflexões características de pavimentos asfálticos semirrígidos e flexíveis, para os quais as deflexões variam normalmente entre 45×10^{-2} mm e 100×10^{-2} mm, dependendo da idade da estrutura.

Essa diferença em termos de comportamento estrutural das calçadas executadas nesta pesquisa frente aos pavimentos convencionais de concreto está relacionada à rigidez da camada de revestimento, denotada especialmente pelo módulo de elasticidade reduzido do CPCP, as pequenas espessuras utilizadas, além da capacidade de suporte limitada da base e do subleito, que não foram tratadas nem compactadas para a implantação das calçadas.

Com a finalidade de avaliar a possibilidade de diferentes tipos de comportamento para estruturas de concretos permeáveis de espessura delgada, optou-se por realizar também retroanálises empregando-se o *software* BAKFAA, desenvolvido pela *Federal Aviation Administration* (FAA), que utiliza a Teoria de Sistemas de Camadas Elásticas (TSCE), normalmente empregado para retroanálise de estruturas de pavimentos asfálticos (BALBO, 2007).

Para realização das retroanálises no BAKFAA foi necessário o emprego dos parâmetros elásticos das três camadas constituintes do pavimento bem como as suas espessuras, além dos resultados das deflexões medidas em campo e os pontos de leitura das deflexões.

Para o caso da camada de revestimento em concreto permeável, os valores iniciais de E foram considerados de acordo com os resultados apresentados na Tabela 5.1 e na Tabela 5.2 e o coeficiente de Poisson igual a 0,22 (GOEDE, 2009).

Para o caso da base em material reciclado Li *et al.* (2014) observaram valores variando de 20 MPa a 120 MPa em retroanálises realizadas em pavimentos em blocos intertravados com base em material reciclado com características granulométricas semelhantes às empregadas na presente pesquisa. Considerando que no estudo citado os autores empregaram compactação para finalização da camada de base, diferentemente da concepção utilizada no presente estudo, sem compactação, optou-se por considerar o valor de E igual a 20 MPa para a base. Para o coeficiente de Poisson, foi estimado o valor de 0,40, compatível com valores empregados na prática de projetos para bases granulares abertas.

De acordo com Ono (2018), que realizou estudos nos solos localizados no *campus* da USP, o solo local é do tipo laterítico argiloso, com módulos de resiliência variando de 120 MPa a 190 MPa, quando devidamente compactados, dependendo do nível das tensões confinantes. Entretanto, assumindo-se que no presente estudo não foi realizado nenhum procedimento de compactação no solo do subleito, optou-se por adotar um módulo de resiliência de 80 MPa para o subleito. Para o coeficiente de Poisson foi empregado o valor de 0,45, também compatível na prática para solos lateríticos argilosos.

Foram também utilizados a carga aplicada e o raio do prato de aplicação da carga. Não foi considerada aderência entre as camadas do pavimento por se tratar de base granular, conforme definido pelo *Interface Parameter* igual a 0,0 no *software*.

Após definição de todos os parâmetros, o *software* realiza a alteração do módulo de elasticidade de todas as camadas analisadas iterativamente, de modo a ajustar a bacia de deflexões, baseado em uma tolerância fixada de iterações. Entretanto, para viabilizar a comparação entre os resultados obtidos nos diferentes *softwares* empregados nessa pesquisa, optou-se por utilizar o mesmo critério do RMSE para avaliação da qualidade da retroanálise, conforme já definido anteriormente.

Na Figura 5.6 está apresentada a tela de operações do BAKFAA para a retroanálise realizada no ensaio C2-2A.

Figura 5.6: Retroanálise das bacias de deflexão no BAKFAA no ensaio C2-2A

Na Tabela 5.4 e na Figura 5.7 estão apresentados os resultados da retroanálise o ajuste da bacia de deflexões, respectivamente.

Tabela 5.4: Exemplo do procedimento de retroanálise no BAKFAA para o ensaio C2-2A

Camada	E (MPa)	Parâmetros	0	20	30	45	60	90	120	Erro (%)	RMSE (%)
			85,4	72,8	59,8	48,3	36,4	19,8	11,5		
Revestimento	7.764	Deflexão (10^{-2} mm)	84,9	72,3	62,1	47,6	35,5	19,7	12,0	13,81	2,48
Base	19	Erro	0,6%	0,7%	3,8%	1,5%	2,4%	0,3%	4,4%		
Subleito	79										

Figura 5.7: Aproximação das bacias de deflexão do BAKFAA no ensaio C2-2A

5.1.1.3 ABAQUS

Ambos os métodos de análise *2D* e *3D* podem ser aplicados para determinar as respostas estruturais de pavimentos frente a carregamentos. Apesar da possibilidade

de se empregar modelos axissimétricos em 2D no ABAQUS, este tipo somente é adequado para a análise de carregamentos pontuais, diferentemente da modelagem em 3D, que possui a capacidade de avaliar a não uniformidade na pressão de contato pneu-pavimento, além da utilização de carregamentos simultâneos em diversos pontos, simulando de maneira mais adequada a aplicação de esforços dos eixos dos veículos (RAHMAN; MAHMUD; AHSAN, 2011). Dessa maneira, optou-se por realizar a modelagem considerando um modelo 3D.

Para realização da modelagem, foram consideradas as mesmas características geométricas já descritas nas retroanálises apresentadas anteriormente. Na Figura 5.8 está apresentado o modelo criado referente à calçada 2 considerando o carregamento do ensaio C2-11B. Como pode ser observado, somente foi modelada a placa apoiada diretamente sobre a fundação de Winkler definida por k , do mesmo modo que foi considerado nas análises realizadas pelo EverFE.

Figura 5.8: Modelo 3D para análise no ABAQUS

Apesar de existirem diversos tipos de elementos sólidos disponíveis na biblioteca do ABAQUS, optou-se para essa modelagem específica por utilizar um elemento quadrático de 8 nós com integração linear reduzida (C3D8R), uma vez que, além de apresentar resultados de deflexão e tensão comparáveis com os resultados do EverFE, este tipo de elemento já foi empregado em diversos estudos para outros tipos

de pavimentos, apresentando resultados satisfatórios (GAEDICK; ROESLER, 2009; RAHMAN; MAHMUD; AHSAN, 2011; SALEHABADI, 2012).

Ainda em relação à malha de elementos finitos, foi realizado um estudo paramétrico considerando a influência da densidade da malha nas deflexões e também no tempo necessário para rodar cada modelo. Na Figura 5.9 e na Figura 5.10 estão apresentados os resultados destas análises para 3 tipos de malhas diferentes.

Figura 5.9: Variação do tempo de análise em função da densidade da malha

Figura 5.10: Variação das deflexões em função da densidade da malha

Em análise aos resultados, observou-se que as deflexões convergiram para uma densidade de malha de 5,00 cm x 5,00 cm x 3,33 cm, que foi então empregada para todas as análises posteriores.

5.1.2 Retroanálise das bacias de deflexão para as condições “seca” e “saturada”

Para as retroanálises das bacias de deflexão nas condições “seca” e “saturada” foi empregado somente o *software* BAKFAA, em função de que, além de ser mais prático, apresentou resultados minimamente aceitáveis na primeira etapa de retroanálises.

O processo para determinação dos módulos nesta segunda etapa das retroanálises seguiu exatamente o mesmo procedimento descrito no item 5.1.1, com exceção da inclusão de cargas de ensaios de aproximadamente 6.600 kgf, além da carga padrão de 4.100 kgf. Importante ressaltar que os pontos analisados foram exatamente os mesmos nas condições “seca” e “saturada”, de modo a avaliar exclusivamente o efeito da presença de elevados teores de umidade no comportamento estrutural da Calçada 2.

5.1.3 Estimativa da redução da vida de fadiga de estruturas em CPCP em função da ocorrência da saturação

De modo a quantificar o problema da saturação e indicar a sua importância para fins de dimensionamento de estruturas de CPCP, foi realizada uma análise da variação das tensões na fibra inferior da camada de CPCP em função da redução da capacidade de suporte da infraestrutura (base e subleito).

Para tanto, foram realizadas análises paramétricas empregando-se o *software* EverFE. Para geometria do pavimento, foi considerada uma placa com largura de 3,5 m e extensão de 10 m, com espessuras de revestimento variando de 10 cm a 30 cm, apoiada sobre o conjunto de base e subleito, definidos pelo k.

Para aplicação do carregamento nas análises foi considerado um eixo simples de roda simples com cargas totais de 22 kN e 42 kN, representando tráfego veículos leve e pesado, respectivamente, com pressão de contato pneu-pavimento de 0,7 MPa. O eixo simulado foi posicionado na borda transversal da placa, que representa a posição crítica em termos de tensões de tração na fibra inferior da camada de revestimento.

Para maior detalhamento sobre a geometria do eixo considerado no carregamento, ver Batezini (2012).

Na Tabela 5.5 estão apresentados os parâmetros físicos, elásticos e de resistência do CPCP, além do valor de k do conjunto base+subleito. Todos os parâmetros foram arbitrados com base nos resultados das retroanálises realizadas, bem como da etapa laboratorial desenvolvida nesta pesquisa.

Tabela 5.5: Parâmetros das camadas para a análise mecanicista

Camada	Parâmetros	Valores
Revestimento	Módulo de elasticidade (MPa)	14.500
	Coeficiente de Poisson	0,22
	*Módulo de ruptura (MR) – MPa	1,49
	*Massa específica – kgf/m ³	1.819
Base + Subleito	Coeficiente de reação do subleito para a condição “seca” - k (MPa/m)	50

* Média para mistura Rg em laboratório.

Novas retroanálises considerando somente os resultados de deflexão D0 foram realizadas no EverFE, de modo a determinar a porcentagem de redução k em função da presença da água. Foram utilizados os valores médios de deflexão nas condições “seca” e “saturada” determinados nos segmentos 1 e 2 da Calçada 2. Os resultados desta retroanálise estão apresentados na Tabela 5.6, que indica uma porcentagem de redução média no valor de k de aproximadamente 55% quando a estrutura do pavimento se encontra na condição “saturada”.

Tabela 5.6: Resultados da Retroanálise do valor de k
(Aceitação da retroanálise se deu em função da proximidade em as deflexões reais e aquelas retroanalizadas)

Segmento da Calçada 2	Deflexão Média Real (10 ⁻² mm)		k Retroanalizado (MPa/m)		Deflexão Retroanalizada (10 ⁻² mm)	
	Seca	Saturada	Seca	Saturada	Seca	Saturada
1	60,8	91,6	60	29	61,4	92,5
2	44,7	62	46	27	44,8	61,4

Com base nos resultados obtidos, optou-se por realizar as análises também para valores de k de 35 MPa/m e 20 MPa/m, simulando-se assim uma condição intermediária de umidade e a condição “saturada”, respectivamente. O valor proposto na Tabela 5.5 de 50 MPa/m representa a condição “seca”.

Atualmente não existe nenhum modelo de fadiga com calibração campo-laboratório que tenha sido desenvolvido ou validado especificamente para concretos permeáveis. Dessa maneira, buscando-se avaliar a variação do comportamento a longo prazo da camada de CPCP para as condições “seca” e “saturada”, optou-se por empregar a equação de fadiga constante no *software* PerviousPave da ACPA, apresentada na Equação 5.6, que foi originalmente desenvolvida para avaliação de concretos convencionais para pavimento e utilizada também no *software* StreetPave (TITUS-GLOVER *et al.*, 2005), igualmente propriedade da ACPA.

$$\log(N_f) = \left[\frac{-RT^{-10.24} \cdot \log(1-P_r)}{0.0112} \right]^{0.217} \quad (5.6)$$

Onde:

- N_f número de repetições de carga admissível;
- RT : relação entre a tensão de tração atuante na fibra inferior da camada de CPCP e a resistência à tração na flexão ou módulo de ruptura do material;
- P_r : probabilidade de ruptura da estrutura, que é especificada em 50% de acordo com a prática americana.

Ressalta-se que a equação utilizada não representa o comportamento de concretos permeáveis, mas sim de concretos convencionais. Mesmo assim, considerou-se válido o seu emprego no âmbito acadêmico com a finalidade única e exclusiva de comparar o comportamento de uma placa apoiada em camadas submetidas a diferentes condições de presença ou não de água na estrutura do pavimento analisado. Cabe reforçar que estas análises propostas não devem ser consideradas como indicação ou especificação para projeto e/ou dimensionamento de estruturas de pavimentos em CPCP, por não se tratar de um modelo validado ou calibrado para este tipo de material. Entretanto, o padrão de análise aqui formulado pode ser reutilizado quando algum modelo calibrado para CPCP esteja disponível.

5.2 Resultados da etapa numérica

5.2.1 Resultados das retroanálises das bacias de deflexão para a primeira etapa dos levantamentos deflectométricos

Nas Figuras 5.11 a 5.15 estão apresentados os gráficos *boxplot* referente aos resultados das retroanálises da primeira etapa. No Apêndice H estão apresentados os resultados individuais para cada retroanálise realizada.

Figura 5.11: Comparação entre os resultados de E

Figura 5.12: Comparação entre os resultados de k

Figura 5.13: Comparação entre os resultados de RMSE

Figura 5.14: Comparação entre os resultados de E da base - BAKFAA

Figura 5.15: Comparação entre os resultados de E do subleito - BAKFAA

Na Tabela 5.7 está apresentado o resumo dos valores máximos e mínimos obtidos referentes a cada parâmetro e na Tabela 5.8 estão apresentados os resultados da análise estatística.

Tabela 5.7: Valores máximos e mínimos dos resultados das retroanálises

Software	Parâmetro Analisado	Calçada 1	Calçada 2 - Segmento 1	Calçada 2 - Segmento 2
EverFE	ERev (MPa)	17.000 a 35.500	12.000 a 17.000	6.000 a 20.000
	k (MPa/m)	19 a 34	39 a 54	40 a 74
	RMSE (%)	1,71 a 5,73	6,1 a 12,38	1,51 a 4,51
BAKFAA	ERev. (MPa)	8.897 a 21.391	6.898 a 9.982	4.449 a 15.535
	EBase (MPa)	2 a 3	5 a 31	5 a 18
	ESubl. (MPa)	15 a 63	79 a 99	76 a 197
	RMSE (%)	1,37 a 2,90	1,50 a 3,85	0,80 a 2,10
ABAQUS	ERev (MPa)	17.000 a 50.000	14.000 a 27.000	6.000 a 20.000
	k (MPa/m)	16 a 34	36 a 56	38 a 72
	RMSE (%)	0,93 a 3,31	5,04 a 10,27	1,27 a 4,39

Tabela 5.8: Análise estatística dos resultados das retroanálises

Software	Parâmetro Analisado	Parâmetros Estatísticos	Calçada 1	Calçada 2 - Segmento 1	Calçada 2 - Segmento 2
EverFE	ERev (MPa)	μ (10^{-2} mm)	28.125	14.500	14.214
		CV	25%	12%	32%
	k (MPa/m)	μ (10^{-2} mm)	25	47	57
		CV	22%	10%	21%
	RMSE (%)	μ (10^{-2} mm)	3,83	8,28	2,96
		CV	38%	24%	29%
BAKFAA	ERev. (MPa)	μ (10^{-2} mm)	16.734	8.596	10.482
		CV	28%	11%	35%
	EBase (MPa)	μ (10^{-2} mm)	3	16	11
		CV	22%	51%	41%
	ESubl. (MPa)	μ (10^{-2} mm)	38	88	124
		CV	51%	51%	35%
ABAQUS	ERev (MPa)	μ (10^{-2} mm)	34.500	18.167	14.214
		CV	34%	13%	13%
	k (MPa/m)	μ (10^{-2} mm)	24	48	55
		CV	28%	29%	50%
	RMSE (%)	μ (10^{-2} mm)	2,09	7,14	2,76
		CV	44%	22%	35%

Os gráficos *boxplot* foram gerados considerando a remoção dos resultados destacados em vermelho no Apêndice H. Já os resultados apresentados na Tabela 5.7 e na Tabela 5.8 foram determinados com a remoção dos resultados destacados em vermelho no Apêndice H e também dos *outliers* observados nos gráficos *boxplot*.

Vale ressaltar que, apesar da limitação de 2% nos valores de RMSE para validação das retroanálises (ASTM, 2015b), a normativa limitante se refere a estruturas de pavimentos asfálticos que possuem diferença considerável de comportamento estrutural em comparação a pavimentos com revestimentos em concreto permeável, que por sua vez podem apresentar maiores descontinuidades por conta da elevada porosidade do revestimento. Dessa maneira, as retroanálises realizadas no presente estudo não foram invalidadas para os casos de RMSE elevados.

A seguir está apresentada a discussão sobre os resultados obtidos nas retroanálises para cada parâmetro de interesse.

Módulo de elasticidade (E) do revestimento

Os resultados dos módulos de elasticidade obtidos no EverFE apresentaram uma variação de 17.000 MPa a 35.500 MPa para a Calçada 1, 12.000 MPa a 17.000 MPa para o segmento 1 da Calçada 2 e de 6.000 MPa a 20.000 MPa para o segmento 2 da Calçada 2, com as médias de 28.125 MPa, 14.500 MPa e 14.214 MPa e coeficientes de variação de 25%, 12% e 32%, respectivamente. Resultados semelhantes foram observados também nas retroanálises realizadas pelo ABAQUS, que resultou em médias variando de 34.500 MPa, 18.167 MPa e 14.214 MPa para os respectivos segmentos.

Estes resultados, com exceção ao valor médio obtido na Calçada 1, são relativamente comparáveis aos resultados médios do módulo de elasticidade estático de 16.000 MPa determinados por meio da analogia de Mohr em laboratório por Batezini (2012), que estudou concretos permeáveis com os mesmos tipos de materiais e com porosidades muito semelhantes às estudadas na presente pesquisa.

Na comparação dos valores de E do CPCP determinados pelos três *softwares*, nota-se que os valores médios obtidos pelo EverFE e no ABAQUS foram sempre mais elevados em comparação aos obtidos no BAKFAA, com uma diferença mais significativa no caso das estruturas contendo espessura do revestimento em concreto permeável de 10 cm, em que os valores médios resultantes no EverFE e no ABAQUS excederam os valores médios resultantes no BAKFAA em aproximadamente 1,7 vezes. No segmento 2 da Calçada 2, com espessura do revestimento de 15 cm, o módulo de elasticidade médio obtido no EverFE e ABAQUS excedeu àquele obtido no BAKFAA por um fator de 1,35. Importante observar também que em geral, os ajustes das curvas teóricas definidas pelos valores de RMSE se mostram consideravelmente melhores nas retroanálises realizadas por meio do BAKFAA.

Suleiman, Gopalakrishnan e Kevern (2011) apresentaram resultados de módulos de elasticidade retroanalizados variando entre 6.500 MPa e 10.000 MPa com média de 8.100 MPa, para CPCP com porosidades próximas àquelas empregadas na presente pesquisa em estruturas com revestimento de 15 cm de espessura. Estes resultados

estão mais próximos daqueles obtidos por meio das análises realizadas no BAKFAA para ambos os segmentos da Calçada 2.

Já Vancura, Macdonald e Khazanovich (2011) obtiveram módulos de elasticidade retroanalisados variando de 9.500 MPa a 48.436 MPa com média de 18.000 MPa, referentes a concretos permeáveis com porosidades variando entre 15% e 18% e revestimentos com 18 cm de espessura. O resultado médio nesse caso é mais próximo dos valores médios obtidos para ambos os segmentos da Calçada 2 pelo EverFE e ABAQUS.

Com base nas análises apresentadas acima e na variabilidade dos resultados observados nessa pesquisa e também nos demais estudos citados, não se vê a necessidade de descartar o emprego de nenhum dos *softwares* utilizados. No caso do EverFE e do ABAQUS, que utilizam o método dos elementos finitos como ferramenta de cálculo, os resultados demonstram que não houve diferença importante no que diz respeito às modelagens empregadas referentes ao E do revestimento. Nesse contexto, sugere-se que, assumindo uma metodologia de análise elástica linear, o EverFE seja usado em futuras análises, dada a maior complexidade e tempo de cálculo referente à modelagem no ABAQUS.

Por outro lado, no caso do BAKFAA, embora os resultados sejam menores que aqueles observados nos demais *softwares* e também com relação aos valores de E de laboratório (BATEZINI, 2012), os valores de RMSE mais baixos quando comparados com o método dos elementos finitos indicam um melhor ajuste das bacias de deflexão teóricas frente às bacias reais. Além disso, os valores resultantes em estudo comparativo (SULEIMAN; GOPALAKRISHNAN; KEVERN, 2011) demonstram valores de E retroanalisados semelhantes aos obtidos empregando-se o BAKFAA, para espessuras de até 15 cm.

Em outro contexto, o método de aproximação das curvas teóricas empregadas pelo BAKFAA é de maior simplicidade quando comparado aos demais *softwares*, o que o torna mais atrativo, dependendo da quantidade de retroanálises a serem realizadas.

Com base nessas considerações, considera-se viável a aplicação deste *software* para realização de retroanálises em pavimentos de CPCP com condições de materiais e de implantação semelhantes às empregadas nessa pesquisa.

Outro ponto de destaque nos resultados, diz respeito aos elevados valores de E resultantes do revestimento da Calçada 1. Essa ocorrência tem relação provável ao enrijecimento da porção superior da camada de base em RCD, que ocorreu em função da segregação da pasta observada nas amostras extraídas da Calçada 1 e apresentados no Capítulo 4.

Esse enrijecimento resulta na formação de um material com rigidez intermediária entre o revestimento de CPCP e a base granular de RCD, em função da presença da pasta segregada. Dessa maneira, é possível assumir que a espessura de 10 cm de revestimento empregada nas retroanálises da Calçada 1 estava subestimada em termos de proporcionalidade estrutural entre os diferentes tipos de materiais, o que pode ter resultado em uma elevação no valor de E retroanalísado, de modo a suprir a não consideração desse material com rigidez intermediária no modelo.

Há também que se comentar as respostas estruturais dos pavimentos frente às deflexões geradas pela aplicação de carregamentos dinâmicos, que não necessariamente representam somente as características elásticas de cada camada ou material individualmente. Essa resposta estrutural está também atrelada ao conjunto estrutural como um todo, podendo sofrer alterações significativas em função de diversos fatores, como o grau de compactação das camadas de base e subleito, ou ainda da condição de contorno das estruturas analisadas. Especialmente no caso da Calçada 1, a baixa capacidade de suporte do conjunto base+subleito pode ter resultado em uma maior mobilização das tensões e deformações na camada de revestimento, o que pode também ter auxiliado no aumento dos valores de módulo de elasticidade retroanalísados do CPCP.

Módulo de reação do subleito (k) e módulos de elasticidade (E) da base e subleito

No EverFE os valores médios de k do subleito resultaram em 25 MPa/m na Calçada 1, e 47 MPa/m e 57 MPa/m nos segmentos 1 e 2 da Calçada 2, respectivamente. Os

valores médios resultantes no ABAQUS foram muito próximos aos do EverFE para os respectivos segmentos, de 24 MPa/m, 48 MPa/m e 55 MPa/m.

No BAKFAA, os módulos de elasticidade médios resultantes da base foram de 3 MPa para a Calçada 1 e 16 MPa e 11 MPa para os segmentos 1 e 2 da Calçada 2, respectivamente. Os módulos de elasticidade médios do subleito foram de 38 MPa para a Calçada 1 e 88 MPa e 125 MPa para os segmentos 1 e 2 da Calçada 2, respectivamente.

Os resultados de k obtidos nas retroanálises da Calçada 1 são consideravelmente menores que aqueles observados na Calçada 2. O mesmo ocorre ao se analisar os resultados de E , tanto da base quanto do subleito. Estes resultados corroboram a constatação feita na análise das bacias de deflexão apresentadas no Capítulo 4 de que o conjunto das camadas da infraestrutura da Calçada 1, que é definido pela base e subleito, apesar de possuir os mesmos tipos de materiais, espessuras e critérios construtivos, possui menor capacidade de suporte quando comparado a ambos os segmentos da Calçada 2.

Esta diferença entre os resultados provavelmente resultou das diferentes condições de contorno entre as estruturas, uma vez que foram implantadas as guias pré-moldadas na Calçada 2, que naturalmente auxiliam no confinamento da camada de base. Além disso, a presença de elemento de separação física entre as camadas de base e subleito pode também ter colaborado com a capacidade de suporte mais elevada dessas camadas na Calçada 2.

Ono (2018) realizou retroanálises empregando o *software* BAKFAA em um pavimento de blocos intertravados de concreto sobre o mesmo material de base e em local próximo ao dessa pesquisa, também no *campus* da USP. O autor obteve módulos de elasticidade médios retroanalizados variando entre 55 MPa e 101 MPa para a base e entre 166 MPa e 236 MPa para o subleito. Observa-se que para ambos os casos, os resultados médios foram mais elevados que aqueles obtidos no presente estudo, o que é justificável, uma vez que, diferentemente do presente estudo, o autor empregou compactação em ambas as camadas por meio de placa vibratória autopropulsora, que resultou no aumento da rigidez dessas camadas.

Vancura, Macdonald e Khazanovich (2011) obtiveram valores de k retroanalizados variando de 25 MPa/m a 70 MPa/m, aproximadamente para o conjunto base+ subleito. Estes resultados podem ser considerados próximos aos obtidos na presente pesquisa.

5.2.2 Resultados das retroanálises das bacias de deflexão para as condições “seca” e “saturada” na Calçada 2

Na Figura 5.16 e na Figura 5.17 estão apresentados os comparativos entre os valores médios de E para cada condição de ensaio realizado, que foram retroanalizados por meio do *software* BAKFAA.

Figura 5.16: Comparação entre os resultados médios de E do revestimento nas condições “seca” e “saturada”

Figura 5.17: Comparação entre os resultados médios de E da base nas condições “seca” e “saturada”

Os resultados de cada bacia retroanalizada nesta segunda etapa, inclusive da análise estatística dos resultados, estão apresentados no Apêndice I.

Ao avaliar os resultados do revestimento e da base, observa-se que, para 100% dos casos, houve redução dos módulos na condição “saturada” em comparação à condição “seca”.

No caso do CPCP, houve uma redução média de E na ordem de 20%, que deve estar associada, de maneira mais direta, ao próprio processo de retroanálise e ajuste das curvas em função de um carregamento dinâmico do que com a variação efetiva real do módulo de elasticidade do CPCP. Sobre a base, a variação do E retroanalizado foi mais expressiva, atingindo valores até 70% menores na condição “saturada”, como é o caso do segmento 1 com carregamento de 6.600 kgf. Essa redução expressiva está diretamente ligada à ocorrência da lubrificação das partículas da base por conta da presença da água, reduzindo-se consideravelmente a sua capacidade de suporte.

Nota-se também que as reduções de E da base são mais acentuadas para o segmento 1 em comparação ao segmento 2 da calçada 2. Essa diferença está associada à variação da espessura das placas em cada segmento (10 cm e 15 cm), indicando que, no caso do segmento 2, no qual a rigidez da placa é mais elevada em função da maior espessura, os esforços causados pelo carregamento dinâmico são absorvidos numa taxa maior pelo revestimento, reduzindo-se as deformações impostas à base.

Na Figura 5.18 estão apresentados os resultados médios de E do subleito nas diferentes condições de umidade.

Com relação aos resultados dos módulos do subleito, há uma confirmação do que foi discutido no Capítulo 4 após análise das deflexões em D0 e D120, sendo que houve pequeno aumento da rigidez média do subleito no segmento 1 em função da provável ocorrência de excesso de poro-pressão nesta camada, que é resultado da aplicação de um carregamento dinâmico e da saturação do sistema, diferentemente do segmento 2, que possui uma membrana plástica impermeável entre a base e o subleito, impedindo a ocorrência da saturação do solo.

Figura 5.18: Comparação entre os resultados médios de E do subleito nas condições “seca” e “saturada”

Em nenhuma das análises foi observada tendência clara sobre aumento ou redução do módulo de elasticidade em relação aos diferentes valores de carregamento empregados. Entretanto, os valores de RMSE resultantes das retroanálises com carregamento de 6.600 kgf indicam maior dificuldade de ajuste das curvas teóricas para a espessura de revestimento de 10 cm, ao contrário do que ocorreu para o segmento com espessura de CPCP de 15 cm, em que os valores de RMSE médios foram menores para essa carga.

Com a finalidade de confirmar a influência da presença da água no interior da estrutura porosa na variação dos módulos de elasticidade das camadas, foi realizado também um teste “t” de hipóteses. Foi fixado um valor de significância de 5%, assumindo-se como hipótese nula que as médias comparadas são estatisticamente iguais, sendo a hipótese alternativa que existe diferença entre as médias.

Anteriormente à realização do teste “t”, uma análise de equivalência das variâncias do conjunto de dados dos valores de E para as condições “seca” e “saturada” foi proposta por meio do teste “f”, e os resultados desta análise estão apresentados na Tabela 5.9.

Após obtenção destes resultados, o teste “t” foi realizado para cada conjunto de dados considerando a equivalência ou não das variâncias, conforme apresentado na Tabela 5.10 e na Tabela 5.11, para os segmentos 1 e 2 da Calçada 2 com carga de 4.100

kgf, respectivamente. Na Tabela 5.12 e na Tabela 5.13 estão apresentados os resultados para os segmentos 1 e 2 da Calçada 2 considerando o carregamento de 6.600 kgf.

Tabela 5.9: Resultados do teste “f” (equivalência das variâncias)

Carga do Ensaio (kgf)	Dados Analisado	Segmento 1	Segmento 2
4.100	Erev	VE	VE
	Ebase	VD	VE
	Esubleito	VD	VE
6.600	Erev	VD	VE
	Ebase	VD	VD
	Esubleito	VD	VD

VE: Variâncias equivalentes

VD: Variâncias diferentes

Tabela 5.10: Resultados do teste de hipóteses do segmento 1 da Calçada 2 para carregamento de 4.100 kgf

Parâmetros Teste “t”	Calçada 2 - Segmento 1					
	ERev. (MPa)		EBase (MPa)		ESubl. (MPa)	
	Seco	Saturado	Seco	Saturado	Seco	Saturado
Média	11.958	7.636	37	17	112	118
Variância	14.400.566	7.050.932	284	15	711	1.058
Observações	16	14	16	14	16	14
Stat t	3,56		4,64		0,60	
t crítico	1,70		1,74		1,71	
Valor p	0,0006698		0,0001165		0,2755712	
Nível de Significância	0,0500000		0,0500000		0,0500000	
Resultado	Rejeita H0		Rejeita H0		NÃO Rejeita H0	

Tabela 5.11: Resultados do teste de hipóteses do segmento 2 da Calçada 2 para carregamento de 4.100 kgf

Parâmetros Teste “t”	Calçada 2 - Segmento 2					
	ERev. (MPa)		EBase (MPa)		ESubl. (MPa)	
	Seco	Saturado	Seco	Saturado	Seco	Saturado
Média	10.093	8.430	27	15	166	141
Variância	17.320.434	15.814.403	437	161	8.127	5.441
Observações	12	11	12	11	12	11
Stat t	0,98		1,67		0,72	
t crítico	1,72		1,72		1,72	
Valor p	0,1696706		0,0551628		0,2404233	
Nível de Significância	0,0500000		0,0500000		0,0500000	
Resultado	NÃO Rejeita H0		NÃO Rejeita H0		NÃO Rejeita H0	

Tabela 5.12: Resultados do teste de hipóteses do segmento 1 da Calçada 2 para carregamento de 6.600 kgf

Parâmetros Teste “t”	Calçada 2 - Segmento 1					
	ERev. (MPa)		EBase (MPa)		ESubl. (MPa)	
	Seco	Saturado	Seco	Saturado	Seco	Saturado
Média	6.263	5.786	60	18	120	123
Variância	3.355.010	4.285.517	2.047	51	2.258	121
n	16	14	16	14	16	14
Stat t	0,66		3,65		0,25	
t crítico	1,71		1,75		1,74	
Valor p	0,2561667		0,0010824		0,4046670	
Nível de Significância	0,0500000		0,0500000		0,0500000	
Resultado	NÃO Rejeita H0		Rejeita H0		NÃO Rejeita H0	

Tabela 5.13: Resultados do teste de hipóteses do segmento 2 da Calçada 2 para carregamento de 6.600 kgf

Parâmetros Teste “t”	Calçada 2 - Segmento 2					
	ERev. (MPa)		EBase (MPa)		ESubl. (MPa)	
	Seco	Saturado	Seco	Saturado	Seco	Saturado
Média	10.848	8.295	15	13	269	131
Variância	18.641.100	12.735.091	57	63	132.841	5.564
n	14	12	13	12	14	12
Stat t	1,63		0,62		1,38	
t crítico	1,71		1,71		1,76	
Valor p	0,0585429		0,2698139		0,0945328	
Nível de Significância	0,0500000		0,0500000		0,0500000	
Resultado	NÃO Rejeita H0		NÃO Rejeita H0		NÃO Rejeita H0	

É possível notar que, tanto para o revestimento quanto para o subleito, a hipótese nula, que representa a igualdade estatística de E nas condições “seca” e “saturada”, deve ser aceita para um nível de significância de 5% da análise, com exceção do revestimento para a condição de carregamento de 4.100 kgf no segmento 1 da Calçada 2. No caso da base, observa-se que para o segmento 1 da Calçada 2, para ambas as cargas de ensaio, a hipótese nula deve ser rejeitada, sendo que o comportamento estrutural não pode ser considerado estatisticamente igual, indicando que essa camada da estrutura, para revestimentos com espessura de 10 cm, parece ser a mais influenciada por conta da “saturação” do sistema.

Conforme já comentado anteriormente, as diferenças entre as espessuras de revestimento aparentemente explicam a variação na suscetibilidade do

comportamento mecânico da base em RCD frente à presença excessiva de água. No caso da espessura de 15 cm de CPCP, foi possível observar que a hipótese nula deve ser aceita, indicando que estatisticamente não há diferenças entre o comportamento da base nas condições “seca” e “saturada” no segmento 2 da Calçada 2. Vale destacar que no segmento 2, considerando o carregamento de 4.100 kgf, o valor de stat-t, apesar de estar abaixo, se encontra muito próximo do limite de “t” crítico para a comparação entre os módulos da base.

5.2.3 Resultados da estimativa da redução da vida de fadiga de revestimentos em CPCP

Na Figura 5.19 está apresentada a variação dos resultados de RT em função da espessura da placa para os diferentes carregamentos analisados e diferentes valores de k.

Figura 5.19: Variação de RT para diferentes espessuras de placa e carregamentos em função da redução da capacidade de suporte do conjunto base+subleito

É possível notar que a redução de k provoca um aumento de RT independentemente da magnitude do carregamento. Para ambas as cargas aplicadas, houve um aumento no valor de RT de aproximadamente 15% em função da redução do valor de k de

50 MPa/m para 20 MPa/m para a espessura de 10 cm, indicando claramente que há um aumento de tensões de tração considerável na fibra inferior da camada do revestimento quando o mesmo é submetido à presença de elevados volumes de água.

Observa-se também que a taxa de aumento no valor de RT reduz quanto maior a espessura da placa, indicando que o aumento da rigidez da placa de concreto permeável tende a ser responsável por uma maior absorção dos esforços, reduzindo-se a parcela de importância da infraestrutura, fazendo com que a redução da sua capacidade de suporte cause um menor efeito em termos de elevação das tensões de tração na fibra inferior da espessura da placa.

Na Figura 5.20 estão apresentados os valores de número N admissível estimados através do modelo de fadiga do PerviousPave em função da variação das espessuras da placa de CPCP, cargas e valores de k.

Figura 5.20: Variação do número N admissível para diferentes espessuras de placa e carregamentos em função da redução de k

Nota-se que para atendimento de um número N de 10^7 , por exemplo, considerando o eixo de 22 kN, haveria a necessidade de se aumentar a espessura da placa de 18 cm para 20 cm em função da ocorrência da saturação da base. Este aumento de espessura é semelhante para o carregamento de 42 kN, visto que na condição “seca”, a espessura de 26 cm atenderia ao número N de 10^7 e na condição “saturada” a espessura deverá ser aumentada para 28 cm.

Em ambos os gráficos analisados é possível observar que a condição de saturação do conjunto base+subleito tem influência direta no comportamento estrutural das placas de CPCP. Para o caso da vida de fadiga, em especial, nota-se que há a necessidade de aumento da espessura das placas em função da condição de saturação para um mesmo período de projeto, o que sugere a importância de incluir essa condição para o dimensionamento de estruturas de pavimentos permeáveis com revestimento em CPCP.

Cabe ressaltar que tanto a análise das tensões quanto a avaliação da vida de fadiga foram realizadas com base em *softwares* e modelos originalmente desenvolvidos para pavimentos de CCP, sendo que os dados aqui estudados e apresentados têm única e exclusiva função acadêmica, e servirão para nortear futuros estudos nesse contexto de pesquisa em CPCP.

5.3 Considerações finais sobre a etapa numérica

A etapa numérica apresentada nessa pesquisa teve por objetivo a realização de retroanálises das características elásticas de cada camada das calçadas por meio de resultados dos levantamentos deflectométricos. Este processo buscou avaliar como a presença de grandes volumes de água no interior das estruturas das calçadas pode influenciar o comportamento estrutural de cada camada individualmente, observando-se como a redução da capacidade de suporte da infraestrutura afeta a vida de fadiga do CPCP em termos de tensões de tração na fibra inferior da camada de revestimento.

A seguir estão apresentadas as considerações finais dessa etapa:

- Os módulos de elasticidade médios do CPCP retroanalizados pelos *softwares* EverFE e ABAQUS da calçada 2 variaram de 14.216 MPa a 18.167 MPa. Esses valores são comparáveis aos valores de E determinados por meio da analogia de Mohr em laboratório por Batezini (2012), com média aproximada de 16.000 MPa, para misturas de concreto permeável com tipos de materiais e porosidades semelhantes. Este comparativo indica que há correspondência entre as características elásticas dos materiais moldados em laboratório, frente

às respostas elásticas do material em pista por conta da aplicação de carregamentos dinâmicos provenientes do FWD;

- A comparação do E do revestimento determinado pelos três softwares, demonstra que os valores médios obtidos pelo EverFE e no ABAQUS, ambos seguindo o método dos elementos finitos, foram sempre mais elevados em comparação aos obtidos no BAKFAA, com uma diferença mais significativa no caso das estruturas contendo espessura do revestimento CPCP de 10 cm. Mesmo considerando as diferenças de resultados encontradas, os três *softwares* empregados apresentaram resultados minimamente satisfatórios em termos de retroanálises das bacias de deflexão para os casos analisados;
- Os valores de E do revestimento resultaram consideravelmente mais elevados na Calçada 1. Essa ocorrência pode ser resultado do leve enrijecimento da camada de base na sua porção mais superior, que ocorreu em função da segregação da pasta observada nas amostras extraídas da Calçada 1. Nesse contexto, a espessura de 10 cm considerada na modelagem da estrutura para as retroanálises não foi suficiente em termos de proporcionalidade estrutural, o que pode ter resultado em uma elevação no valor de E retroanalizado, de modo a suprir a desconsideração desse material com rigidez intermediária entre as camadas de revestimento e base. Outro fator que pode também ter auxiliado no aumento dos valores de E retroanalizados para o CPCP se refere à baixa capacidade de suporte característica do conjunto base+subleito da Calçada 1, o que pode ter gerado um excesso de mobilização da rigidez do revestimento frente aos carregamentos dinâmicos aplicados;
- Os valores de k médios retroanalizados no EverFE foram de 25 MPa/m para a calçada 1 e 47 MPa/m e 57 MPa/m e no ABAQUS de 24 MP/m, 48 MPa/m e 55 MPa/m, para os segmentos 1 e 2 da calçada 2, respectivamente. Os valores de E do subleito retroanalizados no BAKFAA resultaram em 38 MPa para a calçada 1 e 88 MPa e 125 MPa para os segmentos 1 e 2 da calçada 2, respectivamente. Já para o caso da base, os valores de E médios retroanalizados foram de 3 MPa para a Calçada 1 e 16 MPa e 11 MPa para os segmentos 1 e 2 da Calçada 2. Estes resultados

corroboram as constatações sobre a capacidade de suporte do conjunto base+subleito ser consideravelmente menor na Calçada 1;

- As variações mais importantes observadas sobre a redução da rigidez da base ocorreram no segmento 1 da Calçada 2, com redução de E em até 70% na condição “saturada” frente à condição “seca”. Esta redução está diretamente associada à lubrificação das partículas que formam a camada de base, que possui resistência diretamente ligada ao atrito na face dessas partículas. Redução menos expressiva do E da base ocorreu no segmento 2 da calçada 2, cuja diferença está associada à maior espessura da placa de CPCP no segmento 2, fazendo com que os esforços causados pelo carregamento dinâmico sejam absorvidos em uma taxa maior pelo revestimento, tendendo a reduzir as deformações na base com a consequente redução na variação do valor de E em função da presença da água;
- No caso do E do revestimento e do subleito, o teste de hipótese revelou que para ambas as camadas, a hipótese nula deve ser aceita, indicando que o seu comportamento estrutural é estatisticamente igual para as condições “seca” e “saturada”, considerando-se um nível de significância de 5%, com exceção do revestimento no segmento 1 da calçada 1. Já no caso do E da base de RCD, para ambas as cargas de ensaios no segmento 1 da calçada 2, o teste de hipóteses indica rejeição da hipótese nula, sendo que o comportamento estrutural dessa camada não pode ser considerado estatisticamente igual para as condições “seca” e “saturada”. Esses resultados indicam que a camada de base é a mais suscetível à perda de capacidade de suporte em função da presença de quantidade excessiva de água no interior da estrutura;
- Independentemente das cargas aplicadas de 22 kN e 42 kN, houve um aumento de 15% na RT do CPCP na condição “saturada”, definida pelo k do subleito de 20 MPa/m, em comparação à condição “seca”, definida por k igual a 50 MPa/m. Essa condição demonstra claramente que pavimentos permeáveis em CPCP devem ser tratados em termos de capacidade estrutural considerando ambas as condições “seca” e “saturada” para fins de

dimensionamento, visto que a RT está diretamente ligada à vida de fadiga do revestimento;

- Tomando-se por base a equação de fadiga empregada na análise mecanicista realizada, para atendimento ao número N igual a 10^7 considerando o eixo simples de roda simples de 22 kN, haveria a necessidade de se aumentar a espessura da placa de 18 cm para 20 cm, em função da consideração da “saturação” do sistema. Já para cargas de 42 kN, seria necessário possível aumentar a espessura de revestimento de 26 cm para 28 cm de modo a atender o mesmo número N de 10^7 .

Cabe ressaltar que os dois últimos itens das considerações, que tratam do aumento de RT e também sobre vida de fadiga do CPCP, foram gerados considerando um modelo de propagação de tensões e um modelo de fadiga desenvolvidos para CCP, não devendo ser tomados como parâmetro de dimensionamento em projetos reais. A função única e exclusiva de se empregar esta equação nesse trabalho foi puramente para comparação, em nível acadêmico, de como as duas condições “seca” e “saturada”, que representam extremos opostos em termos de nível de umidade nas estruturas, podem influenciar no comportamento estrutural a longo prazo dos revestimentos em CPCP.

CONCLUSÕES

A presente pesquisa teve como objetivo principal a realização de estudos laboratoriais, de campo e numéricos, buscando a viabilização de misturas de concreto permeável para serem empregadas como revestimento de calçadas permeáveis na região de São Paulo, entendendo também os critérios executivos para implantação dessas estruturas. Além disso, a pesquisa objetivou a proposição de um modelo empírico para avaliação da variação da taxa de infiltração *in situ* de calçadas em concreto permeável executadas em locais com diferentes densidades de vegetação e árvores. Finalmente, buscou-se entender se há variação do comportamento estrutural das calçadas executadas para as condições de baixa e elevada umidade no interior da sua estrutura, avaliando-se também qual das camadas do pavimento é mais susceptível à presença da água.

Considerando os resultados obtidos em cada uma das etapas da pesquisa, bem como as considerações expostas ao final dos capítulos 3, 4 e 5, foi possível tecer as seguintes as conclusões gerais:

- Os estudos laboratoriais realizados permitiram avaliar qualitativamente e quantitativamente o comportamento de cada uma das misturas testadas considerando a variação da graduação dos agregados, dos tipos de cimento e dos teores de aditivos superplastificante e retardador de pega. Os resultados demonstram que as misturas Rg e RI atenderam às demandas entendidas como limitantes na fase de laboratório em termos de comportamento hidráulico e mecânico, podendo ser empregadas como material de revestimento de calçadas *in situ*, considerando aplicações por meio de betoneira manual e em caminhão betoneira, respectivamente;
- Em análise aos tipos de materiais empregados em cada mistura, foi possível observar que não houve diferenças importantes em termos de variação do tipo de graduação dos agregados ou ainda dos tipos de cimento nos resultados de porosidade, taxa de infiltração e resistência mecânica determinados em laboratório. Em termos dos aditivos superplastificante e retardador de pega,

ambos os materiais empregados apresentaram resultados satisfatórios, desde que sejam devidamente dosados. Importante comentar que a limitação do teor de aditivo superplastificante é consideravelmente importante para garantir que não ocorra segregação da pasta na mistura, pois foi comprovado que tal ocorrência resulta no aumento da porosidade do concreto permeável, o que pode causar redução da durabilidade das misturas em campo, dentre outros problemas;

- Com base nos resultados de laboratório, foi possível propor correlações com elevados valores de R^2 entre a porosidade do CPCP e os parâmetros de massa específica aparente nos estados fresco e endurecido. Foram também propostas correlações com valores razoáveis de R^2 entre as resistências à compressão e à tração na flexão em função da porosidade das misturas. Tais correlações são importantes para fins de controle de execução do material em campo, visto que somente de posse da massa específica aparente no estado fresco, que é de rápida e fácil determinação em campo, é possível estimar os demais parâmetros de porosidade e resistências do material após endurecido;
- As metodologias aplicadas à execução das calçadas se mostraram satisfatórias em termos de lançamento e compactação. Exceção pode ser considerada em relação ao emprego do rolo metálico com aplicação manual para compactação e finalização da superfície do CPCP, visto que no caso da Calçada 1, que foi executada e finalizada somente com emprego do rolo metálico, o acabamento apresentou pequenas ondulações. Essa condição foi contornada na Calçada 2 com emprego da acabadora de pisos após a compactação com o rolo metálico, que resultou em uma superfície aceitavelmente nivelada;
- Apesar do estudo laboratorial resultar em duas misturas com características suficientes para serem empregadas em campo, as análises visuais *in situ* sugerem que ambas as misturas ainda necessitam de estudo mais aprofundado antes de sua aplicação na prática. No caso da mistura Rg, foi observado que houve segregação da pasta por meio da extração das amostras cilíndricas da Calçada 1, indicando que o teor de 0,35% de superplastificante, mesmo que aprovado em etapa de laboratório, pode ainda não ser o ideal para

a dosagem e materiais utilizados. No caso da mistura RI, utilizada no revestimento dos segmentos 1 e 2 da Calçada 2, foi observada a ocorrência grave de perda de agregados nas seções executivas 3, 5 e 6, indicando que essa mistura deve ser empregada considerando um tempo de trabalho máximo de 90 minutos, podendo até ser estendido para 120 minutos, desde que a dosagem do retardador de pega seja cuidadosamente reajustada;

- O modelo empírico proposto para simulação da redução da taxa de infiltração ao longo do tempo indicou que há uma correlação razoável entre os parâmetros utilizados e conjunto de dados disponível, podendo ser empregado para estimativa da redução da capacidade drenante de calçadas em concreto permeável dentro da região de implantação dessa pesquisa. Durante as regressões realizadas, foi possível observar também que as principais variáveis que explicam a variação da taxa de infiltração ao longo do tempo são o tempo decorrido desde a execução da calçada e as características do local de implantação em termos de densidade de vegetação e árvores, sugerindo que quanto maior a densidade de vegetação e árvores, mais rápido será a ocorrência do *clogging*;
- Os módulos de elasticidade médios do CPCP retroanalizados pelos *softwares* EverFE e ABAQUS da calçada 2 são comparáveis aos valores de E determinados em laboratório por meio da analogia de Mohr por Batezini (2012) para misturas de concreto permeável com tipos de materiais e porosidades semelhantes. Este comparativo indica que há correspondência entre as características elásticas dos materiais moldados em laboratório, frente às respostas elásticas do material em pista por conta da aplicação de carregamentos dinâmicos provenientes do FWD;
- Houve redução considerável na capacidade de suporte geral da estrutura da Calçada 2 na condição “saturada” em comparação à condição “seca”, sendo que as médias das deflexões em D0 se confirmam estatisticamente diferentes de acordo com o teste “t” de hipóteses realizado. Com base nas retroanálises realizadas, foi possível observar que as maiores quedas de módulo de elasticidade se deram na base granular das calçadas, indicando que essa

camada é a mais susceptível à perda de capacidade de suporte dentro do sistema em função da presença de grandes volumes de água no seu interior;

- A redução da capacidade de suporte da infraestrutura (base+subleito) resulta na elevação das deflexões da camada de revestimento, causando consequentemente um aumento nas tensões de tração na sua fibra inferior. Essa condição causa redução da vida de fadiga do concreto permeável, conforme confirmado com emprego da equação de fadiga dos *softwares* StreetPave e PerviousPave, concluindo-se que, para o desenvolvimento de métodos racionais de projeto e dimensionamento de estruturas de concreto permeável em termos mecânicos, deverá ser considerado no modelo os períodos durante os quais essas estruturas estarão submetidas à condição de elevada umidade em função da presença de grandes volumes de água no seu interior.

A partir das análises e conclusões dos resultados das etapas de laboratório e de campo, verificou-se que tanto os tipos de misturas desenvolvidos, além dos procedimentos de execução das calçadas em concreto permeável, funcionaram parcialmente. Em relação aos testes de infiltração, o modelo criado apresentou correlação razoável para o conjunto de dados coletados ao longo de 36 meses, e ainda pode ser calibrado e melhorado considerando a realização de mais medições, incluindo-se também a variável porosidade, com diferentes faixas. No que diz respeito ao comportamento estrutural nas condições “seca” e “saturada”, ficou clara a suscetibilidade das camadas da estrutura frente à presença de elevados volumes de água, indicando que esta condição precisa ser considerada em termos de projeto e dimensionamento de pavimentos em CPCP. Considerando-se as conclusões, alguns aspectos que ainda devem ser entendidos e aprofundados são:

- Ajustar os teores de superplastificante para as misturas produzidas, buscando uma mistura livre de segregação quando implantada em pista;
- Produzir misturas com inclusão de materiais finos, adições, fibras e outros tipos de aditivos além daqueles estudados na presente pesquisa;

- Realizar ensaios de compressão uniaxial em corpos de prova cilíndricos com dimensões maiores, de modo a comprovar se há uma menor variabilidade dos resultados de resistência à compressão em laboratório;
- Realizar ensaios de fadiga e fratura de CPs de CPCP em laboratório;
- Dar sequência às medições de taxa de infiltração ao longo dos próximos anos nas Calçadas 1 e 2, na tentativa de fortalecer o modelo desenvolvido para um maior período de tempo;
- Incluir diferentes porosidades no modelo empírico desenvolvido;
- Efetuar diferentes tipos de manutenção com vácuo e jato de água após mais alguns anos de medições, de modo a avaliar o comportamento hidráulico antes e depois da manutenção, inclusive comparando com as taxas de infiltração nas primeiras idades das calçadas;
- Desenvolver modelos de análise estrutural específicos para materiais de alta porosidade, avaliando, se houver, as diferenças de comportamento entre o CPCP e CCP, e calibrando os modelos por meio de levantamentos com células de carga em pista experimental;
- Instalar pista experimental em CPCP em local com fluxo de veículos, avaliando o comportamento estrutural e a durabilidade ao longo do tempo. Esta etapa de estudo será de extrema importância para se desenvolver métodos racionais de dimensionamento de estruturas em CPCP para tráfego de veículos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS. **Finite element computer program. Theory manual.** Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7583 - Execução de pavimentos de concreto simples por meio mecânico – CANCELADA.** Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da Resistência à Compressão.** Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR NM 67 - Concreto - Determinação da Consistência pelo Abatimento de Tronco de Cone.** Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 51 - Agregado Graúdo - Ensaio de Abrasão “Los Angeles”.** Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 248 - Agregados - Determinação da Composição Granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003a.

_____. **NBR NM 46 - Agregados - Determinação do Material Fino que Passa Através da Peneira 75 μ m, por Lavagem.** Rio de Janeiro, 2003b.

_____. **NBR 15116 - Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil - Utilização em Pavimentação e Preparo de Concreto sem Função Estrutural.** Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 45 - Agregados - Determinação da Massa Unitária e do Volume De Vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 5739 - Concreto - Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7809 - Agregado Graúdo – Determinação do Índice de Forma pelo Método do Paquímetro.** Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR NM 52 – Agregado Miúdo – Determinação da Massa Específica e Massa Específica Aparente.** Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **NBR 7211 - Agregados para Concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2009b.

_____. **NBR 12142 - Concreto - Determinação da Resistência à Tração na Flexão de Corpos de Prova Prismáticos.** Rio de Janeiro, 2010a.

_____. **NBR 7218 - Agregados - Determinação do Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis.** Rio de Janeiro, 2010b.

_____. **NBR 11768 - Aditivos Químicos para Concreto de Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR NM 18 - Cimento Portland - Análise Química - Determinação de Perda ao Fogo.** Rio de Janeiro, 2012a.

_____. **NBR NM 15 - Cimento Portland - Análise Química - Determinação de Resíduo Insolúvel.** Rio de Janeiro, 2012b.

_____. **NBR 16416 - Pavimentos Permeáveis de Concreto - Requisitos e Procedimentos.** Rio de Janeiro, 2015a.

_____. **NBR 16372 - Cimento Portland e Outros Materiais em Pó - Determinação da Finura pelo Método de Permeabilidade ao Ar (Método de Blaine).** Rio de Janeiro, 2015b.

_____. **NBR 5738 - Concreto - Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos de Prova.** Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 16607 - Cimento Portland - Determinação dos Tempos de pega.** Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16697 - Cimento Portland de Alto-Forno.** Rio de Janeiro, 2018.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI. **ACI 522R - 10 - Report on pervious concrete.** Farmington Hills, 2010.

_____. **ACI 318-11 - Building Code Requirements for Structural Concrete.** Farmington Hills, 2011.

_____. **ACI 522.1-13 - Specification for Pervious Concrete Pavement.** Farmington Hills, 2013.

AL-KHATEEB, L. A.; SAOUD, A.; AL-MSOUTI, M. F. **Rutting prediction of flexible pavements using finite element modeling.** Journal of Civil Engineering, v. 5, n. 2, p. 173–190, 2011.

ALAM, A. **Preliminary structural design guideline for pervious concrete pavement system using finite element methods.** Thesis (PhD). Washington State University. Department of Civil and Environmental Engineering. 2013.

ALAM, A.; HASELBACH, L. M. **Estimating the modulus of elasticity of pervious concrete based on porosity.** Advances in Civil Engineering Materials, v. 3, n. 1, p. 256-269, 2014.

ALAM, A.; HASELBACH, L. M.; 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.

ALAM, A.; HASELBACH, L. M.; COFER, W. F. **Evaluation of critical stresses in pervious concrete pavement systems due to partial to full bonding between subgrade, subbase and surface layers.** International Journal of Engineering and Technical Research, v. 2, n. 9, p. 323–327, 2014.

ASADI, S.; MARWA, M. H.; KEVERN, J. T.; RUPNOW, T. D. **Development of photocatalytic pervious concrete pavement for air and storm water improvements.** Transportation Research Record, v. 2290, n. 1, p. 161–167, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM - C33 - Coarse Aggregate Size.** West Conshohocken, PA, USA, 1997.

_____. **ASTM E178 - Standard Practice for Dealing with Outlying Observations.** West Conshohocken, PA, USA, 2002.

_____. **ASTM C1701/C1701M - Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete.** West Conshohocken, PA, USA, 2009.

_____. **ASTM C1754/C1754M - Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete.** West Conshohocken, PA, USA, 2012.

_____. **ASTM C1017 - Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete.** West Conshohocken, PA, USA, 2013.

_____. **ASTM C1688/C1688M - Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete.** West Conshohocken, PA, USA, 2014.

_____. **ASTM C494/C494M - Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete.** West Conshohocken, PA, USA, 2015a.

_____. **ASTM D5858 - Calculating In Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory.** West Conshohocken, PA, USA, 2015b.

_____. **ASTM C150/C150M – Standard Specification for Portland Cement.** West Conshohocken, PA, USA, 2018.

BALBO, J. T. **Análise crítica dos métodos para dimensionamento estrutural de pavimentos de concreto simples.** V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. São Paulo: 2003.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração.** Oficina de Textos, São Paulo, 2007.

BALBO, J. T. **Pavimentos de Concreto.** Oficina de Textos, São Paulo, 2009.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimento para áreas de veículos leves.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2012.

BATEZINI, R.; BALBO, J. T. **Study on the hydraulic conductivity by constant and falling head methods for pervious concrete.** IBRACON Structures and Materials Journal, v. 8, n. 3, p. 248–259, 2015.

BEAN, E. Z.; BRAGA, A. M.; CLAR, M. L.; LINDOW, K. C.; EARLEY, K.; EISENBERG, B.; GWILYM, K. M.; HASELBACH, L. M.; HUNT III, W. F.; KARIMIPOUR, S.; KEVERN, J. T.; KUNKLER, L.; LOWRY, T. P.; PERRY, S. D.; POTTS, A. **Permeable pavements.** 1st edition. American Society of Civil Engineers (ASCE). Reston, Virginia, 2015.

BEAN, E. Z.; HUNT, W. F.; BIDELESPACH, D. A. **Field survey of permeable pavement surface infiltration rates.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 133, n. 3, p. 249–255, 2007.

BEELDENS, A. **Behavior of porous PCC under freeze thaw cycling.** Tenth International Congress on Polymers in Concrete, Honolulu, Hawaii, 2001.

BEELDENS, A.; VAN GEMERT, D.; CAESTECKER, C. **Porous concrete: laboratory versus field experience**. Proceedings 9th International Symposium on Concrete Roads, Istanbul, Turkey, 2003.

BENTZ, D. R. **Virtual pervious concrete: Microstructure, percolation, and permeability**. ACI Materials Journal, v. 105, n. 3, p. 297–301, 2008.

BUSH, E.; CAWLEY, B.; DURHAM, S.; MACKENZIE, K. ROTTMAN, J. THOMAS, D. **Specifier's guide for pervious concrete pavement design**. Colorado Ready Mixed Concrete Association, Centennial, CO, p. 24, 2008.

CARGNIN, A. P.; BALBO, J. T.; BATEZINI, R.; CURVO, F. O.; SEVERI, A. A. **Sensitivity analysis of the thickness in porous concrete pavements design for bus rapid transit (BRT) busways**. IBRACON - 3rd International Conference on Best Practices for Concrete Pavements. Bonito. MS, 2015.

CERVO, T. **Estudo de resistência à fadiga de concretos de cimentos Portland para pavimentação**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2004.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. **Flexural-fatigue characteristics of pervious concrete: Statistical distributions and model development**. Construction and Building Materials, v. 153, p. 1–15, 2017.

CHEN, Y.; WANG, K.; WANG, X.; ZHOU, W. **Strength, fracture and fatigue of pervious concrete**. Construction and Building Materials, v. 42, p. 97–104, 2013.

CHEN, Y.; WANG, K. J.; LIANG, D. **Mechanical properties of pervious cement concrete**. Journal of Central South University, v. 19, p. 3329–3334, 2012.

COUGHLIN, J. P.; CAMPBELL, C. D.; MAYS, D. C. **Infiltration and clogging by sand and clay in a pervious concrete pavement system**. Journal of Hydrologic Engineering, vol. 17, n. 1, p. 68-73, 2011.

CROVETTI, J. A. **Design and evaluation of jointed concrete pavement systems incorporating open-graded permeable bases.** Thesis (PhD). University of Illinois, 1994.

CURVO, F. O. **Estudo da drenabilidade de calçadas experimentais em concreto permeável no campus Armando Salles de Oliveira da USP.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2017.

CUTLER, H. E.; WANG, K.; SCHAEFER, V. R.; KEVERN, J. T. **Resistance of Portland cement pervious concrete to deicing chemicals.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 2164, p. 98-104, 2010.

DAVIDS, W.; TURKIYYAH, G.; MAHONEY, J. **EverFE: rigid pavement three-dimensional finite element analysis tool.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 1629, n. 98-0313, p. 41–49, 1998.

DAVIDS, W. G; WANG, Z.; TURKYAH, G.; MAHONEY, J. P.; BUSH, D. **Three-dimensional finite element analysis of jointed plain concrete pavement with EverFE 2.2.** Transportation Research Board 82th Annual Meeting. Paper N° 03/2223, 2003.

DELATTE, N. J. **Structural design of pervious concrete pavement.** Transportation Research Board 86th Annual Meeting. Paper N° 07/0956, 2007.

DELATTE, N.; MRKAJIC, A.; MILLER, D. **Field and laboratory evaluation of pervious concrete pavements.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2113, n. 2313, p. 132–139, 2009.

DEO, O.; NEITHALATH, N. **Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features.** Materials Science and Engineering, v. 528, n. 1, p. 402–412, 2010.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO - DER/SP. **ET-DE-H00/013 - Mantas Geotêxteis em Dispositivos de Drenagem**. São Paulo, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE – DNIT (Antigo DNER). **DNER-ME 399 - Agregados - Determinação da Perda ao Choque no Aparelho Treton**. Rio de Janeiro, 1999.

ESTEVES, R. L. **Quantificação das superfícies impermeáveis em áreas urbanas por meio de sensoriamento remoto**. Dissertação (Mestrado) Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, 2006.

GAEDICK, C.; ROESLER, J. **Fracture-based method to determine the flexural load capacity of concrete slabs**. Technical Report supported by Federal Aviation Administration – FAA, University of Illinois at Urbana-Champaign, Department of Civil and Environmental Engineering– Illinois, 2009.

GHAFOORI, N.; DUTTA, S. **Laboratory investigation of compacted no-fines concrete for paving materials**. Journal of Materials in Civil Engineering – ASCE, V. 7, n. 3, 1995.

GEOTECHNOLOGY. Disponível em: <https://geotechnology.com/porous-pavement>. Acesso em 22 de novembro de 2018.

GOEDE, W. **Pervious concrete: investigation into structural performance and evaluation of the applicability of existing thickness design methods**. Thesis (Master). Washington State University. Department of Civil and Environmental Engineering, 2009.

GOEDE, W.; HASELBACH, L. M. **Investigation into the structural performance of pervious concrete**. Journal of Transportation Engineering - ASCE, v. 138, n. 1, p. 98–104, 2012.

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, 2014.

HALL, K. T. **Performance, evaluation and rehabilitation of asphalt-overlaid concrete pavements**. Thesis (PhD). University of Illinois, 1991.

HASELBACH, L. M. **Pervious concrete and mitigation of the urban heat island effect**. Transportation Research Board 88th Annual Meeting. Paper N° 09/0098, 2009.

HASELBACH, L. M.; BOYER, M.; KEVERN, J. T.; SCHAEFER, V. R. **Cyclic heat island impacts on traditional versus pervious concrete pavement systems**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 2240, p. 107-115, 2011.

HASELBACH, L. M.; WERNER, B.; DUTRA, V.; SCHWETZ, P.; FILHO, L. C. P. S.; BATEZINI, R.; CURVO, F.; BALBO, J. T. **Nondestructive method for estimating porosity of in-situ pervious concrete**. Journal of Testing and Evaluation. American Society for Testing and Materials – ASTM, v. 45, n. 5, p. 1726-1735, 2016.

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.; FREEMAN, R. M. **Vertical porosity distributions in pervious concrete pavement**. Materials Journal, American Concrete Institute – ACI, v. 103, n. 6, p. 452–458, 2006.

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. **Evaluation of the performance of pervious concrete pavement in the Canadian climate**. Thesis (PhD). University of Waterloo, Ontario, Canada, 2012.

HENDERSON, V.; TIGHE, S. L. **Evaluation of pervious concrete pavement permeability renewal maintenance methods at field sites in Canada**. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 38, p. 1404–1413, 2011.

HENDERSON, V.; TIGHE, S. **Evaluation of pervious concrete pavement performance in cold weather climates.** International Journal of Pavement Engineering, v. 13, p. 197–208, 2012.

HENDERSON, V.; TIGHE, S. L.; NORRIS, J. **Pervious concrete pavement: integrated laboratory and field study.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. v. 2095, p. 13–21, Nov. 2009.

HOLTZ, F. DA C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental.** Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2011.

HORST, M.; WELKER, A. L.; TRAVER, R. G. **Multiyear performance of a pervious concrete infiltration basin BMP.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering – ASCE, v. 137, n. 6, p. 352-358, 2011.

HUANG, B; SHU, X.; DONG, Q. **Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete.** Construction and Building Materials, v. 24, n. 5, p. 818–823, 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO 17785-1:2016 - Testing methods for pervious concrete - Infiltration Rate.** 2016.

JIN, N. **Fly ash applicability in pervious concrete.** Thesis (Master). The Ohio State University, 2010.

KAJIO, S.; TANAKA, S.; TOMITA, R.; NODA, E.; HASHIMOTO, S. **Properties of porous concrete with high strength,** Proceedings 8th International Symposium on Concrete Roads, p. 171-177, Lisbon, 1998.

KALLEDER, G. N. **Estudo da eficiência de calçadas com concretos permeáveis na drenagem superficial urbana e na mitigação de efeitos de chuvas intensas em São Paulo**. Relatório Final, Programa de Iniciação Científica (CNPq-USP-PIBIC) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de engenharia de Transportes, São Paulo, 2017.

KAYHANIAN, M.; ANDERSON, D.; KEVERN, J. T.; 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, 2012.

KEVERN, J. T.; FARNEY, C. **Reducing curing requirements for pervious concrete with a superabsorbent polymer for internal curing**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 2290, p. 115–121, 2012.

KEVERN, J. T.; HASELBACH, L. M.; SCHAEFER, V. R. **Hot weather comparative heat balances in pervious concrete and impervious concrete pavement systems**. Journal of Heat Island Institute International, v. 7, n. 2, p. 231-237, 2012.

KEVERN, J. T.; SCHAEFER, V. R.; WANG, K. **Mixture proportion development and performance evaluation of pervious concrete for overlay applications**. Materials Journal, American Concrete Institute - ACI, v. 108, n. 4, p. 439–448, 2011.

KEVERN, J. T.; SPARKS, J. D. **Low-cost techniques for improving the surface durability of pervious concrete**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. n. 2342, p. 83-89, 2013.

KHAZANOVICH, L., YU, H. T.; RAO, S.; GALASOVA, K.; SHATS, E.; JONES, R. **ISLAB2000, Finite element analysis program for rigid and composite pavements, User's Guide**. ERES Consultant, Urbana-Champaign, Illinois, 2000.

LEE, D. Y. **The effects of air content, water-cement ratio and aggregate type on the flexural fatigue strength of plain concrete**. Thesis (Master). Iowa State University. Department of Civil Engineering, 1979.

KUANG, X.; KIM, J. Y.; GNECCO, I.; RAJE, S.; GAROFALO, G.; SANSALONE, J. **Particle Separation and Hydrologic Control by Cementitious Permeable Pavement**. Transportation Research Board: Journal of the Transportation Research Board, v. 2025, p. 111–117, 2007.

LEE, M. G.; CHIU, C. T.; KAN, Y. C.; YEN, T. **Experimental study of pervious concrete on parking lot**. GeoHunan International Conference – Material Design, Construction, Maintenance, and Testing of Pavements, v. 193, n. 20, p. 125–131, 2009.

LI, H. JONES, D.; WU, R.; HARVEY, J. **Development and HVS validation of design tables for permeable interlocking concrete pavement**. Research Report n. UCPRC-RR-2014-04.2, University of California, Pavement Research Center, 2014.

LI, J. **Mix design of pervious recycled concrete**. GeoHunan International Conference – Performance Modeling and Evaluation of Pavement Systems and Materials - ASCE, n. 195, p. 103-108, Changsha, China, 2009.

LUND, M. S. M.; KEVERN, J. T.; SCHAFER, V. R.; HANSEN, K. K. **Mix design for improved strength and freeze-thaw durability of pervious concrete fill in Pearl-Chain Bridges**. Materials and Structures, v. 50, n. 1, p. 1–15, 2017.

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.

MCCAIN, G. N.; DEWOOLKAR, M. M. **Strength and permeability characteristics of porous concrete pavements**. Transportation Research Board 88th Annual Meeting, Paper N° 09/2584, Washington DC, USA, 2009.

MCCAIN, G. N.; DEWOOLKAR, M. M. **Porous concrete pavements**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2164, n. 1, p. 66–75, 2010.

NEITHALATH, N.; SUMANASOORIYA, M. S.; DEO, O. **Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction.** Materials Characterization, v. 61, n. 8, p. 802–813, 2010.

OBLA, K. H. **Pervious Concrete for Sustainable Development.** Recent Advances in Concrete Technology. Washington DC, 2007. Disponível em: <https://www.nrmca.org/research/Pervious%20recent%20advances%20in%20concrete%20technology0707.pdf>. Acesso em: 28 out. 2016.

OLEK, J.; WEISS, W. J.; NEITHALATH, N.; MAROLF, A.; SELL, E.; THORNTON, W. D. **Development of Quiet and Durable Porous Portland Cement Concrete Paving Materials.** Final Report Number SQDH 2003-5, Purdue University, The Institute for Safe, Quiet and Durable Highways 2003.

ONO, B. W. **Análise do desempenho estrutural e hidráulico de um pavimento permeável com revestimento de blocos de concreto unidirecionalmente articulados.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2018.

PARK, S.; TIA, M. **An experimental study on the water-purification properties of porous concrete,** Cement and Concrete Research, v. 34, n. 2, p. 177-184, 2004.

PINDADO, M. Á.; AGUADO, A.; ALEJANDRO, J. **Fatigue behavior of polymer modified porous concretes.** Barcelona, Spain. Disponível em: <http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/2482/1/aguado_cement_1.pdf>. Acesso em: 12 out. 2016.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas.** 3a Edição, Oficina de Textos, São Paulo, 2006.

PINTO, L. L. C. A. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, São Paulo, 2011.

RAHMAN, M. T.; MAHMUD, K.; AHSAN, S. **Stress-strain characteristics of flexible pavement using finite element analysis**. International Journal of Civil and Structural Engineering, v. 2, n. 1, p. 233–240, 2011.

RODDEN, R.; VOIGT, G.; GIERALTOWSKI, A. **PerviousPave (Software)**. American Concrete Pavement Association - ACPA. Skokie, Illinois, 2010.

SALEHABADI, E. G. **the linear elastic analysis of flexible pavement by the finite element method and theory of multiple-layers system**. Switzerland Research Park Journal, v. 101, n. 9, p. 363–371, 2012.

SALES, T. L. **Pavimento permeável com superfície em blocos de concreto de alta porosidade**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2008.

SALLES, L. S. **Análise do comportamento de pavimento experimental de concreto continuamente armado de curta extensão**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2013.

SANTOS, H. R. **Influência do teor de argamassa e da granulometria da brita na permeabilidade e nas resistências à compressão e à abrasão de concretos permeáveis**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Goiás. Escola de Engenharia Civil. Goiânia, 2014.

SCHAEFER, V.; WANG, K.; SULEIMAN, M. T.; KEVERN, J. T. **Mix design development for pervious concrete in cold weather climates**. Final Report, Center for Transportation Research and Education (CTRE), Iowa State University, 2006.

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, 2011.

SUKUMARAN, B.; CHAMALA, N.; WILLIS, M.; DAVIS, J.; JUREWICZ, S. KYATHAM, V. **Three-dimensional finite element modeling of flexible pavements**. FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference. Atlantic City NJ, USA, 2004.

SULEIMAN, M. T.; GOPALAKRISHNAN, K.; KEVERN, J. T. **Structural response of pervious concrete pavement systems using falling weight deflectometer testing and analysis**. Journal of Transportation Engineering, v. 137, n. 12, p. 907–917, 2011.

TAMAI, M.; YOSHIDA, M. **Durability of porous concrete**. 6th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, n. SP-212-47, p. 755-769, Theessaloniki, Greece, 2003.

TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. **Pervious concrete pavement**. Report. Portland Cement Association. National Ready Mixed Concrete Association, p. 36, Skokie, Illinois, USA, 2004.

TITUS-GLOVER, L.; MALLELA, J.; DARTER, M.; VOIGT, G.; WAALKES, S. **Enhanced Portland cement concrete fatigue model for StreetPave**, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 1919, p. 29-37, 2005.

TUKEY, J. W. **Exploratory data analysis: past, present and future**. Report n. AD-A266 775, Princeton University, Princeton, NJ, USA, 1993.

VANCURA, M.; MACDONALD, K.; KHAZANOVICH, L. **Structural analysis of pervious concrete pavement**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 2226, p. 13–20, 2011.

WELKER, A. L.; BARBIS, J. D.; JEFFERS, P. A. a **side-by-side comparison of pervious concrete and porous asphalt**. Journal of the American Water Resources Association, v. 48, n. 4, p. 809–819, 2012.

YANG, J.; JIANG, G. **Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials**. Cement and Concrete Research, v. 33, n. 3, p. 381-386, 2003.

ZAGHLOUL, S.; WHITE, T. **Guidelines for permitting overloads – Part 1 – Effect of overloaded vehicles on the Indiana highway network.** Publication FHWA/IN/JHRP-93/05. Joint Highway Research Project, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1994.

ZAHARIEVA, R.; BODIN, F. B.; SKOCZYLAS, F.; QIRQUIN, E. **Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete.** Cement and Concrete Composites, v. 25, n. 2, p. 223-232, 2003.

ZDIRI, M.; ABRIAK, N.; NEJI, J.; BEN OUEZDOU, M. **Modelling of the stress and strains in an RCC pavement using the computer code Abaqus.** Electronic Journal of Structural Engineering, v. 9, p. 37-44, 2009.

APÊNDICE A – RESULTADOS DAS ANÁLISES PARA DETECÇÃO DE *OUTLIERS* DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO DE ACORDO COM A ASTM E178 (ASTM, 2002).

Tabela A.1: Análise de detecção de *outliers* dos dados de massa específica aparente no estado fresco

Mistura	CP	Resultados de Massa Específica Aparente no Estado Fresco (kg/m³)	Média (km/m³)	Desvio Padrão (km/m³)	T para ASTM E178 - $T=(X-X1)/S$	Limite de T Considerando 3, 6 e 10 Amostras e Nível de Significância Maior que 5%.	Verificação
Ra	1	1.783	1.816	32,042	1,060	1,153	Manter
	2	1.821	1.816	32,042	0,132	1,153	Manter
	3	1.846	1.816	32,042	0,927	1,153	Manter
Rb	1	1.795	1.783	12,732	1,000	1,153	Manter
	2	1.770	1.783	12,732	1,000	1,153	Manter
	3	1.783	1.783	12,732	0,000	1,153	Manter
Rc	1	1.859	1.846	33,687	0,378	1,153	Manter
	2	1.808	1.846	33,687	1,134	1,153	Manter
	3	1.872	1.846	33,687	0,756	1,153	Manter
Rf	1	1.770	1.753	25,037	0,678	1,822	Manter
	2	1.770	1.753	25,037	0,678	1,822	Manter
	3	1.744	1.753	25,037	0,339	1,822	Manter
	4	1.757	1.753	25,037	0,170	1,822	Manter
	5	1.706	1.753	25,037	1,865	1,822	Excluir
	6	1.770	1.753	25,037	0,678	1,822	Manter
Rg	1	1.795	1.831	23,362	1,544	1,822	Manter
	2	1.821	1.831	23,362	0,454	1,822	Manter
	3	1.821	1.831	23,362	0,454	1,822	Manter
	4	1.859	1.831	23,362	1,181	1,822	Manter
	5	1.846	1.831	23,362	0,636	1,822	Manter
	6	1.846	1.831	23,362	0,636	1,822	Manter
Ri	1	1.770	1.828	26,976	2,171	2,176	Manter
	2	1.795	1.828	26,976	1,227	2,176	Manter
	3	1.846	1.828	26,976	0,661	2,176	Manter
	4	1.833	1.828	26,976	0,189	2,176	Manter
	5	1.821	1.828	26,976	0,283	2,176	Manter
	6	1.859	1.828	26,976	1,133	2,176	Manter
	7	1.846	1.828	26,976	0,661	2,176	Manter
	8	1.833	1.828	26,976	0,189	2,176	Manter
	9	1.846	1.828	26,976	0,661	2,176	Manter
	10	1.833	1.828	26,976	0,189	2,176	Manter

Mistura	CP	Resultados de Massa Específica Aparente no Estado Fresco (kg/m³)	Média (km/m³)	Desvio Padrão (km/m³)	T para ASTM E178 - $T=(X-X1)/S$	Limite de T Considerando 3, 6 e 10 Amostras e Nível de Significância Maior que 5%.	Verificação
Rj	1	1.872	1.846	47,640	0,535	2,176	Manter
	2	1.897	1.846	47,640	1,069	2,176	Manter
	3	1.872	1.846	47,640	0,535	2,176	Manter
	4	1.833	1.846	47,640	0,267	2,176	Manter
	5	1.757	1.846	47,640	1,871	2,176	Manter
	6	1.846	1.846	47,640	0,000	2,176	Manter
	7	1.783	1.846	47,640	1,336	2,176	Manter
	8	1.910	1.846	47,640	1,336	2,176	Manter
	9	1.859	1.846	47,640	0,267	2,176	Manter
	10	1.833	1.846	47,640	0,267	2,176	Manter
RI	1	1.897	1.887	10,043	1,014	2,176	Manter
	2	1.884	1.887	10,043	0,254	2,176	Manter
	3	1.872	1.887	10,043	1,521	2,176	Manter
	4	1.897	1.887	10,043	1,014	2,176	Manter
	5	1.897	1.887	10,043	1,014	2,176	Manter
	6	1.884	1.887	10,043	0,254	2,176	Manter
	7	1.884	1.887	10,043	0,254	2,176	Manter
	8	1.897	1.887	10,043	1,014	2,176	Manter
	9	1.872	1.887	10,043	1,521	2,176	Manter
	10	1.884	1.887	10,043	0,254	2,176	Manter

Tabela A.2: Análise de detecção de *outliers* dos dados de massa específica aparente no estado endurecido

Mistura	CP	Resultados de Massa Específica Aparente no Estado Endurecido (kg/m³)	Média (kg/m³)	Desvio Padrão (kg/m³)	T para ASTM E178 - $T=(X-X1)/S$	Limite de T Considerando 3, 6 e 10 Amostras e Nível de Significância Maior que 5%.	Verificação
Ra	1	1.769	1.807	35,049	1,078	1,153	Manter
	2	1.813	1.807	35,049	0,180	1,153	Manter
	3	1.838	1.807	35,049	0,898	1,153	Manter
Rb	1	1.790	1.772	15,804	1,140	1,153	Manter
	2	1.765	1.772	15,804	0,411	1,153	Manter
	3	1.760	1.772	15,804	0,729	1,153	Manter
Rc	1	1.855	1.863	8,349	0,915	1,153	Manter
	2	1.872	1.863	8,349	1,067	1,153	Manter
	3	1.861	1.863	8,349	0,152	1,153	Manter
Rf	1	1.756	1.724	25,971	1,238	1,822	Manter
	2	1.735	1.724	25,971	0,429	1,822	Manter
	3	1.717	1.724	25,971	0,243	1,822	Manter
	4	1.699	1.724	25,971	0,947	1,822	Manter
	5	1.690	1.724	25,971	1,291	1,822	Manter
	6	1.745	1.724	25,971	0,814	1,822	Manter
Rg	1	1.782	1.819	26,978	1,368	1,822	Manter
	2	1.802	1.819	26,978	0,647	1,822	Manter
	3	1.803	1.819	26,978	0,610	1,822	Manter
	4	1.845	1.819	26,978	0,955	1,822	Manter
	5	1.845	1.819	26,978	0,965	1,822	Manter
	6	1.838	1.819	26,978	0,705	1,822	Manter
Ri	1	1.757	1.819	26,751	2,321	2,176	Excluir
	2	1.791	1.819	26,751	1,053	2,176	Manter
	3	1.843	1.819	26,751	0,880	2,176	Manter
	4	1.838	1.819	26,751	0,696	2,176	Manter
	5	1.819	1.819	26,751	0,001	2,176	Manter
	6	1.845	1.819	26,751	0,951	2,176	Manter
	7	1.826	1.819	26,751	0,247	2,176	Manter
	8	1.821	1.819	26,751	0,063	2,176	Manter
	9	1.833	1.819	26,751	0,525	2,176	Manter
	10	1.820	1.819	26,751	0,013	2,176	Manter
Rj	1	1.859	1.838	46,812	0,457	2,176	Manter
	2	1.883	1.838	46,812	0,967	2,176	Manter
	3	1.860	1.838	46,812	0,480	2,176	Manter
	4	1.829	1.838	46,812	0,172	2,176	Manter
	5	1.757	1.838	46,812	1,725	2,176	Manter
	6	1.843	1.838	46,812	0,116	2,176	Manter
	7	1.766	1.838	46,812	1,520	2,176	Manter

Mistura	CP	Resultados de			T para ASTM E178 - $T=(X-X1)/S$	Limite de T Considerando 3, 6 e 10 Amostras e Nível de Significância Maior que 5%.	Verificação
		Massa Específica Aparente no Estado Endurecido (kg/m³)	Média (kg/m³)	Desvio Padrão (kg/m³)			
RI	8	1.904	1.838	46,812	1,411	2,176	Manter
	9	1.855	1.838	46,812	0,383	2,176	Manter
	10	1.819	1.838	46,812	0,397	2,176	Manter
	1	1.884	1.884	10,007	0,048	2,176	Manter
	2	1.874	1.884	10,007	1,014	2,176	Manter
	3	1.868	1.884	10,007	1,574	2,176	Manter
	4	1.885	1.884	10,007	0,156	2,176	Manter
	5	1.890	1.884	10,007	0,602	2,176	Manter
	6	1.890	1.884	10,007	0,570	2,176	Manter
	7	1.901	1.884	10,007	1,671	2,176	Manter
	8	1.892	1.884	10,007	0,831	2,176	Manter
	9	1.873	1.884	10,007	1,129	2,176	Manter
	10	1.882	1.884	10,007	0,162	2,176	Manter

Tabela A.3: Análise de detecção de *outliers* dos dados de porosidade

Mistura	CP	Resultados de Porosidade	Média	Desvio Padrão	T para ASTM E178 - $T=(X-X1)/S$	Limite de T Considerando 3, 6 e 9 Amostras e Nível de Significância Maior que 5%.	Verificação
Rb	1	29,86%	30,31%	0,41%	1,093	1,153	Manter
	2	30,66%	30,31%	0,41%	0,868	1,153	Manter
	3	30,40%	30,31%	0,41%	0,225	1,153	Manter
Rc	1	26,09%	25,77%	0,28%	1,147	1,153	Manter
	2	25,58%	25,77%	0,28%	0,688	1,153	Manter
	3	25,64%	25,77%	0,28%	0,459	1,153	Manter
Rf	1	30,71%	32,32%	1,30%	1,238	1,822	Manter
	2	31,76%	32,32%	1,30%	0,429	1,822	Manter
	3	32,63%	32,32%	1,30%	0,243	1,822	Manter
	4	33,55%	32,32%	1,30%	0,947	1,822	Manter
	5	33,99%	32,32%	1,30%	1,291	1,822	Manter
	6	31,26%	32,32%	1,30%	0,814	1,822	Manter
Rg	1	29,39%	27,54%	1,35%	1,368	1,822	Manter
	2	28,41%	27,54%	1,35%	0,647	1,822	Manter
	3	28,36%	27,54%	1,35%	0,610	1,822	Manter
	4	26,25%	27,54%	1,35%	0,955	1,822	Manter
	5	26,24%	27,54%	1,35%	0,965	1,822	Manter
	6	26,59%	27,54%	1,35%	0,705	1,822	Manter
Ri	1	-	-	-	-	-	-
	2	29,11%	27,53%	0,74%	2,140	2,110	Excluir
	3	26,73%	27,53%	0,74%	1,080	2,110	Manter
	4	26,90%	27,53%	0,74%	0,847	2,110	Manter
	5	27,76%	27,53%	0,74%	0,310	2,110	Manter
	6	26,77%	27,53%	0,74%	1,028	2,110	Manter
	7	27,55%	27,53%	0,74%	0,025	2,110	Manter
	8	27,73%	27,53%	0,74%	0,275	2,110	Manter
	9	27,32%	27,53%	0,74%	0,277	2,110	Manter
	10	27,88%	27,53%	0,74%	0,482	2,110	Manter
Rj	1	-	-	-	-	-	-
	2	24,20%	26,53%	2,15%	1,080	2,110	Manter
	3	25,28%	26,53%	2,15%	0,580	2,110	Manter
	4	26,89%	26,53%	2,15%	0,169	2,110	Manter
	5	29,88%	26,53%	2,15%	1,562	2,110	Manter
	6	26,15%	26,53%	2,15%	0,177	2,110	Manter
	7	29,55%	26,53%	2,15%	1,408	2,110	Manter
	8	23,64%	26,53%	2,15%	1,344	2,110	Manter
	9	25,88%	26,53%	2,15%	0,301	2,110	Manter
	10	27,27%	26,53%	2,15%	0,344	2,110	Manter
RI	1	-	-	-	-	-	-

Mistura	CP	Resultados de Porosidade	Média	Desvio Padrão	T para ASTM E178 - $T=(X-X1)/S$	Limite de T Considerando 3, 6 e 9 Amostras e Nível de Significância Maior que 5%.	Verificação
	2	24,52%	24,06%	0,68%	0,675	2,110	Manter
	3	24,73%	24,06%	0,68%	0,983	2,110	Manter
	4	23,97%	24,06%	0,68%	0,139	2,110	Manter
	5	23,83%	24,06%	0,68%	0,345	2,110	Manter
	6	23,81%	24,06%	0,68%	0,373	2,110	Manter
	7	22,71%	24,06%	0,68%	1,992	2,110	Manter
	8	23,69%	24,06%	0,68%	0,551	2,110	Manter
	9	25,00%	24,06%	0,68%	1,376	2,110	Manter
	10	24,31%	24,06%	0,68%	0,366	2,110	Manter

Tabela A.4: Análise de detecção de *outliers* dos dados de taxa de infiltração em condição confinada

Mistura	CP	Resultados Taxa de Infiltração Confinada (cm/h)	Média (cm/h)	Desvio Padrão (cm/h)	T para ASTM E178 - $T=(X-X1)/S$	Limite de T Considerando 3, 6 e 9 Amostras e Nível de Significância Maior que 5%.	Verificação
Rb	1	4.450	4.502	90	0,577	1,153	Manter
	2	4.450	4.502	90	0,577	1,153	Manter
	3	4.607	4.502	90	1,155	1,153	Excluir*
Rc	1	2.505	2.409	137	0,696	1,153	Manter
	2	2.471	2.409	137	0,450	1,153	Manter
	3	2.252	2.409	137	1,146	1,153	Manter
Rf	1	4.604	6.273	1.683	0,991	1,822	Manter
	2	5.393	6.273	1.683	0,523	1,822	Manter
	3	6.322	6.273	1.683	0,029	1,822	Manter
	4	6.872	6.273	1.683	0,356	1,822	Manter
	5	9.279	6.273	1.683	1,785	1,822	Manter
	6	5.171	6.273	1.683	0,655	1,822	Manter
Rg	1	5.424	4.433	781	1,270	1,822	Manter
	2	4.696	4.433	781	0,338	1,822	Manter
	3	5.031	4.433	781	0,767	1,822	Manter
	4	3.965	4.433	781	0,599	1,822	Manter
	5	4.217	4.433	781	0,277	1,822	Manter
	6	3.262	4.433	781	1,499	1,822	Manter
Ri	1	-	-	-	-	-	-
	2	6.015	6.472	763	0,598	2,110	Manter
	3	6.406	6.472	763	0,086	2,110	Manter
	4	6.194	6.472	763	0,364	2,110	Manter
	5	5.194	6.472	763	1,674	2,110	Manter
	6	6.619	6.472	763	0,193	2,110	Manter
	7	6.067	6.472	763	0,530	2,110	Manter
	8	7.937	6.472	763	1,919	2,110	Manter
	9	6.791	6.472	763	0,417	2,110	Manter
	10	7.025	6.472	763	0,724	2,110	Manter
Rj	1	-	-	-	-	-	-
	2	5.305	6.670	742	1,839	2,110	Manter
	3	6.470	6.670	742	0,271	2,110	Manter
	4	7.101	6.670	742	0,580	2,110	Manter
	5	7.441	6.670	742	1,038	2,110	Manter
	6	7.769	6.670	742	1,479	2,110	Manter
	7	6.786	6.670	742	0,155	2,110	Manter
	8	6.003	6.670	742	0,898	2,110	Manter
	9	6.429	6.670	742	0,326	2,110	Manter
	10	6.731	6.670	742	0,081	2,110	Manter
RI	1	-	-	-	-	-	-

Mistura	CP	Resultados Taxa de Infiltração Confinada (cm/h)	Média (cm/h)	Desvio Padrão (cm/h)	T para ASTM E178 - $T=(X-X1)/S$	Limite de T Considerando 3, 6 e 9 Amostras e Nível de Significância Maior que 5%.	Verificação
	2	5.964	5.025	571	1,646	2,110	Manter
	3	5.001	5.025	571	0,042	2,110	Manter
	4	5.476	5.025	571	0,791	2,110	Manter
	5	4.856	5.025	571	0,297	2,110	Manter
	6	4.572	5.025	571	0,794	2,110	Manter
	7	4.561	5.025	571	0,814	2,110	Manter
	8	4.173	5.025	571	1,494	2,110	Manter
	9	5.610	5.025	571	1,026	2,110	Manter
	10	5.012	5.025	571	0,023	2,110	Manter

* O resultado não foi desconsiderado devido ao pequeno número de CPs para essa mistura, e também porque os resultados para os outros dois CPs são iguais, o que leva o resultado, por menor disperso que seja, a ser considerado como um *outlier* de acordo com o método de detecção aplicado, o que é comprovado pela proximidade de T calculado em relação ao T limite.

Tabela A.5: Análise de detecção de *outliers* dos dados de taxa de infiltração em condição não confinada

Mistura	CP	Resultados Taxa de Infiltração Não Confinada (cm/h)	Média (cm/h)	Desvio Padrão (cm/h)	T para ASTM E178 - $T=(X-X1)/S$	Limite de T Considerando 3, 6 e 9 Amostras e Nível de Significância Maior que 5%.	Verificação
Rb	1	4.825	5.158	370	0,901	1,153	Manter
	2	5.556	5.158	370	1,076	1,153	Manter
	3	5.093	5.158	370	0,176	1,153	Manter
Rc	1	2.929	2.759	155	1,101	1,153	Manter
	2	2.720	2.759	155	0,248	1,153	Manter
	3	2.627	2.759	155	0,853	1,153	Manter
Rf	1	4.947	6.512	1.695	0,923	1,822	Manter
	2	5.020	6.512	1.695	0,880	1,822	Manter
	3	7.316	6.512	1.695	0,475	1,822	Manter
	4	6.456	6.512	1.695	0,033	1,822	Manter
	5	9.451	6.512	1.695	1,734	1,822	Manter
	6	5.880	6.512	1.695	0,373	1,822	Manter
Rg	1	5.597	5.040	1.454	0,383	1,822	Manter
	2	7.334	5.040	1.454	1,578	1,822	Manter
	3	5.621	5.040	1.454	0,399	1,822	Manter
	4	3.953	5.040	1.454	0,748	1,822	Manter
	5	4.474	5.040	1.454	0,390	1,822	Manter
	6	3.264	5.040	1.454	1,222	1,822	Manter
Ri	1	-	-	-	-	-	-
	2	6.520	7.330	1.020	0,794	2,110	Manter
	3	6.914	7.330	1.020	0,408	2,110	Manter
	4	6.726	7.330	1.020	0,592	2,110	Manter
	5	6.120	7.330	1.020	1,186	2,110	Manter
	6	6.483	7.330	1.020	0,830	2,110	Manter
	7	7.453	7.330	1.020	0,121	2,110	Manter
	8	8.207	7.330	1.020	0,860	2,110	Manter
	9	8.798	7.330	1.020	1,439	2,110	Manter
	10	8.747	7.330	1.020	1,390	2,110	Manter
Rj	1	-	-	-	-	-	-
	2	6.128	7.482	904	1,499	2,110	Manter
	3	7.156	7.482	904	0,361	2,110	Manter
	4	8.480	7.482	904	1,104	2,110	Manter
	5	8.178	7.482	904	0,769	2,110	Manter
	6	8.632	7.482	904	1,272	2,110	Manter
	7	8.091	7.482	904	0,673	2,110	Manter
	8	6.465	7.482	904	1,126	2,110	Manter
	9	6.877	7.482	904	0,670	2,110	Manter
	10	7.334	7.482	904	0,164	2,110	Manter
RI	1	-	-	-	-	-	-

Mistura	CP	Resultados Taxa de Infiltração Não Confinada (cm/h)	Média (cm/h)	Desvio Padrão (cm/h)	T para ASTM E178 - $T=(X-X1)/S$	Limite de T Considerando 3, 6 e 9 Amostras e Nível de Significância Maior que 5%.	Verificação
	2	6.529	5.908	484	1,283	2,110	Manter
	3	6.292	5.908	484	0,792	2,110	Manter
	4	5.984	5.908	484	0,156	2,110	Manter
	5	5.992	5.908	484	0,172	2,110	Manter
	6	6.055	5.908	484	0,303	2,110	Manter
	7	5.415	5.908	484	1,019	2,110	Manter
	8	4.963	5.908	484	1,952	2,110	Manter
	9	6.258	5.908	484	0,722	2,110	Manter
	10	5.687	5.908	484	0,457	2,110	Manter

Tabela A.6: Análise de detecção de *outliers* dos dados de resistência à compressão aos 28 dias

Mistura	CP	Resistência à Compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	T para ASTM E178 - $T=(X-X1)/S$	Limite de T Considerando 3 e 6 Amostras e Nível de Significância Maior que 5%.	Verificação
Ra	1	8,75	11,93	3,053	1,043	1,153	Manter
	2	12,21	11,93	3,053	0,092	1,153	Manter
	3	14,83	11,93	3,053	0,951	1,153	Manter
Rb	1	5,00	5,51	0,486	1,048	1,153	Manter
	2	5,56	5,51	0,486	0,105	1,153	Manter
	3	5,97	5,51	0,486	0,943	1,153	Manter
Rc	1	8,28	8,45	3,326	0,051	1,153	Manter
	2	5,21	8,45	3,326	0,974	1,153	Manter
	3	11,85	8,45	3,326	1,025	1,153	Manter
Rf	1	6,42	5,67	0,791	0,939	1,822	Manter
	2	6,21	5,67	0,791	0,682	1,822	Manter
	3	4,93	5,67	0,791	0,945	1,822	Manter
	4	5,70	5,67	0,791	0,038	1,822	Manter
	5	4,51	5,67	0,791	1,476	1,822	Manter
	6	6,28	5,67	0,791	0,762	1,822	Manter
Rg	1	6,10	8,46	1,572	1,500	1,822	Manter
	2	6,98	8,46	1,572	0,941	1,822	Manter
	3	8,66	8,46	1,572	0,128	1,822	Manter
	4	9,66	8,46	1,572	0,768	1,822	Manter
	5	9,38	8,46	1,572	0,590	1,822	Manter
	6	9,96	8,46	1,572	0,954	1,822	Manter
Ri	5	8,66	7,94	0,741	0,974	1,822	Manter
	6	7,13	7,94	0,741	1,088	1,822	Manter
	7	8,28	7,94	0,741	0,458	1,822	Manter
	8	7,64	7,94	0,741	0,401	1,822	Manter
	9	8,79	7,94	0,741	1,146	1,822	Manter
	10	7,13	7,94	0,741	1,088	1,822	Manter
Rj	5	7,13	8,72	1,797	0,886	1,822	Manter
	6	10,44	8,72	1,797	0,957	1,822	Manter
	7	6,88	8,72	1,797	1,028	1,822	Manter
	8	10,44	8,72	1,797	0,957	1,822	Manter
	9	10,19	8,72	1,797	0,815	1,822	Manter
	10	7,26	8,72	1,797	0,815	1,822	Manter
RI	5	11,20	11,14	0,982	0,065	1,822	Manter
	6	12,73	11,14	0,982	1,621	1,822	Manter
	7	11,33	11,14	0,982	0,194	1,822	Manter

Mistura	CP	Resistência à Compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	T para ASTM E178 - $T=(X-X1)/S$	Limite de T Considerando 3 e 6 Amostras e Nível de Significância Maior que 5%.	Verificação
	8	11,08	11,14	0,982	0,065	1,822	Manter
	9	9,68	11,14	0,982	1,491	1,822	Manter
	10	10,82	11,14	0,982	0,324	1,822	Manter

Tabela A.7: Análise de detecção de *outliers* dos dados resistência à tração na flexão aos 28 dias

Mistura	CP	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	T para ASTM E178 - $T=(X-X1)/S$	Limite de T Considerando 3, 6, 7 e 8 Amostras e Nível de Significância Maior que 5%.	Verificação
Ra	1	1,34	2,19	0,751	1,136	1,938	Manter
	2	2,75	2,19	0,751	0,748	1,938	Manter
	3	2,48	2,19	0,751	0,388	1,938	Manter
	4	2,25	2,19	0,751	0,077	1,938	Manter
	5	2,63	2,19	0,751	0,590	1,938	Manter
	6	2,85	2,19	0,751	0,887	1,938	Manter
	7	2,79	2,19	0,751	0,796	1,938	Manter
Rb	1	1,37	1,39	0,458	0,042	1,938	Manter
	2	0,94	1,39	0,458	0,978	1,938	Manter
	3	1,86	1,39	0,458	1,020	1,938	Manter
	4	1,39	1,39	0,458	0,005	1,938	Manter
	5	1,30	1,39	0,458	0,207	1,938	Manter
	6	1,80	1,39	0,458	0,894	1,938	Manter
	7	1,20	1,39	0,458	0,412	1,938	Manter
Rc	1	1,67	1,75	0,376	0,214	2,032	Manter
	2	2,16	1,75	0,376	1,090	2,032	Manter
	3	1,42	1,75	0,376	0,876	2,032	Manter
	4	1,59	1,75	0,376	0,425	2,032	Manter
	5	1,16	1,75	0,376	1,566	2,032	Manter
	6	1,82	1,75	0,376	0,179	2,032	Manter
	7	1,48	1,75	0,376	0,722	2,032	Manter
	8	2,52	1,75	0,376	2,048	2,032	Excluir
Rf	1	1,98	1,43	0,326	1,705	1,822	Manter
	2	1,59	1,43	0,326	0,511	1,822	Manter
	3	1,40	1,43	0,326	0,087	1,822	Manter
	4	1,24	1,43	0,326	0,562	1,822	Manter
	5	1,29	1,43	0,326	0,407	1,822	Manter
	6	1,05	1,43	0,326	1,159	1,822	Manter
Rg	1	1,46	1,49	0,189	0,155	1,822	Manter
	2	1,32	1,49	0,189	0,897	1,822	Manter
	3	1,43	1,49	0,189	0,326	1,822	Manter
	4	1,70	1,49	0,189	1,119	1,822	Manter
	5	1,29	1,49	0,189	1,049	1,822	Manter
	6	1,74	1,49	0,189	1,309	1,822	Manter
Ri	1	3,60*	2,88	1,247	0,577	1,153	Manter
	2	3,60*	2,88	1,247	0,577	1,153	Manter
	3	1,44*	2,88	1,247	1,155	1,153	Excluir*
Rj	1	2,16	1,92	0,208	1,155	1,153	Excluir**

Mistura	CP	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	T para ASTM E178 - $T=(X-X1)/S$	Limite de T Considerando 3, 6, 7 e 8 Amostras e Nível de Significância Maior que 5%.	Verificação
	2	1,80	1,92	0,208	0,577	1,153	Manter
	3	1,80	1,92	0,208	0,577	1,153	Manter
RI	1	1,44	2,04	0,749	0,801	1,153	Manter
	2	2,88	2,04	0,749	1,121	1,153	Manter
	3	1,80	2,04	0,749	0,320	1,153	Manter

* A técnica de detecção de *outlier* aplicada na mistura Ri indica a remoção do valor de 1,44 MPa uma vez que os resultados para os outros dois CP foram iguais e muito mais elevados. Neste caso o valor de 1,44 MPa foi o único mantido, e os demais valores foram desconsiderados, visto que os resultados estão muito acima da resistência esperada para a mistura, indicando possível falha na execução do ensaio.

** O resultado não foi desconsiderado devido ao pequeno número de CPs produzidos para essa mistura, e também porque os resultados para os outros dois CPs são iguais, o que leva o resultado, por menos disperso que seja, a ser considerado como um *outlier* de acordo com o método de detecção aplicado, o que é comprovado pela proximidade de T calculado em relação ao T limite.

Tabela A.8: Análise de detecção de *outliers* dos dados resistência à compressão aos 28 dias referente aos CPs para controle tecnológico das misturas dos segmentos 1, 2 e 3.

Mistura	CP	Resistência à Compressão (MPa)	Média	Desvio Padrão	T para ASTM E178 - $T=(X-X1)/S$	Limite de T Considerando 12 Amostras e Nível de Significância Maior que 5%.	Verificação
RI - Controle Tecnológico Segmentos 1 e 2	1	8,91	11,08	2,504	0,865	2,285	Manter
	2	12,99	11,08	2,504	0,764	2,285	Manter
	3	9,17	11,08	2,504	0,762	2,285	Manter
	4	11,71	11,08	2,504	0,253	2,285	Manter
	5	10,82	11,08	2,504	0,103	2,285	Manter
	6	11,08	11,08	2,504	0,001	2,285	Manter
	7	7,89	11,08	2,504	1,273	2,285	Manter
	8	12,73	11,08	2,504	0,660	2,285	Manter
	9	14,64	11,08	2,504	1,423	2,285	Manter
	10	8,79	11,08	2,504	0,913	2,285	Manter
	11	15,53	11,08	2,504	1,779	2,285	Manter
	12	8,66	11,08	2,504	0,965	2,285	Manter
Mistura Comercial - Controle Tecnológico Segmento 3	1	7,13	11,08	2,504	1,576	2,285	Manter
	2	15,92	11,08	2,504	1,933	2,285	Manter
	3	8,91	11,08	2,504	0,864	2,285	Manter
	4	9,17	11,08	2,504	0,763	2,285	Manter
	5	12,73	11,08	2,504	0,661	2,285	Manter
	6	11,08	11,08	2,504	0,000	2,285	Manter
	7	7,00	11,08	2,504	1,627	2,285	Manter
	8	13,62	11,08	2,504	1,017	2,285	Manter
	9	10,70	11,08	2,504	0,152	2,285	Manter
	10	8,02	11,08	2,504	1,220	2,285	Manter
	11	12,48	11,08	2,504	0,560	2,285	Manter
	12	8,02	11,08	2,504	1,220	2,285	Manter

APÊNDICE B – PROJETO EXECUTIVO DA CALÇADA 2

Figura B.1: Planta de localização e acesso para caminhões

Figura B.2: Local de implantação da calçada 2 - Situação existente

Figura B.3: Local de implantação da calçada 2 - Situação projetada

Para detalhes, ver a Figura B.4 e a Figura B.5

Figura B.4: (a) Detalhe 1 – Segmento 2; (b) Corte AA; (c) Corte BB; (d) Corte CC

(a)

Ver descrição dos materiais de 1 a 6 na Figura B.5

(b)

(c)

(d)

LEGENDA	MATERIAL
①	CPCP LMP
②	BASE RECICLADA – FAIXA 20–40 mm
③	TUBO DE PVC Ø 100 MM REVESTIDO COM MANTA GEOTÊXTEL
④	MANTA DUPLA PLÁSTICA 150 MICRAS – IMPERMEABILIZANTE
⑤	SOLO LOCAL NÃO COMPACTADO
⑥	CAMADA DRENANTE – BRITA 2
⑦	HYDROMEDIA LAFARGE
⑧	MANTA GEOTÊXTEL – LINHA BIDIM RT-07

APÊNDICE C – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE LEVANTAMENTO COM FWD

Figura C.1: Localização dos pontos de execução dos levantamentos deflectométricos na Calçada 1 (dimensões em m)

Figura C.2: Localização dos pontos de execução dos levantamentos deflectométricos no segmento 1 da Calçada 2 (dimensões em m)

Figura C.3: Localização dos pontos de execução dos levantamentos deflectométricos no segmento 2 da Calçada 2 (dimensões em m)

APÊNDICE D – RESULTADOS DE TAXA DE INFILTRAÇÃO MEDIDOS NAS CALÇADAS 1 E 2 ENTRE O PERÍODO DE MAIO DE 2017 E DEZEMBRO DE 2018

Tabela D.1: Resultados de taxa de infiltração na calçada 1

Calçada 1	Data do Ensaio					
	11/05/2017		26/09/2018		11/12/2018	
	t (s)	I (cm/h)	t (s)	I (cm/h)	t (s)	I (cm/h)
Ponto 1	84,33	1087	48,32	379	150,21	122
Ponto 2	108,51	845	37,80	485	52,20	351
Ponto 3	76,15	241	137,54	133	184,06	100
Ponto 4	69,22	265	103,10	178	303,61	60
Ponto 5	32,26	2842	53,77	1705	65,86	1392
Ponto 6	75,42	1216	95,41	961	95,41	192

Estão destacados em vermelho os ensaios realizados com 3,6 litros. Os demais foram realizados considerando 18 litros.

Tabela D.2: Resultados de taxa de infiltração no segmento 1 da calçada 2

Calçada 2 - Segmento 1	Data do Ensaio					
	11/05/2017		26/09/2018		11/12/2018	
	t (s)	I (cm/h)	t (s)	I (cm/h)	t (s)	I (cm/h)
Ponto 1	74,50	1.231	69,08	265	68,99	266
Ponto 2	25,19	3.639	35,31	2.596	38,89	2.357
Ponto 3	16,14	5.680	21,78	4.209	25,07	3.657
Ponto 4	14,55	6.301	19,83	4.623	23,17	3.957
Ponto 5	17,78	5.156	32,80	2.795	34,88	2.628
Ponto 6	16,89	5.428	23,61	3.883	27,01	3.394
Ponto 7	14,10	6.502	17,19	5.333	21,86	4.194
Ponto 8	17,28	5.305	22,83	4.015	24,59	3.728
Ponto 9	15,72	5.832	24,10	3.804	25,52	3.592
Ponto 10	15,10	6.071	20,60	4.450	21,78	4.209
Ponto 11	7,49	12.239	16,42	5.583	15,56	5.892
Ponto 12	11,27	8.134	12,93	7.090	16,30	5.624

Estão destacados em vermelho os ensaios realizados com 3,6 litros. Os demais foram realizados considerando 18 litros.

Tabela D.3: Resultados de taxa de infiltração no segmento 2 da calçada 2

Calçada 2 - Segmento 2	Data do Ensaio					
	11/05/2017		26/09/2018		11/12/2018	
	t (s)	I (cm/h)	t (s)	I (cm/h)	t (s)	I (cm/h)
Ponto 1	29,43	3.115	42,59	2.152	40,42	2.268
Ponto 2	12,40	7.393	16,20	5.659	17,83	5.142
Ponto 3	8,17	11.221	10,59	8.657	13,30	6.893
Ponto 4	19,47	4.708	55,77	1.644	61,29	1.496
Ponto 5	20,41	4.492	85,50	1.072	115,40	794
Ponto 6	19,55	4.689	26,65	3.440	31,02	2.955
Ponto 7	15,10	6.071	22,70	4.038	24,25	3.780
Ponto 8	16,71	5.486	24,50	3.742	27,23	3.367
Ponto 9	13,36	6.862	17,18	5.336	20,40	4.494
Ponto 10	11,00	8.334	15,05	6.091	18,60	4.929
Ponto 11	11,87	7.723	14,89	6.157	16,20	5.659

APÊNDICE E – DEMAIS MODELOS EMPÍRICOS DE REDUÇÃO DE TAXA DE INFILTRAÇÃO GERADOS

Figura E.1: Modelo de variação da permeabilidade em função do tempo versus resultados dos levantamentos de campo – Modelo Linear – $R^2=0,24$

Figura E.2: Modelo de variação da permeabilidade em função do tempo e da presença ou não de vegetação versus resultados dos levantamentos de campo – Modelo Linear – $R^2=0,65$

Figura E.3: Modelo de variação da permeabilidade em função do tempo versus resultados dos levantamentos de campo – Modelo logarítmico – $R^2=0,24$

Figura E.4: Modelo de variação da permeabilidade em função do tempo e da presença ou não de vegetação versus resultados dos levantamentos de campo – Modelo logarítmico – $R^2=0,65$

APÊNDICE F – RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS DEFLECTOMÉTRICOS REALIZADOS NAS CALÇADAS – ETAPA 1

Tabela F.1: Resultados dos levantamentos deflectométricos na Calçada 1

Ponto	Carga (kgf)	Deflexão (10 ⁻² mm)							Temp. (°C)	
		Distância do centro de aplicação (cm)							Ar	Pav.
		0	20	30	45	60	90	120		
C1-1A	4058	236,1	175,4	144,5	99,7	59,8	1,3	-2,1	33,0	36,6
C1-1B	4069	231,6	172,2	141,5	97,4	58,2	1,2	-2,2	34,4	37,9
C1-2A	4099	144,8	139,8	133,3	121,8	111,9	88,8	65,0	34,7	34,0
C1-2B	4140	132,8	128,3	122,0	111,8	102,5	81,4	59,0	34,7	34,0
C1-3A	4109	126,9	121,1	110,6	100,5	86,0	59,0	36,9	34,8	35,2
C1-3B	4140	112,9	107,6	99,1	89,4	76,5	52,4	34,0	34,8	35,2
C1-4A	4058	173,2	155,6	140,6	121,6	102,7	67,5	40,3	33,4	36,1
C1-4B	4120	151,3	135,9	124,0	106,6	89,4	61,4	36,5	33,4	36,1
C1-5A	4048	139,9	140,1	127,7	118,5	102,7	72,4	40,9	32,5	36,0
C1-5B	4120	120,1	120,1	109,0	100,4	85,9	59,8	35,0	32,5	36,0
C1-6A	4028	111,5	79,1	93,8	85,7	72,7	51,8	36,1	34,0	37,6
C1-6B	4120	100,4	95,3	82,7	74,7	62,1	43,0	29,1	34,0	37,6
C1-7A	4058	98,2	91,4	83,2	75,5	61,6	41,1	25,9	31,6	36,6
C1-7B	4109	87,1	81,1	73,4	66,2	54,1	36,0	23,4	31,6	36,6
C1-8A	4130	102,1	55,7	61,4	55,6	41,8	25,6	15,2	31,9	37,8
C1-8B	4120	98,7	81,0	60,9	53,2	41,3	26,0	14,9	31,9	37,8

Tabela F.2: Resultados dos levantamentos deflectométricos na Calçada 2 – Segmento 1

Ponto	Carga (kgf)	Deflexão (10 ⁻² mm)								Temp. (°C)	
		Distância do centro de aplicação (cm)								Ar	Pav.
		0	20	30	45	60	90	120			
C2-1A	4035	122,8	93,7	71,8	52,2	34,9	14,4	6,9	38,0	40,0	
C2-1B	4112	122,6	93,6	71,4	52,1	34,5	14,4	6,9	38,0	40,0	
C2-2A	4068	85,4	72,8	59,8	48,3	36,4	19,8	11,5	39,0	38,0	
C2-2B	4148	76,9	64,3	53,1	42,1	31,5	16,8	10,0	39,0	38,0	
C2-3A	4086	75,3	64,9	53,3	43,4	33,0	19,0	10,9	39,0	35,0	
C2-3B	4146	69,4	59,4	48,3	39,0	29,4	16,3	10,0	39,0	35,0	
C2-4A	4049	84,2	69,5	57,0	45,2	33,4	17,1	9,0	40,0	42,0	
C2-4B	4136	77,3	63,0	51,0	39,8	29,0	14,8	8,4	40,0	42,0	
C2-5A	4079	79,2	67,3	57,1	47,0	36,4	20,7	11,9	40,0	49,0	
C2-5B	4149	74,2	63,0	52,9	43,3	33,0	18,1	10,7	40,0	49,0	
C2-6A	4044	87,0	74,6	62,8	50,9	38,8	21,4	11,5	39,0	51,0	
C2-6B	4132	81,9	70,0	58,5	47,1	35,5	19,2	10,8	39,0	51,0	
C2-7A	4036	95,1	82,4	69,4	57,6	43,7	23,3	12,8	39,0	48,0	
C2-7B	4080	91,1	78,6	65,8	54,0	40,4	21,7	11,9	39,0	48,0	
C2-8A	4120	62,0	59,5	52,5	45,4	37,3	23,9	14,7	39,0	49,0	
C2-8B	4177	58,8	56,2	49,4	42,3	34,4	21,3	13,4	39,0	49,0	

Tabela F.3: Resultados dos levantamentos deflectométricos na Calçada 2 – Segmento 2.

Ponto	Carga (kgf)	Deflexão (10^{-2} mm)							Temp. (°C)	
		Distância do centro de aplicação (cm)							Ar	Pav.
		0	20	30	45	60	90	120		
C2-9A	4122	74,5	67,8	57,1	47,9	37,8	22,3	13,4	38,0	52,0
C2-9B	4172	71,0	64,4	53,7	44,8	35,0	20,4	12,3	38,0	52,0
C2-10A	4176	46,0	43,2	38,4	34,2	28,6	19,5	12,5	40,0	47,0
C2-10B	4197	43,1	40,6	35,9	31,8	26,5	18,0	11,6	40,0	47,0
C2-11A	4180	40,4	38,0	34,2	30,7	26,1	17,2	12,1	40,0	49,0
C2-11B	4212	38,4	36,0	32,2	28,9	24,4	16,1	11,2	40,0	49,0
C2-12A	4195	41,4	37,9	33,4	29,5	24,3	15,7	10,6	40,0	46,0
C2-12B	4213	40,0	36,5	32,0	28,2	23,2	14,9	10,1	40,0	46,0
C2-13A	4145	48,9	45,0	39,8	35,2	29,7	19,3	13,5	40,0	51,0
C2-13B	4167	47,1	43,6	38,0	33,5	28,0	18,2	12,7	40,0	51,0
C2-14A	4069	65,0	59,3	51,9	45,7	37,3	24,6	16,4	42,0	46,0
C2-14B	4100	65,3	56,5	52,1	46,1	37,3	24,6	16,4	42,0	46,0
C2-15A	4090	59,8	56,8	52,0	47,4	41,4	30,4	21,9	43,0	47,0
C2-15B	4148	57,4	53,4	49,5	45,1	39,2	28,3	20,6	43,0	47,0

APÊNDICE G – RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS DEFLECTOMÉTRICOS REALIZADOS NA CALÇADA – ETAPA 2

Tabela G.1: Resultados dos levantamentos deflectométricos na Calçada 2 – Segmento 1 na
Condição “Seca”

Ponto	Carga (kgf)	Deflexão (10 ⁻² mm)							Temp. (°C)	
		Distância do centro de aplicação (cm)							Ar	Pav.
		0	20	30	45	60	90	120		
C2-1A - Seco	4.259	62,8	50,0	39,7	28,8	20,5	9,3	4,7	13,7	22,8
C2-1B - Seco	4.270	62,5	49,8	38,7	28,6	20,1	9,4	4,8	13,5	21,9
C2-1C - Seco	6.792	96,1	71,0	60,3	43,4	30,9	13,0	6,3	13,4	17,8
C2-1D - Seco	6.864	95,2	74,0	59,5	42,7	30,4	12,6	6,4	13,4	17,8
C2-2A - Seco	4.224	57,1	50,3	44,0	35,9	28,6	17,8	11,3	13,2	21,5
C2-2B - Seco	4.232	50,4	43,7	37,6	30,5	24,0	15,0	9,7	13,4	23,5
C2-2C - Seco	6.725	99,5	81,9	69,6	54,8	43,0	25,5	16,1	13,7	15,3
C2-2D - Seco	6.793	96,6	78,6	65,7	50,6	38,9	22,6	14,7	13,7	15,3
C2-3A - Seco	4.183	57,1	50,8	44,8	36,7	29,8	18,5	11,9	13,8	22,1
C2-3B - Seco	4.195	50,5	44,6	38,8	31,8	25,5	15,8	10,3	13,7	23,5
C2-3C - Seco	6.616	108,1	86,2	74,3	57,9	45,0	25,9	15,9	13,8	15,7
C2-3D - Seco	6.725	106,1	83,9	71,1	53,6	40,4	22,1	13,4	13,8	15,7
C2-4A - Seco	4.190	65,5	54,2	46,1	36,8	28,3	15,5	7,9	13,6	23,8
C2-4B - Seco	4.192	57,0	48,2	40,0	31,3	24,0	13,5	7,4	13,6	23,0
C2-4C - Seco	6.651	124,0	95,3	79,3	59,8	43,6	21,4	9,8	13,8	17,3
C2-4D - Seco	6.739	116,7	89,2	73,9	55,3	40,2	20,2	10,4	13,8	17,3
C2-5A - Seco	4.177	64,9	56,7	49,6	40,4	32,3	19,2	11,9	13,6	23,5
C2-5B - Seco	4.197	56,3	49,1	42,7	34,5	27,5	16,5	10,4	13,9	22,5
C2-5C - Seco	6.604	123,0	99,9	85,0	65,4	49,5	26,9	15,7	14,0	15,8
C2-5D - Seco	6.663	138,8	106,8	88,3	64,7	47,0	23,1	12,7	14,0	15,8
C2-6A - Seco	4.165	65,6	56,5	49,1	39,7	31,3	18,9	11,9	13,9	21,8
C2-6B - Seco	4.175	56,7	48,0	41,1	32,6	25,2	14,9	9,7	14,1	22,8
C2-6C - Seco	6.623	119,1	95,3	80,7	61,9	47,3	27,0	16,9	13,7	15,0
C2-6D - Seco	6.693	116,6	91,0	76,2	57,3	42,9	24,0	15,0	13,7	15,0
C2-7A - Seco	4.161	76,7	62,8	52,7	39,4	27,1	14,9	9,5	13,9	22,4
C2-7B - Seco	4.177	68,9	54,7	45,1	32,9	21,9	12,0	8,2	14,0	22,8
C2-7C - Seco	6.535	178,2	127,4	99,8	63,1	33,8	13,7	10,0	14,3	15,5
C2-7D - Seco	6.668	144,4	108,2	86,9	59,2	37,1	17,7	11,7	14,3	15,5
C2-8A - Seco	4.169	65,0	54,0	45,9	35,2	25,9	11,3	6,9	13,8	22,0
C2-8B - Seco	4.198	56,5	47,0	39,8	30,7	23,3	12,1	8,1	14,1	22,3
C2-8C - Seco	6.614	141,5	107,1	85,7	62,6	42,0	12,7	6,0	12,7	14,7
C2-8D - Seco	6.689	140,8	104,2	82,6	59,1	38,9	10,3	5,2	12,7	14,7

Tabela G.2: Resultados dos levantamentos deflectométricos na Calçada 2 – Segmento 1 na Condição “Saturada”

Ponto	Carga (kgf)	Deflexão (10^{-2} mm)							Temp. (°C)	
		Distância do centro de aplicação (cm)							Ar	Pav.
		0	20	30	45	60	90	120		
C2-1A - Saturado	4139	79,4	62,0	49,3	36,8	26,3	13,2	5,1	14,3	21,9
C2-1B - Saturado	4156	75,9	57,7	46,4	34,3	24,3	12,2	5,1	14,1	20,2
C2-1C - Saturado	6641	124,4	93,3	75,5	55,3	39,4	19,5	7,2	13,9	18,1
C2-1D - Saturado	6708	121,8	91,7	74,2	53,8	38,2	18,8	6,9	13,9	18,1
C2-2A - Saturado	4147	68,3	59,6	50,8	40,0	30,8	17,8	10,3	14,2	20,7
C2-2B - Saturado	4159	66,2	57,4	48,1	38,0	29,0	16,5	9,6	14,1	19,8
C2-2C - Saturado	6639	115,1	95,9	81,1	62,0	47,0	26,2	14,8	14,1	14,4
C2-2D - Saturado	6681	115,3	94,8	79,7	60,2	45,3	24,6	13,7	14,1	14,4
C2-3A - Saturado	4161	71,4	57,6	48,0	38,3	29,0	16,1	9,2	14,1	18,9
C2-3B - Saturado	4151	67,6	53,4	45,2	35,2	26,6	14,9	8,7	14,2	18,5
C2-3C - Saturado	6614	121,7	92,9	78,9	59,8	44,5	23,2	12,6	14,2	14,2
C2-3D - Saturado	6674	117,5	89,6	75,8	57,2	42,5	22,3	12,4	14,2	14,2
C2-4A - Saturado	4136	75,4	64,1	53,3	41,7	31,2	16,3	7,5	14,3	18,2
C2-4B - Saturado	4138	72,3	60,7	50,4	38,8	29,0	15,3	7,6	14,3	19,3
C2-4C - Saturado	6577	139,0	106,5	88,0	65,0	47,2	22,4	9,4	14,0	14,7
C2-4D - Saturado	6676	136,4	103,6	86,2	63,4	46,1	22,5	10,3	14,0	14,7
C2-5A - Saturado	4108	88,4	71,4	59,6	44,8	32,8	16,1	9,1	14,2	21,7
C2-5B - Saturado	4136	84,6	67,8	56,1	41,9	30,2	14,8	8,0	14,3	21,6
C2-5C - Saturado	6545	165,1	127,1	104,1	75,0	53,0	23,0	10,9	14,2	14,1
C2-5D - Saturado	6615	161,8	124,5	101,5	72,5	50,8	22,1	10,8	14,2	14,1
C2-6A - Saturado	4125	90,7	79,4	67,2	51,7	39,4	20,8	11,3	14,1	19,2
C2-6B - Saturado	4123	84,9	72,3	61,2	46,7	34,7	18,0	9,7	14,2	20,0
C2-6C - Saturado	6611	167,5	132,9	109,9	79,5	56,2	26,9	13,2	14,2	17,0
C2-6D - Saturado	6624	173,4	136,2	112,3	80,8	56,9	27,0	13,1	14,2	17,0
C2-7A - Saturado	4074	137,6	102,9	82,0	55,2	32,5	13,4	8,2	14,4	22,6
C2-7B - Saturado	4094	119,5	89,5	72,1	49,6	30,1	13,2	8,0	14,6	20,7
C2-7C - Saturado	6450	214,3	159,0	127,8	84,8	47,2	17,8	11,1	14,7	18,7
C2-7D - Saturado	6563	205,8	153,1	124,0	83,4	48,1	19,0	11,1	14,7	18,7
C2-8A - Saturado	4105	117,6	92,7	73,7	52,3	33,5	4,1	-0,6	14,7	20,5
C2-8B - Saturado	4087	119,8	91,9	73,0	50,4	31,9	2,2	-0,6	14,8	21,3
C2-8C - Saturado	4110	109,8	84,1	67,0	46,2	30,0	4,8	-0,2	14,8	21,3
C2-8D - Saturado	4095	119,1	90,4	71,4	48,8	29,9	1,7	-0,8	14,8	21,1

* Valores em vermelho foram desconsiderados nas análises estatísticas

Tabela G.3: Resultados dos levantamentos deflectométricos na Calçada 2 – Segmento 2 na Condição “Seca”

Ponto	Carga (kgf)	Deflexão (10^{-2} mm)								Temp. (°C)	
		Distância do centro de aplicação (cm)								Ar	Pav.
		0	20	30	45	60	90	120			
C2-9A - Seco	4.191	65,1	59,1	50,3	40,2	30,5	16,4	7,2	13,5	24,5	
C2-9B - Seco	4.199	52,5	46,3	38,7	31,0	22,9	12,5	6,5	13,8	24,5	
C2-9C - Seco	6.695	98,4	84,7	71,5	55,6	41,8	21,4	6,1	14,0	17,9	
C2-9D - Seco	6.750	91,1	76,4	64,0	49,1	36,4	18,1	5,8	14,0	17,9	
C2-10A - Seco	4.175	37,2	37,4	35,4	34,1	24,1	16,3	10,5	14,2	21,7	
C2-10B - Seco	4.176	32,1	30,9	28,8	27,0	20,3	13,9	9,5	14,2	22,1	
C2-10C - Seco	6.746	56,9	54,6	51,7	48,0	36,9	24,8	16,3	14,1	15,3	
C2-10D - Seco	6.845	53,7	51,3	48,1	43,6	34,1	23,0	15,3	14,1	15,3	
C2-11A - Seco	4.196	34,9	31,3	27,7	23,7	19,0	10,6	7,7	14,0	20,1	
C2-11B - Seco	4.201	30,7	27,4	24,1	20,5	16,2	9,0	6,9	14,2	20,8	
C2-11C - Seco	6.765	55,0	47,2	42,2	35,1	28,0	15,3	11,4	14,1	14,6	
C2-11D - Seco	6.818	51,8	45,8	41,0	33,7	26,9	14,7	11,0	14,1	14,6	
C2-12A - Seco	4.192	33,9	33,2	30,9	28,6	20,1	13,4	8,6	14,1	23,5	
C2-12B - Seco	4.189	29,8	28,7	26,4	23,9	17,0	11,5	7,5	14,0	20,7	
C2-12C - Seco	6.773	51,6	48,9	45,6	40,7	30,8	20,5	13,2	14,0	14,8	
C2-12D - Seco	6.890	49,6	46,5	43,0	37,8	29,0	19,4	12,4	14,0	14,8	
C2-13A - Seco	4.153	40,2	40,3	38,1	31,3	25,3	15,6	9,4	13,6	21,7	
C2-13B - Seco	4.160	36,0	35,0	32,5	26,8	21,4	13,6	8,5	13,6	23,5	
C2-13C - Seco	6.706	63,4	60,4	57,3	46,8	37,8	23,8	14,7	13,0	16,7	
C2-13D - Seco	6.769	59,6	57,5	54,0	43,5	35,3	22,4	14,1	13,0	16,7	
C2-14A - Seco	4.119	57,4	55,6	52,4	48,6	33,9	23,2	15,3	13,2	20,9	
C2-14B - Seco	4.136	49,9	47,3	43,4	39,7	29,2	19,9	13,8	13,4	23,4	
C2-14C - Seco	6.649	92,3	84,3	78,4	69,6	52,8	35,7	24,2	13,5	19,2	
C2-14D - Seco	6.673	88,4	79,9	73,3	63,6	48,9	33,2	22,9	13,5	19,2	
C2-15A - Seco	4.094	68,9	62,7	56,6	50,0	42,6	29,9	20,3	13,6	23,1	
C2-15B - Seco	4.127	57,1	52,3	47,2	41,4	35,4	24,9	17,1	14,0	21,9	
C2-15C - Seco	6.614	105,8	96,1	87,7	77,0	66,5	47,2	32,0	14,1	18,2	
C2-15D - Seco	6.700	101,9	92,3	83,8	72,9	62,6	44,1	29,9	14,1	18,2	

Tabela G.4: Resultados dos levantamentos deflectométricos na Calçada 2 – Segmento 2 na Condição “Saturada”

Ponto	Carga (kgf)	Deflexão (1×10^{-2} mm)							Temp. (°C)	
		Distância do centro de aplicação (cm)							Ar	Pav.
		0	20	30	45	60	90	120		
C2-9A - Saturado	4.152	92,6	86,1	73,7	58,3	45,5	24,7	9,9	16,0	20,4
C2-9B - Saturado	4.199	87,0	80,0	67,8	53,8	41,0	22,3	9,0	16,0	20,1
C2-9C - Saturado	6.575	147,8	129,6	111,2	87,5	66,7	36,3	14,3	16,1	14,3
C2-9D - Saturado	6.655	144,3	126,9	108,6	85,0	64,6	34,8	13,3	16,1	14,3
C2-10A - Saturado	4.162	56,5	57,1	54,6	51,4	44,4	31,0	19,6	15,7	18,1
C2-10B - Saturado	4.175	50,9	50,1	47,2	43,6	37,6	26,1	16,5	15,8	20,9
C2-10C - Saturado	6.657	84,7	82,4	78,2	71,6	62,0	43,6	27,9	15,8	14,1
C2-10D - Saturado	6.709	83,5	79,8	75,1	68,1	58,5	41,2	26,3	15,8	14,1
C2-11A - Saturado	4.173	49,5	46,3	42,2	36,9	31,0	19,9	13,5	15,8	19,3
C2-11B - Saturado	4.203	44,9	41,7	37,7	32,7	27,2	17,0	11,5	16,0	19,1
C2-11C - Saturado	6.703	70,5	64,4	58,6	50,2	41,6	26,1	18,1	15,8	15,3
C2-11D - Saturado	6.750	68,5	62,4	56,6	48,1	39,5	24,4	16,9	15,8	15,3
C2-12A - Saturado	4.213	49,0	46,8	43,3	39,1	30,4	20,7	13,2	15,3	19,4
C2-12B - Saturado	4.194	42,1	39,2	35,6	31,2	24,3	16,1	10,5	15,5	19,6
C2-12C - Saturado	6.728	66,7	60,6	55,4	48,1	37,8	25,5	16,6	15,1	13,3
C2-12D - Saturado	6.795	63,2	57,7	52,4	44,9	35,5	23,9	15,5	15,1	13,3
C2-13A - Saturado	4.153	59,1	59,5	55,8	46,3	37,7	24,2	14,5	15,3	19,5
C2-13B - Saturado	4.144	57,0	58,0	54,2	44,9	36,5	23,3	13,9	15,4	19,7
C2-13C - Saturado	6.593	95,3	95,8	92,1	75,6	61,0	39,3	23,5	15,4	14,3
C2-13D - Saturado	6.645	92,6	92,7	88,4	72,3	58,1	37,3	22,3	15,4	14,3
C2-14A - Saturado	4.075	69,4	65,2	60,7	53,0	41,6	28,8	18,6	15,9	18,5
C2-14B - Saturado	4.116	64,0	59,1	54,5	46,2	37,3	25,6	17,2	15,8	17,2
C2-14C - Saturado	6.539	109,6	98,7	90,8	76,4	62,0	43,2	29,0	15,8	12,9
C2-14D - Saturado	6.604	110,5	97,6	88,9	73,5	59,7	41,6	28,1	15,8	12,9
C2-15A - Saturado	4.104	75,5	69,2	62,1	54,0	46,1	32,1	21,2	15,6	18,7
C2-15B - Saturado	4.109	69,9	63,7	57,1	49,8	42,2	29,7	20,1	15,7	21,1
C2-15C - Saturado	6.551	121,6	110,1	100,1	87,1	74,0	52,2	35,3	15,5	14,2
C2-15D - Saturado	6.673	121,0	108,6	98,6	85,2	72,1	50,6	34,2	15,5	14,2

APÊNDICE H – RESULTADOS DAS RETROANÁLISES REALIZADAS COM OS LEVANTAMENTOS DEFLECTOMÉTRICOS REALIZADOS NA ETAPA 1

Tabela H.1: Resultados das retroanálises na Calçada 1 - EverFE

Bacia	E (MPa)	k (MPa/m)	0	20	30	45	60	90	120	Erro Total (%)	RMSE (%)
C1-2A	34.000	FWD	144,8	139,8	133,3	121,8	111,9	88,8	65,0	26,01	4,88
		19,0	148,4	143,1	136,1	124,8	111,5	83,8	58,1		
		Erro	2,49%	2,36%	2,10%	2,46%	0,36%	5,63%	10,62%		
C1-2B	34.500	FWD	132,8	128,3	122,0	111,8	102,5	81,4	59,0	30,95	5,73
		21,0	137,0	131,9	125,1	114,3	101,6	75,6	51,8		
		Erro	3,16%	2,81%	2,54%	2,24%	0,88%	7,13%	12,20%		
C1-3A	24.000	FWD	126,9	121,1	110,6	100,5	86,0	59,0	36,9	9,61	1,71
		25,0	128,4	122,0	114,1	101,0	86,4	58,5	35,9		
		Erro	1,18%	0,74%	3,16%	0,50%	0,47%	0,85%	2,71%		
C1-3B	32.000	FWD	112,9	107,6	99,1	89,4	76,5	52,4	34,0	15,91	2,86
		27,0	112,5	107,4	101,2	90,5	78,6	55,1	35,4		
		Erro	0,35%	0,19%	2,12%	1,23%	2,75%	5,15%	4,12%		
C1-4A	17.000	FWD	173,2	155,6	140,6	121,6	102,7	67,5	40,3	16,32	2,75
		20,0	163,4	152,6	142,4	124,4	105,1	68,9	40,6		
		Erro	5,66%	1,93%	1,28%	2,30%	2,34%	2,07%	0,74%		
C1-4B	20.000	FWD	151,3	135,9	124,0	106,6	89,4	61,4	36,5	18,10	3,16
		23,0	141,2	131,9	123,2	107,8	91,3	60,1	35,6		
		Erro	6,68%	2,94%	0,65%	1,13%	2,13%	2,12%	2,47%		
C1-7A	28.000	FWD	98,2	91,4	83,2	75,5	61,6	41,1	25,9	17,83	4,00
		32,0	96,8	91,6	85,7	74,8	63,2	41,1	23,4		
		Erro	1,43%	0,22%	3,00%	0,93%	2,60%	0,00%	9,65%		
C1-7B	35.500	FWD	87,1	81,1	73,4	66,2	54,1	36,0	23,4	29,97	5,54
		34,0	87,1	82,7	77,8	68,6	58,7	39,4	23,5		
		Erro	0,00%	1,97%	5,99%	3,63%	8,50%	9,44%	0,43%		

Tabela H.2: Resultados das retroanálises na Calçada 1 - BAKFAA

Bacia	ERev. (MPa)	EBase (MPa)	ESubl. (MPa)	Parâmet.	0	20	30	45	60	90	120	Erro Total (%)	RMSE (%)
C1-2A	18.315	255*	15	FWD	144,8	139,8	133,3	121,8	111,9	88,8	65,0	12,89	2,65
				Def Sim.	147,1	139,6	132,7	121,2	109,3	87,2	69,0		
				Erro	1,58%	0,12%	0,42%	0,52%	2,33%	1,80%	6,12%		
C1-2B	19.914	286*	17	FWD	132,8	128,3	122,0	111,8	102,5	81,4	59,0	13,98	2,90
				Def Sim.	135,0	128,1	121,7	111,0	100,0	79,7	63,0		
				Erro	1,62%	0,19%	0,26%	0,71%	2,39%	2,07%	6,74%		
C1-3A	16.670	2	63	FWD	126,9	121,1	110,6	100,5	86,0	59,0	36,9	14,62	2,89
				Def Sim.	128,8	120,2	112,0	98,5	84,6	59,3	39,4		
				Erro	1,54%	0,78%	1,31%	2,03%	1,65%	0,48%	6,83%		
C1-3B	18.302	3	54	FWD	112,9	107,6	99,1	89,4	76,5	52,4	34,0	12,90	2,35
				Def Sim.	114,7	106,9	99,6	87,5	75,2	53,0	35,7		
				Erro	1,62%	0,67%	0,51%	2,16%	1,75%	1,05%	5,13%		
C1-4A	8.898	3	40	FWD	173,2	155,6	140,6	121,6	102,7	67,5	40,3	10,30	1,68
				Def Sim.	171,0	156,4	143,3	122,0	101,2	66,1	41,4		
				Erro	1,26%	0,53%	1,89%	0,31%	1,43%	2,03%	2,84%		
C1-4B	10.313	3	39	FWD	151,3	135,9	124,0	106,6	89,4	61,4	36,5	11,55	2,22
				Def Sim.	149,5	136,9	125,5	107,1	89,2	59,1	38,0		
				Erro	1,16%	0,71%	1,18%	0,44%	0,21%	3,73%	4,12%		
C1-7A	20.068	2	258*	FWD	98,2	91,4	83,2	75,5	61,6	41,1	25,9	7,59	1,37
				Def Sim.	98,3	91,2	84,6	73,5	62,1	41,6	25,7		
				Erro	0,10%	0,25%	1,62%	2,72%	0,88%	1,29%	0,75%		
C1-7B	21.391	3	116	FWD	87,1	81,1	73,4	66,2	54,1	36,0	23,4	8,53	1,42
				Def Sim.	87,2	80,7	74,6	64,6	54,5	36,6	23,1		
				Erro	0,14%	0,54%	1,65%	2,44%	0,75%	1,65%	1,35%		

*Valores desconsiderados para as análises estatísticas realizadas no Capítulo 5

Tabela H.3: Resultados das retroanálises na Calçada 1 – ABAQUS

Bacia	E (MPa)	k (MPa/m)	0	20	30	45	60	90	120	Erro Total (%)	RMSE (%)
C1-2A	50.000	FWD	144,8	139,8	133,3	121,8	111,9	88,8	65	10,11	1,74
		16,0	146,3	140,9	135,7	125,8	114,4	89,6	65,1		
		Erro	1,01%	0,79%	1,76%	3,27%	2,20%	0,92%	0,15%		
C1-2B	50.000	FWD	132,8	128,3	122	111,8	102,5	81,4	59	8,87	1,61
		18,0	133,5	128,3	123,2	113,8	102,9	79,7	57,2		
		Erro	0,54%	0,01%	1,02%	1,77%	0,42%	2,06%	3,05%		
C1-3A	30.000	FWD	126,9	121,1	110,6	100,5	86,0	59,0	36,9	5,57	0,94
		25,0	126,2	119,2	112,2	99,4	85,6	58,8	37,0		
		Erro	0,55%	1,55%	1,41%	1,05%	0,47%	0,32%	0,22%		
C1-3B	35.000	FWD	112,9	107,6	99,1	89,4	76,5	52,4	34	5,96	0,93
		28,0	112,3	106,2	100,0	88,8	76,7	53,0	33,6		
		Erro	0,58%	1,34%	0,89%	0,63%	0,24%	1,18%	1,12%		
C1-4A	17.000	FWD	173,2	155,6	140,6	121,6	102,7	67,5	40,3	16,54	2,98
		18,0	163,0	152,4	142,0	123,5	103,9	67,1	38,6		
		Erro	5,88%	2,04%	0,97%	1,58%	1,17%	0,61%	4,29%		
C1-4B	22.000	FWD	151,3	135,9	124	106,6	89,4	61,4	36,5	19,77	3,31
		20,0	142,9	134,3	125,7	110,4	93,9	62,3	37,1		
		Erro	5,54%	1,19%	1,36%	3,55%	5,02%	1,47%	1,64%		
C1-7A	33.000	FWD	98,2	91,4	83,2	75,5	61,6	41,1	25,9	13,03	2,28
		30,0	97,9	91,2	85,4	75,0	63,8	42,2	25,1		
		Erro	0,26%	0,18%	2,66%	0,68%	3,49%	2,68%	3,09%		
C1-7B	39.000	FWD	87,1	81,1	73,4	66,2	54,1	36	23,4	18,69	2,92
		34,0	84,6	79,6	74,6	65,6	56,0	37,4	22,4		
		Erro	2,82%	1,84%	1,63%	0,85%	3,44%	3,75%	4,36%		

Tabela H.4: Resultados das retroanálises no segmento 1 da Calçada 2 - EverFE

Bacia	E (MPa)	k (MPa/m)	0	20	30	45	60	90	120	Erro Total (%)	RMSE (%)
C2-2A	13.500	FWD	85,4	72,8	59,8	48,3	36,4	19,8	11,5	48,06	7,82
		44,0	80,9	71,6	63,9	51,3	39,4	20,8	9,8		
		Erro	5,27%	1,65%	6,86%	6,21%	8,24%	5,05%	14,78%		
C2-2B	14.500	FWD	76,9	64,3	53,1	42,1	31,5	16,8	10,0	53,67	9,49
		52,0	72,7	64,0	56,8	45,1	34,3	17,6	8,0		
		Erro	5,46%	0,47%	6,97%	7,13%	8,89%	4,76%	20,00%		
C2-3A	14.500	FWD	75,3	64,9	53,3	43,4	33,0	19,0	10,9	53,94	10,19
		49,0	75,4	66,6	59,3	47,4	36,3	18,9	8,7		
		Erro	0,13%	2,62%	11,26%	9,22%	10,00%	0,53%	20,18%		
C2-3B	17.000	FWD	69,4	59,4	48,3	39	29,4	16,3	10,0	57,12	9,67
		54,0	66,2	58,6	52,4	42,1	32,4	17,2	8,1		
		Erro	4,61%	1,35%	8,49%	7,95%	10,20%	5,52%	19,00%		
C2-4A	13.000	FWD	84,2	69,5	57,0	45,2	33,4	17,1	9,0	40,63	6,76
		50,0	75,8	66,5	58,8	46,4	35,0	17,7	7,9		
		Erro	9,98%	4,32%	3,16%	2,65%	4,79%	3,51%	12,22%		
C2-4B	16.000	FWD	77,3	63,0	51,0	39,8	29,0	14,8	8,4	70,23	12,38
		52,0	70,0	62,0	55,3	44,4	34,1	18,0	8,4		
		Erro	9,44%	1,59%	8,43%	11,56%	17,59%	21,62%	0,00%		
C2-5A	16.500	FWD	79,2	67,3	57,1	47,0	36,4	20,7	11,9	34,92	6,29
		46,0	74,8	66,7	60,0	48,8	38,1	21,0	10,3		
		Erro	5,56%	0,89%	5,08%	3,83%	4,67%	1,45%	13,45%		
C2-5B	16.500	FWD	74,2	63,0	52,9	43,3	33,0	18,1	10,7	43,27	7,45
		50,0	70,9	63,0	56,4	45,6	35,3	19,0	9,1		
		Erro	4,45%	0,00%	6,62%	5,31%	6,97%	4,97%	14,95%		
C2-6A	12.000	FWD	87,0	74,6	62,8	50,9	38,8	21,4	11,5	41,53	9,57
		45,0	83,3	73,3	64,9	51,4	38,9	19,8	8,8		
		Erro	4,25%	1,74%	3,34%	0,98%	0,26%	7,48%	23,48%		
C2-6B	14.500	FWD	81,9	70,0	58,5	47,1	35,5	19,2	10,8	41,11	7,02
		47,0	77,3	68,5	61,1	49,1	37,7	19,9	9,2		
		Erro	5,62%	2,14%	4,44%	4,25%	6,20%	3,65%	14,81%		
C2-7A	12.000	FWD	95,1	82,4	69,4	57,6	43,7	23,3	12,8	27,55	6,10
		39,0	92,0	81,8	72,7	58,2	44,6	23,5	10,9		
		Erro	3,26%	0,73%	4,76%	1,04%	2,06%	0,86%	14,84%		
C2-7B	14.000	FWD	91,1	78,6	65,8	54,0	40,4	21,7	11,9	39,28	6,54
		40,0	87,7	78,5	70,2	56,9	44,2	24,0	11,5		
		Erro	3,73%	0,13%	6,69%	5,37%	9,41%	10,60%	3,36%		
C2-8A	60.000	FWD	62,0	59,5	52,5	45,4	37,3	23,9	14,7	56,71	10,31
		43,0	75,9	63,9	57,4	48,0	39,9	24,9	14,6		
		Erro	22,42%	7,39%	9,33%	5,73%	6,97%	4,18%	0,68%		
C2-8B	65.000	FWD	58,8	56,2	49,4	42,3	34,4	21,3	13,4	27,17	6,27
		50,0	67,5	56,7	50,8	42,4	34,5	21,6	12,5		
		Erro	14,80%	0,89%	2,83%	0,24%	0,29%	1,41%	6,72%		

Tabela H.5: Resultados das retroanálises no segmento 1 da Calçada 2 - BAKFAA

Bacia	ERev. (MPa)	EBase (MPa)	ESubl. (MPa)	Parâmet.	0	20	30	45	60	90	120	Erro Total (%)	RMSE (%)
C2-2A	7.764	19	79	FWD	85,4	72,8	59,8	48,3	36,4	19,8	11,5	13,81	2,48
				Def. Sim.	84,9	72,3	62,1	47,6	35,5	19,7	12,0		
				Erro	0,64%	0,70%	3,81%	1,54%	2,37%	0,34%	4,41%		
C2-2B	8.049	25	91	FWD	76,9	64,3	53,1	42,1	31,5	16,8	10,0	12,92	2,33
				Def. Sim.	76,3	64,4	54,8	41,4	30,6	16,9	10,4		
				Erro	0,82%	0,08%	3,19%	1,55%	2,75%	0,41%	4,12%		
C2-3A	9.115	24	83	FWD	75,3	64,9	53,3	43,4	33,0	19,0	10,9	17,05	3,05
				Def. Sim.	75,0	64,2	55,4	42,9	32,4	18,5	11,6		
				Erro	0,45%	1,11%	3,92%	1,24%	1,74%	2,42%	6,17%		
C2-3B	9.153	31	92	FWD	69,4	59,4	48,3	39,0	29,4	16,3	10,0	12,62	2,23
				Def. Sim.	69,2	58,7	50,2	38,4	28,8	16,3	10,3		
				Erro	0,34%	1,25%	3,98%	1,55%	2,18%	0,15%	3,17%		
C2-4A	7.190	17	94	FWD	84,2	69,5	57,0	45,2	33,4	17,1	9,0	21,97	4,23
				Def. Sim.	83,1	69,9	59,3	44,3	32,2	16,9	9,9		
				Erro	1,31%	0,56%	3,96%	1,89%	3,47%	1,29%	9,49%		
C2-4B	6.898	27	99	FWD	77,3	63,0	51,0	39,8	29,0	14,8	8,4	19,76	3,85
				Def. Sim.	76,4	63,3	53,0	38,9	28,0	14,8	9,1		
				Erro	1,11%	0,45%	3,84%	2,22%	3,61%	0,19%	8,35%		
C2-5A	9.815	18	80	FWD	79,2	67,3	57,1	47,0	36,4	20,7	11,9	15,72	2,72
				Def. Sim.	78,2	67,7	59,0	46,3	35,5	20,5	12,5		
				Erro	1,29%	0,59%	3,33%	1,44%	2,54%	1,15%	5,39%		
C2-5B	9.982	20	91	FWD	74,2	63,0	52,9	43,3	33,0	18,1	10,7	13,1	2,23
				Def. Sim.	73,4	63,2	54,7	42,5	32,2	18,2	11,1		
				Erro	1,03%	0,26%	3,41%	1,85%	2,46%	0,62%	3,48%		
C2-6A	8.800	13	85	FWD	87,0	74,6	62,8	50,9	38,8	21,4	11,5	14,29	2,63
				Def. Sim.	86,3	74,5	64,7	50,4	38,1	21,0	12,1		
				Erro	0,83%	0,11%	3,05%	1,03%	1,91%	1,84%	5,51%		
C2-6B	8.898	16	90	FWD	81,9	70,0	58,5	47,1	35,5	19,2	10,8	11,22	2,00
				Def. Sim.	81,4	69,8	60,3	46,5	34,8	19,1	11,2		
				Erro	0,67%	0,30%	3,01%	1,31%	1,86%	0,47%	3,60%		
C2-7A	8.839	9	82	FWD	95,1	82,4	69,4	57,6	43,7	23,3	12,8	10,99	1,84
				Def. Sim.	94,4	82,2	71,8	56,5	42,9	23,5	13,0		
				Erro	0,79%	0,29%	3,53%	1,98%	1,76%	1,04%	1,60%		
C2-7B	8.644	11	89	FWD	91,1	78,6	65,8	54,0	40,4	21,7	11,9	9,90	1,79
				Def. Sim.	90,5	78,3	68,0	52,9	39,9	21,7	12,2		
				Erro	0,65%	0,42%	3,38%	1,96%	1,23%	0,00%	2,25%		
C2-8A	26.102	5	187	FWD	62,0	59,5	52,5	45,4	37,3	23,9	14,7	9,03	1,50
				Def. Sim.	63,0	57,8	53,0	45,2	37,5	24,2	14,5		
				Erro	1,68%	2,83%	1,04%	0,34%	0,61%	1,11%	1,41%		
C2-8B	25.239	6	160	FWD	58,8	56,2	49,4	42,3	34,4	21,3	13,4	11,92	1,98
				Def. Sim.	59,9	54,6	49,8	42,1	34,6	21,9	13,0		
				Erro	1,83%	2,89%	0,80%	0,54%	0,44%	2,67%	2,76%		

Tabela H.6: Resultados das retroanálises no segmento 1 da Calçada 2 - ABAQUS

Bacia	E (MPa)	k (MPa/m)	0	20	30	45	60	90	120	Erro Total (%)	RMSE (%)
C2-2A	15.000	FWD	85,4	72,8	59,8	48,3	36,4	19,8	11,5	44,68	8,12
		44,0	78,6	70,1	62,3	50,0	38,4	20,2	9,4		
		Erro	7,96%	3,78%	4,20%	3,48%	5,38%	1,97%	17,91%		
C2-2B	20.000	FWD	76,9	64,3	53,1	42,1	31,5	16,8	10	55,38	8,82
		49,0	67,3	60,5	54,3	44,3	34,6	19,1	9,4		
		Erro	12,48%	5,88%	2,28%	5,18%	9,97%	13,69%	5,90%		
C2-3A	27.000	FWD	75,3	64,9	53,3	43,4	33	19	10,9	43,98	6,74
		56,0	71,3	62,7	56,1	45,8	35,9	19,9	9,7		
		Erro	5,38%	3,44%	5,27%	5,44%	8,76%	4,68%	11,01%		
C2-3B	27.000	FWD	69,4	59,4	48,3	39	29,4	16,3	10	56,46	9,51
		63,0	67,0	58,5	52,0	42,0	32,5	17,4	8,2		
		Erro	3,53%	1,55%	7,74%	7,67%	10,58%	6,99%	18,40%		
C2-4A	15.000	FWD	84,2	69,5	57	45,2	33,4	17,1	9	44,31	6,80
		47,0	75,1	66,7	59,1	47,1	35,9	18,6	8,5		
		Erro	10,78%	4,06%	3,70%	4,25%	7,49%	8,48%	5,56%		
C2-4B	16.000	FWD	77,3	63	51	39,8	29	14,8	8,4	65,99	10,27
		52,0	70,2	62,2	55,0	43,7	33,1	16,9	7,6		
		Erro	9,13%	1,24%	7,92%	9,80%	14,24%	14,26%	9,40%		
C2-5A	17.000	FWD	79,2	67,3	57,1	47	36,4	20,7	11,9	36,95	7,55
		45,0	74,2	66,5	59,4	48,1	37,4	20,2	9,8		
		Erro	6,28%	1,23%	4,08%	2,40%	2,61%	2,37%	17,98%		
C2-5B	20.000	FWD	74,2	63	52,9	43,3	33	18,1	10,7	40,69	6,70
		49,0	67,4	60,5	54,3	44,3	34,7	19,1	9,4		
		Erro	9,23%	3,90%	2,68%	2,29%	5,00%	5,52%	12,06%		
C2-6A	15.000	FWD	87	74,6	62,8	50,9	38,8	21,4	11,5	31,72	5,04
		41,0	81,8	73,1	65,3	52,7	40,8	21,9	10,5		
		Erro	6,02%	2,01%	3,92%	3,54%	5,08%	2,29%	8,87%		
C2-6B	17.000	FWD	81,9	70	58,5	47,1	35,5	19,2	10,8	40,17	6,16
		45,0	75,1	67,3	60,2	48,7	37,8	20,4	9,8		
		Erro	8,28%	3,89%	2,82%	3,40%	6,45%	6,35%	8,98%		
C2-7A	14.000	FWD	95,1	82,4	69,4	57,6	43,7	23,3	12,8	32,47	5,28
		36,0	92,2	82,5	73,8	59,8	46,5	25,3	12,3		
		Erro	3,05%	0,08%	6,30%	3,85%	6,43%	8,45%	4,30%		
C2-7B	15.000	FWD	91,1	78,6	65,8	54	40,4	21,7	11,9	32,68	5,18
		40,0	84,9	75,8	67,7	54,7	42,3	22,8	10,9		
		Erro	6,81%	3,56%	2,86%	1,28%	4,80%	4,88%	8,49%		
C2-8A	85.000	FWD	62	59,5	52,5	45,4	37,3	23,9	14,7	30,97	6,93
		48,0	72,3	60,4	54,2	45,3	37,0	23,4	13,7		
		Erro	16,60%	1,53%	3,28%	0,31%	0,72%	2,01%	6,53%		
C2-8B	85.000	FWD	58,8	56,2	49,4	42,3	34,4	21,3	13,4	30,28	6,83
		52,0	68,4	57,0	51,1	42,5	34,6	21,6	12,5		
		Erro	16,29%	1,46%	3,36%	0,40%	0,55%	1,50%	6,72%		

Tabela H.7: Resultados das retroanálises no segmento 2 da Calçada 2 - EverFE

Bacia	E (MPa)	k (MPa/m)	0	20	30	45	60	90	120	Erro Total (%)	RMSE (%)
C2-9A	6.000	FWD	74,5	67,8	57,1	47,9	37,8	22,3	13,4	23,56	3,54
		47,0	72,4	64,8	58,5	48,6	39,1	23,3	12,8		
		Erro	2,82%	4,42%	2,45%	1,46%	3,44%	4,48%	4,48%		
C2-9B	6.000	FWD	71,0	64,4	53,7	44,8	35,0	20,4	12,3	29,49	4,51
		51,0	70,2	62,5	56,3	46,4	36,9	21,6	11,6		
		Erro	1,13%	2,95%	4,84%	3,57%	5,43%	5,88%	5,69%		
C2-10A	15.000	FWD	46,0	43,2	38,4	34,2	28,6	19,5	12,5	8,77	1,51
		60,0	45,9	42,3	39,4	34,3	29,1	19,7	12,6		
		Erro	0,22%	2,08%	2,60%	0,29%	1,75%	1,03%	0,80%		
C2-10B	16.000	FWD	43,1	40,6	35,9	31,8	26,5	18,0	11,6	8,97	1,60
		65,0	42,6	39,3	36,5	31,7	26,9	18,2	11,6		
		Erro	1,16%	3,20%	1,67%	0,31%	1,51%	1,11%	0,00%		
C2-11A	18.000	FWD	40,4	38,0	34,2	30,7	26,1	17,2	12,1	14,29	2,54
		67,0	40,2	37,2	34,6	30,3	25,9	17,8	11,5		
		Erro	0,50%	2,11%	1,17%	1,30%	0,77%	3,49%	4,96%		
C2-11B	19.000	FWD	38,4	36,0	32,2	28,9	24,4	16,1	11,2	16,29	2,61
		72,0	37,6	34,8	32,4	28,3	24,1	16,5	10,7		
		Erro	2,08%	3,33%	0,62%	2,08%	1,23%	2,48%	4,46%		
C2-12A	16.000	FWD	41,4	37,9	33,4	29,5	24,3	15,7	10,6	18,60	2,96
		72,0	39,8	36,5	33,8	29,2	24,6	16,3	10,2		
		Erro	3,86%	3,69%	1,20%	1,02%	1,23%	3,82%	3,77%		
C2-12B	16.000	FWD	40,0	36,5	32,0	28,2	23,2	14,9	10,1	21,38	3,38
		74,0	39,0	35,8	33,1	28,5	24,0	15,8	9,8		
		Erro	2,50%	1,92%	3,44%	1,06%	3,45%	6,04%	2,97%		
C2-13A	15.000	FWD	48,9	45,0	39,8	35,2	29,7	19,3	13,5	18,84	3,47
		57,0	46,6	43,0	40,1	35,0	29,9	20,5	13,3		
		Erro	4,70%	4,44%	0,75%	0,57%	0,67%	6,22%	1,48%		
C2-13B	15.000	FWD	47,1	43,6	38,0	33,5	28,0	18,2	12,7	23,91	4,13
		65,0	44,4	41,6	38,7	33,6	28,3	18,8	11,8		
		Erro	5,73%	4,59%	1,84%	0,30%	1,07%	3,30%	7,09%		
C2-14A	9.000	FWD	65,0	59,3	51,9	45,7	37,3	24,6	16,4	21,28	3,47
		45,0	64,1	58,9	54,3	46,6	38,9	25,3	15,5		
		Erro	1,38%	0,67%	4,62%	1,97%	4,29%	2,85%	5,49%		
C2-14B	10.000	FWD	65,3	56,5	52,1	46,1	37,3	24,6	16,4	18,57	3,04
		45,0	61,9	57,2	52,9	45,7	38,5	25,6	16,0		
		Erro	5,21%	1,24%	1,54%	0,87%	3,22%	4,07%	2,44%		
C2-15A	18.000	FWD	59,8	56,8	52,0	47,4	41,4	30,4	21,9	11,64	2,28
		40,0	61,6	56,7	53,1	47,3	41,3	30,0	20,9		
		Erro	3,01%	0,18%	2,12%	0,21%	0,24%	1,32%	4,57%		
C2-15B	20.000	FWD	57,4	53,4	49,5	45,1	39,2	28,3	20,6	14,49	2,38
		41,0	59,1	54,4	51,1	45,6	39,9	29,3	20,6		
		Erro	2,96%	1,87%	3,23%	1,11%	1,79%	3,53%	0,00%		

Tabela H.8: Resultados das retroanálises no segmento 2 da Calçada 2 - BAKFAA

Bacia	ERev. (MPa)	EBase (MPa)	ESubl. (MPa)	Parâmet.	0	20	30	45	60	90	120	Erro Total (%)	RMSE (%)
9A	4.476	9	100	FWD	74,5	67,8	57,1	47,9	37,8	22,3	13,4	9,13	1,62
				Def. Sim.	75,2	65,9	58,6	47,7	37,7	22,5	13,25		
				Erro	0,91%	2,86%	2,60%	0,50%	0,17%	1,03%	1,12%		
9B	4.449	11	104	FWD	71,0	64,4	53,7	44,8	35,0	20,4	12,3	10,22	1,80
				Def. Sim.	71,7	62,4	55,2	44,6	35,0	20,6	12,1		
				Erro	1,01%	3,07%	2,85%	0,55%	0,05%	1,03%	1,65%		
10A	12.712	7	191	FWD	46,0	43,2	38,4	34,2	28,6	19,5	12,5	45,84	1,10
				Def. Sim.	46,3	42,4	39,2	33,9	28,7	19,5	12,517		
				Erro	0,57%	1,85%	1,98%	0,82%	0,36%	0,12%	0,14%		
10B	12.636	9	154	FWD	43,1	40,6	35,9	31,8	26,5	18,0	11,6	7,05	1,24
				Def. Sim.	43,5	39,7	36,6	31,5	26,6	18,0	11,701		
				Erro	0,96%	2,19%	1,82%	0,91%	0,23%	0,06%	0,87%		
11A	15.418	7	197	FWD	40,4	38,0	34,2	30,7	26,1	17,2	12,1	12,65	2,10
				Def. Sim.	40,7	37,5	34,7	30,3	25,9	17,9	11,779		
				Erro	0,72%	1,42%	1,56%	1,30%	0,94%	4,05%	2,65%		
11B	15.535	9	186	FWD	38,4	36,0	32,2	28,9	24,4	16,1	11,2	11,89	1,91
				Def. Sim.	38,6	35,5	32,8	28,5	24,2	16,6	10,94		
				Erro	0,62%	1,51%	1,84%	1,42%	0,78%	3,40%	2,32%		
12A	11.301	15	136	FWD	41,4	37,9	33,4	29,5	24,3	15,7	10,6	9,50	1,54
				Def. Sim.	41,5	37,4	34,2	29,0	24,2	16,1	10,448		
				Erro	0,20%	1,21%	2,29%	1,53%	0,56%	2,27%	1,43%		
12B	11.207	18	135	FWD	40,0	36,5	32,0	28,2	23,2	14,9	10,1	9,93	1,61
				Def. Sim.	40,1	36,0	32,8	27,8	23,0	15,2	9,954		
				Erro	0,17%	1,26%	2,49%	1,50%	0,75%	2,31%	1,45%		
13A	9.921	13	101	FWD	48,9	45,0	39,8	35,2	29,7	19,3	13,5	10,87	1,75
				Def. Sim.	49,0	44,4	40,7	34,9	29,3	19,9	13,269		
				Erro	0,21%	1,28%	2,26%	0,97%	1,49%	2,95%	1,71%		
13B	9.637	17	102	FWD	47,1	43,6	38,0	33,5	28,0	18,2	12,7	11,46	1,81
				Def. Sim.	47,4	42,7	39,0	33,2	27,7	18,7	12,481		
				Erro	0,54%	2,03%	2,59%	0,92%	1,05%	2,62%	1,72%		
14A	6.509	12	76	FWD	65,0	59,3	51,9	45,7	37,3	24,6	16,4	6,69	1,26
				Def. Sim.	65,1	58,5	53,2	45,0	37,3	24,8	16,331		
				Erro	0,18%	1,37%	2,46%	1,54%	0,01%	0,70%	0,42%		
14B	6.882	11	78	FWD	65,3	56,5	52,1	46,1	37,3	24,6	16,4	9,38	1,66
				Def. Sim.	64,3	57,9	52,8	44,8	37,3	24,9	16,407		
				Erro	1,52%	2,51%	1,30%	2,81%	0,11%	1,09%	0,04%		
15A	12.957	5	88	FWD	59,8	56,8	52,0	47,4	41,4	30,4	21,9	4,79	0,80
				Def. Sim.	60,0	56,1	52,7	47,1	41,3	30,6	21,818		
				Erro	0,38%	1,23%	1,38%	0,63%	0,16%	0,63%	0,37%		
15B	13.101	6	86	FWD	57,4	53,4	49,5	45,1	39,2	28,3	20,6	5,22	0,90
				Def. Sim.	57,3	53,4	50,1	44,6	39,0	28,7	20,449		
				Erro	0,22%	0,01%	1,16%	1,12%	0,49%	1,49%	0,73%		

Tabela H.9: Resultados das retroanálises no segmento 2 da Calçada 2 - ABAQUS

Bacia	E (MPa)	k (MPa/m)	0	20	30	45	60	90	120	Erro Total (%)	RMSE (%)
C2-9A	6.000	FWD	74,5	67,8	57,1	47,9	37,8	22,3	13,4	22,81	3,65
		46,0	72,0	64,4	58,3	48,3	38,7	23,0	12,6		
		Erro	3,42%	4,99%	2,01%	0,79%	2,41%	3,14%	6,04%		
C2-9B	6.000	FWD	71	64,4	53,7	44,8	35	20,4	12,3	29,12	4,39
		46,0	69,9	62,3	56,1	46,3	36,8	21,5	11,6		
		Erro	1,62%	3,26%	4,47%	3,26%	5,23%	5,59%	5,69%		
C2-10A	15.000	FWD	46,0	43,2	38,4	34,2	28,6	19,5	12,5	6,71	1,27
		58,0	45,7	42,2	39,2	34,1	28,9	19,6	12,5		
		Erro	0,67%	2,29%	2,06%	0,23%	1,12%	0,26%	0,08%		
C2-10B	16.000	FWD	43,1	40,6	35,9	31,8	26,5	18	11,6	8,98	1,59
		63,0	42,5	39,2	36,4	31,7	26,8	18,0	11,5		
		Erro	1,39%	3,37%	1,39%	0,47%	1,09%	0,22%	1,03%		
C2-11A	18.000	FWD	40,4	38	34,2	30,7	26,1	17,2	12,1	14,12	2,62
		63,0	40,8	37,8	35,3	30,9	26,4	18,1	11,8		
		Erro	0,99%	0,42%	3,07%	0,62%	1,07%	5,47%	2,48%		
C2-11B	19.000	FWD	38,4	36	32,2	28,9	24,4	16,1	11,2	12,59	2,37
		68,0	38,3	35,5	33,1	28,9	24,7	16,9	10,9		
		Erro	0,21%	1,36%	2,67%	0,07%	1,02%	4,84%	2,41%		
C2-12A	15.000	FWD	41,4	37,9	33,4	29,5	24,3	15,7	10,6	17,37	3,21
		70,0	40,4	37,0	34,1	29,3	24,5	16,0	9,8		
		Erro	2,42%	2,32%	2,16%	0,58%	0,82%	1,91%	7,17%		
C2-12B	16.000	FWD	40	36,5	32	28,2	23,2	14,9	10,1	20,34	3,17
		72,0	39,0	35,8	33,0	28,4	23,8	15,7	9,7		
		Erro	2,58%	2,03%	3,16%	0,85%	2,67%	5,10%	3,96%		
C2-13A	15.000	FWD	48,9	45	39,8	35,2	29,7	19,3	13,5	19,10	3,31
		55,0	47,1	43,6	40,5	35,4	30,2	20,6	13,3		
		Erro	3,76%	3,18%	1,83%	0,62%	1,52%	6,63%	1,56%		
C2-13B	14.000	FWD	47,1	43,6	38	33,5	28	18,2	12,7	20,38	3,73
		60,0	45,6	41,9	38,8	33,5	28,2	18,7	11,7		
		Erro	3,25%	3,88%	2,00%	0,06%	0,68%	2,80%	7,72%		
C2-14A	10.000	FWD	65	59,3	51,9	45,7	37,3	24,6	16,4	19,38	3,06
		43,0	62,3	57,3	53,0	45,9	38,6	25,6	16,1		
		Erro	4,12%	3,36%	2,14%	0,33%	3,38%	4,23%	1,83%		
C2-14B	10.000	FWD	65,3	56,5	52,1	46,1	37,3	24,6	16,4	18,74	3,10
		43,0	62,7	57,7	53,4	46,2	38,8	25,8	16,2		
		Erro	3,92%	2,12%	2,44%	0,11%	4,08%	4,80%	1,28%		
C2-15A	19.000	FWD	59,8	56,8	52	47,4	41,4	30,4	21,9	8,58	1,69
		38,0	61,6	56,7	53,2	47,5	41,6	30,5	21,4		
		Erro	2,96%	0,12%	2,38%	0,19%	0,41%	0,23%	2,28%		
C2-15B	20.000	FWD	57,4	53,4	49,5	45,1	39,2	28,3	20,6	7,91	1,46
		41,0	58,1	53,5	50,2	44,7	39,1	28,5	20,0		
		Erro	1,20%	0,19%	1,37%	0,86%	0,28%	0,85%	3,16%		

APÊNDICE I – RESULTADOS DAS RETROANÁLISES REALIZADAS COM OS LEVANTAMENTOS DEFLECTOMÉTRICOS DA ETAPA 2

Tabela I.1: Resultados das retroanálises segmento 1 da Calçada 2 incluindo análise estatística básica – Condição “seca” para carga de 4.100 kgf

Ensaio	Carga	Erev (MPa)	Ebase (MPa)	Esub (MPa)	RMSE (%)
C2-1A - Seco	4.259	7.460	29	164	5,94
C2-1B - Seco	4.270	7.140	33	157	6,99
C2-2A - Seco	4.224	16.014	34	91	0,82
C2-2B - Seco	4.232	15.041	82	99	1,28
C2-3A - Seco	4.183	17.478	27	90	0,61
C2-3B - Seco	4.195	17.744	44	99	0,75
C2-4A - Seco	4.190	11.919	21	116	4,89
C2-4B - Seco	4.192	11.399	34	119	3,97
C2-5A - Seco	4.177	14.182	21	89	0,98
C2-5B - Seco	4.197	15.226	33	97	0,98
C2-6A - Seco	4.165	12.194	35	82	1,27
C2-6B - Seco	4.175	11.605	65	96	1,12
C2-7A - Seco	4.161	6.667	31	96	1,31
C2-7B - Seco	4.177	6.068	48	110	1,85
C2-8A - Seco	4.169	10.341	16	160	4,68
C2-8B - Seco	4.198	10.846	40	119	2,23
Média	4.198	11.958	37	112	2,48
Desvio Padrão	32	3.795	17	27	2,09
CV (%)	0,8	31,7	45,6	23,9	84,4

Tabela I.2: Resultados das retroanálises segmento 1 da Calçada 2 incluindo análise estatística básica – Condição “seca” para carga de 6.600 kgf

Ensaio	Carga	Erev (MPa)	Ebase (MPa)	Esub (MPa)	RMSE (%)
C2-1C - Seco	6.792	7.761	30	181	9,41
C2-1D - Seco	6.864	7.775	29	191	6,53
C2-2C - Seco	6.725	8.677	167	86	3,46
C2-2D - Seco	6.793	8.893	82	101	1,77
C2-3C - Seco	6.616	7.616	112	83	4,63
C2-3D - Seco	6.725	7.366	64	99	4,17
C2-4C - Seco	6.651	6.392	26	113	11,09
C2-4D - Seco	6.739	6.261	38	112	8,94
C2-5C - Seco	6.604	7.078	43	81	5,68
C2-5D - Seco	6.663	4.506	54	84	12,97
C2-6C - Seco	6.623	6.360	99	78	3,88
C2-6D - Seco	6.693	5.498	127	86	4,84
C2-7C - Seco	6.535	2.243	29	103	16,74
C2-7D - Seco	6.668	3.758	30	114	1,74
C2-8C - Seco	6.614	5.235	13	204	6,71
C2-8D - Seco	6.689	4.796	15	213	10,37
Média	6.687	6.263	60	120	7,06
Desvio Padrão	84	1.832	45	48	4,21
CV (%)	1,3	29,2	75,7	39,5	59,6

Tabela I.3: Resultados das retroanálises segmento 1 da Calçada 2 incluindo análise estatística básica – Condição “saturada” para carga de 4.100 kgf

Ensaio	Carga	Erev (MPa)	Ebase (MPa)	Esub (MPa)	RMSE (%)
C2-1A - Saturado	4.139	6.865	14	183	8,25
C2-1B - Saturado	4.156	6.909	15	196	10,14
C2-2A - Saturado	4.147	11.220	20	96	1,43
C2-2B - Saturado	4.159	10.806	24	100	1,71
C2-3A - Saturado	4.161	9.903	17	124	5,95
C2-3B - Saturado	4.151	9.702	21	127	5,51
C2-4A - Saturado	4.136	9.489	13	128	4,47
C2-4B - Saturado	4.138	8.911	18	116	4,26
C2-5A - Saturado	4.108	6.152	19	94	2,75
C2-5B - Saturado	4.136	6.139	21	103	3,80
C2-6A - Saturado	4.125	8.299	11	94	0,92
C2-6B - Saturado	4.123	7.017	13	101	1,06
C2-7A - Saturado	4.074	2.504	13	96	2,12
C2-7B - Saturado	4.094	2.992	17	98	2,26
C2-8A - Saturado	4.105	-	-	-	-
C2-8B - Saturado	4.087	-	-	-	-
Média	4.127	7.636	17	118	3,02
Desvio Padrão	27	2.655	4	33	1,73
CV (%)	0,6	34,8	22,7	27,5	57,3

*Os espaços não preenchidos se referem a retroanálises não realizadas por conta de leituras de deflexões incoerentes em um ou mais LVDTs, ocorridas nos respectivos ensaios.

Tabela I.4: Resultados das retroanálises segmento 1 da Calçada 2 incluindo análise estatística básica – Condição “saturada” para carga de 6.600 kgf

Ensaio	Carga	Erev (MPa)	Ebase (MPa)	Esub (MPa)	RMSE (%)
C2-1C - Saturado	6.641	5.387	29	123	21,01
C2-1D - Saturado	6.708	5.562	29	131	20,44
C2-2C - Saturado	6.639	9.960	15	125	5,19
C2-2D - Saturado	6.681	9.150	17	127	4,70
C2-3C - Saturado	6.614	7.328	21	119	4,97
C2-3D - Saturado	6.674	7.224	27	117	4,46
C2-4C - Saturado	6.577	5.519	20	111	12,85
C2-4D - Saturado	6.676	5.472	26	105	11,59
C2-5C - Saturado	6.545	4.863	11	137	5,48
C2-5D - Saturado	6.615	4.880	12	142	7,38
C2-6C - Saturado	6.611	5.388	10	137	8,34
C2-6D - Saturado	6.624	4.970	10	129	7,57
C2-7C - Saturado	6.450	2.555	12	115	4,21
C2-7D - Saturado	6.563	2.750	13	111	2,59
C2-8C - Saturado	4.110	-	-	-	-
C2-8D - Saturado	4.095	-	-	-	-
Média	6.616	5.786	18	123	8,63
Desvio Padrão	67	2.070	7	11	5,86
CV (%)	1,0	35,8	39,9	8,9	67,9

*Os espaços não preenchidos se referem a retroanálises não realizadas por conta de leituras de deflexões incoerentes em um ou mais LVDTs, ocorridas nos respectivos ensaios.

Tabela I.5: Resultados das retroanálises segmento 2 da Calçada 2 incluindo análise estatística básica – Condição “seca” para carga de 4.100 kgf

Ensaio	Carga	Erev (MPa)	Ebase (MPa)	Esub (MPa)	RMSE (%)
C2-9C - Seco	4.191	4.882	7	302	3,11
C2-9D - Seco	4.199	5.248	14	206	1,34
C2-10C - Seco	4.175	-	-	-	-
C2-10D - Seco	4.176	15.650	24	125	5,28
C2-11C - Seco	4.196	11.036	19	196	4,86
C2-11D - Seco	4.201	11.813	15	212	5,97
C2-12C - Seco	4.192	14.903	10	248	5,97
C2-12D - Seco	4.189	16.438	12	279	4,90
C2-13C - Seco	4.153	-	-	-	-
C2-13D - Seco	4.160	12.494	13	181	4,95
C2-14C - Seco	4.119	6.767	36	61	8,48
C2-14D - Seco	4.136	7.870	48	72	5,48
C2-15C - Seco	4.094	6.323	55	49	2,33
C2-15D - Seco	4.127	7.688	71	59	1,95
Média	4.165	10.093	27	166	4,55
Desvio Padrão	34	4.162	21	90	2,03
CV (%)	0,8	41,2	77,6	54,4	44,6

**Os espaços não preenchidos se referem a retroanálises não realizadas por conta de leituras de deflexões incoerentes em um ou mais LVDTs, ocorridas nos respectivos ensaios.*

Tabela I.6: Resultados das retroanálises segmento 2 da Calçada 2 incluindo análise estatística básica – Condição “seca” para carga de 6.600 kgf

Ensaio	Carga	Erev (MPa)	Ebase (MPa)	Esub (MPa)	RMSE (%)
C2-9C - Seco	6.695	4.728	7	1.502	7,92
C2-9D - Seco	6.750	4.481	11	398	7,67
C2-10C - Seco	6.746	16.299	11	152	5,49
C2-10D - Seco	6.845	17.920	10	215	3,74
C2-11C - Seco	6.765	9.370	34	173	4,82
C2-11D - Seco	6.818	10.648	27	199	5,35
C2-12C - Seco	6.773	15.888	12	214	3,78
C2-12D - Seco	6.890	16.394	14	236	2,75
C2-13C - Seco	6.706	11.125	14	147	4,87
C2-13D - Seco	6.769	11.641	15	162	3,74
C2-14C - Seco	6.649	8.822	7	129	3,22
C2-14D - Seco	6.673	8.484	9	114	3,17
C2-15C - Seco	6.614	8.215	12	62	1,03
C2-15D - Seco	6.700	7.863	17	63	1,01
Média	6.742	10.848	15	269	4,18
Desvio Padrão	76	4.318	8	364	2,05
CV (%)	1,1	39,8	53,3	135,5	49,1

Tabela I.7: Resultados das retroanálises segmento 2 da Calçada 2 incluindo análise estatística básica – Condição “saturada” para carga de 4.100 kgf

Ensaio	Carga	Erev (MPa)	Ebase (MPa)	Esub (MPa)	RMSE (%)
C2-9A - Saturado	4.152	3.362	5	180	7,69
C2-9B - Saturado	4.199	3.670	5	217	6,57
C2-10A - Saturado	4.162	-	-	-	-
C2-10B - Saturado	4.175	14.875	4	149	4,81
C2-11A - Saturado	4.173	11.775	5	232	3,66
C2-11B - Saturado	4.203	11.583	8	196	2,33
C2-12A - Saturado	4.213	11.510	7	153	3,50
C2-12B - Saturado	4.194	12.058	8	210	2,36
C2-13A - Saturado	4.153	-	-	-	-
C2-13B - Saturado	4.144	-	-	-	-
C2-14A - Saturado	4.075	5.744	32	51	5,14
C2-14B - Saturado	4.116	6.381	21	64	1,83
C2-15A - Saturado	4.104	5.644	32	47	2,57
C2-15B - Saturado	4.109	6.124	36	51	1,59
Média	4.155	8.430	15	141	4,05
Desvio Padrão	42	3.977	13	74	2,01
CV (%)	1,0	47,2	85,8	52,4	49,6

*Os espaços não preenchidos se referem a retroanálises não realizadas por conta de leituras de deflexões incoerentes em um ou mais LVDTs, ocorridas nos respectivos ensaios.

Tabela I.8: Resultados das retroanálises segmento 2 da Calçada 2 incluindo análise estatística básica – Condição “saturada” para carga de 6.600 kgf

Ensaio	Carga	Erev (MPa)	Ebase (MPa)	Esub (MPa)	RMSE (%)
C2-9A - Saturado	6.575	3.316	5	282	3,47
C2-9B - Saturado	6.655	3.241	6	202	6,08
C2-10A - Saturado	6.657	11.362	6	99	4,23
C2-10B - Saturado	6.709	12.270	9	78	4,97
C2-11A - Saturado	6.703	11.285	9	170	2,64
C2-11B - Saturado	6.750	10.509	13	149	2,51
C2-12A - Saturado	6.728	11.967	10	188	2,06
C2-12B - Saturado	6.795	11.961	12	179	1,95
C2-13A - Saturado	6.593	-	-	-	-
C2-13B - Saturado	6.645	-	-	-	-
C2-14A - Saturado	6.539	5.849	20	60	1,04
C2-14B - Saturado	6.604	5.119	34	60	1,12
C2-15A - Saturado	6.551	6.383	13	53	0,86
C2-15B - Saturado	6.673	6.282	16	54	0,90
Média	6.655	8.295	13	131	2,65
Desvio Padrão	77	3.569	8	75	1,71
CV (%)	1,2	43,0	62,0	56,8	64,6

*Os espaços não preenchidos se referem a retroanálises não realizadas por conta de leituras de deflexões incoerentes em um ou mais geofones, ocorridas nos respectivos ensaios.