ERIC RIBEIRO DA SILVA

Análise do comportamento estrutural e funcional de um pavimento experimental com blocos pré-moldados de concreto

São Paulo

2016

ERIC RIBEIRO DA SILVA

Análise do comportamento estrutural e funcional de um pavimento experimental com blocos pré-moldados de concreto

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. José Tadeu Balbo

São Paulo

2016

ERIC RIBEIRO DA SILVA

Engenheiro Civil, Universidade Nove de Julho, 2013

Bacharel em Matemática, Universidade Braz Cubas, 2004

Análise do comportamento estrutural e funcional de um pavimento experimental com blocos pré-moldados de concreto

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de Transportes – Infraestrutura de Transportes

Orientador: Prof. Dr. José Tadeu Balbo

Laboratório de Mecânica de Pavimentos

São Paulo

2016

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

São Paulo, 30 de novembro de 2016.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Catalogação-na-publicação

Silva, Eric Ribeiro da

Análise do comportamento estrutural e funcional de um pavimento experimental com blocos pré-moldados de concreto / E.R. Silva – versão corr. -- São Paulo, 2016.

234 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1. Pavimentação 2. Pavimentação de concreto 3. Pavimento intertravado 4. Base cimentada I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

AGRADECIMENTOS

Na certeza de que nada se constrói sozinho é necessário prestar aqui o devido agradecimento a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

Primeiramente, agradeço a Deus por cada dia e cada conquista alcançada em minha vida.

Aos meus pais Noemia e José, por formarem meu caráter e por tudo que fizeram para que meu irmão e eu pudéssemos ter uma educação de qualidade. Ao meu irmão Leandro, por todo carinho e apoio ao longo de todos estes anos.

A Adriana minha amiga e companheira por acreditar e sempre me apoiar incondicionalmente, mesmo quando isso significava minha ausência.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Tadeu Balbo por todo conhecimento transmitido e por sua paciência e dedicação em me orientar ao longo desta pesquisa.

Aos professores Dr. Glauco Tulio Pessa Fabbri e Dra. Rosângela dos Santos Motta pela participação na banca do exame de qualificação e pelas contribuições prestadas a esta pesquisa na forma de sugestões e apontamentos.

Ao amigo Eng. Pedro Denis Tonetto, pela grande amizade, pelos inúmeros conselhos ao longo destes últimos cinco anos e por contribuir para o meu crescimento como profissional e como ser humano.

Ao amigo e colega de pós-graduação Frank Ressutte pelas inúmeras sugestões e contribuições a esta pesquisa.

A todos os colegas de curso, em especial a Andréia Posser Cargnin e Lucio Salles pelo apoio e companheirismo.

A empresa DYNATEST por ter realizado os ensaios deflectométricos com equipamento FWD, nos trechos experimentais.

A empresa EPT – Engenharia e Pesquisas Tecnológicas S.A. pelo apoio técnico na abertura de cavas para fins de inspeção das estruturas de pavimento dos trechos experimentais.

A Prefeitura do Campus USP da Capital, em especial aos profissionais Enea Neri e Amaury Martins da divisão de infraestrutura, pelo apoio técnico durante os fechamentos para realização de levantamentos na Avenida Professor Almeida Prado.

Aos profissionais Flavio Conte e Cristiane Pires Andrioli, ambos da FCTH, pelo fornecimento dos dados meteorológicos utilizados neste estudo.

Ao Eng. Douglas Costa da Prefeitura do Campus USP da Capital pelo fornecimento dos dados relativos ao tráfego de veículos na Avenida Professor Almeida Prado.

A todos, o meu mais sincero muito obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS i

LISTA DE QUADROS vii

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS xii

LISTA DE SÍMBOLOS xiv

RESUMO xv

ABSTRACT xvi

1 INTRODUÇÃO 25

1.1 Objetivos do trabalho de pesquisa 26

1.1.1 Objetivo geral 26

1.1.2 Objetivos específicos 26

1.2 Estrutura da dissertação 27

2 PAVIMENTO DE BLOCOS DE CONCRETO 28

2.1 Breve histórico 28

2.2 Vantagens e limitações dos PBC 33

2.2.1 Vantagens associadas ao uso do PBC 33

2.2.2 Limitações dos PBC 35

2.3 Características estruturais dos pavimentos de blocos de concreto 36

2.3.1 Influência do formato dos blocos e do padrão de arranjo no comportamento estrutural 38

2.3.2 Intertravamento 43

2.3.3 Intertravamento horizontal 44

2.3.4 Intertravamento vertical 45

2.3.5 Intertravamento rotacional 46

2.3.6 O efeito do intertravamento na dissipação de tensões 47
2.4 Requisitos estruturais dos pavimentos de blocos de concreto 49
2.4.1 Blocos de concreto 49
2.4.2 Camada de assentamento 51
2.4.3 Material de rejuntamento 61
2.4.4 Base e sub-base 64
2.4.5 Subleito 66
2.4.6 Contenções 67
2.5 Métodos de projeto 72
2.5.1 Experiência internacional no dimensionamento do PBC 75
2.5.2 Métodos nacionais de dimensionamento do PBC 102
2.6 Comportamento mecânico do PBC 113
3 MÉTODO DE PESQUISA NOS TRECHOS EXPERIMENTAIS 119
3.1 Localização e caracterização dos trechos experimentais 119
3.2 Premissas de projeto para construção dos trechos experimentais 122
3.2.1 Características geotécnicas 122
3.2.2 Tráfego 126
3.2.3 Dimensionamento da estrutura do pavimento 126
3.2.4 Camada de base de CCR 127
3.2.5 Verificação mecanicista 129
3.2.6 Parâmetros construtivos 132
3.3 Construção dos trechos experimentais 134
3.4 Avaliação das condições estruturais do pavimento 136
3.4.1 Inspeções visuais das condições do pavimento 136
3.4.2 Levantamentos deflectométricos 138
3.4.3 Abertura de cavas 141

4 RESULTADOS OBTIDOS 145

4.1 Avaliação visual das condições do pavimento 145

4.2 Índice de condição do pavimento 150

4.3 Deflexões de FWD obtidas 154

4.4 Estrutura de pavimento encontrada 163

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 171

5.1 Pista x projeto 171

5.2 Retroanálise dos módulos de resiliência das camadas do pavimento 177

5.3 Comparativo das bacias de deformação medidas e retroanalisadas 189

6 CONCLUSÕES 208

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 211

APÊNDICE A – Levantamentos de campo para determinação do ICP 219

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Via Appia 29

Figura 2.2 - Calçada do Lorena 31

Figura 2.3 - Componentes típicos de um sistema de pavimento intertravado de concreto ... 33

Figura 2.4 - Tipos mais comuns de formatos de blocos 39

Figura 2.5 - Exemplo de blocos de concreto tipo I 39

Figura 2.6 - Exemplo de blocos de concreto tipo II 40

Figura 2.7 - Exemplo de blocos de concreto tipo III 40

Figura 2.8 - Exemplo de blocos de concreto tipo IV 41

Figura 2.9 - Padrões de assentamento dos blocos para tráfego de pedestre 41

Figura 2.10 - Padrões de assentamento dos blocos recomendado para o tráfego de veículos 42

Figura 2.11 - Desempenho do PBC em função do arranjo dos blocos 43

Figura 2.12 - Intertravamento horizontal 44

Figura 2.13 - Intertravamento vertical 46

Figura 2.14 - Intertravamento rotacional 46

Figura 2.15 - Aplicação de carregamento vertical estático sobre a superfície do pavimento . 47

Figura 2.16 - Os seis diferentes formatos de blocos testados 48

Figura 2.17 - Tensão registrada pelas células de pressão 48

Figura 2.18 - Efeito da espessura dos blocos no desempenho de pavimentos sobre a solicitação do tráfego 50

Figura 2.19 - Faixas granulométricas recomendadas para areias empregadas em camadas de assentamento 57

Figura 2.20 - Efeito da espessura da camada de assentamento no desempenho de pavimentos 58

Figura 2.21 - Faixas granulométricas recomendadas para areias empregadas em camadas de rejuntamento 63

Figura 2.22 - Blocos atuando como contenção 68

Figura 2.23 - Exemplos de diferentes tipos de contenções empregadas em PBC 71

Figura 2.24 - Exemplo de contenções entorno de utilidades públicas enterradas 72

Figura 2.25 - Método de projeto para pavimentos trafegados por automóveis e veículos leves com pesos equivalentes a carros 76

Figura 2.26 - Método de projeto para pavimentos que não ultrapassem 1,5 x 10^6 repetições de eixo padrão durante o horizonte de projeto 77

Figura 2.27 - Espessura da base granular do pavimento rodoviário para bloco de espessura de 80 mm 93

Figura 2.28 - Espessura da base de solo-cimento em função do N de projeto e do CBR do subleito 95

Figura 2.29 - Distribuição de veículos de cargas comerciais recomendada para projetos de pavimentos rodoviários na Austrália 97

Figura 2.30 - Curvas de projeto para pavimento rodoviário 101

Figura 2.31 - Curvas de projeto para pavimentos industriais 102

Figura 2.32 - Efeito progressivo das diversas cargas por eixo simples 103

Figura 2.33 - Espessura necessária de sub-base 105

Figura 2.34 - Espessura necessária de base de concreto compactado com rolo ou solo-cimento 106

Figura 2.35 - Espessura da base cimentada em função do número N 110

Figura 2.36 - Efeito progressivo do intertravamento sobre o tráfego 117

Figura 2.37 - Sequência do teste de carregamento desenvolvido por Shackel 118

Figura 3.1 - Localização dos trechos experimentais em PBC 120

Figura 3.2 - Estaqueamento nos Trechos 1 e 2 121

Figura 3.3 - Locação dos poços de inspeção PI-01 e PI-02 123

Figura 3.4 - Curva granulométrica do material do subleito PI-01 125

Figura 3.5 - Curva granulométrica do material do subleito PI-02 125

Figura 3.6 - Resistência a tração na flexão do CCR convencional em função do consumo de cimento 128

Figura 3.7 - Seção de projeto 133

Figura 3.8 - Foto da fase de construção dos trechos experimentais na transição entre o PBC e o PCCA 135

Figura 3.9 - Blocos segmentados dispostos em arranjo espinha-de-peixe nos trechos experimentais 136

Figura 3.10 -Levantamento deflectométrico com FWD 139

Figura 3.11 - Temperatura x umidade relativa 140

Figura 3.12 - Locação das cavas no Trecho 1, seções 1 e 4 142

Figura 3.13 - Locação das cavas no Trecho 2, seções 2 e 3 142

Figura 3.14 - Locais escolhidos para abertura de cavas no trecho 1 143

Figura 3.15 - Locais escolhidos para abertura de cavas no trecho 2 144

Figura 4.1 - Blocos danificados e deformação permanente 145

Figura 4.2 - Espaçamento entre juntas 146

Figura 4.3 - Perda de rejuntamento / bombeamento 147

Figura 4.4 - Reparos 147

Figura 4.5 - Afundamento em trilha de roda 148

Figura 4.6 - Contenções danificadas 148

Figura 4.7 - Problemas construtivos 149

Figura 4.8 - Escala de classificação do ICP 151

Figura 4.9 - Distribuição das amostras de ICP calculadas em cada seção 153

Figura 4.10 - Comportamento do pavimento com base na deflexão máxima 157

Figura 4.11 - Análise estatística das deflexões na Seção 1 159

Figura 4.12 - Análise estatística das deflexões na Seção 2 160

Figura 4.13 - Análise estatística das deflexões na Seção 3 161

Figura 4.14 - Análise estatística das deflexões na Seção 4 162

Figura 4.15 - Detalhe da espessura do bloco retirado da cava CV03 (igual a 9,4 cm) 163

Figura 4.16 - Detalhe da espessura da camada de assentamento na cava CV07 (areia grossa, 11 cm) 163

Figura 4.17 - Tentativa de extração de CP na cava CV01 164

Figura 4.18- Materiais das camadas de assentamento e base coletados na cava CV08 164

Figura 4.19 - CPs coletados nas cavas CV01 e CV04 165

Figura 4.20 - Material de reforço de subleito coletado na cava CV08 165

Figura 4.21- Amostra da cava CV08 para determinação da composição granulométrica 167

Figura 4.22 - Análise granulométrica de material da camada de assentamento coletado na cava CV-08 168

Figura 4.23 - Resumo dos resultados dos estudos realizados no trecho 1 169

Figura 4.24 - Resumo dos resultados dos estudos realizados no trecho 2 170

Figura 5.1 - Amostra extraída da camada de base na cava CV01 175

Figura 5.2 - Resultados do teste de carbonatação 176

Figura 5.3 - Pontos de aplicação de carga escolhidos para retroanálise na Seção 1 179

Figura 5.4 - Pontos de aplicação de carga escolhidos para retroanálise na Seção 2 180

Figura 5.5 - Pontos de aplicação de carga escolhidos para retroanálise na Seção 3 180

Figura 5.6 - Pontos de aplicação de carga escolhidos para retroanálise na Seção 4 181

Figura 5.7 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 1.2 191

Figura 5.8 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 1.6 192

Figura 5.9 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 1.8 193

Figura 5.10 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 1.10 194

Figura 5.11 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 2.1 195

Figura 5.12 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 2.5 196

Figura 5.13 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 2.6 197

Figura 5.14 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 2.8 198

Figura 5.15 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 3.2 199

Figura 5.16 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 3.4 200

Figura 5.17 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 3.5 201

Figura 5.18 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 3.7 202

Figura 5.19 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 4.3 203

Figura 5.20 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 4.4 204

Figura 5.21 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 4.5 205

Figura 5.22 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 4.7 206

Figura 5.23 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 4.10 207

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Fatores que influenciam no desempenho do PBC sob o tráfego veícular 49

Quadro 2.2 – Faixas granulométricas recomendadas para areias empregadas em camadas de assentamento 56

Quadro 2.3 - Comparativo de espessuras de camada de assentamento e materiais recomendados 59

Quadro 2.4 - Faixas granulométricas recomendadas para areias empregadas em camadas de rejuntamento.....62

Quadro 2.5 - Fatores de drenagem 66

Quadro 2.6 - Tipos de contenção a serem adotadas em função do local de aplicação 69

Quadro 2.7 – Coeficientes de equivalência estrutural entre materiais 78

Quadro 2.8 - Categorias de subleito.....79

Quadro 2.9 - Classificação da qualidade da drenagem em função do tempo de drenagem e tipo de solo.....79

Quadro 2.10 - Método de dimensionamento: categoria de solo 1 a 2 81

Quadro 2.11 - Método de dimensionamento: categoria de solo 3 a 4 82

Quadro 2.12 - Método de dimensionamento: categoria de solo 5 a 6 83

Quadro 2.13 - Método de dimensionamento: categoria de solo 7 a 8 84

Quadro 2.14 - Classificação da via em função do tráfego no método da AHIBM 85

Quadro 2.15 - Exemplos de dimensionamentos estruturais de pavimentos de blocos de concreto segundo o critério da AHIBM 87

Quadro 2.16 - Valores de referência para quantidades de veículos comerciais por dia para vias de baixo volume de tráfego 88

Quadro 2.17 - Espessura das camadas do pavimento sujeito ao baixo volume de tráfego 89

Quadro 2.18 - Volume de tráfego acumulado em função do número de veículos comerciais por dia 89

Quadro 2.19 - Espessura das camadas de sub-base mais reforço ou apenas sub-base (mm) 91

Quadro 2.20 - Espessura da camada de base, camada de assentamento e blocos de concreto 92

Quadro 2.21 - Classificação de tráfego das vias 109

Quadro 2.22 - Espessura e resistência dos blocos de revestimento – Procedimento A 111

Quadro 2.23 - Espessura necessária de base puramente granular (H_{BG}) – Procedimento B . 112

Quadro 2.24 - Critério de avaliação das condições do pavimento com base nas deflexões . 113

Quadro 2.25 - Espessuras das camadas dos trechos experimentais de pavimentos de blocos de concreto 114

Quadro 2.26 - Valores de módulos de resiliência e coeficientes de *Poisson* típicos do PBC . 115

Quadro 3.1 - Resultado dos poços de inspeção 124

Quadro 3.2 - Resumo dos ensaios geotécnicos das amostras 124

Quadro 3.3 - Parâmetros adotados na análise mecanicista 131

Quadro 3.4 - Resultados obtidos na análise mecanicista 131

Quadro 3.5 - Critério recomendado para substituição de solos indadequados 132

Quadro 3.6 - Descrição da seção típica dos trechos experimentais 133

Quadro 3.7 - Critério de liberação das camadas por deflectometria 134

Quadro 3.8 - Níveis de severidade de danos em pavimentos de blocos de concreto 137

Quadro 3.9 - Patologias em PBC intertravados e suas possíveis causas 138

Quadro 3.10 - Distância dos geofones até o ponto de aplicação de carga 139

Quadro 3.11 - Condições climáticas na época em que foi realizado o FWD 140

Quadro 4.1 - Amostras para verificação do ICP 150

Quadro 4.2 - ICP calculado em cada amostra 153

Quadro 4.3 – Faixa de variação das deflexões obtidas diretamente sob o ponto de carregamento nas seções experimentais 154

Quadro 4.4 - Dados obtidos a partir do levantamento deflectométrico com FWD da 1ª aplicação de carga 155

Quadro 4.5 - Dados obtidos a partir do levantamento deflectométrico com FWD da 2ª aplicação de carga 156

Quadro 4.6 - Parâmetros estatísticos para elaboração do *"box-plot"* da seção 1 159

Quadro 4.7 - Parâmetros estatísticos para elaboração do *"box-plot"* da seção 2 160

Quadro 4.8 - Parâmetros estatísticos para elaboração do *"box-plot"* da seção 3 161

Quadro 4.9 - Parâmetros estatísticos para elaboração do *"box-plot"* da seção 4 162

Quadro 4.10 - Características dos materiais encontrados nas aberturas de cavas do trecho 1 166

Quadro 4.11 - Características dos materiais encontrados nas aberturas de cavas do trecho 2 166

Quadro 4.12 - Resumo da análise granulométrica do material coletado na cava CV08 167

Quadro 5.1 - Comparativo dos materiais e espessuras das camadas do pavimento 172

Quadro 5.2 - Faixas de variação dos módulos de resiliência e coeficientes de *Poisson* 178

Quadro 5.3 - Parâmetros para retroanálise da Seção 1 no programa BAKFAA – FAA 183

Quadro 5.4 - Parâmetros para retroanálise da Seção 2 no programa BAKFAA – FAA 184

Quadro 5.5 - Parâmetros para retroanálise da Seção 3 no programa BAKFAA – FAA 185

Quadro 5.6 - Parâmetros para retroanálise da Seção 4 no programa BAKFAA – FAA 186

Quadro 5.7 - Módulos de resiliência das camadas retroanalisados com auxílio do programa BAKFAA (MPa) 187

Quadro 5.8 - Resumo dos módulos de resiliência retroanalisados em cada seção 188

Quadro 5.9 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 1.2 na Seção 1 191

Quadro 5.10 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 1.6 na Seção 1 192

Quadro 5.11 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 1.8 na Seção 1 193

Quadro 5.12 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 1.10 na Seção 1 194

Quadro 5.13 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 2.1 na Seção 2 195

Quadro 5.14 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 2.5 na Seção 2 196

Quadro 5.15 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 2.6 na Seção 2 197

Quadro 5.16 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 2.8 na Seção 2 198

Quadro 5.17 -Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 3.2 na Seção 3 199

Quadro 5.18 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 3.4 na Seção 3 200

Quadro 5.19 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 3.5 na Seção 3 201

Quadro 5.20 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 3.7 na Seção 3 202

Quadro 5.21 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 4.3 na Seção 4 203

Quadro 5.22 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 4.4 na Seção 4 204

Quadro 5.23 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 4.5 na Seção 4 205

Quadro 5.24 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 4.7 na Seção 4 206

Quadro 5.25 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 4.10 na Seção 4 207

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	*American Association of State Highway and Transportation Officials*
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	*Association Française de Normalisation*
AHIBM	*Association of Hokkaido Interlocking Block Manufacturers*
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
BGS	Brita Graduada Simples
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
BS	*British Standards*
CBR	*California Bearing Ratio*
CBUQ	Concreto betuminoso usinado a quente
CCAA	*Cement and Concrete Association of Australia*
CCR	Concreto compactado com rolo
CCCUSP	Coordenadoria do Campus da Capital USP
CP	Corpo de prova
CSA	*Canadian Standard Association*
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DERSA	Desenvolvimento Rodoviário S/A
DIN	*Deutsches Institut fur Normung*
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
EPE	Eixo Padrão Equivalente
ESRD	Eixo Simples de Rodas Duplas

ETD	Eixo Tandem Duplo
ETT	Eixo Tandem Triplo
FAA	*Federal Aviation Administration*
FCTH	Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica
FWD	*Falling Weight Deflectometer*
ICP	Índice de Condição do Pavimento
ICPI	*Interlocking Concrete Pavement Institute*
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
NBR	Normalização Brasileira
PBC	Pavimento de Bloco de Concreto
PCA	*Portland Cement Association*
PCCA	Pavimento de Concreto Continuamente Armado
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PMSP	Prefeitura Municipal de São Paulo
PI	Poço de inspeção
RMSE	Erro quadrático médio percentual
SI	Sistema Internacional de Unidades
USP	Universidade de São Paulo
VDM	Volume diário médio

LISTA DE SÍMBOLOS

Mr	Módulo de resiliência
N	Número de repetições de eixo padrão
μ	Coeficiente de *Poisson*
IP	Índice de plasticidade
LL	Limite de liquidez
H	Espessura total do pavimento
TA	Espessura total requerida para pavimento asfáltico
a_n	Coeficientes relativos a tensão
T_n	Espessuras individuais de cada camada
w	Carga por eixo
e	Espessura total do pavimento
p	Carga por roda
IS	CBR do subleito
H_{BC}	Espessura de base cimentada
H_{BG}	Espessura de base granular
H_{SB}	Espessura de sub-base granular
K_{BC}	Coeficiente estrutural da camada cimentada
εv_{adm}	Deformação vertical admissível
RT	Relação entre tensões
σtf_{adm}	Tensão de tração na flexão admissível

RESUMO

Dentre a vasta gama de alternativas estruturais possíveis para a construção de pavimentos, os revestimentos com blocos pré-moldados de concreto têm sua aplicação consolidada em pavimentação de áreas portuárias. Além disso, em muitos países, este tipo de pavimento tem sido utilizado com sucesso em aplicações rodoviárias, aeroportuárias, em pátios industriais e em demais aplicações para tráfegos veiculares e de pedestres. No Brasil, no entanto, devido a insucessos em sua utilização, motivados, muitas vezes, pela inobservância de parâmetros técnicos relevantes a essa tecnologia, contribuíram para que este tipo de pavimento tenha sido subutilizado. Todavia, as recentes revisões nas normas nacionais que tratam deste tema, a criação de novas normatizações e a recente construção de importantes rodovias utilizando este tipo de revestimento, contribuem para o aperfeiçoamento de profissionais e a diminuição do prejulgamento desta tecnologia. Neste sentido, é de suma importância estudar o comportamento estrutural e funcional deste tipo de pavimento. De modo que, neste trabalho, foram estudadas quatro seções de dois trechos experimentais construídos entre julho e setembro de 2010. Foram realizadas avaliações destrutivas e não destrutivas para análise dos materiais, suas espessuras e confronto com os parâmetros construtivos oriundos do projeto e da literatura, bem como a verificação das condições para realização de retroanálise dos módulos de resiliência das camadas do pavimento. Os levantamentos deflectométricos apresentaram patamares muito elevados de deflexões reversíveis em todas as seções estudadas. Das aberturas de cavas e confronto com a estrutura de projeto, verificou-se incompatibilidades entre os materiais e espessuras das camadas do pavimento projetado x pavimento construído, destacando-se a condição verificada na camada de base por apresentar significativa desagregação do material, cujo projeto indicava utilização de concreto compactado com rolo (CCR), o que evidencia problemas no controle tecnológico dos materiais e falhas no gerenciamento da obra. Por meio das retroanálises foram verificadas diminuições significativas dos módulos de resiliência das camadas do pavimento, quando comparado com os parâmetros de projeto. Os índices de condições do pavimento (ICP) apontaram condições distintas nas seções avaliadas mesmo sujeitas ao mesmo tráfego de veículos.

Palavras chave: pavimentação, pavimentação de concreto, pavimento intertravado, base cimentada.

ABSTRACT

Among the wide range of possible structural alternatives for the construction of pavements, interlocking concrete pavements are the orthodox solution for paving ports. Furthermore, in many countries, this type of pavement has been successfully used in highways, airport applications, in industrial areas and other applications for vehicular traffic and pedestrians. In Brazil, however, due to failures in its use, driven often by the lack of relevant technical parameters to this technology, contributed to the fact that this type of pavement has been misused. Although, recent reviews from the national standards that deal with this type of pavement, the creation of new standards and the recent construction of important highways using this type of structure, have contributed to the improvement of professionals and decreased the prejudice of this technology. In this sense, it is extremely important to study the structural and functional behavior of this type of pavement. Therefore, in this research it was studied two experimental sections built between July and September 2010 that carried out destructive and nondestructive evaluations for the analysis of materials, their thicknesses and constructive confrontation with the parameters derived from the project and the literature, as well verifying the conditions to accomplish the back calculation of the elastic modulus of the pavement layers. The displacement tests surveys demonstrated very high levels of reversible displacements in all studied sections. From the inspection pits openings and confrontation with the project structure, there is incompatibility between the materials and thicknesses of the layers of the designed pavement versus constructed pavement, the condition verified highlighting the base layer for introducing significant breakdown of the material, which design indicated use of roller-compacted concrete (RCC), which indicates problems in the quality control of materials and failures in the management. The back calculation showed that decreases were observed elastic modulus of the pavement layers when compared with the design parameters. Surveys concerning pavement condition index (PCI) showed different conditions for the evaluated sections even supporting the same traffic.

Key words: paving, concrete pavement, interlocking concrete pavement, cement-treated bases.

1 INTRODUÇÃO

Os blocos pré-moldados de concreto para pavimentos foram desenvolvidos no final da década de 1940 na Holanda como um substituto para as ruas de tijolos (BURAK, 2002a). Na segunda metade do século XX, segundo Dowson (2009), com a invenção de máquinas capazes de produzir blocos de concreto de alta qualidade, precisão dimensional e economia, a indústria de concreto pré-moldado se espalhou pelo mundo. A partir do início da década de 1970, seu uso tinha sido estabelecido na América, África, Austrália e Japão (SHACKEL, 1980). Apenas no final da década de 1970 houve sua expansão no norte da Europa (DOWSON, 2009).

Conforme argumentam vários autores, entre eles, Knapton e Smith (2012), os pavimentos revestidos com blocos de concreto intertravados constituem uma solução consolidada para áreas portuárias. Além disso, em vários países ao redor do mundo, os blocos de concreto para pavimentação têm sido utilizados com sucesso em aplicações rodoviárias, aeroportuárias, pátios industriais, áreas de estacionamento e passeios públicos.

Neste sentido, Cruz (2003) relata que no Brasil, no período entre 1998 e 2003, haviam sido instalados, na cidade do Rio de Janeiro, mais de um milhão de metros quadrados de pavimentos de blocos pré-moldados de concreto na área urbana da cidade.

Contudo, embora em muitos países a pavimentação de rodovias com blocos de concreto se configure como uma prática comum, no Brasil, a maior demanda por este tipo de revestimento ainda se restringe a aplicações sujeitas ao tráfego leve, áreas de estacionamento ou, simplesmente, áreas de pedestres, existindo assim, poucos exemplos da aplicação deste tipo de pavimento em áreas sujeitas ao tráfego de veículos comerciais.

Um destes exemplos é a rodovia estadual Nequinho Fogaça (SP-139) que, de acordo com Sousa (2015), configura-se como a primeira experiência rodoviária nacional com pavimento intertravado. A obra foi administrada pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) e compreendem uma extensão de 33 km de pavimento de blocos de concreto intertravados no trecho da estrada do Parque Estadual Carlos Botelho (SP), cruzando uma unidade de proteção ambiental em plena Floresta Atlântica. É importante observar que

a SP-139 trata-se de uma rodovia de tráfego restrito, ou seja, tráfego leve com N de projeto igual a 1,14 x 10^6 repetições de eixo padrão de 80 kN, sendo empregada em sua construção base granular. Além da SP-139, há ainda um projeto semelhante na Rodovia Estadual Arlindo Bettio (SP-613), na região do Pontal do Paranapanema, em São Paulo, além do trecho de serra da Rodovia Cunha (SP) - Paraty (RJ) (SOUSA, 2015).

Um outro exemplo da aplicação de pavimentos de blocos de concreto em pavimento sujeito ao tráfego de veículos comerciais, encontra-se dentro das dependências da Universidade de São Paulo (USP), localizado na Avenida Professor Almeida Prado, onde foram construídos dois trechos experimentais revestidos de blocos de concreto sobre base cimentada.

1.1 Objetivos do trabalho de pesquisa

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa foi analisar criticamente o comportamento estrutural e funcional de pavimentos de blocos pré-moldados de concreto sobre base cimentada através do estudo de caso dos trechos experimentais localizados na Avenida Almeida Prado na USP.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa, tendo como base o exposto no objetivo geral, são:

- Realizar avaliação visual contínua dos trechos experimentais, para verificação preliminar de patologias no pavimento;
- Realizar avaliação não destrutiva do pavimento, por meio de levantamento deflectométrico com equipamento *Falling Weight Deflectometer* (FWD);
- Realizar avaliação destrutiva no pavimento através da abertura de cavas para análise dos materiais, suas espessuras e condições de retroanálise;
- Realizar retroanálises da estrutura do pavimento a partir dos dados obtidos nos levantamentos deflectométricos com FWD e da abertura de cavas;

- Confrontar os dados obtidos por meio das avaliações destrutivas e não destrutivas com as premissas oriundas do projeto para construção do pavimento e também da literatura;
- Determinar o ICP a partir dos níveis de severidade das patologias verificadas nos trechos experimentais;
- Por fim, apresentar uma análise crítica dos resultados obtidos no projeto experimental avaliado.

1.2 Estrutura da dissertação

A estrutura desta dissertação é composta por seis capítulos. Os conteúdos de cada capítulo, que sequenciam a introdução, são resumidos a seguir.

No Capítulo 2 é apresentada a pesquisa bibliográfica que versa sobre: um breve histórico dos pavimentos de blocos de concreto, as vantagens e limitações na utilização deste tipo de revestimento, suas características e requisitos estruturais e os principais critérios de projeto nacionais e internacionais.

No Capítulo 3 são descritos os métodos de pesquisa adotados nos trechos experimentais. São abordadas as premissas do projeto de construção dos trechos experimentais e os métodos de avaliação destrutivos e não destrutivos empregados.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados das avaliações descritas no Capítulo 3 e ainda, é realizada avaliação funcional do pavimento por meio da determinação do índice de condição do pavimento com base na norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) E2840 (2015).

No Capítulo 5 são discutidos os resultados apresentados no Capítulo 4 através do confronto das premissas de projeto com os dados verificados em pista. Além disso, são apresentadas as retroanálises das estruturas dos trechos experimentais.

As considerações finais são apresentadas no Capítulo 6, juntamente com as conclusões obtidas durante o desenvolvimento deste trabalho e recomendações para estudos futuros.

2 PAVIMENTO DE BLOCOS DE CONCRETO

2.1 Breve histórico

Raramente haverá uma única solução para a maioria dos problemas de projeto de pavimentação. Ao contrário, haverá normalmente uma vasta gama de alternativas de estruturas de pavimento representando diferentes combinações de materiais e técnicas de construção que lhe darão um resultado satisfatório (SHACKEL, 2006).

Dentre estas alternativas, os pavimentos revestidos de blocos pré-moldados de concreto – convenientemente designados neste trabalho como PBC – têm se apresentado como solução para pavimentação de estradas, áreas portuárias, aeroportuárias, pátios industriais e em demais aplicações para tráfegos veiculares e de pedestres, em vários países ao redor do mundo.

Assim, para que se possa compreender a relevância dos PBC dentre as demais soluções de pavimentação, é importante buscar entender suas origens desde os motivos que levaram ao seu desenvolvimento e aperfeiçoamento.

Neste sentido, Balbo (2007) relata que o surgimento das estradas e seu aperfeiçoamento se deu devido à necessidade da humanidade em obter melhores acessos às áreas cultiváveis, às fontes de matéria-prima e também do desejo de expandir sua área de influência. Sendo que, os registros mais antigos do surgimento de estradas remontam à China. Todavia, segundo Balbo (2007, p. 13), “ [...] foram os romanos que, bem mais tarde, aperfeiçoaram as estradas, através da instalação de pavimentos e drenagem com o intuito de torná-las mais duradouras”, destacando-se entre as diversas estradas romanas a Via Appia, por ser uma das primeiras a merecer atenção técnica quanto à pavimentação.

De acordo com Knapton (1996), a Via Appia, frequentemente retratada como o principal exemplo de uma estrada romana, era, na verdade, não pavimentada até o século II d.C. e, segundo o autor, é improvável que qualquer estrada tenha sido pavimentada antes desta época. Além disso, é interessante notar que essas estradas eram pavimentadas muitas vezes

utilizando pedras retangulares e outras com pedras poligonais, muitas vezes de oito lados. A Figura 2.1 ilustra um trecho da Via Appia cujo pavimento foi revestido com pedras poligonais.

Figura 2.1 - Via Appia

Fonte: ICPI (2010)

Para Dowson (2009), a pavimentação utilizando pedras naturais fornecia o único meio prático de formação de superfícies sólidas para estradas, tendo o seu uso continuado através de diferentes civilizações, embora as construções diferissem, dependendo do tipo de pedras disponíveis, tipos de solo e tipo de tráfego.

Knapton (1996) apresenta peculiaridades inerentes aos pavimentos romanos construídos na Grã-Bretanha. Segundo o autor, uma característica única das estradas romanas britânicas foi a utilização do aterro de altura entre 0,3 a 1,5 m em que as estradas eram geralmente construídas. O aterro era construído usando materiais escavados de valas paralelas à estrada. Vários autores têm especulado sobre a finalidade do aterro: alguns consideraram como uma função de engenharia, permitindo que a água escorresse a partir dos materiais de pavimentação das estradas, enquanto outros consideraram o fato de que, durante os

primeiros anos após a invasão romana a Grã-Bretanha, os bretões eram hostis, de modo que o aterro pode ter sido construído para a segurança, não apenas para os viajantes romanos terem uma melhor visão da estrada elevada, mas também para serem capazes de defender-se contra possíveis ataques.

Deve-se ter em mente que dois mil anos atrás, a Grã-Bretanha era em grande parte floresta e todas as estradas foram construídas através de terras desmatadas, geralmente com clareiras estendendo-se até uma largura de 30 m, embora a maioria das estradas tivessem menos de 10 m de largura. O objetivo da clareira era, provavelmente, para melhorar a segurança e, possivelmente, para tornar as estradas mais fáceis de se encontrar.

Depois de abrir a clareira através da floresta, eram escavadas as valas laterais para marcar os limites da estrada. As valas laterais na estrada eram aprofundadas e o material escavado era utilizado para construir o aterro. Geralmente, o material de aterro das valas era colocado diretamente sobre o solo existente e não era realizada nenhuma tentativa de remover o material superior não consolidado. A uma altura de aproximadamente um metro acima do solo natural, as grandes pedras irregulares de fundação da estrada com dimensões típicas de 600x400x200 mm eram colocadas na condição em que elas chegavam da pedreira. Pedras britadas graúdas ou cascalho eram colocados e compactados sobre as pedras de fundação e pedras mais compridas eram colocadas na parte lateral para conter as pedras britadas ou cascalho. Geralmente, duas camadas de brita ou cascalho eram colocadas sobre as pedras de fundação. Finalmente, a superfície da estrada de pedras menores era colocada. As pedras eram cortadas em tamanhos exatos no canteiro de obras, de modo a se encaixar firmemente.

A instalação das pedras de revestimento seguia muitos dos atuais princípios da tecnologia de blocos. A integridade superficial dependia do intertravamento, ou seja, a incapacidade de uma pedra individual mover-se isoladamente de seus vizinhos quando solicitada pelo tráfego. Este intertravamento foi desenvolvido como uma consequência dos altos níveis de precisão que foram alcançados com pedras cortadas.

Do mesmo modo, Dowson (2009) atribui aos romanos o desenvolvimento do sistema de utilização de pequenas unidades travadas em conjunto com material fino, que precedeu muitos dos atuais princípios da tecnologia de pavimentação de blocos de concreto. Em particular, os romanos tinham o corte preciso de unidades e consistentes larguras de juntas,

medidas através da tentativa de inserir uma lâmina de faca entre as unidades, um dos princípios que seguimos até hoje na manutenção de larguras de juntas precisas.

Assim como Knapton (1996) e Dowson (2009), Burak (2002a) e o *Interlocking Concrete Pavement Institute* (ICPI, 2010) argumentam que o conceito de intertravamento utilizado atualmente em PBC provém das técnicas empregadas pelos romanos.

Cerca de 900 anos atrás, em partes do mundo em que não havia uma ampla oferta de uma pedra natural adequada, tornou-se comum a pavimentação com tijolos de barro queimado (DOWSON, 2009).

No Brasil, durante a construção da primeira estrada pavimentada no país foi empregada técnica análoga aquela utilizada nas construções das estradas romanas, conforme relata Balbo (2007, p.13 e p. 22), a calçada do Lorena, que ligava Riacho Grande em São Bernardo Campo à Cubatão em Santos, foi construída em 1792 por iniciativa da capitania de São Paulo e, segundo o autor "[...] o pavimento era composto de pedras recortadas justapostas, com cerca de 200 mm de espessura, assentes sobre base de 300 mm a 500 mm de pedregulho e saibro existente na região da Serra do Mar e Baixada Santista".

Figura 2.2 - Calçada do Lorena

Fonte: Balbo (2007)

Segundo Hallack (1998, p. 5), “com a acelerada urbanização ocorrida no final do século XIX e com o aparecimento do automóvel, tornou-se pouco econômico e pouco prático talhar as grandes quantidades de pedras que o ritmo de pavimentação exigia naquela época [...]”.

No início do século XX a utilização de pavimentação segmentar diminuiu, principalmente como resultado do desenvolvimento dos ligantes betuminosos e hidráulicos, o que permitiu a criação de pavimentos contínuos "in situ". Com poucas exceções, o uso de uma pavimentação segmentar continuou diminuindo até a invenção, na segunda metade do século XX, de máquinas capazes de fazer blocos de concreto de alta qualidade, precisão dimensional e economia. A invenção destas máquinas resultou na criação de uma das maiores inovações da indústria de concreto pré-moldado, que se espalhou pelo mundo. Além disso, a introdução do bloco de pavimentação resultou no ressurgimento, das formas mais antigas de pavimentação segmentar e, como resultado, em um crescimento do seu uso (DOWSON, 2009).

De acordo com o ICPI (2010), os primeiros blocos de concreto pré-moldados foram desenvolvidos na Holanda na década de 1940 como um substituto para ruas de tijolos de barro. A tradição milenar forte de pavimentação segmentar na Europa possibilitou que PBC intertravados se difundissem rapidamente.

Shackel (1980) relata que até o início da década de 1970 o uso de pavimento intertravado tinha se estabelecido na América, África, Austrália e Japão. Nestes países, a inserção de mercado inicial de blocos de concreto foi lenta, sendo restrita a aplicações em arquitetura e pavimentação de áreas de pedestres (calçamentos).

Para Dowson (2009), no Reino Unido, o renascimento da pavimentação segmentar começou com a introdução de blocos de concreto no norte da Europa no final da década de 1970. O desenvolvimento da utilização da pavimentação foi, em parte devido à sua praticidade, mas também como resultado de sua aparência atraente e provavelmente foi auxiliado pela nostalgia das antigas formas de pavimentação do século anterior.

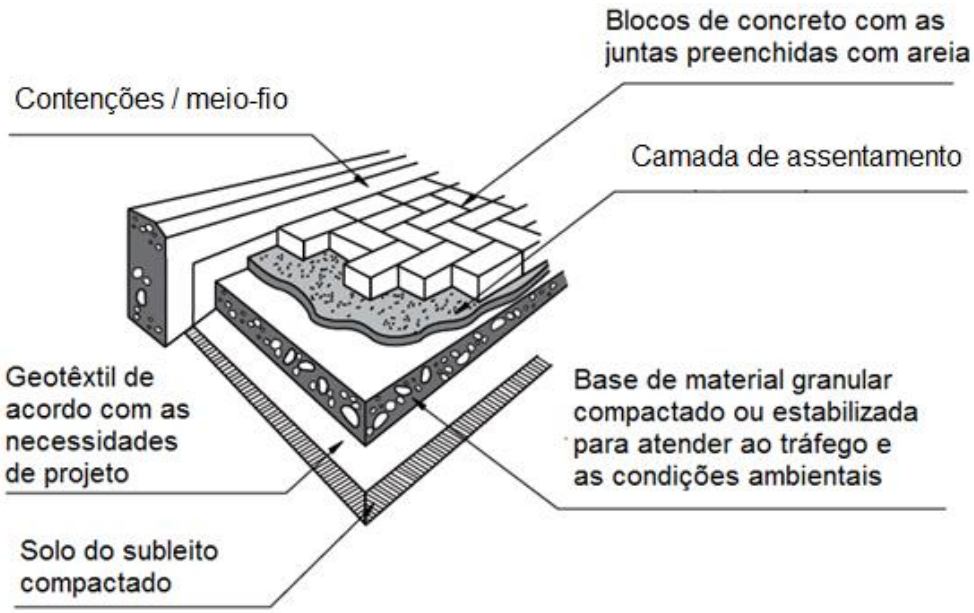
No Brasil a introdução dos blocos de concreto pré-moldados como material de revestimento, segundo Hallack (1998, p. 5), “[...] aconteceu na década de 1970. No entanto, sua aplicação muitas vezes não obedeceu aos critérios técnicos mínimos necessários; os insucessos daí provenientes fizeram com que fossem relegados a um segundo plano dentro do cenário nacional de pavimentação”.

2.2 Vantagens e limitações dos PBC

2.2.1 Vantagens associadas ao uso do PBC

Hein, Aho e Burak (2009) e o ICPI (2012) apresentam características típicas e vantagens quanto ao uso do PBC, estando tais características e vantagens aqui resumidas. A Figura 2.3 ilustra a seção típica de uma estrutura de pavimento revestida com blocos de concreto.

Figura 2.3 - Componentes típicos de um sistema de pavimento intertravado de concreto



Fonte: Adaptado de ICPI (2012)

Os blocos de concreto para pavimentos intertravados são compostos de cimento Portland, agregados miúdos e graúdos, podendo ser adicionado pigmento de cor. Estes materiais são combinados com uma pequena quantidade de água para fazer um concreto de "slump zero". Os blocos são feitos em condições controladas com máquinas que aplicam pressão e vibração. O resultado é um concreto consistente, denso, de alta resistência, moldado em diversas opções de formatos.

Podem ser fabricados com excelentes características de drenagem e são constantemente usados para ajudar no escoamento de águas pluviais. As juntas de areia entre os blocos

individuais de concreto ajudam a transferir as cargas de roda através do mecanismo de transferência de carga por cisalhamento.

Os PBC chegam ao local de instalação prontos para serem instalados e a liberação para o tráfego pode ocorrer imediatamente depois da conclusão da pavimentação. Podendo assim reduzir o tempo de construção e liberar o acesso rapidamente.

Ao contrário dos pavimentos convencionais de concreto de cimento Portland ou concreto asfáltico, PBC não dependem da continuidade monolítica de material para a sua integridade estrutural. Manutenções de redes subterrâneas e deformações locais dos materiais de base podem ser corrigidas com a remoção e posterior, reconstrução das camadas. As unidades modulares permitem mudanças no *layout* do pavimento ao longo de sua vida.

Unidades coloridas podem ser usadas como sinalização horizontal e demarcações em pista, estacionamento e marcações de serviços públicos. Os blocos podem ser fabricados na forma de peças podotáteis para uso em passeios públicos, faixas de pedestres, nos cruzamentos ou em plataformas ferroviárias.

As junções chanfradas na superfície do pavimento facilitam a remoção de água da superfície. Isso diminui o brilho noturno quando o pavimento está molhado e melhora a resistência à derrapagem.

Blocos de concreto podem ter maior resistência aos sais de degelo do que os materiais de pavimentação convencionais devido ao elevado consumo de cimento, peso específico e baixa absorção.

PBC possuem alta resistência à abrasão melhorando a aderência pneu / pavimento, alta resistência às deformações relacionadas à temperatura e alta resistência aos danos causados por derramamento de combustíveis e outros produtos derivados do petróleo.

Uma simples base granular pode acomodar pequenos recalques sem o aparecimento de patologias superficiais. Instalações mecânicas de blocos de concreto podem ainda encurtar o tempo de construção e os custos. Outras vantagens relativas aos PBC são descritas por Anderton (1991) e Carvalho (1998):

- Baixo custo de manutenção, posto que, quando se torna necessário remover determinada área pavimentada, cerca de 90 a 95% das peças retiradas podem ser reaproveitadas;
- Devido à facilidade de colocação das peças, não há necessidade de utilização de pessoal especializado, o que constitui um dos fatores de economia do processo, e que recomenda o seu emprego em grande escala nos países não industrializados;
- Proporciona boa superfície de rolamento para velocidades de até 60 km/h;
- Fornece uma baixa manutenção da superfície do pavimento;
- Suporta grandes cargas de tráfego concentradas e fornecer resistência a cargas abrasivas;
- Suporta cargas pesadas sobre subleitos relativamente fracos, quando empregado com base adequada para este fim.

2.2.2 Limitações dos PBC

Anderton (1991) e TIRC (2004) apresentam algumas das limitações mais comuns quanto ao uso do PBC:

- Embora não necessite de mão de obra especializada, em regiões onde o custo da mão de obra é significativo, o custo inicial para instalação deste tipo de pavimento poderá ser mais elevado, dependendo da quantidade de trabalho, espessura do pavimento, localização, etc;
- Quando a instalação é feita manualmente o processo de construção poderá exigir trabalho intensivo;
- Não é aconselhado para velocidades superiores a 60 km/h pois, devido a rede de juntas, o nível de ruído gerado pode acarretar em desconforto para o usuário. De modo geral, o ruído gerado é de 5 a 8 dB mais alto do que em superfícies betuminosas;
- Podem ocorrer problemas devido à infiltração de água nas camadas subjacentes o que, poderá acarretar em lubrificação da camada de assentamento e consequentemente no bombeamento do material fino através das juntas durante a passagem dos veículos

(este problema normalmente é apenas significativo no início da vida útil do pavimento, antes do intertravamento).

2.3 Características estruturais dos pavimentos de blocos de concreto

Segundo Knapton e Barber (1980) os projetos de pesquisa relativos a PBC inicialmente foram orientados a examinar a eficiência dos blocos de concreto em dissipar as cargas verticais aplicadas. A análise dos resultados iniciais indicou que o revestimento de blocos de concreto constitui um comportamento de pavimento com propriedades elásticas análogas às do pavimento flexível convencional. Esta conclusão inicial permitiu que se recomendasse este tipo de estrutura para pavimentos urbanos.

Segundo os autores, através da comparação da capacidade de dissipação de carga dos blocos de concreto com o pavimento flexível convencional, deduziu-se que um pavimento composto de blocos de 80 mm sobre camada de assentamento de areia de 50 mm seria equivalente a 160 mm de material betuminoso. Embora, segundo Knapton e Barber (1980), esta dedução seja baseada sobre tênue argumento, diversas áreas experimentais em grande escala foram observadas na época e essas observações comprovaram tal conclusão.

Kasahara, Komura e Ikeda (1992) estudando o desempenho do PBC, sobre baixo volume de tráfego e dimensionados conforme o procedimento de projeto japonês para pavimentos flexíveis, concluíram que a capacidade de dissipação de carga dos blocos de concreto mais a camada de assentamento é equivalente à capacidade de dissipação de carga do concreto asfáltico à temperatura de 50ºC.

Atualmente, considera-se que a contribuição estrutural dos blocos de concreto e camada de assentamento pode exceder a de uma espessura equivalente de asfalto, pois de acordo com o ICPI (2012), conforme os pavimentos intertravados de concreto recebem o tráfego, eles tendem a aumentar a sua capacidade estrutural ao longo do tempo devido ao efeito progressivo do intertravamento.

Denota-se uma tendência em se comparar a capacidade estrutural do revestimento (blocos mais camada de assentamento) do PBC com a capacidade estrutural de revestimentos asfálticos. Todavia, é importante lembrar que a resistência característica dos blocos de

concreto é a própria resistência do concreto; contudo, o que se discute aqui é a contribuição estrutural do revestimento de blocos de concreto em conjunto com o material de assentamento que, por sua vez, é semelhante à de revestimentos asfálticos.

Outro aspecto importante diz respeito ao cuidado que se deve ter em classificar os PBC. As normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 9781 (2013) e NBR 15953 (2011), por exemplo, definem PBC intertravados como um pavimento flexível revestido com peças de concreto sobrepostas a uma camada de assentamento e camadas de base e sub-base, cujo intertravamento do sistema é obtido através do preenchimento das juntas com areia e pelo confinamento proporcionado pelas contenções laterais.

Contudo, não se pode generalizar que todo PBC constituir-se-á em um pavimento flexível, pois conforme explica Balbo (2007) o PBC será flexível quando a base e sub-base empregadas forem mais flexíveis (como, por exemplo, na utilização de bases e sub-bases granulares). No entanto, ao se empregar bases cimentadas a resposta mecânica do PBC tenderá a ser a de um pavimento rígido, ou seja, diferentemente do que define as normas ABNT NBR 9781 (2013) e NBR 15953 (2011), o comportamento estrutural de pavimentos revestidos com blocos de concreto intertravados dependerá da presença ou não de material cimentado em suas camadas de base ou sub-base, e não apenas em função do revestimento empregado.

De acordo com Shackel (1992), algumas regras foram incorporadas em procedimentos de projeto do PBC e incluem afirmações tais como:

- “Blocos segmentados (blocos de 16 faces) tendem a ter melhor desempenho sob o tráfego do que blocos retangulares”;
- “No caso do PBC sujeitos ao tráfego veicular, os padrões de espinha-de-peixe são preferíveis a padrões de fileiras”;
- “Blocos mais finos do que 80 mm não devem ser utilizados, exceto para aplicações de tráfego leve”.

O autor explica que, estas regras tentam interpretar e resumir os dados empíricos sobre o desempenho do PBC sob o tráfego. Assim, as primeiras decisões que devem ser tomadas são quanto à escolha do formato do bloco, espessura e padrão de arranjo.

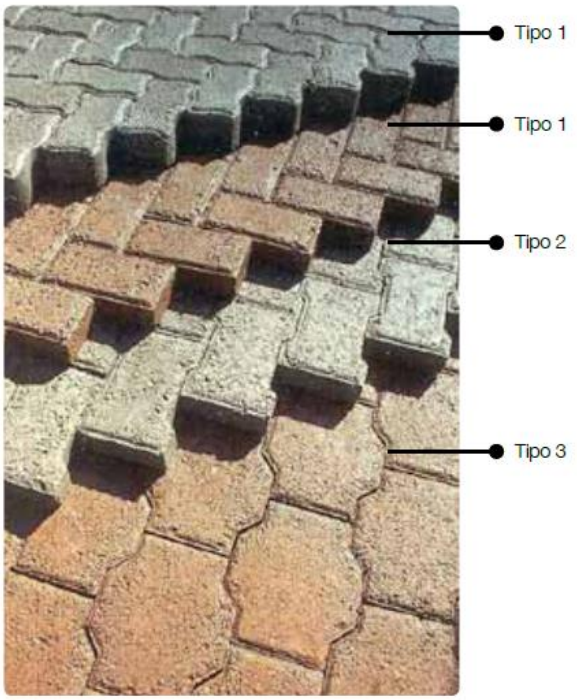
2.3.1 Influência do formato dos blocos e do padrão de arranjo no comportamento estrutural

Na literatura encontra-se uma variedade de formatos de blocos pré-moldados de concreto para revestimento de pavimentos. O ICPI (2012) considera que o formato do bloco de concreto determina a gama de padrões de arranjo. Entretanto, o ICPI considera-se conservador a não reconhecer diferenças entre as formas dos blocos com relação ao seu desempenho estrutural e funcional.

O Manual de Pavimento Intertravado da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2010), define três tipos básicos de formatos de blocos os quais são descritos a seguir e ilustrados na Figura 2.4:

- Tipo 1: Constituído por formas retangulares, apresenta facilidade de produção e colocação em obra, além de facilitar a construção de detalhes nos pavimentos. As suas dimensões são, usualmente, 20 cm de comprimento por 10 cm de largura e as suas faces laterais podem ser retas, curvilíneas ou poliédricas;
- Tipo 2: Genericamente, apresenta o formato "I" e somente pode ser montado em fileiras travadas. As suas dimensões são, usualmente, 20 cm de comprimento por 10 cm de largura;
- Tipo 3: É o bloco que, pelo seu peso e tamanho, não pode ser apanhado com uma mão só (suas dimensões são de, pelo menos, 20 x 20 cm).

Figura 2.4 - Tipos mais comuns de formatos de blocos

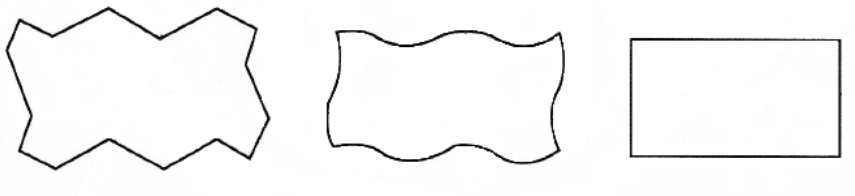


Fonte: ABCP (2010)

De acordo com a ABNT NBR 9781 (2013), no Brasil, os formatos de blocos de concreto para pavimentação passaram a ser agrupados em quatro categorias, a saber:

- Tipo I – Blocos de concreto com formato próximo ao retangular, com relação comprimento/largura igual a dois, que se arranjam entre si nos quatro lados e podem ser assentados em fileiras ou em espinha-de-peixe, conforme ilustrado na Figura 2.5;

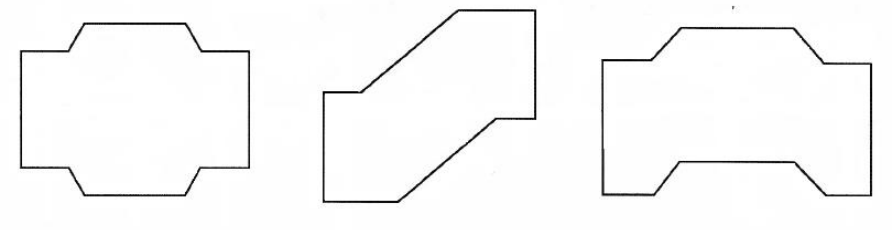
Figura 2.5 - Exemplo de blocos de concreto tipo I



Fonte: ABNT NBR 9781 (2013)

- Tipo II – Blocos de concreto com formato único, diferente do retangulares pois só podem ser assentados em fileiras, de acordo com a Figura 2.6;

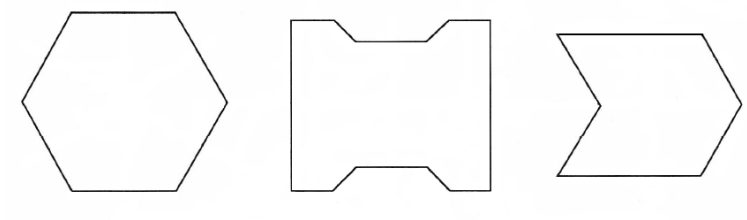
Figura 2.6 - Exemplo de blocos de concreto tipo II



Fonte: ABNT NBR 9781 (2013)

- Tipo III – Blocos de concreto com formatos geométricos característicos, como trapézios, hexágonos, triedros etc., com pesos superiores a 4 kg são ilustrados na Figura 2.7;

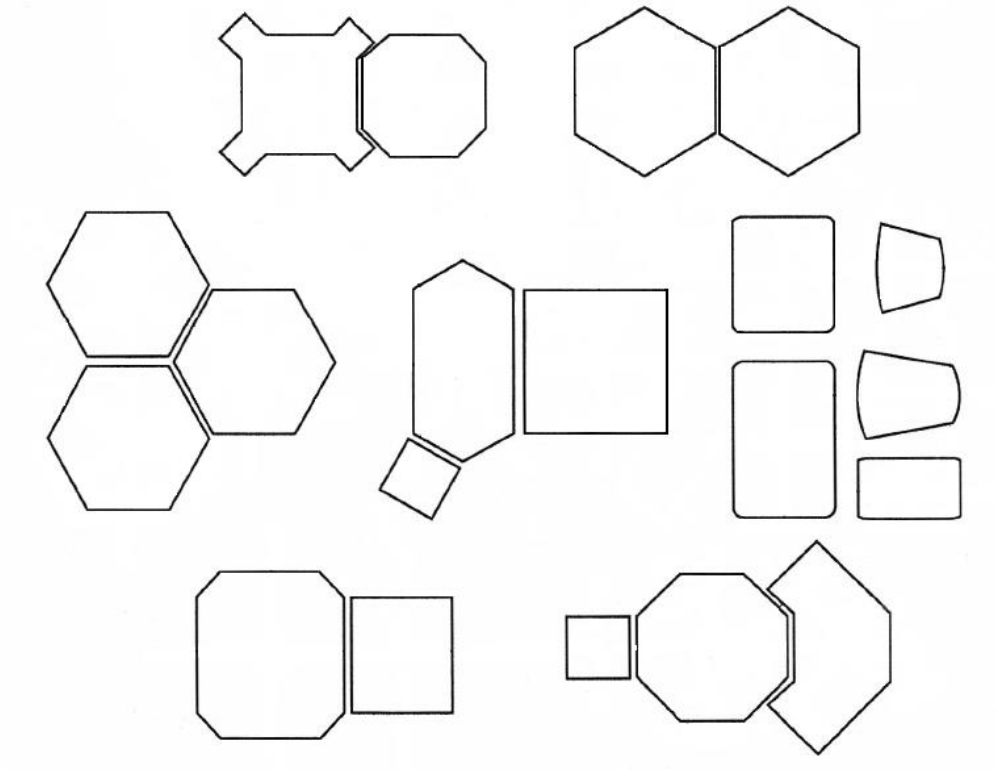
Figura 2.7 - Exemplo de blocos de concreto tipo III



Fonte: ABNT NBR 9781 (2013)

- Tipo IV – Conjunto de blocos de concreto de diferentes tamanhos, ou um único bloco com juntas falsas, que podem ser utilizadas com um ou mais padrões de assentamento, conforme apresentado na Figura 2.8.

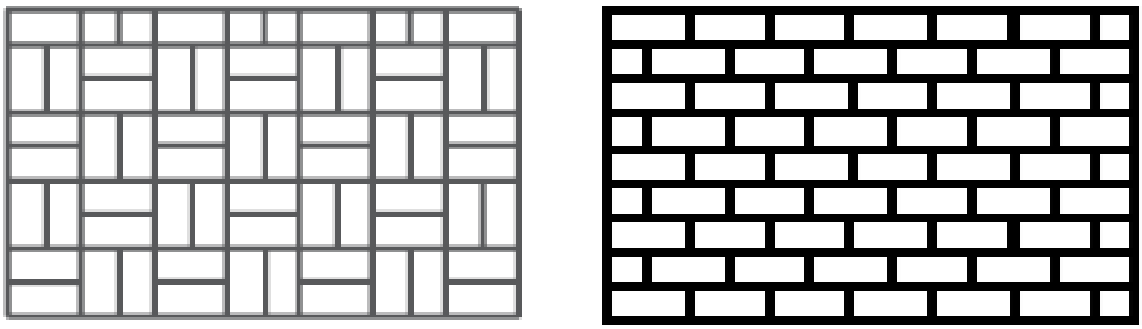
Figura 2.8 - Exemplo de blocos de concreto tipo IV



Fonte: ABNT NBR 9781 (2013)

Existe uma variedade de padrões de arranjo que podem ser alcançados com base nos tipos de blocos a serem utilizados e suas possíveis combinações. A Figura 2.9 e Figura 2.10 ilustram os padrões de arranjo mais comuns em função de sua aplicabilidade em relação ao tipo de tráfego esperado.

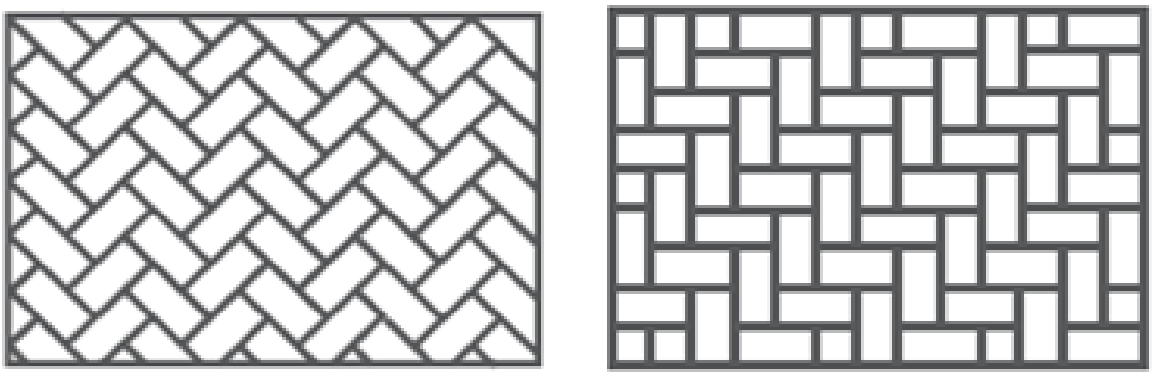
Figura 2.9 - Padrões de assentamento dos blocos para tráfego de pedestre



(a) Trama (b) Fileiras

Fonte: ABCP (2010)

Figura 2.10 - Padrões de assentamento dos blocos recomendado para o tráfego de veículos



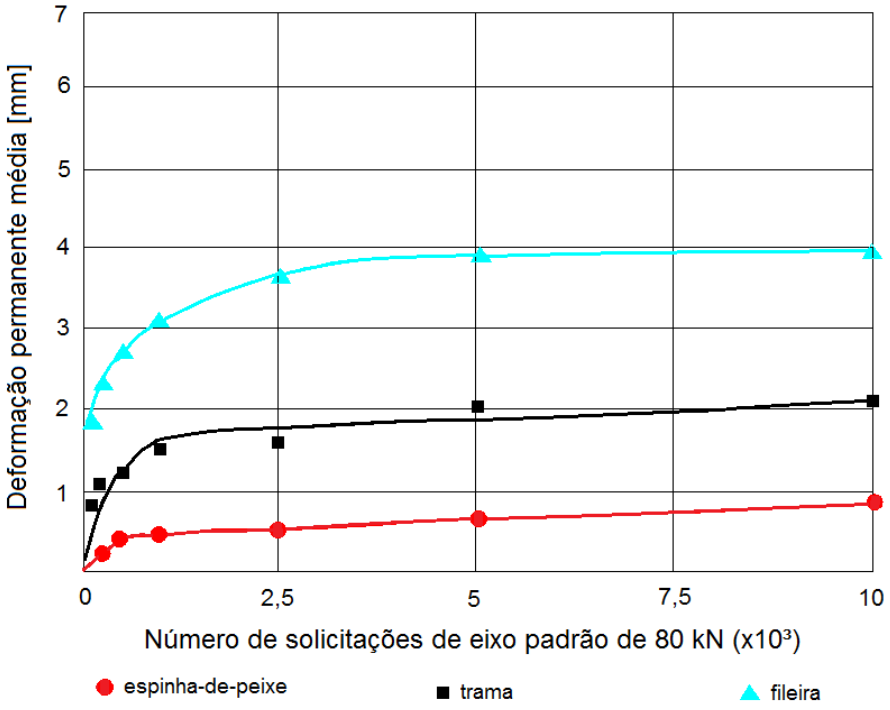
(a) Espinha-de-peixe a 45º (b) Espinha-de-peixe a 90º

Fonte: ABCP (2010)

Shackel (1990; 2000a; 2003), o ICPI (2010) e ICPI (2012) afirmam que os padrões espinha-de-peixe são os padrões de assentamento mais eficazes para manter o intertravamento horizontal. Segundo eles, testes mostraram que estes padrões podem oferecer uma maior resistência estrutural e capacidade de inibir o movimento lateral do que outros padrões de assentamento.

Shackel (1990) estudando o desempenho do PBC sujeito ao tráfego veicular constatou que as deformações permanentes do PBC variam em função do padrão de arranjo dos blocos. Usando blocos de 80 mm de espessura verificou-se que o padrão de arranjo espinha-de-peixe apresenta menores valores de deformações permanentes quando comparado com os padrões trama e fileiras. O padrão de arranjo fileiras apresentou os piores resultados principalmente quando dispostos paralelamente ao sentido do tráfego. A Figura 2.11 ilustra o desempenho do PBC em função do arranjo dos blocos.

Figura 2.11 - Desempenho do PBC em função do arranjo dos blocos



Fonte: Adaptado de SHACKEL (1990)

2.3.2 Intertravamento

Os PBC podem ser classificados como intertravados, quando há transferência de carga entre os blocos de concreto, ou não intertravados, quando são dispostos de forma independente sem que haja a transferência de carga entre os blocos de concreto (HACHIYA, YIN e SATO, 1998).

Segundo ICPI (2006) o intertravamento é a força de atrito entre as unidades de pavimentação que os impedem de girar, ou mover-se horizontalmente ou verticalmente em relação uns aos outros. Para Knapton e Barber (1980) e o ICPI (2010), o intertravamento é o ponto crítico para o desempenho estrutural do PBC intertravados.

Quando compactados, os blocos intertravados transferem cargas verticais dos veículos aos blocos adjacentes por cisalhamento, através do material de rejuntamento. A areia nas articulações permite que as cargas aplicadas possam ser distribuídas de modo semelhante ao asfalto, reduzindo as tensões na base e no subleito (ICPI, 2012).

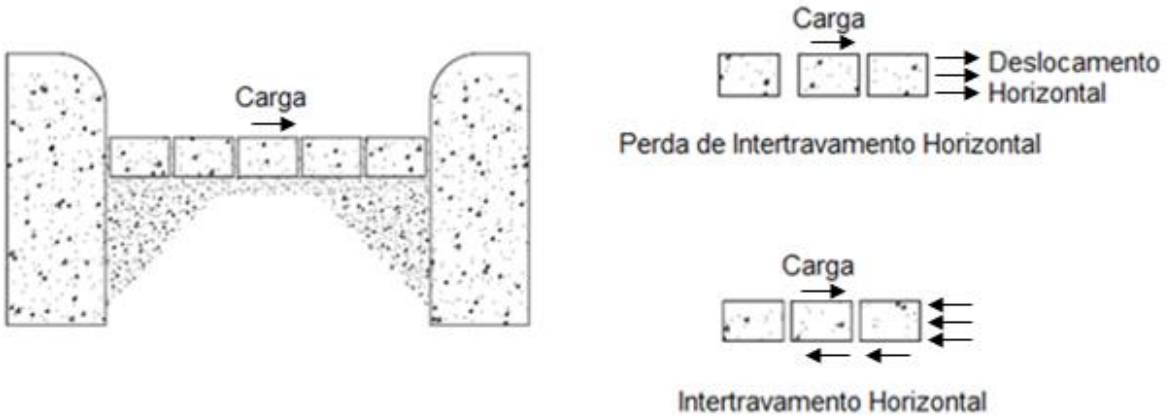
Ao considerar o projeto e construção, três tipos de intertravamento devem ser alcançados: o intertravamento horizontal, intertravamento vertical e intertravamento rotacional.

2.3.3 Intertravamento horizontal

"O intertravamento horizontal é a capacidade do pavimento intertravado de resistir a esforços causados por forças de aceleração e de frenagem das cargas" (ABNT NBR 15953, 2011).

De acordo com Knapton e Barber (1980), o fenômeno de deformação foi observado em 1979, particularmente quando blocos retangulares foram colocados no padrão de fileiras com seu mais longo eixo transversal na direção principal de tráfego. Conforme ilustra a Figura 2.12, forças horizontais de aceleração e frenagem movimentam os blocos ao longo do alinhamento da via e, eventualmente, os blocos quebram nos cantos de uma fileira de blocos, transmitindo elevada tensão de tração local para a próxima fileira.

Figura 2.12 - Intertravamento horizontal



Fonte: Adaptado de ICPI (2010)

Segundo Burak (2002b), ICPI (2006), ICPI (2010) e Shackel e Lim (2003) o intertravamento horizontal depende dos padrões de arranjo e é alcançado principalmente através da utilização de padrões que dispersam as forças de frenagem, giro e aceleração dos veículos. Os padrões

de arranjo mais eficazes para manter o intertravamento horizontal são padrões em espinha-de-peixe.

Embora a deformação não possa ser totalmente eliminada nos vários pontos de frenagem, este efeito pode ser reduzido para um nível no qual a ruptura é eliminada e não há nenhuma consequência visual (KNAPTON e BARBER, 1980).

2.3.4 Intertravamento vertical

A ABNT NBR 15953 (2011) define intertravamento vertical como “a capacidade do pavimento intertravado resistir a esforços de cisalhamento entre as peças”.

Se uma carga vertical é aplicada sobre um bloco sem intertravamento vertical, esse bloco deslocar-se-á verticalmente, entre seus vizinhos, impondo elevada tensão vertical sobre a camada de base. O intertravamento vertical é alcançado através da vibração dos blocos sobre a camada de assentamento, cuja granulometria permita que as partículas de areia possam subir em torno de 25 mm entre as juntas dos blocos, durante a construção. Essas juntas devem compreender largura de até 6 mm. Uma areia bem graduada possui partículas de, aproximadamente, 0,05 a 4,8 mm. Portanto, em qualquer posição ao redor do perímetro do bloco, partículas de areia calçam os blocos vizinhos, assim permitindo a transferência de carga entre os blocos através do cisalhamento (KNAPTON e BARBER, 1980).

Deste modo, e conforme descreve Burak (2002b), ICPI (2006), ICPI (2010) e Shackel e Lim (2003), o intertravamento vertical é obtido através da transferência de cargas por cisalhamento entre blocos adjacentes, por meio do material de rejuntamento, e é ilustrado na Figura 2.13.

Figura 2.13 - Intertravamento vertical

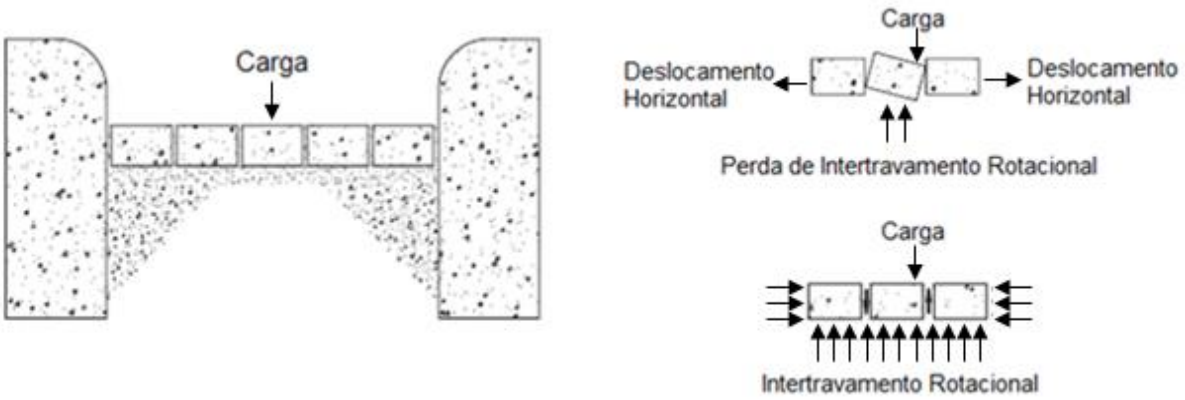
Fonte: Adaptado de ICPI (2010)

2.3.5 Intertravamento rotacional

Intertravamento rotacional é a capacidade do pavimento intertravado de resistir a esforços perpendiculares excêntricos aos eixos das peças (ABNT NBR 15953, 2011).

Uma carga vertical aplicada assimetricamente sobre um bloco tenta rotacioná-lo. Para que um bloco individual rode, ele deve deslocar o seu vizinho lateralmente sobre uma contenção lateral, conforme ilustrado na Figura 2.14. O intertravamento rotacional é alcançado quando cada bloco individual é impedido de rodar. Também existe evidência para apoiar a teoria de que o material de rejuntamento também ajuda a induzir intertravamento rotacional. Um tamanho de partícula máximo de 3 mm tem sido sugerido para este tipo de areia frequentemente usado para este propósito (KNAPTON e BARBER, 1980).

Figura 2.14 - Intertravamento rotacional



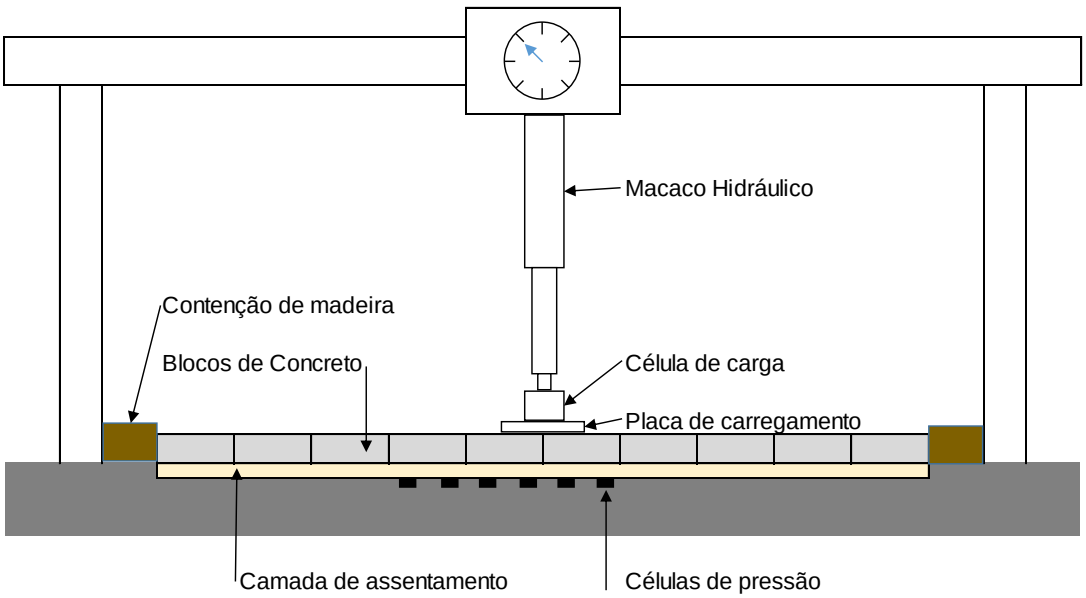
Fonte: Adaptado de ICPI (2010)

Burak (2002b), ICPI (2006), ICPI (2010) e Shackel e Lim (2003) consideram que o intertravamento rotacional depende principalmente da espessura do revestimento, do espaçamento entre as peças e das restrições laterais (contenções).

2.3.6 O efeito do intertravamento na dissipação de tensões

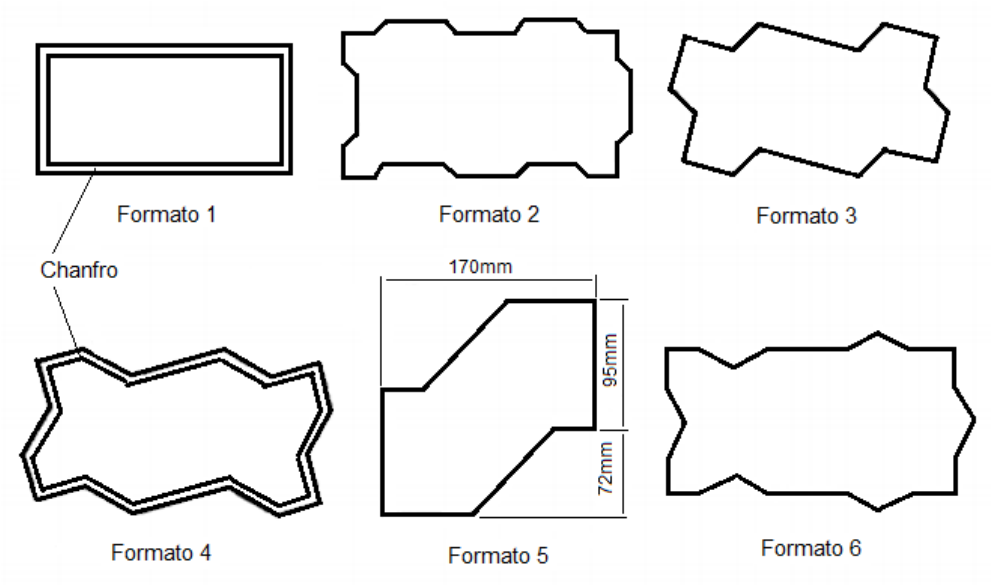
Knapton e Barber (1980) relatam que a primeira tentativa para quantificar o efeito do intertravamento na dissipação de tensões devido à aplicação de carga foi registrada em 1976, no Reino Unido. Uma área de 2m x 2m pavimentada com blocos de concreto foi construída sobre um arranjo de 24 células medidoras de pressão. Uma carga vertical estática foi aplicada sobre a superfície do pavimento como apresentado na Figura 2.15 e a tensão no fundo de uma camada de 50 mm de areia foi medida. Uma carga de 50 kN foi aplicada a uma série de 8 pavimentos, usando blocos de 6 diferentes formatos, conforme ilustra a Figura 2.16. Observou-se que à medida que aumenta a carga, o percentual de tensão vertical no fundo do colchão de areia diminui (Figura 2.17), reduzindo para 60%, o que significa que quanto maior for a tensão aplicada há uma maior capacidade de distribuição de carga dos blocos (ocorre mais intertravamento). A capacidade de distribuição de carga foi determinada para ser substancialmente independente do formato do bloco, espessura e padrão de arranjo.

Figura 2.15 - Aplicação de carregamento vertical estático sobre a superfície do pavimento



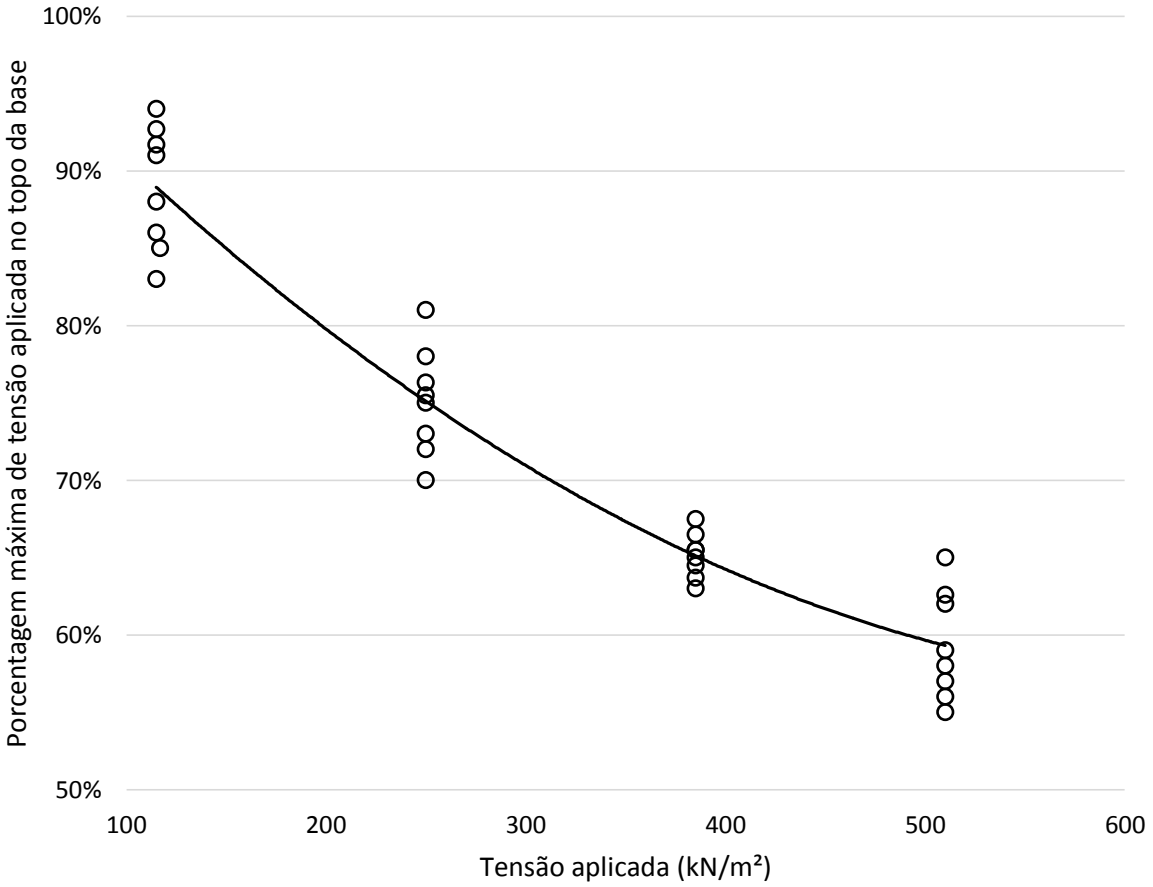
Fonte: Adaptado de Knapton e Barber (1980)

Figura 2.16 - Os seis diferentes formatos de blocos testados



Fonte: Adaptado de Knapton e Barber (1980)

Figura 2.17 - Tensão registrada pelas células de pressão



Fonte: Adaptado de Knapton e Barber (1980)

2.4 Requisitos estruturais dos pavimentos de blocos de concreto

Muitos fatores podem influenciar no desempenho de pavimentos ao longo de sua vida de serviço. Shackel (2003) enumera os fatores que influenciam o desempenho do PBC sob ação do tráfego, os quais serão abordados ao longo deste item, conforme são apresentados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Fatores que influenciam no desempenho do PBC sob o tráfego veícular

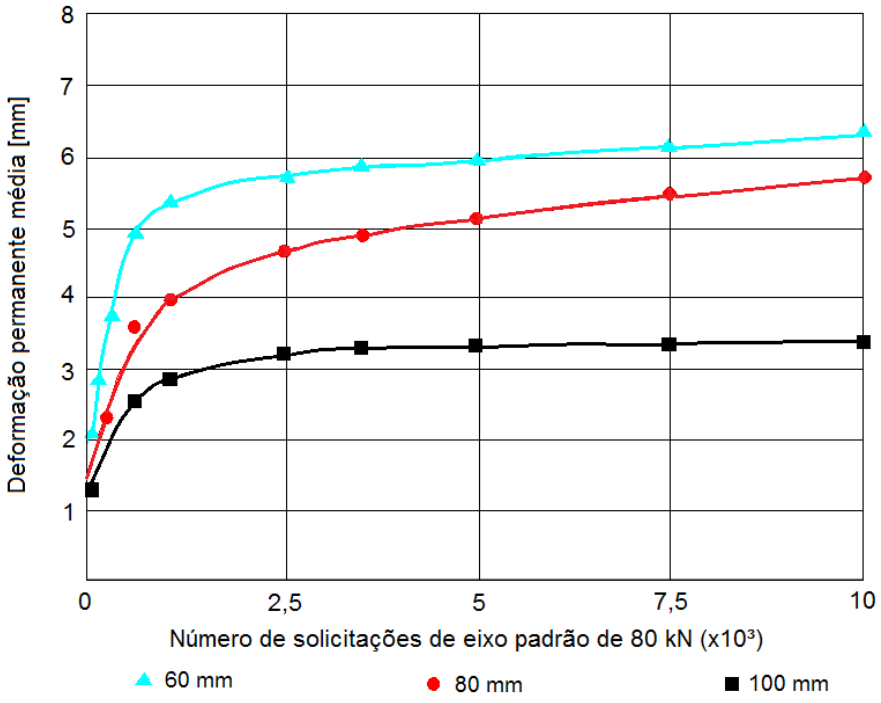
Camada	Fatores
Blocos	Formato Espessura Dimensões Padrão de arranjo Espaçamento entre juntas
Material de assentamento e rejuntamento	Espessura da camada de assentamento Granulometria Umidade Angularidade Mineralogia
Base e sub-base	Tipo de material Granulometria Plasticidade Rigidez e durabilidade
Subleito	Tipo de solo Rigidez e capacidade de suporte Umidade

Fonte: Adaptado de Shackel (2003)

2.4.1 Blocos de concreto

A partir dos resultados de testes realizados com simulador de tráfego pesado, na África do Sul, Shackel (1990) apresentou resultados que mostraram que as deformações permanentes em PBC variam em função do número de solicitações de eixo padrão. Nos testes utilizou-se o eixo padrão de 80kN para três diferentes espessuras dos blocos (60, 80 e 100 mm), sobre camada de areia de 20 mm e base de 150 mm, conforme apresentado na Figura 2.18.

Figura 2.18 - Efeito da espessura dos blocos no desempenho de pavimentos sobre a solicitação do tráfego



Fonte: Adaptado de SHACKEL (1990)

No entanto, especificações técnicas como o ICPI (2012) recomendam espessuras de blocos em função da aplicação, tais como: passeios públicos e calçadas residenciais são recomendados blocos de 60 mm de espessura; para pavimentos sujeitos ao tráfego de veículos normalmente são exigidos blocos de 80 mm de espessura; para alguns pavimentos industriais são utilizadas, no mínimo, unidades de 100 mm de espessura.

Nos Estados Unidos da América (EUA) e Canadá, conforme descreve Burak (2002a), os blocos de concreto são fabricados com base nas especificações ASTM C936 (2008) ou *Canadian Standards Association* (CSA) A231.2 (1995). Em ambas especificações, os blocos de concreto são definidos pelo seu índice de aparência (comprimento dividido por espessura) e por seu valor total de área de superfície. Um bloco de concreto, por definição, deve ter uma proporção de aparência inferior a 4:1 e uma área superficial menor que 0,065 m². Para áreas sujeitas a uso veicular constante, a relação de aparência necessária é menos de 2,5:1. A CSA especifica uma resistência à compressão média mínima de 50 MPa e inclui um requisito de durabilidade de perda máxima de 200 g / m² de área de superfície após 25 ciclos de congelamento e descongelamento em uma solução salina de 3%, ou 500 g de perda / m² depois de 50 ciclos.

No Brasil a ABNT NBR 9781 (2013) estabelece os requisitos e métodos de ensaio exigidos para aceitação de blocos de concreto para PBC intertravados sujeitos ao tráfego de pedestres, de veículos dotados de pneumáticos e áreas de armazenamento de produtos. A tolerância dimensional dos blocos de concreto é de ± 3 mm no comprimento, largura ou espessura do bloco (a versão anterior da norma "ABNT NBR 9781 (1987)" estabelecia tolerância de 5 mm na espessura do bloco).

Para o tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha, a norma estabelece resistência à compressão dos blocos maior ou igual a 35 MPa e como critério de resistência à abrasão, de acordo com ensaio específico, cavidade máxima menor ou igual a 23 mm, enquanto para o tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados, a norma recomenda resistência característica à compressão maior ou igual a 50 MPa e cavidade máxima no ensaio de resistência à abrasão menor ou igual a 20 mm. Admite-se absorção de água com valor médio menor ou igual a 6% nas amostras de blocos, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7%.

Além disso, são apresentados na norma ABNT 9781 (2013) os procedimentos para determinação de resistência à compressão (o que anteriormente era preconizado pela ABNT NBR 9780, 1987), para ensaio de absorção de água, para ensaio de resistência a abrasão e exemplos de formatos de blocos.

2.4.2 Camada de assentamento

Embora mundialmente seja notável o emprego de areia como camada de assentamento, e do mesmo modo se utilize amplamente o termo "colchão de areia" (do inglês – *bedding sand*), optou-se, neste trabalho, pela terminologia adotada pela ABNT NBR 15953 (2011) "camada de assentamento" visto que, no Brasil, alguns dos documentos de referência empregados na elaboração de projeto e execução desta camada consideram o emprego não só de areia, mas também de pó-de-pedra como material para assentamento dos blocos.

Beaty (1994) relata que no passado pouca atenção foi dada à qualidade da areia empregada como camada de assentamento do PBC. Geralmente, se uma areia era adequada para fazer concreto, ela era aceita como material a ser empregado como camada de assentamento do

PBC, parte disso devido a empreiteiros de pavimentação exigirem a utilização de areias que estivessem disponíveis localmente a baixo custo, estando geralmente pouco preocupados com especificações detalhadas do material. Para pavimentos sujeitos a cargas leves, areias especificadas para concreto têm sido muitas vezes utilizadas com sucesso. Em casos críticos, de tráfego pesado canalizado em PBC, particularmente em climas úmidos, uma pequena perda de serventia tem sido atribuída ao uso de areias inadequadas como material de assentamento. Tais falhas são dispendiosas em termos de reconstrução, causando danos à imagem do PBC para suportar o tráfego e cargas industriais. Segundo o autor, o custo adicional para obter um material de assentamento de primeira qualidade para aplicações críticas, é insignificante em comparação com os custos ligados à perda de serventia.

2.4.2.1 Funções, requisitos e especificações

Segundo Beaty (1994), a areia para camada de assentamento é considerada como um elemento essencial em um PBC, facilitando a colocação dos blocos. No entanto, no caso em que estruturas do PBC estão sujeitas a suportar cargas elevadas ou rodoviárias, esta pode ser uma fonte potencial de problemas relacionados ao desempenho do pavimento. O autor resume as principais funções, requisitos e especificações para areias empregadas como camada de assentamento em PBC:

- As principais funções da camada de assentamento são:
    - Promover uma superfície plana na qual os blocos são assentados;
    - Acomodar tolerâncias admissíveis no nível de superfície da base acabada;
    - Acomodar tolerâncias admissíveis de espessura do processo de fabricação dos blocos;
    - Fornecer suporte uniforme para os blocos e evitar concentrações de tensões as quais possam causar danos aos blocos;
    - Preencher a parte inferior dos espaços entre os blocos adjacentes, com a finalidade de desenvolver o intertravamento.
- Para cumprir essas funções, a areia empregada como camada de assentamento deve apresentar os seguintes requisitos:

- Estar facilmente disponível a um custo viável;
- Ser facilmente aplicável com uma espessura uniforme;
- Ser facilmente compactada;
- Não ser susceptível ao congelamento;
- Ser capaz de entrar nas juntas entre os blocos;
- Ser resistente ao mecanismo de degradação.

- O desempenho da areia da camada de assentamento é pensado para depender de um número de fatores, incluindo as seguintes especificações:
  - A espessura da camada de assentamento;
  - A granulometria da areia;
  - A forma das partículas;
  - O teor de umidade da areia durante a compactação e o serviço;
  - A origem geológica da areia.

2.4.2.2 Granulometria da camada de assentamento

De acordo com o ICPI (2007), nos EUA e Canadá as especificações típicas exigem que areias empregadas em camadas de assentamento devem estar em conformidade com a norma ASTM C33 (1999) ou CSA A 23.1 FA1 (2004). Ambas as granulometrias empregadas para as areias de concreto. Todavia, o ICPI (2007) recomenda limites adicionais na quantidade máxima de material que passa na peneira nº 200, ao se empregar este material como camada de assentamento do PBC. A redução da admissibilidade da quantidade de material fino tem o objetivo de reduzir o risco de má drenagem e instabilidade da camada de assentamento, visto que na presença de água as partículas finas ficam em suspensão, formando uma pasta que lubrifica a camada como um todo.

Knapton (1994) observou que, desde 1980, tem havido uma crescente conscientização sobre a importância em se observar a quantidade de material fino presente na areia utilizada como camada de assentamento. Esta se manifesta na redução em material que passa na peneira de 0,075 mm nas especificações. Em 1980, verificou-se que 10% da areia podia ser mais fina do que 0,075 mm, ao passo que em 1991, este valor tinha sido reduzido para 3% na *British*

Standard (BS) (norma britânica), a 1% para pavimentos de tráfego intenso, reduzindo mais, para 0,1%, para terminais de ônibus e similares.

De acordo com o manual da INTERPAVE (2012), no Reino Unido, tem se adotado valores admissíveis de material que passa na peneira de 0,063 mm (padrão de peneira utilizada no Reino Unido) da ordem de 1,5%, estabelecido pela BS EM 12620 (2002).

No Brasil, no entanto, alguns documentos técnicos para execução do PBC especificam a granulometria da areia ou pó-de-pedra a ser empregada como material de assentamento iguais aquelas empregadas na produção de concreto de cimento, sem o devido cuidado em limitar os valores máximos de material que passa na peneira de 0,075 mm, a exemplo das práticas internacionais citadas.

Neste sentido, a especificação nacional de serviço ES-327/97 "Pavimentação: pavimentos com peças pré-moldadas de concreto" recomendada para estacionamentos, vias de acesso, desvios ou rodovias de tráfego leve preferencialmente urbanos, do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1997b) e a especificação técnica ET-DE-P00/048 **"**Pavimento com peças pré-moldadas de concreto" para fins rodoviários do DER-SP (2006a), ambas recomendam a utilização da granulometria estabelecida na especificação de materiais EM-038/97 do DNER (1997a), a qual apresenta limites de materiais retidos na peneira de 0,075 mm entre 2 e 10%.

Da mesma forma, o "Manual de pavimentos rígidos" do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2005) apresenta critério para dimensionamento e execução do PBC direcionados a aplicações, principalmente, em acostamentos, recuos, pátios e outros locais onde o tráfego, além de ser pequeno, flui com baixa velocidade. Recomenda, na execução da camada de assentamento a utilização de areia ou pó-de-pedra, mas sem indicar as tolerâncias admissíveis quanto à granulometria do material. O mesmo fato ocorre na especificação técnica ET-P00/012/1985 da empresa Desenvolvimento Rodoviário S.A. do Estado de São Paulo (DERSA-SP, 1985).

No âmbito municipal, a instrução de projeto IP-06/2004 "Dimensionamento de pavimentos com blocos intertravados de concreto" da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP, 2004)

indicada, preferencialmente, para vias de baixo volume de tráfego, não estabelece limites granulométricos para o material a ser empregado na camada de assentamento.

Por outro lado, Carvalho (1998) no estudo técnico 27 da ABCP para projeto e construção de pavimentos revestidos com peças pré-moldadas de concreto, recomenda a utilização de areia "contendo no máximo 5% de silte e argila (em massa), no máximo 10% de material retido na peneira de 4,8 mm" e estabelece limites entre 0 e 10% de material que passa na peneira 0,075 mm.

Do mesmo modo, a norma ABNT NBR 15953 (2011) define os procedimentos para execução do PBC intertravados para aplicações sujeitas ao tráfego de pedestres, de veículos dotados de pneumáticos e áreas de armazenamento de produtos – na contramão das recomendações de manuais e normas internacionais – especifica o limite máximo de material que passa na peneira 0,075 mm em 10%. Entretanto, a própria norma reconhece que, sob determinadas condições de utilização do PBC, o excesso de material retido na peneira de abertura igual a 0,075 mm pode acarretar uma compactação excessiva da camada de assentamento, resultando em deformações do pavimento.

A respeito disso, Beaty (1994) e Burak (2002a) explicam que ao se especificar a camada de assentamento onde são esperadas aplicações repetidas de cargas elevadas, deve-se levar em consideração que as partículas quebram em finos. Com a água das chuvas penetrando no pavimento pelas juntas, ao encontrar com partículas mais finas que 0,075 mm formam uma lama que lubrifica a camada, mantendo as partículas mais finas em suspensão. A pressão gerada por mais cargas de roda faz com que a lama seja forçada para fora através das juntas e os finos em suspensão sejam ejetados por meio do mecanismo de bombeamento, resultando em perda de material e causando, consequentemente, deformações permanentes que, no limite, serão iguais à espessura original da camada de assentamento compactada, ou seja, 30 a 50 mm, o que excede significativamente os valores aceitáveis de deformação do pavimento.

O Quadro 2.2 sumariza os limites granulométricos para areias empregadas em camadas de assentamento no Brasil, EUA, Reino Unido e Canadá.

Quadro 2.2 – Faixas granulométricas recomendadas para areias empregadas em camadas de assentamento

Abertura da Peneira (mm)	ABNT 15953	ASTM C33[1]	BS EN12620[2]	CSA A23.1 FA1[3]
	Brasil	EUA	Reino Unido	Canadá
		Porcentagem que passa		
10,000				100
9,500	93 - 100	100		
8,000			100	
6,300			95 - 100	
5,000				95 - 100
4,750	90 - 100	95 - 100		
4,000			85 - 99	
2,500				80 - 100
2,360	75 - 100	80 - 100		
1,250				50 - 90
1,180	50 - 95	50 - 85		
0,630				25 - 65
0,600	30 - 85	25 - 60		
0,500			30 - 70	
0,315				10 - 35
0,300	5 - 50	5 - 30		
0,160				2 - 10
0,150	0 - 15	0 - 10		
0,080				0 - 1
0,075	0 - 10	0 - 1		
0,063			0 - 1,5	

Com base nos dados apresentados no Quadro 2.2, na Figura 2.19 são apresentadas as faixas granulométricas para areias empregadas em camadas de assentamento no Brasil, EUA, Reino Unido e Canadá, na qual pode-se observar que as características mais conservadoras estão presentes nas normas ASTM e CSA, em conjunto com os limites granulométricos adicionais

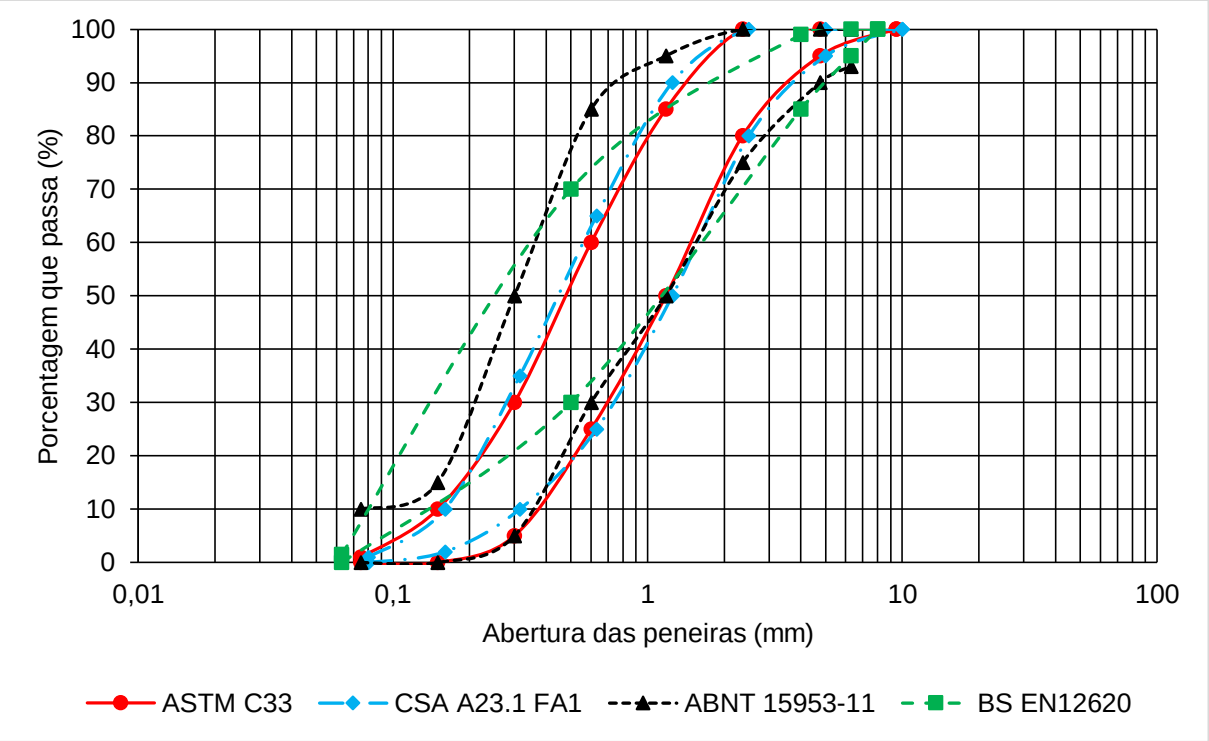
[1] Para a ASTM C33, o ICPI (2007) recomenda a quantidade máxima de material que passa na peneira de 0,075 mm igual a 1%.

[2] Os valores da BS EN 12620 foram tomados a partir da referência INTERPAVE (2012).

[3] Para o CSA A23.1 FA1, o ICPI (2007) recomenda reduzir a quantidade máxima de material que passa pela peneira 0,080 mm de 3% para 1%. Embora o diâmetro na abertura da malha da peneira N° 200 da norma ASTM é equivalente a 0,075 mm, a CSA usa o tamanho padrão de peneira alemã do *Deutsches Institut fur Normung* (DIN) e francês da *Association Française de Normalisation* (AFNOR) equivalente a 0,080 mm.

recomendados pelo ICPI na peneira de nº 200 ou equivalente, por considerar menores quantidades de material que passa na peneira 0,075mm enquanto, a norma brasileira se destaca como a menos conservadora devido à notável permissividade de material fino na composição granulométrica da areia empregada na camada de assentamento.

Figura 2.19 - Faixas granulométricas recomendadas para areias empregadas em camadas de assentamento



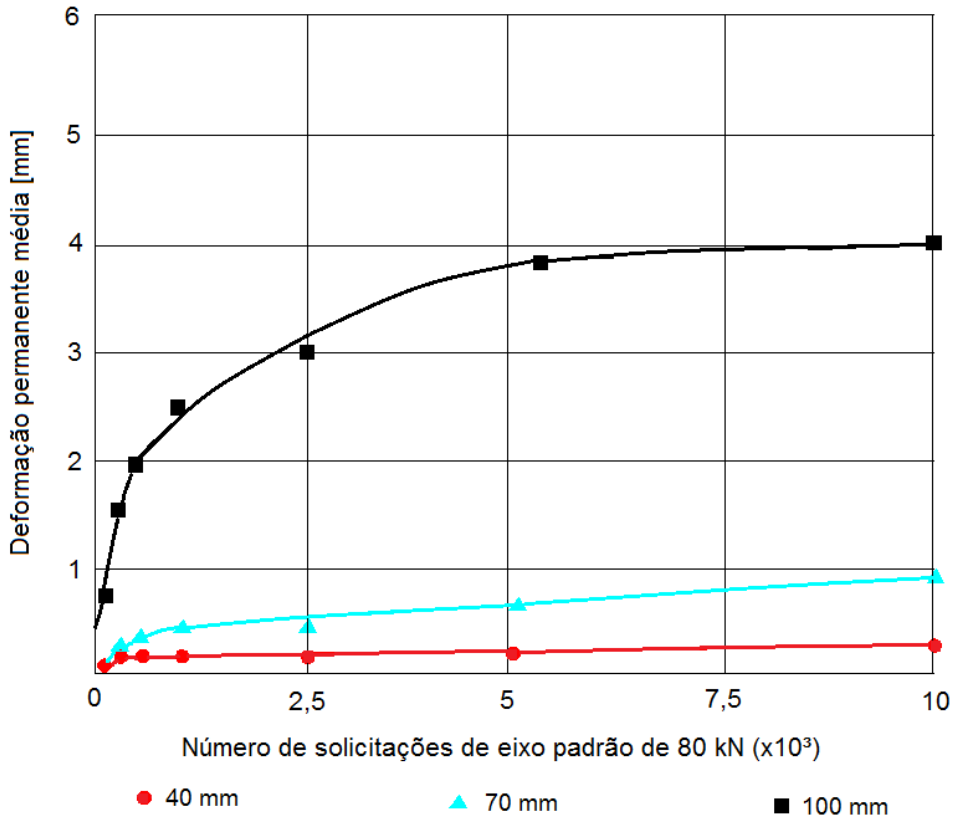
2.4.2.3 Espessura da camada de assentamento

Assim como a granulometria do material a ser empregado na camada de assentamento é de suma importância no desempenho estrutural do PBC, o emprego correto da espessura de material nesta camada influencia o comportamento da estrutura e também deverá ser objeto de atenção especial.

Para Shackel (1990), a espessura e granulometria da camada de assentamento influencia diretamente no comportamento estrutural do PBC. Tais conclusões foram obtidas pelo autor por meio de resultados experimentais obtidos utilizando blocos de 80 mm de espessura

assentados sobre camadas de areia não compactada com espessuras de 40, 70 e 100 mm, solicitadas por eixo padrão de 80 kN (carga por roda de 40 kN) com pressão dos pneumáticos de 0,6 MPa (Figura 2.20).

Figura 2.20 - Efeito da espessura da camada de assentamento no desempenho de pavimentos



Fonte: Adaptado de Shackel (1990)

Dos dados apresentados na Figura 2.20 constata-se que a areia empregada como camada de assentamento, na condição não compactada, com espessura de 40 mm atingiu valores mais baixos de deformações permanente, menores que 0,5 mm, e que incrementos na espessura desta camada ocasionaram deformações permanentes mais significativas, conforme observado para a espessura de 100 mm de material de assentamento, onde constatou-se deformações permanentes de até 4 mm.

Segundo Burak (2002a) a camada de assentamento deve ser consistente ao longo de todo o pavimento, não devendo exceder 25 mm após a compactação.

Carvalho (1998) afirma que a espessura da camada de areia não compactada é, geralmente, 1,5 cm superior à da camada compactada e sua espessura deve ser verificada constantemente durante a construção.

Um comparativo entre as espessuras de camadas empregadas em diferentes países é apresentado no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Comparativo de espessuras de camada de assentamento e materiais recomendados

País	**Material**	**Espessura (mm)**	**Condição**	**Fonte**
África do Sul	areia	25 - 30	não compactada	NITRR (1987)
Brasil	pétreo	30 - 70	não compactada	NBR 15953 (2011)
	areia ou pó-de-pedra	30 - 50	compactada	DER/SP (2006a)
	areia	40	compactada	DNER (1997b)
	areia	30 - 50	não compactada	Carvalho (1998)
	areia ou pó-de-pedra	40	compactada	DNIT (2005)
Canadá e EUA	areia	25 - 30	compactada	Burak (2002a) e ICPI (2012)
Reino Unido	areia	30 - 65	compactada	INTERPAVE (2012)

2.4.2.4 Influência da umidade na camada de assentamento

O *National Institute for Transport and Road Research* (NITRR, 1987) descreve que a experiência obtida na África do Sul mostrou que a compactação adequada da areia empregada na camada de assentamento é adquirida a valores de umidade tipicamente entre 4 e 8%, sendo considerado 6% como valor de umidade satisfatório.

No Brasil a ABNT NBR 15953 (2011) recomenda que a umidade do material de assentamento esteja entre 3% a 7% no momento da aplicação.

Para Burak (2002a) a camada de assentamento atua como o ponto de repouso para os blocos, mas o mais importante, facilita o assentamento inicial dos blocos e fornece uma camada de drenagem para a água que penetra através das juntas.

A respeito disso, Madrid, Giraldo e González (2003) relatam que foi reconhecido que PBC permitem a entrada de determinada porcentagem das águas da superfície na camada de assentamento, particularmente quando nova, mas ao longo de um período de tempo, a infiltração é reduzida a um ponto que poderia ser assumida próxima de zero. De acordo com o autor, esta infiltração é uma das principais preocupações devido ao potencial de danos que poderia causar à base, sub-base e subleito, e a necessidade de construir sistemas de drenagem para esgotar esta água.

Knapton (1994) relata que sempre houve dificuldades ligadas à camada de assentamento em PBC sobre tráfego intenso, e que a água tem sido um fator importante. Embora um pouco de umidade aumente a estabilidade na compactação da maioria dos materiais das camadas, a experiência indica que muitas areias perdem estabilidade quando um teor de umidade específico é atingido. Quando a camada de assentamento se encontra inundada (não necessariamente saturada), as partículas finas, presentes no material original ou as que foram desenvolvidas pela degradação interna de grão sobre grão, devem ser eliminadas ou reduzidas a um nível controlado para mitigar a possibilidade de instabilidade da camada.

Segundo o autor, é também evidente que as areias manufaturadas (pó-de-pedra) são muito mais propensas a serem afetadas pela água do que materiais naturais com superfícies de grãos polidos por ocorrência de intemperismo geológico. O autor ainda apresenta fatores que podem ou não influenciar na perda de estabilidade da camada de assentamento:

- Os seguintes fatores estão presentes em ruptura do pavimento:
    - Pó-de-pedra contendo 3% ou mais de materiais finos no momento da ruptura;
    - Tráfego severamente canalizado, geralmente corredores de ônibus;
    - Camada de assentamento inundada.
- Os seguintes fatores não levam a instabilidade da camada de assentamento:

- Veículos industriais muito pesados;
- Qualquer formato específico de bloco, tamanho ou material;
- Materiais mal graduados acima de abertura de peneira de 0,15 mm;
- Tráfego de alta velocidade (acima de 50 km/h).

Segundo o ICPI (2007) o fracasso da areia empregada como camada de assentamento ocorre em tráfego canalizado de veículos, devido a dois principais motivos: falha estrutural através da degradação e; saturação devido à drenagem inadequada. Como as camadas de assentamento estão localizadas no alto da estrutura do pavimento, elas são submetidas a aplicações repetidas de alta tensão a partir da passagem de veículos sobre o pavimento. Esta ação repetida, particularmente de maiores cargas de eixo de ônibus e caminhões, degradam a camada de assentamento causando patologias. Para estas aplicações o material deve ser selecionado com base na sua capacidade de resistir à degradação a longo prazo.

Neste sentido, o ICPI (2007) afirma que a escolha do material para a camada de assentamento com uma granulometria com limite estabelecido de até 1% na quantidade de material que passa na peneira de 0,075 mm, conforme indicado pelo ICPI (2007), irá ajudar a reduzir o risco de má drenagem e instabilidade. No entanto, estas areias são susceptíveis a problemas de drenagem se elas não têm a dureza para resistir à degradação de longo prazo devido às cargas de roda veiculares.

Knapton (1994) relaciona outros fatores de projeto do PBC que influenciam na umidade da camada de assentamento, sendo as mais impactantes: declividade da superfície; pistas longas e íngremes; selagem de juntas do pavimento.

2.4.3 Material de rejuntamento

De acordo com Burak (2002a), a areia comum, utilizada como material de preenchimento das juntas do PBC, promove intertravamento vertical e transferência de cargas por cisalhamento, podendo ser um pouco mais fina do que a areia da camada de assentamento. No entanto, segundo o autor, comumente a areia da camada de assentamento é usada para rejuntamento para facilitar o controle de materiais do local de trabalho. Isso exige um esforço adicional para preencher as articulações durante a compactação, devido à granulometria mais grosseira. O material de rejuntamento deve estar seco quando varrido nas juntas, para garantir que não

ocorram vazios nas articulações devido aos grãos de areia aderidos em razão da umidade, o que reduziria o intertravamento.

Assim, como no caso das faixas granulométricas empregadas na camada de assentamento, nos EUA e Canadá, o ICPI recomenda, pelas mesmas razões, limitações adicionais na quantidade máxima de material que passa na peneira de abertura igual a 0,075 mm. O Quadro 2.4 resume os limites granulométricos para areias empregadas em camadas de rejuntamento no Brasil, EUA, Reino Unido e Canadá.

Quadro 2.4 - Faixas granulométricas recomendadas para areias empregadas em camadas de rejuntamento

Abertura da Peneira (mm)	**ABNT 15953**	**ASTM C144[4]**	**BS EN12620[5]**	**CSA A179[6]**
	Brasil	**EUA**	**Reino Unido**	**Canadá**
	Porcentagem que passa			
5,000				100
4,750	100	100		
4,000				
2,500				90 - 100
2,360	75 - 100	95 - 100		
2,000			100	
1,250				85 - 100
1,180	50 - 95	70 - 100		
1,000			85 - 100	
0,630				65 - 95
0,600	30 - 85	40 - 75		
0,500			55 - 100	
0,315				15 - 80
0,300	5 - 50	10 - 35		
0,160				0 - 35
0,150	0 - 15	2 - 15		
0,080				
0,075	0 - 10	0 - 1		0 - 1
0,063			0 - 2	

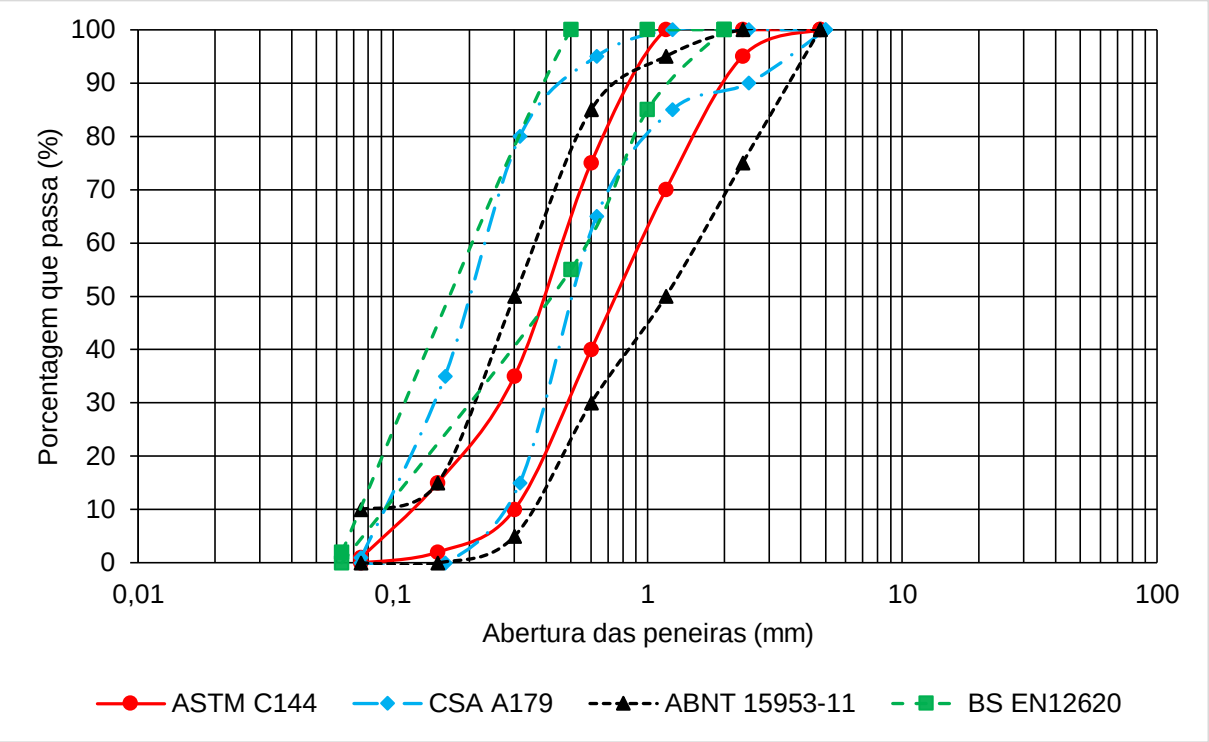
[4] Valores referentes à ASTM C144 fornecidos por Knapton e Smith (2012)

[5] Valores referentes à BS EN 12620 consultados em INTERPAVE (2012)

[6] Valores referentes à CSA A179 fornecidos por Knapton e Smith (2012)

A Figura 2.21 ilustra a distribuição das faixas granulométricas para areias empregadas em camadas de rejuntamento no Brasil, EUA, Reino Unido e Canadá, com base nos dados do Quadro 2.4.

Figura 2.21 - Faixas granulométricas recomendadas para areias empregadas em camadas de rejuntamento



Em alguns casos há a necessidade de se especificar a selagem das juntas do pavimento. Segundo Knapton (1994), a selagem das juntas do pavimento é especificada regularmente por uma ou mais das razões seguintes:

- Impedir a erosão do material de rejuntamento por rajadas de motores de aeronaves;
- Evitar que o material de rejuntamento seja removido pelo vácuo durante o varrimento de ruas (centro da cidade);
- Evitar a contaminação dos materiais das camadas subjacentes por combustível (postos de combustível);
- Reduzir o teor de umidade da camada de assentamento (terminais de ônibus e ruas).

Enquanto a experiência e evidências laboratoriais dão suporte a cada um dos itens acima, Knapton (1994) alerta que o custo adicional de vedação de juntas é tal que a operação deve ser realizada somente quando há um motivo específico para fazê-lo. Até 1994, o autor relata que dois tipos de selante foram utilizados: um material à base de água e outro à base de polímero. Ao reduzir o teor de água da camada de assentamento, o potencial para a areia entrar em colapso é reduzido. Segundo o autor, estima-se que, no Reino Unido 10% dos pavimentos projetados sejam selados.

Alguns dos documentos técnicos brasileiros para execução do PBC recomendam a utilização de asfalto para selagem das juntas, sendo tal aspecto verificado em DER-SP (2006a), DNER (1997b) e DNIT (2005).

2.4.4 Base e sub-base

De acordo com a ABNT NBR 15953 (2011) “a camada de sub-base ou de base pode ser constituída de materiais pétreos (agregados industriais, agregados reciclados, cascalho) ou misturas estabilizadas com cimento”.

Burak (2002a) explica que, bases de agregados britados, ou bases estabilizadas utilizadas na construção de pavimentos asfálticos flexíveis são geralmente adequadas para pavimentos intertravados de concreto. Normalmente, as especificações rotineiras de granulometria são suficientes. Nos EUA e Canadá os requisitos mínimos recomendados de resistência para bases granulares deve ser *California Bearing Ratio* (CBR) = 80% e para sub-bases, CBR = 30% para PBC. Materiais de base devem ter um índice de plasticidade (IP) não superior a 6% e um limite de liquidez (LL) não superior a 25%.

Devido a descontinuidade da superfície do PBC, tendo em vista a rede de juntas, a fissuração por si só não é um problema. A camada de assentamento não irá propagar prontamente fissuras a partir da base. O que torna, pouco provável que a fissuração da base levará a abertura das juntas no pavimento (SHACKEL, 1984).

Segundo Cook e Knapton (1996), no caso de pavimentos sujeitos ao tráfego pesado é muito comum na construção do pavimento incluir uma base tratada com cimento ou betume. Além

disso, tradicionalmente os métodos de projeto de pavimentos flexíveis têm sido modificados, pressupondo que os blocos e a camada de assentamento sejam equivalentes a uma espessura semelhante de material betuminoso.

Contudo, os autores advertem que, no caso de pavimentos sujeitos ao tráfego leve, muitos projetistas têm ignorado o emprego de bases estabilizadas e da camada de assentamento. Algumas pesquisas têm sugerido que, nessa situação, os blocos não são equivalentes a materiais betuminosos como em pavimentos com bases estabilizadas, pois verificou-se que quando blocos são colocados diretamente sobre o material granular, os níveis de deformações permanentes medidos são até duas vezes maiores que os valores medidos em pavimentos betuminosos em circunstâncias semelhantes.

Shackel (1984) explica ainda que a vida de serviço efetiva de um pavimento que incorpora uma base tratada com cimento é composta de duas fases. Durante a primeira fase a base se comporta como um material de alto módulo de resiliência (baixa deformação) até que, eventualmente, ocorra a fissuração por fadiga. A vida de fadiga depende da magnitude da tensão de tração máxima repetitiva em relação ao esforço de tração de ruptura na base. Esta, por sua vez, depende da resistência do material, uma vez que em uma base cimentada fissurada o seu módulo de resiliência efetivo diminui, assemelhando-se ao de uma base de brita. Nesta altura, a vida útil do pavimento remanescente pode ser calculada em termos do número de repetições necessários para causar deformações plásticas inaceitáveis.

Para base e sub-base há informações substanciais sobre a faixa provável de módulos de resiliência para diferentes classes de material. Assim sendo, a escolha dos materiais a serem empregados será regido por considerações de drenagem, disponibilidade local de material e custo (SHACKEL, 1992).

Shackel (1992; 2000a) explica que as condições de drenagem do local a ser pavimentado influenciam nas propriedades do subleito e nos materiais de base ou sub-base granulares. Geralmente, os efeitos de um aumento da saturação em materiais granulares serão de redução da rigidez e sua capacidade de suporte. Em geral, a escolha do tipo de material que será empregado nas camadas de base e sub-base é determinada pelas condições de drenagem as quais se deseja alcançar.

O Quadro 2.5 apresenta os fatores de drenagem usados no dimensionamento sugeridos para PBC. Estes são dados como uma função das condições de drenagem e tempo de saturação com base na nomenclatura da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

Quadro 2.5 - Fatores de drenagem

Condições de drenagem	Tempo de saturação do pavimento			
	< 1%	1% a 5%	5% a 25%	> 25%
Excelente - drenagem em 12 horas ou menos (Pavimento normalmente seco)	1,00	0,90	0,85	0,80
Bom - drenagem em 1 dia	0,90	0,85	0,75	0,70
Regular - drenagem em 1 semana ou menos (Pavimento normalmente úmido)	0,85	0,75	0,70	0,60
Ruim - drenagem em 1 mês	0,75	0,70	0,60	0,50
Muito ruim - não é fácil drenar (Pavimento está sempre molhado)	0,70	0,65	0,50	0,40

Fonte: Adaptado de Shackel (2000a)

2.4.5 Subleito

Segundo Shackel (1986; 1992) o subleito deve ser caracterizado em termos de seu módulo de resiliência (Mr) e do coeficiente de *Poisson* (μ). Estes são melhor medidos diretamente pelo ensaio de carregamento triaxial. No entanto, tais testes ainda não são de rotina e, na maioria dos casos, o módulo é determinado a partir de medidas simples, menos fundamentais de propriedades do solo, como o CBR, usando relações empíricas, tais como as Equações (1) e (2):

$$Mr = 10 \cdot CBR \qquad (MPa) \qquad (1)$$

ou alternativamente,

$$Mr = 17{,}6 \cdot CBR^{0{,}64} \ (MPa) \qquad (2)$$

Em casos onde nem mesmo os dados de CBR estão disponíveis, torna-se então necessário inferir as faixas prováveis de módulos de resiliência com base em dados oriundos da classificação do solo. Burak (2002a) discute que a compactação do solo do subleito é crucial para o desempenho do PBC intertravados e que a compactação adequada irá minimizar recalques.

De acordo com Burak (2002a) e o ICPI (2012) a compactação deve ser de pelo menos 98% da energia normal para áreas de pedestres e calçadas residenciais, e, pelo menos, 98% da energia modificada para áreas sob constante tráfego de veículos. Ambos os autores recomendam o uso de geotêxteis sobre solos do subleito extremamente saturados ou muito finos, para prolongar a vida da camada de base e reduzir a probabilidade de deformações.

No Brasil, de acordo com a ABNT NBR 15953 (2011), que normaliza os procedimentos para execução do PBC intertravados, o subleito constituído de solo natural do local ou proveniente de empréstimo, deve cumprir as especificações da ABNT NBR 12307 (1991) e os seguintes requisitos mínimos:

- O material do subleito deve apresentar CBR maior que 2% e expansão volumétrica menor ou igual a 2%;
- Toda a camada de subleito deve estar limpa, sem a presença de plantas, raízes e qualquer tipo de matéria orgânica;
- A camada de subleito deve estar bem drenada, mantendo o lençol freático rebaixado no mínimo 1,5 m da cota final de superfície do pavimento acabado;
- A camada final do subleito deve apresentar a cota definida no projeto e ter os mesmos caimentos da camada de revestimento do pavimento pronto, sendo recomendado o caimento mínimo de 2%, salvo condição específica de projeto.

2.4.6 Contenções

Os ICPI (2014), ICPI (2012) e ABNT NBR15953 (2011) descrevem quais são os tipos de contenções utilizadas em PBC, tratam de sua importância e descrevem seu emprego em função do tipo de material, sendo que este item resume tais elementos.

As contenções em torno do PBC intertravados são essenciais para seu desempenho. Os blocos e areia são mantidos unidos por estas, permitindo que o sistema permaneça confinado. Para passeios, pátios e calçadas, as contenções podem ser de aço, alumínio, concreto ou guias/meio-fio de concreto pré-moldado ou moldados no local, ou ainda, contenções de plástico especificamente projetadas para blocos concreto.

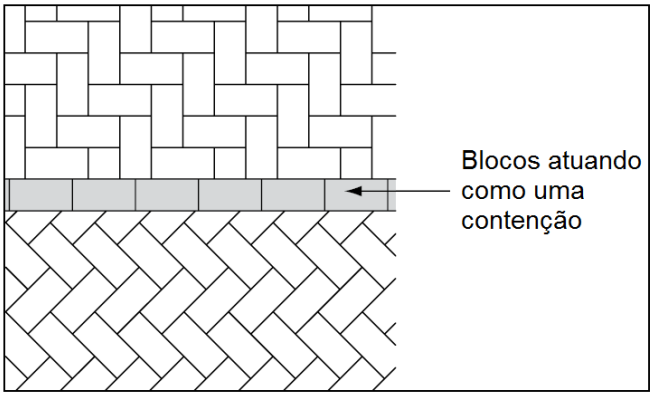
Contenções de concreto são recomendadas para faixas de pedestres, estacionamentos, passeios, ruas, pátios industriais, pavimentos de portos e aeroportos. Contenções de concreto pré-moldado e guias de pedra cortadas são adequadas para ruas e estacionamentos.

As contenções são tipicamente colocadas antes de instalar a camada de assentamento e os blocos de concreto. Algumas contenções, tais como plástico, aço e alumínio podem ser instaladas após a colocação dos blocos de concreto.

Contenções de borda ou contenções laterais são um componente essencial de intertravamento de pavimentos de concreto. As contenções confinam os blocos fortemente, permitindo consistente intertravamento das unidades em todo o pavimento. Elas previnem os deslocamentos dos blocos sob a ação de forças horizontais do tráfego. As contenções são projetadas para permanecer estáticas durante a recepção de impactos durante a fase construtiva, provenientes de veículos e de ciclos de congelamento e descongelamento.

As contenções são necessárias ao longo do perímetro do PBC intertravados ou onde existe uma mudança no material do pavimento. Por exemplo, quando um padrão assentamento muda de direção, pode haver a necessidade dos blocos atuarem como uma contenção Figura 2.22.

Figura 2.22 - Blocos atuando como contenção



Fonte: Adaptado de ICPI (2014)

O Quadro 2.6 apresenta os tipos de contenções laterais e suas aplicações. De modo geral, as contenções podem ser divididas em pré-fabricadas ou moldadas “in loco”. Sendo que, as contenções pré-fabricadas podem ser produzidas em concreto pré-moldado, plástico, pedra cortada, alumínio e aço. Já as contenções moldadas “in loco” são feitas de concreto. Independentemente do material de que é feita a contenção, ela deve ter uma superfície vertical lisa que irá permitir que o pavimento esteja em contato total com a contenção.

Quadro 2.6 - Tipos de contenção a serem adotadas em função do local de aplicação

Local de aplicação	Concreto moldado no local	Concreto pré-moldado e pedras cortadas	Plástico, alumínio e aço
Passeios públicos - sem tráfego veicular	x	x	x
Praças - sem tráfego veicular	x	x	x
Ruas residenciais	x	x	x[1]
Ruas comerciais e industriais	x	x	x[1]
Estacionamentos	x	x	x[1]
Cruzamentos em ruas de concreto ou asfalto	x	x	
Estradas de todos os tipos	x	x	
Acessos a utilidades públicas enterradas	x	x	
Postos de combustível	x	x	
Pisos industriais	x		
Terminais de carga	x		

1 – Apenas produtos projetados para aplicações de cargas elevadas.

Fonte: Adaptado de ICPI (2014)

As contenções podem ser classificadas, como: contenção permanente; contenção provisória; viga de contenção. As contenções permanentes são aquelas que manterão o intertravamento do pavimento durante todo seu período de projeto, garantindo a estabilidade do sistema e que apresentem as seguintes condições:

- Serem constituídas de estrutura rígida ou de dispositivos fixados na base do pavimento, de modo a impedir o seu deslocamento;
- Serem executadas obedecendo as cotas de níveis e alinhamentos definidos no projeto;

- Serem executadas antes da camada de revestimento.

As contenções provisórias são aquelas utilizadas durante a fase de construção do PBC, as quais devem cumprir no mínimo as seguintes condições:

- Serem constituídas de estrutura rígida (caibros de madeira ou perfil de aço) fixadas na estrutura do pavimento, de modo a impedir o seu deslocamento;
- Serem utilizadas a cada término de jornada de trabalho, cujo assentamento não foi finalizado junto a uma contenção ou viga de contenção, e retiradas antes do reinício da jornada de trabalho seguinte.

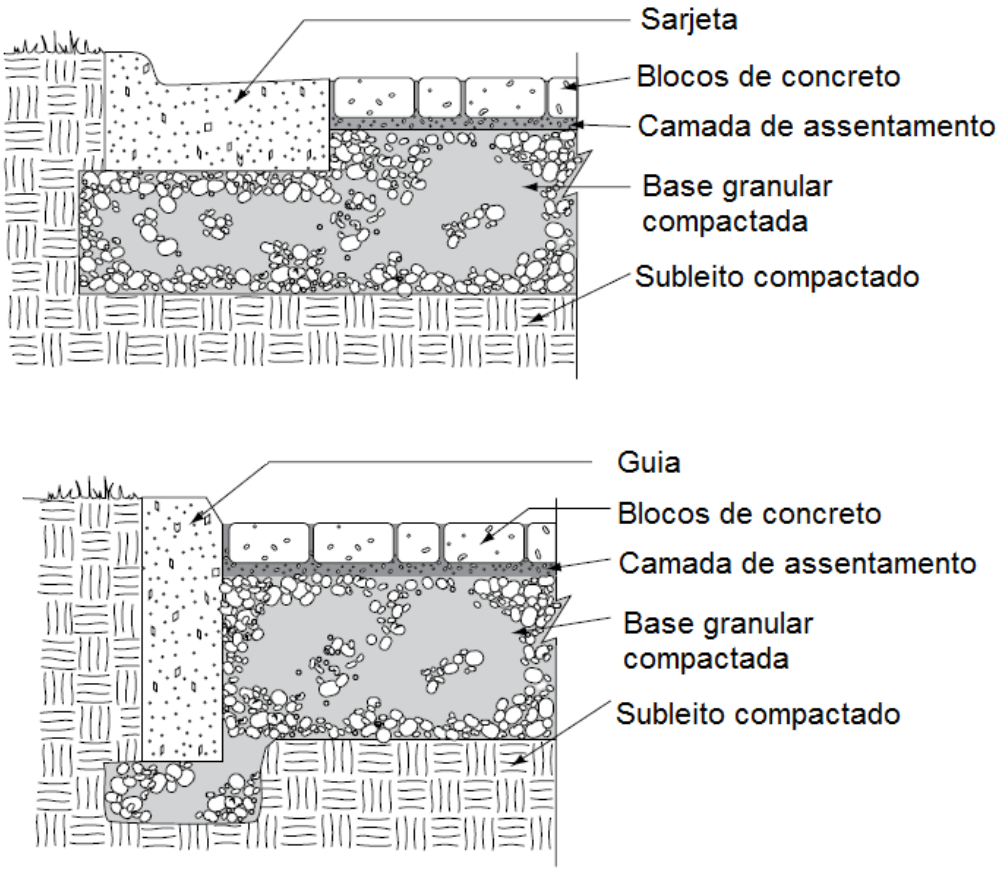
O projeto deve especificar, quando necessário, o uso de vigas de contenção, que devem cumprir no mínimo as seguintes condições:

- Serem constituídas de estrutura rígida (concreto simples ou concreto armado) com seção determinada em projeto e altura suficiente para penetrar até a camada de subleito, de modo a impedir o seu deslocamento;
- Serem utilizadas em todo encontro de pavimento intertravado com outro tipo de pavimentação ou com via sem pavimentação;
- Serem executadas com fundação de acordo com as condições de tráfego e especificações de projeto.

Segundo a ABNT NBR 15953 (2011), “as vigas de contenção devem ser utilizadas em trechos com inclinação igual ou superior a 8%. O espaçamento entre as vigas é determinado em função do tipo de tráfego, utilização e inclinação, devendo este detalhamento constar do projeto”.

A Figura 2.23 exemplifica a disposição e diferentes tipos de contenções em seções transversais típicas do PBC.

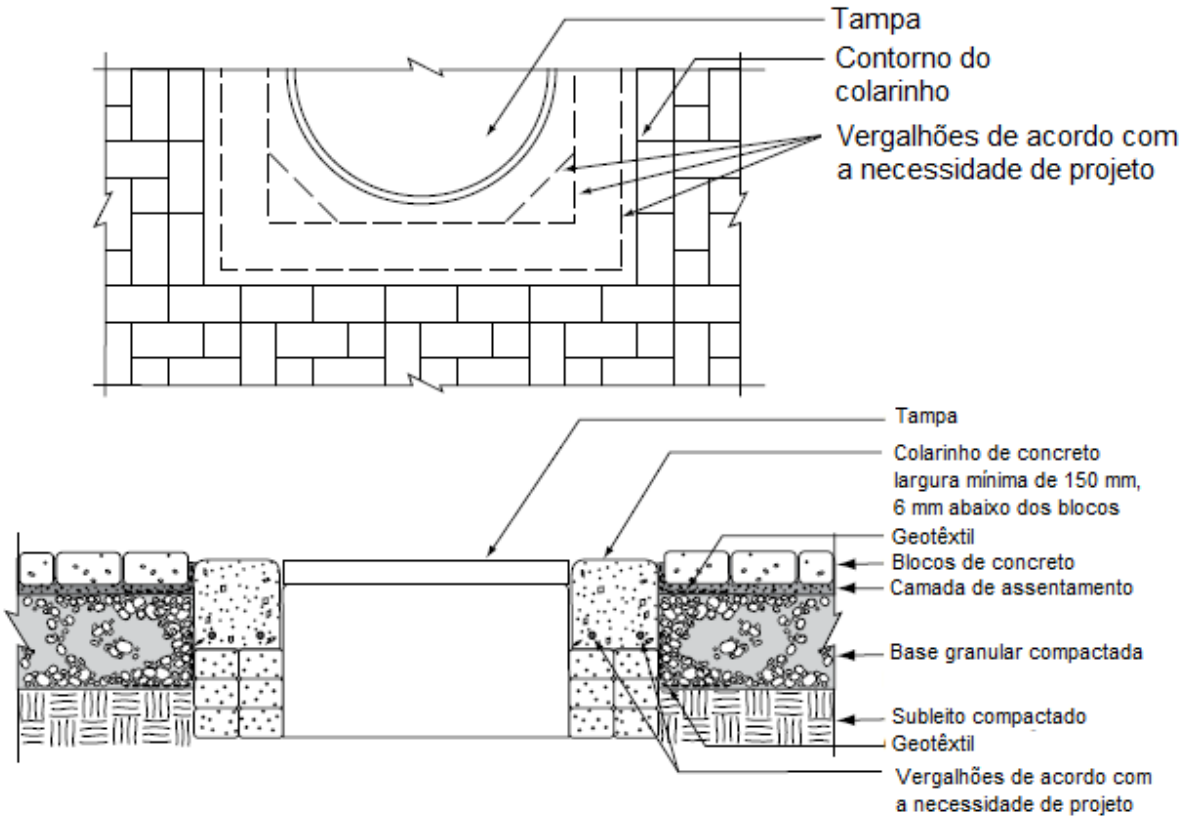
Figura 2.23 - Exemplos de diferentes tipos de contenções empregadas em PBC



Fonte: Adaptado de ICPI (2014)

Em regiões do pavimento onde são instalados poços de visita de acesso a utilidades públicas enterradas (por exemplo: redes de esgotos, redes de água e gás, telefone, elétrica) é extremamente necessária a construção de “colarinhos” de concreto em seu entorno com a finalidade de evitar que, serviços rotineiros nestes poços de visita ocasionem perda de intertravamento devido a possibilidade de quebra ou deslocamento dos blocos. A compactação consistente da base de agregado contra elementos de ferro fundido é difícil, então um colarinho de concreto colocado no seu entorno reduz o potencial de deslocamento após a compactação de base. Colarinhos de concreto devem estar 6 mm abaixo dos blocos em regiões sujeitas a neve para evitar a possibilidade de dano eventual causado por equipamentos de retirada de neve. A Figura 2.24 exemplifica a implantação e seção transversal de contenções entorno de utilidades públicas enterradas.

Figura 2.24 - Exemplo de contenções entorno de utilidades públicas enterradas



Fonte: Adaptado de ICPI (2014)

2.5 Métodos de projeto

Segundo Shackel (1980), a utilização de blocos de concreto para pavimentação ocorreu inicialmente de forma lenta, devido à falta de um método de projeto adequado para pavimento usando blocos articulados de concreto como revestimento o que, restringiu, inicialmente, a aplicação deste tipo de pavimento a áreas de pedestres.

De acordo com o autor, os primeiros estudos dirigidos a elaboração de métodos de projeto do PBC tiveram início na América do Sul e África do Sul em meados da década de 1960. Em seguida, surgiram estudos no Reino Unido, Austrália e Nova Zelândia, sendo que inicialmente a maioria desses estudos foram conduzidos por organizações comerciais de cimento ou concreto que tinham pouca experiência em projeto de pavimento rodoviário. Apenas em 1977, quando estudos de tráfego acelerado do PBC foram iniciados na Austrália é que o problema de projeto foi abordado do ponto de vista de engenharia de pavimentos.

Hein, Aho e Burak (2009) relatam que ao longo dos últimos anos tem havido avanços na teoria e prática do projeto estrutural do PBC, particularmente em países como a Austrália, Canadá, Inglaterra, Holanda, África do Sul e Estados Unidos.

Segundo Shackel (1980; 1984; 1992) e Kasahara, Komura e Ikeda (1992), a gama de métodos de projeto para pavimentos de blocos de concreto pode ser dividida em quatro categorias:

- Métodos empíricos;
- Adaptações de procedimentos de projeto para pavimentos flexíveis convencionais;
- Métodos empíricos baseados em pistas de teste em escala real;
- Métodos mecanicistas com parâmetros de projeto determinados em ensaios de laboratório.

Métodos baseados no conhecimento local ou experiência são normalmente limitados pelo domínio da experiência ou procedimentos dos quais eles são derivados. Historicamente, tais métodos geralmente têm servido como procedimentos provisórios em regiões em que pavimentos de blocos foram recentemente introduzidos. Uma abordagem alternativa tem sido a modificação de procedimentos para pavimentos flexíveis convencionais (SHACKEL, 1980; 1984; 1992).

Burak (2002b) relata que, geralmente, pavimentos de concreto intertravados são projetados por métodos semi-empíricos ou por métodos mecanicistas baseados em sistemas de camadas elásticas. Devido às semelhanças com pavimentos asfálticos em termos da natureza da distribuição de carga e modos de ruptura (subleito), o método da AASHTO pode ser utilizado para a concepção estrutural do PBC intertravados, sendo em parte baseado em testes de tráfego em escala real. Condições ambientais, tais como drenagem, susceptibilidade ao congelamento, tráfego, subleito e módulo de resiliência de base são aspectos de consideração necessárias nos projetos.

Segundo o autor, uma vez que a condição de intertravamento é atingida, o módulo de resiliência é considerado aproximadamente 3.100 MPa para blocos de 80 mm sobre 25 mm de camada de assentamento. Isso resulta em um coeficiente de camada estrutural semelhante às misturas asfálticas. No entanto, ao contrário dos revestimentos asfálticos, os revestimentos

de blocos de concreto não são susceptíveis a uma diminuição no módulo de resiliência e patologias de superfície em elevadas temperaturas.

A concepção mecanicista, por sua vez, usa análise elástica para calcular as tensões e deformações causadas no pavimento por cargas de roda. Procedimentos de projeto informatizados adaptados especificamente para pavimentos de blocos têm sido desenvolvidos. Alguns destes programas podem permitir critérios adicionais de entrada para os parâmetros de projeto, como por exemplo, o programa pode apresentar como entrada a forma, padrão de arranjo e espessura de projeto e atribuir um módulo de resiliência (BURAK, 2002a).

De acordo com Shackel (1992), em contraste com outros procedimentos, métodos mecanicistas aplicam rotinas metodológicas analíticas para projetar pavimentos. No entanto, os métodos são complexos e implicam normalmente em análise computacional. Consequentemente, exceto em países como a Austrália onde métodos de projeto de pavimentos com análise computacional têm sido estabelecidos como uma política nacional, engenheiros têm adotado de forma lenta os métodos mecanicistas para PBC.

Segundo o autor, para análises de camadas elásticas, é necessário atribuir uma rigidez ou o módulo de resiliência para a camada de revestimento. Isto pode ser feito idealizando-se a real superfície de blocos em termos de uma camada elástica homogénea equivalente da mesma espessura. O módulo de resiliência apropriado para esta camada pode ser selecionado a partir de dados obtidos de levantamentos com FWD em pavimentos de blocos atualmente em serviço (retroanálises). Tais estudos com FWD foram realizados em vários países, incluindo Holanda, Grã-Bretanha, Japão e Austrália.

Shackel (1980; 1984) lista uma série de conclusões obtidas a partir de vários estudos que são relevantes para a formulação e avaliação de métodos de projeto além daquelas anteriormente citadas, sendo resumidas da seguinte forma:

- É necessário suporte adequado da base para o desenvolvimento do intertravamento. No entanto, se a rigidez da base é demasiadamente elevada poderá inibir o intertravamento;

- Evidências limitadas sugerem que o intertravamento pode ser desenvolvido mais rapidamente onde as juntas são mais estreitas do que em locais cujas juntas são mais largas;
- Uma vez que um PBC se torna totalmente intertravado ele atinge um estado de equilíbrio estável, que não é afetado nem pelo volume de tráfego ou pela magnitude da carga dos eixos (dentro da faixa de 24 a 70 kN).

2.5.1 Experiência internacional no dimensionamento do PBC

2.5.1.1 Método de projeto para pavimento sujeito ao tráfego leve

Cook e Knapton (1996) apresentam um método de projeto direcionado a pavimentos sujeitos ao tráfego leve. Segundo os autores, no Reino Unido pavimentos rodoviários revestidos com blocos de concreto ou argila têm sido projetados de acordo com as recomendações da norma britânica BS7533 (1992), a qual fornece orientações sobre a concepção de pavimentos solicitados por até 12 milhões de repetições de eixos padrão de 80 kN (ou seja, para as vias com volume de tráfego elevado).

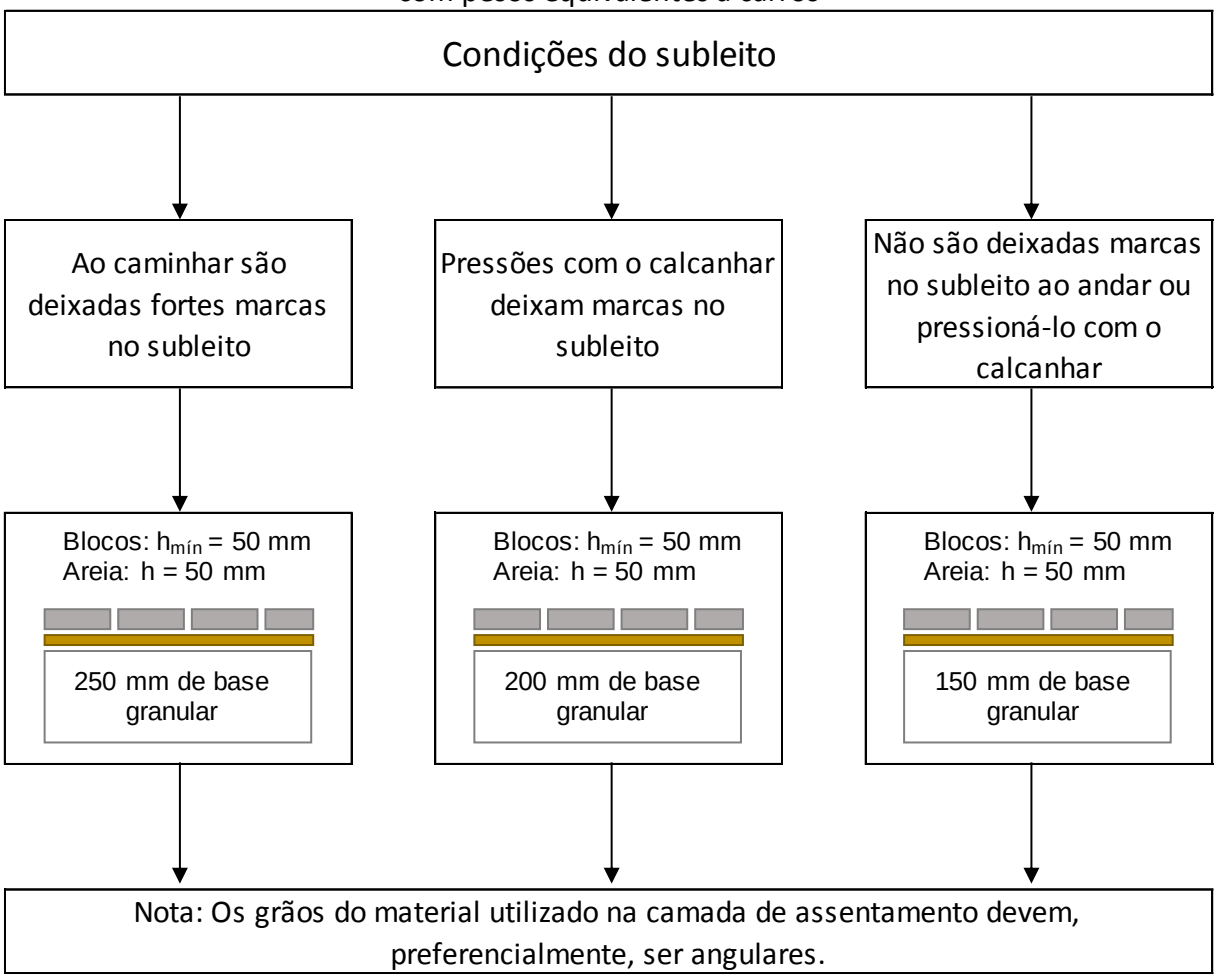
No entanto, muitas áreas pavimentadas são destinadas a suportar menos de 1.000 solicitações acumuladas de eixos padrão durante a vida de serviço. Essas áreas incluem parques de estacionamento, unidades privadas e áreas principalmente de pedestres.

Há duas categorias distintas de pavimento sujeitos ao tráfego leve. A primeira categoria compreende os pavimentos solicitados por relativamente poucos veículos pesados, e a segunda por pavimentos solicitados por veículos não mais pesados do que carros.

Considerando o projeto de pavimentos solicitados por automóveis e outros veículos leves similares, um método de projeto simples é ilustrada na Figura 2.25. Isto permite determinar uma espessura de sub-base granular de acordo com as condições locais do terreno. Em muitos desses pavimentos seria impraticável exigir que testes de engenharia fossem realizados, com a finalidade de caracterizar as condições do subleito. Portanto, um teste simples destinado a essa finalidade, onde é proposto utilizar como base para o projeto, a impressão feita no subleito por alguém andando ou pressionando o calcanhar no chão. Embora existam,

obviamente, possibilidades de erro, é preferível adotar esta abordagem a ignorar as condições do terreno ou a sugerir investigações de campo detalhadas que raramente seriam realizadas.

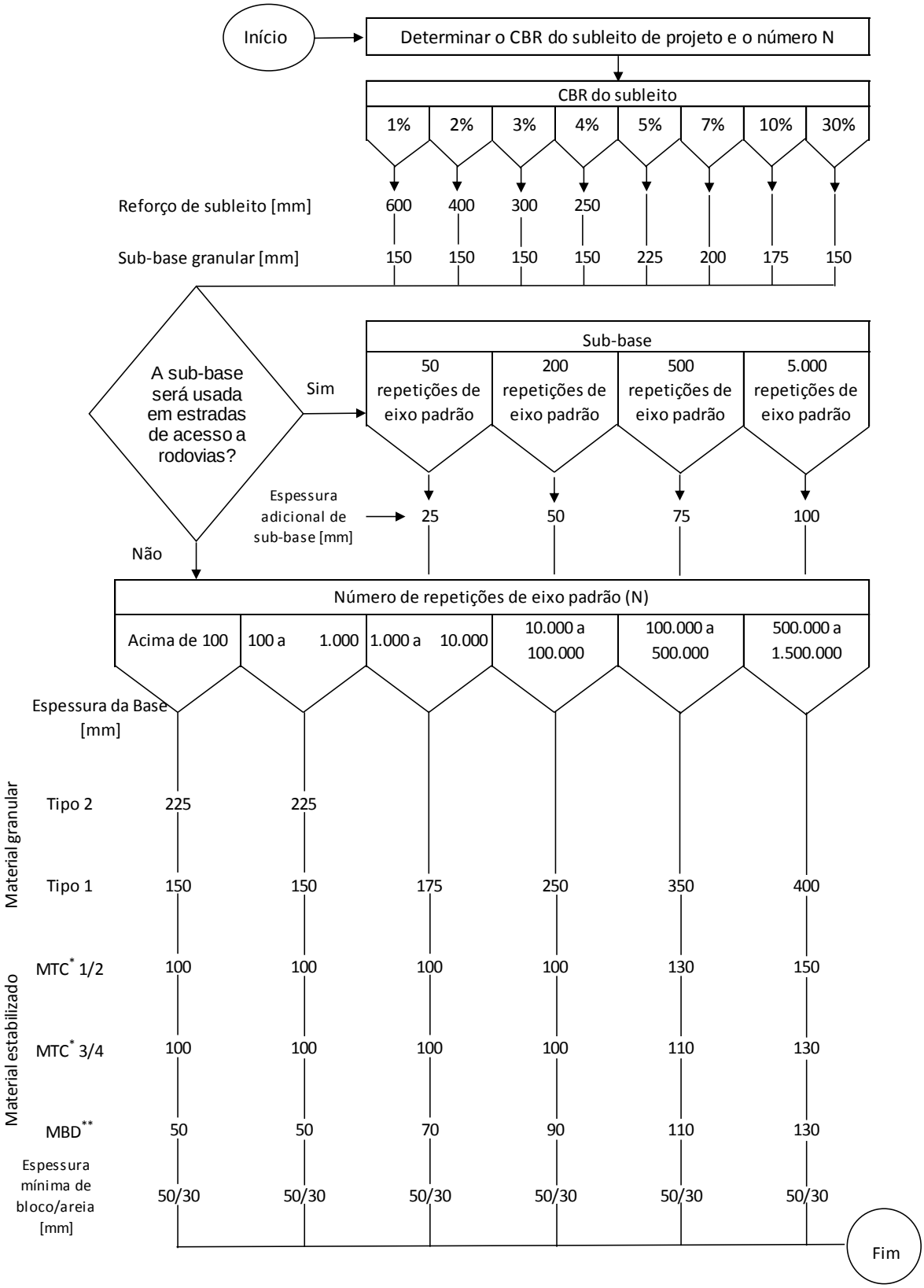
Figura 2.25 - Método de projeto para pavimentos trafegados por automóveis e veículos leves com pesos equivalentes a carros



Fonte: Adaptado de Cook e Knapton (1996)

A carta de projeto apresentada na Figura 2.26 foi desenvolvida para este tipo de pavimento onde a camada de base pode ser concebida em material granular ou material estabilizado. Conforme o método empregado no Reino Unido, para o uso de base granular são possíveis dois tipos de materiais: material tipo 1 (material adequado para aplicação em rodovias); e material tipo 2 (material mais sensível a alterações na umidade). Como material estabilizado são recomendados materiais tratados com cimento e macadame betuminoso denso.

Figura 2.26 - Método de projeto para pavimentos que não ultrapassem 1,5 x 10^6 repetições de eixo padrão durante o horizonte de projeto



*Material tratado com cimento (MTC); **Macadame betuminoso denso (MBD).

Fonte: Adaptado de Cook e Knapton (1996)

Conforme apresentado no Quadro 2.7, o método ainda fornece os coeficientes de equivalência estrutural entre materiais, o que possibilita ampliar as alternativas de projeto.

Quadro 2.7 – Coeficientes de equivalência estrutural entre materiais

Categoria do material	Coeficientes
Material tratado com cimento - Tipo 1	2,0
Material tratado com cimento - Tipo 2	2,0
Material tratado com cimento - Tipo 3	3,0
Material tratado com cimento - Tipo 4	3,0
Qualidade de pavimento de concreto	4,0
Macadame betuminoso denso	3,0
Concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ)	3,5
Material granular - Tipo 1	1,0
Material granular - Tipo 2	0,7
Material de subleito melhorado	0,5

Fonte: Adaptado de Cook e Knapton (1996)

2.5.1.2 Método de projeto baseado no guia da AASHTO de 1993

Hein, Burak e Rada (2009) apresentam o método para o projeto estrutural de pavimentos intertravados de concreto com base no método de dimensionamento de pavimentos flexíveis descrito no *Guide for Design of Pavement Structures* publicado pela AASHTO (1993).

O método aplica-se a áreas pavimentadas sujeitas a cargas limitadas a 10 milhões de repetições de eixo padrão de 80 kN, com uma velocidade permitida de até 70 km/h.

O método utiliza oito categorias de qualidade do subleito. Os tipos de subleito são classificados de acordo com o método de classificação unificada dos solos, conforme apresentado no Quadro 2.8.

Quadro 2.8 - Categorias de subleito

Categoria	Classificação	Descrição	Características de drenagem	Suscetibilidade ao congelamento
1	pedregulho / pedras	Rocha, rocha despedaçada, pedregulhos / pedras	Excelente	Nenhuma
2	GW, SW	Pedregulho e areia bem graduados	Excelente	Insignificante
3	GP, SP	Pedregulho e areia mal graduados	Excelente a regular	Insignificante a leve
4	GM, SM	Pedregulho e areia siltosos	Regular a semi-impermeável	Leve a moderada
5	GC, SC	Pedregulho e areia argilosos	Praticamente impermeável	Insignificante a leve
6	ML, MI	Siltes e areias siltosas	Tipicamente ruim	Grave
7	CL, MH	Argilas de baixa plasticidade e siltes de alta compressibilidade	Praticamente impermeável	Leve a grave
8	CI, CH	Argilas de média a alta plasticidade	Semi-impermeável a impermeável	Insignificante a grave

Fonte: Adaptado de Hein, Burak e Rada (2009)

Uma vez que o subleito tenha sido caracterizado, é necessário identificar a qualidade de drenagem do terreno e da estrutura do pavimento utilizando o Quadro 2.9. Dependendo do tipo de subleito, a resistência do pavimento pode ser reduzida, se houver excesso de água no solo.

Quadro 2.9 - Classificação da qualidade da drenagem em função do tempo de drenagem e tipo de solo

Qualidade da drenagem	Tempo de drenagem	Categoria do solo
Bom	1 dia	1, 2, 3
Regular	7 dias	3, 4
Ruim	1 mês	4, 5, 6, 7, 8

Fonte: Adaptado de Hein, Burak e Rada (2009)

O método admite o uso de bases granulares ou tratadas com cimento. É exigido CBR mínimo de 80% para a base granular.

Materiais de base granulares são condicionados a ter uma perda máxima de 60%, no ensaio de abrasão Micro-Deval e uma perda máxima de 40%, quando ensaiado em conformidade com o teste de abrasão Los Angeles. No índice de plasticidade é necessário um valor máximo de 6 e o limite máximo de liquidez de 25. Para fins construtivos, a espessura mínima de projeto de base granular é fixada em 100 mm para o tráfego menor que $5x10^6$ repetições de eixo padrão e 150 mm para valores superiores a $5x10^6$.

Para bases tratadas com material asfáltico é exigido um mínimo de estabilidade Marshall de 8.000 N. Para bases tratadas com cimento é necessária resistência à compressão mínima de 4,5 MPa aos 7 dias. Para fins construtivos, a espessura mínima da base tratada com cimento é de 100 mm.

Para sub-base granulares é exigido um CBR mínimo de 40%. O índice de plasticidade máximo necessário igual a 10 e o limite máximo de liquidez igual a 25.

Os blocos de concreto devem ter uma razão de aparência (comprimento dividido por espessura total) inferior ou igual a 3:1 e uma espessura mínima de 80 mm.

É recomendado o padrão de arranjo espinha-de-peixe 45º ou 90º. Padrões de assentamento alternativos podem ser considerados, desde que eles sejam funcionalmente e estruturalmente equivalentes.

A espessura de sub-base necessária é determinada com base no nível de confiança do projeto, horizonte de projeto, tráfego estimado, tipo de solo do subleito, estrutura de drenagem do pavimento, e tipo de base selecionada. A espessura de sub-base é determinada a partir do Quadro 2.10 ao Quadro 2.13.

Quadro 2.10 - Método de dimensionamento: categoria de solo 1 a 2

Base Granular - Espessura da Estrutura (mm)												
Drenagem		Número N	$1x10^4$	$2x10^4$	$5x10^4$	$1x10^5$	$2x10^5$	$5x10^5$	$1x10^6$	$2x10^6$	$5x10^6$	$1x10^7$
		Tipo de Camada										
Categoria 1	Bom	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	100	100	100	150	150	200	150	150
		Sub-base granular									200	300
	Regular	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	100	100	100	150	175	150	150	150
		Sub-base granular								150	250	350
	Ruim	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	100	100	100	150	200	150	150	150
		Sub-base granular								150	300	400
Categoria 2	Bom	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	100	100	100	150	175	150	150	150
		Sub-base granular								150	250	350
	Regular	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	100	100	100	150	200	150	150	150
		Sub-base granular								150	300	400
	Ruim	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	100	100	125	200	150	150	150	150
		Sub-base granular							150	275	425	550

Fonte: Adaptado de Hein, Burak e Rada (2009)

Quadro 2.11 - Método de dimensionamento: categoria de solo 3 a 4

Base Granular - Espessura da Estrutura (mm)												
Drenagem		Número N	$1x10^4$	$2x10^4$	$5x10^4$	$1x10^5$	$2x10^5$	$5x10^5$	$1x10^6$	$2x10^6$	$5x10^6$	$1x10^7$
		Tipo de Camada										
Categoria 3	Bom	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	100	100	100	150	200	150	150	150
		Sub-base granular								150	300	400
	Regular	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	100	100	125	200	150	150	150	150
		Sub-base granular							150	275	425	550
	Ruim	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	100	125	200	150	150	150	150	150
		Sub-base granular						175	300	400	575	725
Categoria 4	Bom	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	100	100	125	200	150	150	150	150
		Sub-base granular							150	275	425	550
	Regular	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	100	125	200	150	150	150	150	150
		Sub-base granular						175	300	400	575	725
	Ruim	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	100	150	100	150	150	150	150	150
		Sub-base granular					175	225	350	475	650	800

Fonte: Adaptado de Hein, Burak e Rada (2009)

Quadro 2.12 - Método de dimensionamento: categoria de solo 5 a 6

Base Granular - Espessura da Estrutura (mm)												
Drenagem		Número N	$1x10^4$	$2x10^4$	$5x10^4$	$1x10^5$	$2x10^5$	$5x10^5$	$1x10^6$	$2x10^6$	$5x10^6$	$1x10^7$
		Tipo de Camada										
Categoria 5	Bom	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	100	100	175	150	150	150	150	150
		Sub-base granular						150	250	350	525	650
	Regular	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	100	150	100	150	150	150	150	150
		Sub-base granular					175	225	350	475	650	800
	Ruim	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	150	200	100	150	150	150	150	150
		Sub-base granular					250	300	425	550	750	875
Categoria 6	Bom	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	100	150	100	150	150	150	150	150
		Sub-base granular					175	225	350	475	650	800
	Regular	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	150	200	100	150	150	150	150	150
		Sub-base granular					250	300	425	550	750	875
	Ruim	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	125	200	100	100	150	150	150	150	150
		Sub-base granular				250	350	450	575	700	900	1.050

Fonte: Adaptado de Hein, Burak e Rada (2009)

Quadro 2.13 - Método de dimensionamento: categoria de solo 7 a 8

Base Granular - Espessura da Estrutura (mm)												
Drenagem		Número N	$1x10^4$	$2x10^4$	$5x10^4$	$1x10^5$	$2x10^5$	$5x10^5$	$1x10^6$	$2x10^6$	$5x10^6$	$1x10^7$
		Tipo de Camada										
Categoria 7	Bom	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	125	175	100	150	150	150	150	150
		Sub-base granular					225	275	400	525	700	850
	Regular	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	175	100	100	150	150	150	150	150
		Sub-base granular				225	325	400	525	650	850	1000
	Ruim	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	150	100	100	100	150	150	150	150	150
		Sub-base granular			200	325	425	525	650	800	1000	1150
Categoria 8	Bom	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	150	200	100	150	150	150	150	150
		Sub-base granular					250	300	425	550	750	875
	Regular	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	100	175	100	100	150	150	150	150	150
		Sub-base granular				225	325	400	525	650	850	1.000
	Ruim	Blocos e camada de assentamento	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
		Base granular	100	150	100	100	100	150	150	150	150	150
		Sub-base granular			200	325	425	525	650	800	1.000	1.150

Fonte: Adaptado de Hein, Burak e Rada (2009)

2.5.1.3 Método de projeto empregado em Hokkaido – Japão

Kasahara, Komura e Ikeda (1992) descrevem o método de projeto publicado em 1988 pela *Association of Hokkaido Interlocking Block Manufacturers* (AHIBM) para vias com baixo volume de tráfego, com menos de 250 passagens diárias de caminhões, a qual baseia-se nas seguintes premissas:

- A capacidade de dissipação de carga do conjunto bloco de concreto mais colchão de areia é equivalente à capacidade de dissipação de carga do concreto asfáltico;
- A espessura de projeto do pavimento depende do CBR de projeto e do período de projeto de 10 anos (N);
- A espessura da camada de proteção contra o congelamento é a diferença entre a profundidade de penetração do gelo e a espessura de projeto.

A classificação das vias em função do número de repetições de eixo padrão de 50 kN, para um período de projeto de 10 anos, é apresentada no Quadro 2.14.

Quadro 2.14 - Classificação da via em função do tráfego no método da AHIBM

Classificação da via	Volume diário de tráfego comercial de veículos em mão única	Número total de carga de roda equivalente de 50 kN para um período de projeto de 10 anos
A	100 a 250	150.000
L1	40 a 99	30.000
L2	15 a 39	7.000
L3	5 a 14	1.500
L4	menos de 5	220

Fonte: Adaptado de Kasahara, Komura e Ikeda (1992)

Neste método, a espessura total do pavimento H e a espessura total requerida para o pavimento asfáltico TA são calculadas pelas Equações 3 e 4.

$$H = \frac{28 \cdot N^{0,1}}{CBR^{0,6}} \qquad \text{(cm)} \qquad (3)$$

$$TA = \frac{3,84 \cdot N^{0,16}}{CBR^{0,3}} \qquad \text{(cm)} \qquad (4)$$

A espessura individual de cada camada é determinada pela Equação 5:

$$TA = a_1 \cdot T_1 + a_2 \cdot T_2 + a_3 \cdot T_3 \qquad \text{(cm)} \qquad (5)$$

onde,

Os coeficientes relativos às tensões são:

$a_1 = 1$ para a camada de blocos de concreto mais camada de assentamento;

$a_2 = 0,35$ para camada de brita com CBR acima de 80%;

$a_3 = 0,25$ para camada de brita com CBR acima de 30%.

As espessuras individuais de cada camada são:

$T_1 =$ espessura da camada de blocos de concreto mais camada de assentamento;

$T_2 =$ espessura da camada de base;

$T_3 =$ espessura da camada de sub-base.

O Quadro 2.15 apresenta exemplos de projetos estruturais do PBC para diferentes classificações de vias e diferentes valores de CBR de projeto para o subleito, onde as espessuras das camadas são dadas em milímetros.

Quadro 2.15 - Exemplos de dimensionamentos estruturais de pavimentos de blocos de concreto segundo o critério da AHIBM

	Classificação da Via	CBR do subleito (%)				
		3%	4%	6%	8%	12%
Bloco de concreto (mm)	A	80	80	80	80	80
Camada de assentamento (mm)		30	30	30	30	30
Camada de base (mm)		100	350	300	250	100
Camada de sub - base (mm)		250	-	-	-	-
Bloco de concreto (mm)	L1	80	80	80	80	80
Camada de assentamento (mm)		30	30	30	30	30
Camada de base (mm)		300	250	200	150	100
Camada de sub - base (mm)		-	-	-	-	-
Bloco de concreto (mm)	L2	80	80	80	80	80
Camada de assentamento (mm)		30	30	30	30	30
Camada de base (mm)		200	150	100	100	100
Camada de sub - base (mm)		-	-	-	-	-
Bloco de concreto (mm)	L3	60	60	60	60	60
Camada de assentamento (mm)		30	30	30	30	30
Camada de base (mm)		200	150	100	100	100
Camada de sub - base (mm)		-	-	-	-	-
Bloco de concreto (mm)	L4	60	60	60	60	60
Camada de assentamento (mm)		30	30	30	30	30
Camada de base (mm)		150	100	100	100	100
Camada de sub - base (mm)		-	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de Kasahara, Komura e Ikeda (1992)

2.5.1.4 Método de projeto da INTERPAVE – Reino Unido

O manual da INTERPAVE (2012) fornece orientação sobre o projeto estrutural para várias aplicações do PBC no Reino Unido. Este item descreve o método recomendada pela INTERPAVE (2012), baseada na norma britânica BS 7533 (1992), para PBC sujeitos ao tráfego leve de veículos e PBC sujeitos ao tráfego pesado de veículos.

PAVIMENTOS SUJEITOS A BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO

Segundo a INTERPAVE (2012) a norma britânica BS 7533-2 (2002) fornece orientações sobre a concepção de pavimentos para baixo volume de tráfego para todas as áreas pavimentadas

sujeitas a cargas de eixos de até 110 kN. Isso se aplica a áreas de circulação em até $5x10^5$ repetições de eixo padrão que inclui ruas sem saída, calçadas, parques de estacionamento, áreas particulares, vias com pouco tráfego de veículos, parques privados e industriais e vias particulares.

A capacidade de carga do subleito deve ser obtida para que se possa determinar a espessura total da sub-base. A capacidade de suporte do subleito é definida pelo ensaio de CBR. O Quadro 2.16 a seguir pode ser usado como uma referência para aplicações típicas com base no número de veículos comerciais por dia (vc/dia).

Quadro 2.16 - Valores de referência para quantidades de veículos comerciais por dia para vias de baixo volume de tráfego

Categoria	Tráfego máximo ($x10^6$)	vc/dia	Aplicações típicas
I	> $5x10^5$		usar BS 7533-1
II	$5x10^5$	> 5	Estradas provisórias e outras vias
		< 5	Áreas de estacionamento com tráfego intenso ocasional Passeios sujeitos ao tráfego de veículos
III a		< 1	Áreas de pedestre com tráfego veicular ocasional
III b		zero	Áreas de estacionamento e passeios
IV			Áreas privadas, caminhos, pátios

Fonte: Adaptado de INTERPAVE (2012)

O período de projeto de 20 anos pode ser adotado para PBC. O volume de tráfego a ser transportado pelo pavimento é expresso em repetições de eixo padrão. Onde ocorre o tráfego canalizado nas rodovias e estradas, o fator de tráfego deve ser multiplicado por 3. Se a aplicação deste fator resultar em um valor maior do que $5x10^5$ repetições de eixo padrão, deve-se adotar o método da BS 7533-1 (2001).

A espessura da estrutura é determinada com base na categoria de aplicação e no CBR do subleito, e a espessura de cada camada obtida a partir do Quadro 2.17 que se segue.

Quadro 2.17 - Espessura das camadas do pavimento sujeito ao baixo volume de tráfego

Categoria	Sub-base [mm]					Base [mm]	Camada de assentamento [mm]	Espessura mínima dos blocos [mm]
	CBR							
	< 2%	3%	4%	5%	6%			
II	400	350	250	150	150	125	30	60
IIIa	350	300	225	150	150	0	30	50
	250	150	100	100	0	70	30	50
IIIb	300	250	175	100	100	0	30	50
IV	200	150	125	100	0	0	30	50

Fonte: Adaptado de INTERPAVE (2012)

PAVIMENTOS SUJEITOS A ALTO VOLUME DE TRÁFEGO

O procedimento para o projeto de pavimentação de vias sujeitas a alto volume de tráfego pode ser feito a partir da BS7533-1 (2001) na qual as orientações a seguir se baseiam.

Deve-se inicialmente estabelecer o CBR do subleito. Os valores utilizados para o CBR devem basear-se nos piores resultados obtidos. Avalia-se o número de veículos comerciais por dia (vc/dia) que passa em cada direção e determina-se o número de repetições de eixo padrão para o período de projeto desejado conforme o Quadro 2.18; a seguir, se faz a conversão de veículos comerciais por dia (vc/dia) para o número de repetições de eixo padrão.

Quadro 2.18 - Volume de tráfego acumulado em função do número de veículos comerciais por dia

Volume de tráfego (vc/dia)	Tráfego acumulado ($x10^6$)			
	Período de projeto de 20 anos		Período de projeto de 40 anos	
	Crescimento nulo	2% de crescimento	Crescimento nulo	2% de crescimento
30	0,2	0,3	0,4	0,6
120	0,8	1	2	3
250	2	3	6	9
500	6	8	15*	22*
1000	16	22*	-	-

* Volumes excedem o escopo da norma BS 7533: Parte 1

Fonte: Adaptado de INTERPAVE (2012)

Este Quadro 2.18 aplica-se a pavimentos normais, nos quais os veículos comerciais constituem menos de 50% do fluxo.

Um cuidado especial deve ser tomado na seleção do material da camada de assentamento, a ser utilizado em áreas sujeitas ao tráfego canalizado de carga pesada, particularmente em áreas de alta pluviosidade. A espessura do bloco mínimo para vias que têm em média mais do que 5 veículos comerciais por dia deve ser de 80 mm. Em casos de menor fluidez a espessura do bloco pode ser de 50 mm.

Em alguns casos, deve-se levar em conta, por exemplo, efeitos de carga não usuais ou particularmente pesadas ou ainda outras condições, a saber:

- Onde se espera tráfego canalizado, o volume de tráfego deve ser triplicado antes de levar a cabo o projeto, para permitir o aumento da aplicação de cargas concentradas em um local específico no pavimento. Larguras de faixa normais em uma rodovia geralmente não constituem tráfego canalizado, mas o tráfego canalizado pode desenvolver-se em qualquer via, por exemplo, em regiões íngremes, nas proximidades de sinais de trânsito e em pontos críticos;
- Onde são esperadas velocidades superiores a 50 km/h, o tráfego acumulado deve ser duplicado antes de realizar o projeto para permitir efeitos de carregamento dinâmico;
- Quando ocorrem tráfego canalizado e velocidades superiores a 50 km/h, apenas o multiplicador maior, ou seja, três, deve ser aplicado;
- Pavimentos construídos sobre solos suscetíveis a congelamento devem ter uma espessura total de material não-suscetível ao congelamento não inferior a 450 mm (base mais sub-base).

O Quadro 2.19 apresenta a espessura da camada de reforço de subleito mais a espessura da camada de sub-base, ou apenas a espessura da camada de sub-base, onde se verifica que as espessuras são dependentes do valor do CBR do subleito e do tráfego. Utilizando a combinação da camada de reforço de subleito com a sub-base, ou sub-base apenas, pode-se resultar na criação de um pavimento de desempenho estrutural equivalente.

Quadro 2.19 - Espessura das camadas de sub-base mais reforço ou apenas sub-base (mm)

Opções Estruturais		CBR < 2%	2% < CBR < 3%	3% < CBR < 4%	4% < CBR < 5%	5% < CBR < 10%	10% < CBR < 15%	15% < CBR < 30%
Não trafegadas	Sub-base + Reforço de Subleito	150	150	Utilizar apenas sub-base				
		150	150					
	Apenas sub-base		170	150				
Acima de 4 habitações, 2000m² ou 100 eixos padrão	Sub-base + Reforço de Subleito	150	150	150	Utilizar apenas sub-base			
		210	180	150				
	Apenas sub-base		250	190	160	150	150	150
Acima de 20 habitações ou 200 eixos padrão	Sub-base + Reforço de Subleito	150						
		370	250	170	160	150	150	0
	Apenas sub-base		310	250	210	180	150	150
Acima de 50 habitações, 5000m² de área comercial ou 500 eixos padrão	Sub-base + Reforço de Subleito	150						
		470	340	250	220	200	150	0
	Apenas sub-base		350	270	230	200	160	150
Acima de 80 habitações, 8000m² de área comercial ou 1000 eixos padrão	Sub-base + Reforço de Subleito	150						
		600	450	350	300	250	180	0
	Apenas sub-base		400	310	270	225	180	150
Grande desenvolvimento 5000m²	Sub-base + Reforço de Subleito	200		150				
		600	450	450	350	300	250	150
	Apenas sub-base		450	350	310	270	240	225

Fonte: Adaptado de INTERPAVE (2012)

O número de eixos padrão no Quadro 2.19 é baseado no tráfego durante a fase de construção, ou seja, os que se destinam a impor carregamento sobre a sub-base durante o período de construção.

A espessura nominal compactada da camada de assentamento colocada sobre uma sub-base de material granular deve ser de 50 mm. Quando usada base tratada com cimento, pode-se utilizar uma camada de assentamento mais fina, porém em nenhum local a espessura da camada de assentamento compactada deve ser inferior a 30 mm.

A espessura de base necessária pode ser determinada a partir do número de repetição de eixos padrão ao longo da vida útil do pavimento e o tipo de base empregada, a partir do Quadro 2.20:

Quadro 2.20 - Espessura da camada de base, camada de assentamento e blocos de concreto

Repetições de eixo padrão ($x10^6$)	Espessura de base cimentada CBM3 [mm]	Espessura de base de macadame denso [mm]	Espessura da camada de assentamento [mm]	Espessura dos blocos [mm]
0,5 a 1,5	130	130	30	50, 60, 65 ou 80
> 1,5 a 4	150	150		60
	145	145		65
	130	130		80
> 4 a 8	195	170		65
	180	155		80
> 8 a 12	230	170		

Nota: CBM3 (*Cement Bound Material*) material estabilizado com cimento, com resistência à compressão aos 7 dias igual a 10 MPa, equivalente a uma brita graduada tratada com cimento (BGTC) ou CCR.

Fonte: Adaptado de INTERPAVE (2012)

2.5.1.5 Métodos de projeto desenvolvidos por Shackel

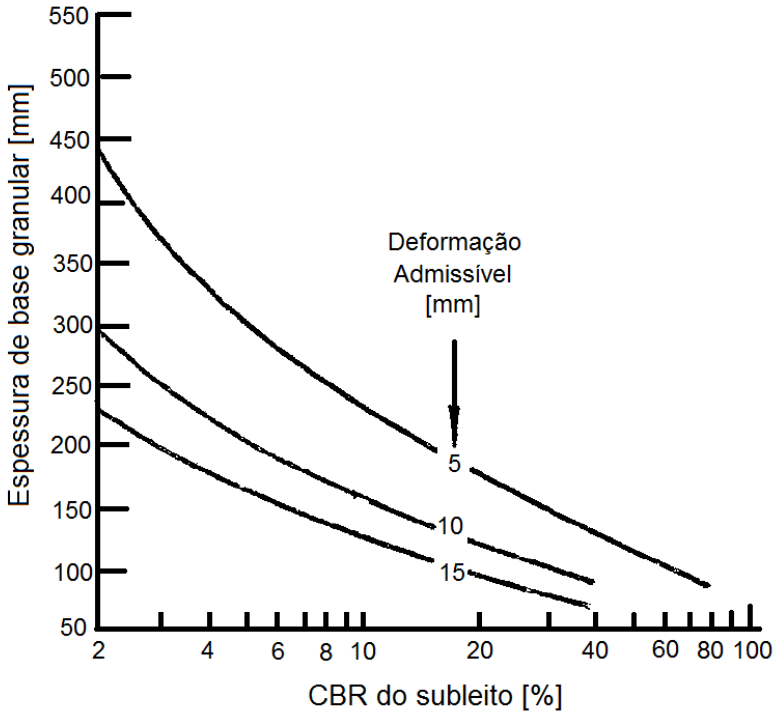
MÉTODO DE PROJETO AUSTRALIANO (1984)

O método de dimensionamento desenvolvido por Shackel (1984), em colaboração com o *Cement and Concrete Association of Australia* (CCAA), aplica-se a pavimentos rodoviários. Após a escolha do tipo de bloco, espessura e padrão de assentamento, o procedimento de projeto necessita dos seguintes parâmetros de entrada para a concepção do PBC:

- Carga de roda ou de eixo, em kN;
- Número de repetições de eixo padrão;
- Pressão dos pneumáticos, em MPa;
- Capacidade de suporte do subleito CBR.

O método aplica-se a carga máxima legal permitida em rodovias na Austrália, que é de 80 kN. Além disso, o método considera a utilização de base granular ou um material estabilizado com cimento. Em geral, a utilização de base tratada com cimento é indicada em locais que apresentem valores relativamente baixos de CBR, tipicamente menores do que 10%. A curva de projeto apresentada na Figura 2.27 define a espessura de base granular a ser empregada, em função do CBR do subleito.

Figura 2.27 - Espessura da base granular do pavimento rodoviário para bloco de espessura de 80 mm



Fonte: Adaptado de Shackel (1984)

Para aplicação das curvas é necessária a especificação da deformação permanente admissível (afundamento em trilha de roda). O CCAA recomenda deformações associadas ao tráfego

entre 5 e 10 mm para rodovias de tráfego pesado e terminais de ônibus, enquanto que para ruas residenciais de tráfego leve são admitidas deformações permanentes de até 15 mm.

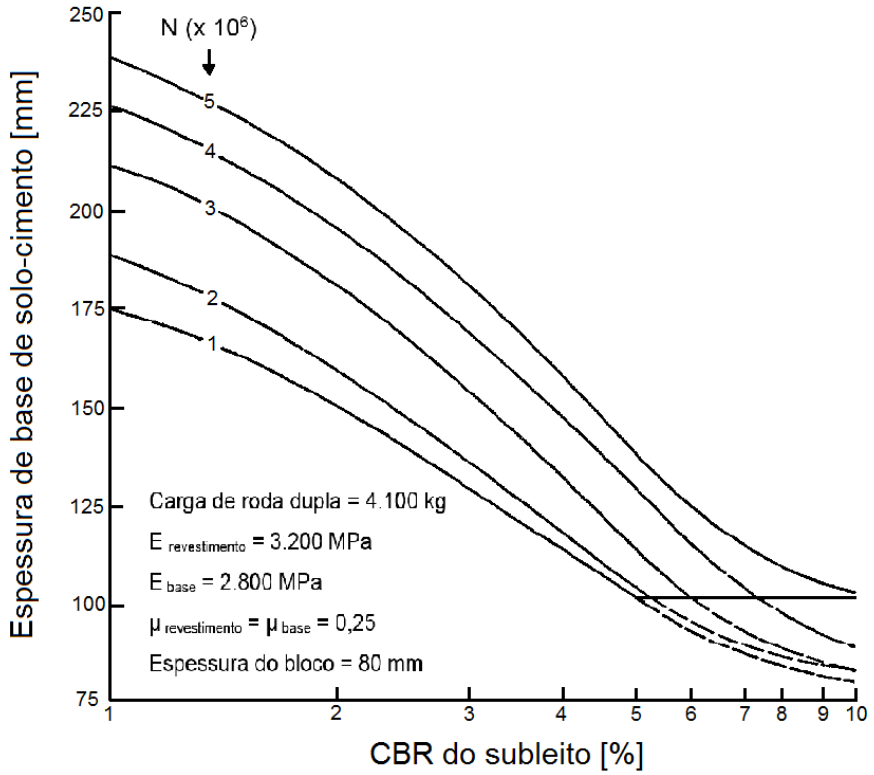
Para o emprego de bases estabilizadas, Shackel (1984) considera o horizonte de projeto de uma base estabilizada como o somatório de dois critérios, sendo a fissuração devido à fadiga e afundamentos de trilhas de rodas. Considerando-se o emprego de solo-cimento, cujo módulo de resiliência da base não fissurada seja de 2.800 MPa e que, depois de fissurado, pode-se considerar que o material apresente um módulo efetivo de apenas 280 MPa. Já o revestimento (que compreende os blocos mais camada de assentamento), assume-se que seu módulo de resiliência é da ordem de 3.200 MPa.

O método de projeto apresentado na Figura 2.28 foi desenvolvido com base nos seguintes parâmetros:

- Carga de roda dupla de 40 kN;
- Número N superior a 1×10^6;
- Blocos de concreto segmentados (blocos de 16 faces) de 80 mm de espessura;
- Coeficiente de *Poisson* das camadas igual a 0,25.

Segundo o autor, devido à pressão dos pneumáticos variar entre 0,5 e 0,8 MPa, ela pode ser desprezada como um parâmetro de projeto por ter pouca influência no resultado.

Figura 2.28 - Espessura da base de solo-cimento em função do N de projeto e do CBR do subleito



Fonte: Adaptado de Shackel (1984)

MÉTODO LOCKPAVE

De acordo com Shackel (2000a), o método mecanicista desenvolvido a partir de meados da década de 1980 tem por base o programa LOCKPAVE e é usado em diversas regiões incluindo Austrália, América do Norte, Europa, África do Sul e Ásia. Conforme explica Shackel (1986), seja para uma rodovia ou uma área industrial, o método baseia-se nos seguintes fatores:

- Características de carregamento;
- Fatores ambientais;
- Desempenho do pavimento em serviço.

CARGA DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO

Com a finalidade de caracterizar um fluxo de veículos mistos, pode-se empregar o conceito de eixo padrão equivalente (EPE). Normalmente, este é escolhido para corresponder à máxima carga por eixo legalmente permitido. O tráfego real é então substituído para fins de concepção

por um número equivalente de EPEs calculados com base no efeito de dano de um veículo e é proporcional à relação da sua carga por eixo elevada a alguma potência, *n*. Em outras palavras, repetições N_1 de uma carga por eixo, w, é equivalente a N_2 cargas equivalentes por eixo padrão onde (Equação 6):

$$N_2 = \left(\frac{w}{EPE}\right)^n \cdot N_1 \qquad (6)$$

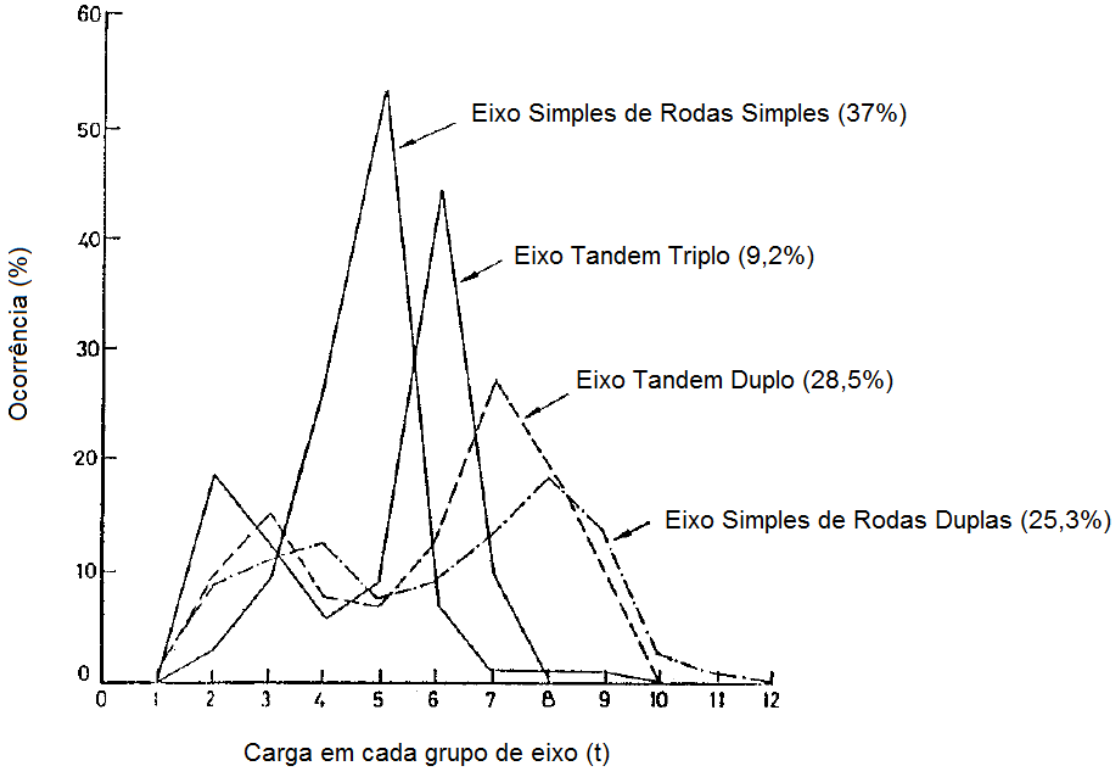
A potência, *n*, na Equação 6 é assumida normalmente como 4, embora testes de tráfego acelerado realizados pelo autor e outros, de uma variedade de pavimentos, revelaram que, na prática, *n* varia entre 2 e 6, dependendo dos materiais de pavimentação, sequência e espessura das camadas.

Shackel (1986; 2000a) discute que o conceito representado pela Equação 6 é amplamente utilizado na concepção de pavimentos asfálticos, mas deve ser tratado com cautela em projetos para PBC. Segundo o autor, conforme observado em muitos estudos, PBC tendem a enrijecer sob o tráfego. Por conseguinte, eles tornam-se menos sensíveis às cargas com a passagem do tempo. Além disso, não há nenhuma evidência para sugerir que a "lei da quarta potência" representada pela Equação 6 ou qualquer conceito de dano semelhante aplica-se ao PBC. Pelo contrário, os dados existentes sugerem que, pelo menos, para cargas de roda até 70 kN, nem as magnitudes, nem o número de veículos carregados têm qualquer efeito substancial sobre a resposta de um PBC uma vez alcançado o intertravamento. Em outras palavras, o conceito de equivalência entre cargas não se aplica a PBC.

A alternativa preferida para a utilização de equivalências de carga no eixo é a concepção do pavimento para as distribuições de números reais de veículos e cargas previstas a partir de estudos de tráfego. A desvantagem desta abordagem é que o efeito de cada uma das cargas sobre os eixos que formam a distribuição deve ser calculado separadamente e depois somado sobre o espectro completo do tráfego. Isto aumenta grandemente a quantidade de computação necessária; no entanto, os cálculos podem ser simplificados através da adoção de uma distribuição idealizada de cargas por eixo com base em pesquisas de tráfego. Por

exemplo, a Figura 2.29 apresenta a distribuição de veículos de cargas comerciais recomendadas para projetos de pavimentos rodoviários na Austrália.

Figura 2.29 - Distribuição de veículos de cargas comerciais recomendada para projetos de pavimentos rodoviários na Austrália



Fonte: Adaptado de Shackel (1986)

SOBRECARGA E FATORES DE SEGURANÇA

O método admite a aplicação de fatores de segurança nos cálculos para garantir que as tensões e deformações previstas em serviço se encontrem muito abaixo dos valores teoricamente toleráveis. No entanto, o autor esclarece que devido aos PBC tenderem a tornar-se menos sensíveis à carga sob o tráfego, o fator de segurança tende a aumentar com o tempo. Por esta razão, exceto nos estágios iniciais do tráfego, PBC são menos propensos a ser danificados por sobrecarga do que pavimentos flexíveis ou rígidos.

FATORES AMBIENTAIS

A maioria dos tipos de pavimentos são sensíveis a fatores ambientais, dos quais a temperatura é o mais importante. Em contraste com outros tipos de revestimentos, não há evidências de que as características estruturais dos PBC sejam afetadas pela temperatura. Em outras palavras os blocos de concreto não sofrem influência da temperatura.

CRITÉRIOS DE DESEMPENHO

O método considera como critérios de desempenho as deflexões e deformações permanentes no PBC. Segundo Shackel (2002a), PBC podem rotineiramente tolerar deflexões muito maiores do que pavimentos convencionais, sem perda de serventia. Isto significa que a rigidez global de um PBC pode, muitas vezes, ser muito menor do que um pavimento convencional. A este respeito, pavimento de bloco pode consistentemente apresentar deflexões de 200×10^{-2} mm ou mais, sem apresentar patologias, enquanto pavimentos de concreto e pavimentos asfálticos são limitados a valores bem inferiores.

Quanto às deformações permanentes, o autor faz a seguinte consideração: antes de ser intertravado, o PBC não deve acumular mais de 5 ou 10 mm de deformação permanente em aplicações de tráfego urbano, e não mais de 15 a 20 mm em aplicações rurais ou industriais. No geral, o controle dos níveis de afundamentos em trilhas de roda representa o principal critério de projeto para PBC.

PROCEDIMENTO MECANICISTA PARA PROJETO DO PBC

O método é constituído por dois procedimentos sequenciais, englobando:

- Dados de entrada – compreendem a escolha de materiais de pavimentação e a modelagem desses dados de projeto necessários pelo programa, sendo eles:
    - As propriedades dos materiais de revestimento, base e sub-base;
    - A capacidade de suporte do subleito;
    - As cargas de projeto.
- Projeto do pavimento – compreende os cálculos sistemáticos de espessura das camadas para os vários materiais escolhidos para compor o pavimento.

MÉTODO DE PROJETO DO PAVIMENTO

Uma vez que os dados de entrada foram determinados, o projetista deve decidir se quer ou não usar uma sub-base. Essencialmente, esta é uma decisão econômica que pode ser facilmente realizada através da execução de uma série de projetos alternativos. No entanto, como há uma ampla generalização, a decisão de utilizar uma sub-base apenas será justificada onde:

- O subleito é pouco resistente (CBR < 5%);
- As cargas por eixo são elevadas;
- Os materiais de base disponíveis são muito custosos.

O programa executa os seguintes passos para elaboração do projeto:

(a) As cargas a serem suportadas pelo pavimento são expressas em termos de um espectro de cargas por eixo de projeto;

(b) As camadas de base e sub-base são especificadas em termos de ser tanto materiais granulares ou estabilizados com cimento. Segundo Shackel (2000a) o procedimento leva em consideração que as características de fadiga destas duas categorias de materiais são bastante diferentes umas das outras;

(c) O subleito é caracterizado em termos de um valor de CBR que é então relacionado com um módulo de resiliência usando a Equação (1) para pavimentos industriais ou Equação (2) para rodovias (ver item 2.4.5);

(d) A espessura do bloco é especificada (para a maioria dos casos práticos, uma espessura de 80 mm de blocos segmentados (por exemplo, blocos de 16 faces) é empregada de forma adequada);

(e) O programa seleciona espessura teste (> 100 mm) da base ou sub-base;

(f) Para cada um dos eixos, a distribuição de tensões e deformações é calculada. No caso de materiais granulares, as camadas de base ou sub-base são automaticamente subdivididas em três camadas mais esbeltas, às quais são atribuídos valores do módulo de resiliência em função da rigidez das camadas subjacentes, de acordo com os critérios desenvolvidos para pavimentos flexíveis convencionais. Desta maneira, os materiais granulares são tratados como sendo dependentes da tensão de confinamento (não lineares);

(g) Tendo calculado a distribuição de tensões e deformações, o número de repetições dessas magnitudes de tensões e deformações que o pavimento pode suportar antes da falha são calculados de acordo com os critérios de desempenho / danos (tais como a hipótese de Palmgren-Miner e as tensões e deformações admissíveis nas camadas do pavimento);

(h) Os passos (f) e (g) são, então, repetidos para os demais eixos de projeto e o fator de dano acumulado é calculado usando a hipótese de Palmgren-Miner (Equação 7). Se o fator exceder a unidade da espessura de teste são feitos incrementos progressivos (ou seja, os passos. (e), (f) e (g) são repetidos) até que possa ser verificado que o pavimento tenha capacidade suficiente para suportar todo o espectro de fadiga e danos previstos. Assim, o programa assume inicialmente um valor de capacidade de suporte da sub-base e determina uma espessura de base adequada. A espessura da sub-base correspondente é então calculada. Na estimativa do suporte de sub-base, assume-se, de forma conservadora, que, independentemente do tipo de material de sub-base, ela se comporta como um material granular com um módulo de resiliência dependente da tensão, que não será superior a 225 MPa para material granular ou 400 MPa para sub-base estabilizada com cimento.

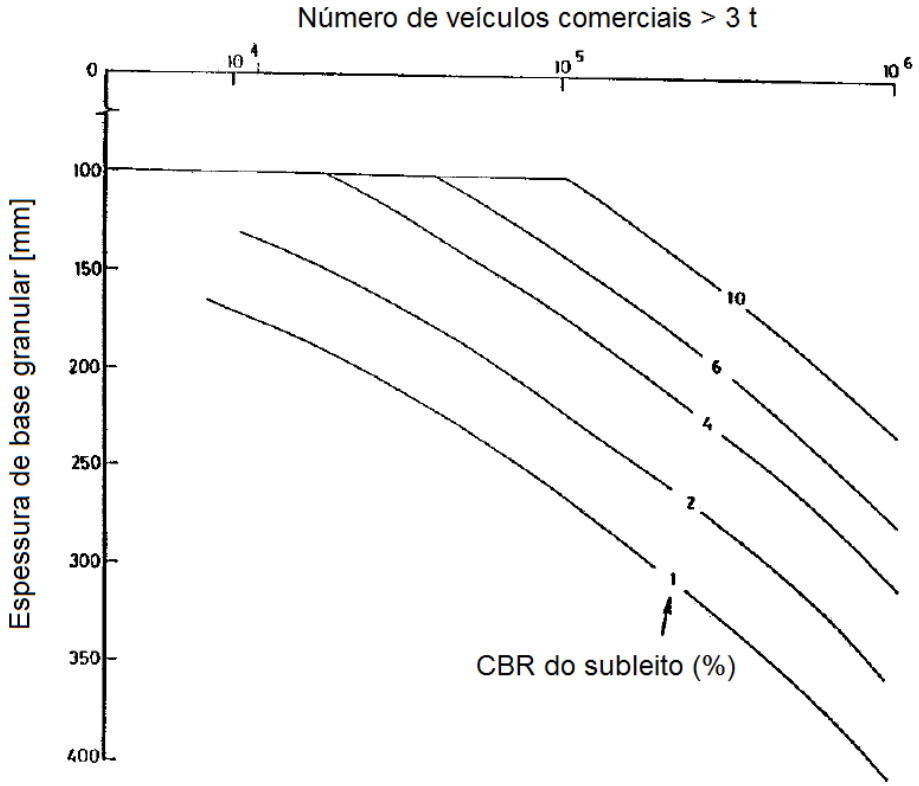
$$\sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} = 1 \qquad (7)$$

onde: N_i é o número de ciclos até a falha no nível de tensão i, e n_i é o número de ciclos adotadas ao nível de tensão i.

CURVAS DE PROJETO

Para rodovias, o tráfego é assumido para seguir o espectro de carregamento dado na Figura 2.29. Em todos os casos, a pressão dos pneumáticos foi assumida como sendo 0,7 MPa. As curvas de projeto resultantes são apresentadas na Figura 2.30.

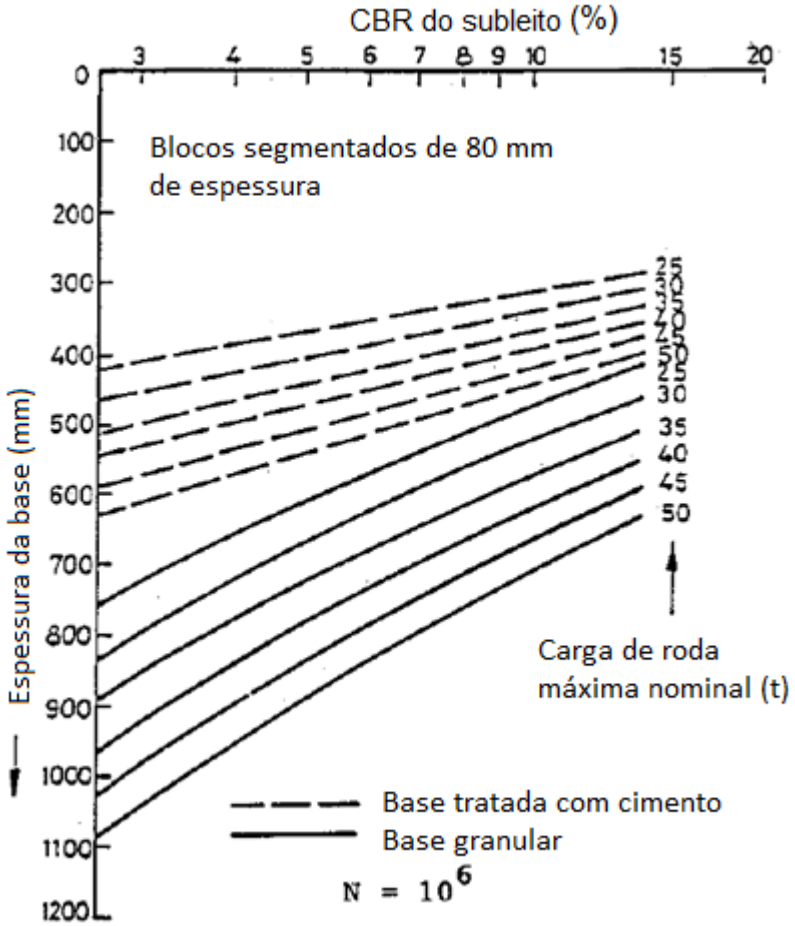
Figura 2.30 - Curvas de projeto para pavimento rodoviário



Fonte: Adaptado de Shackel (1986)

A Figura 2.31 apresenta as curvas de projeto para pavimentos industriais sujeitos a um único veículo de projeto.

Figura 2.31 - Curvas de projeto para pavimentos industriais



Fonte: Adaptado de Shackel (1986)

2.5.2 Métodos nacionais de dimensionamento do PBC

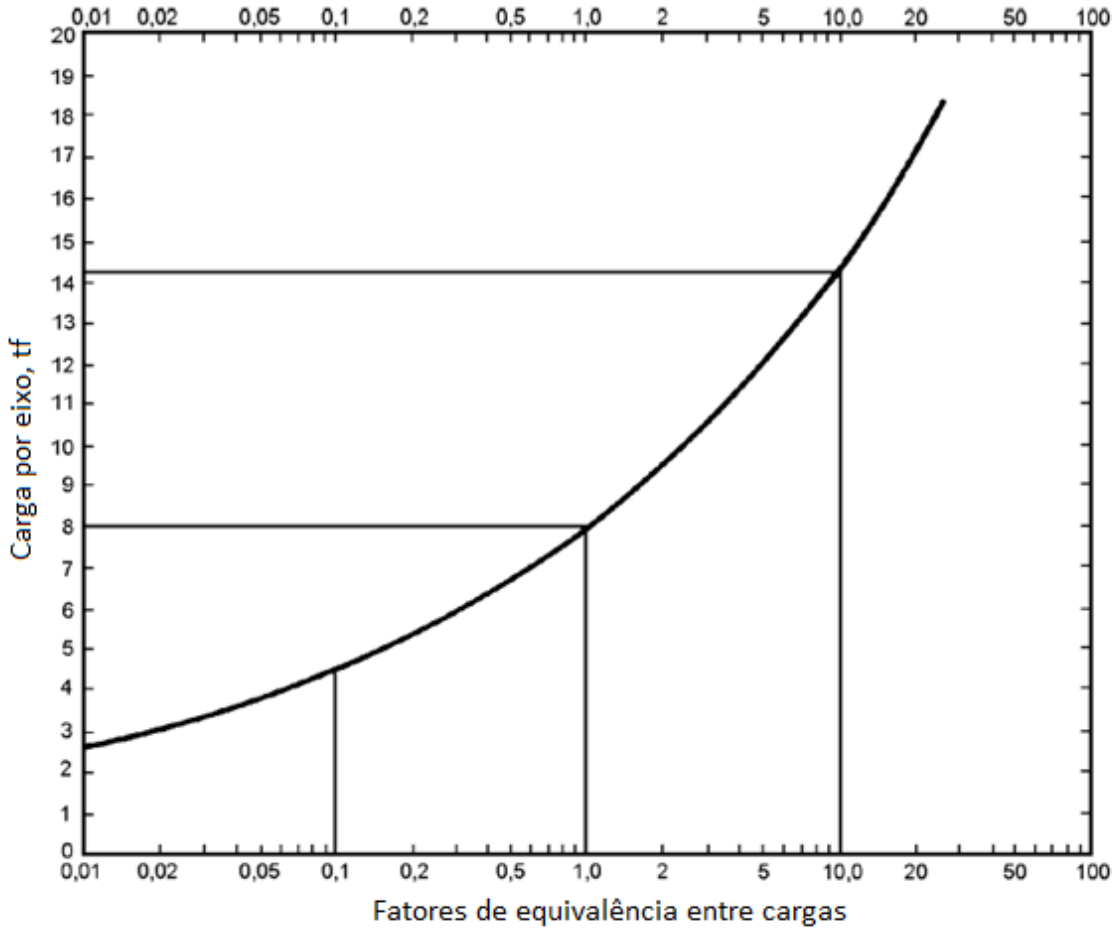
2.5.2.1 Método de projeto da ABCP

Segundo Carvalho (1998), o método de projeto proposto pela ABCP é uma adaptação do método concebido por Lilley e Walker[7] e é destinado a aplicação em pavimentos sujeitos ao tráfego de veículos comerciais.

[7] LILLEY, A. A.; WALKER, B. J. **Concrete block paving for heavily trafficked roads and paved areas**. C.C.A, London, 1978.

O procedimento se baseia na utilização de curvas de projeto. A curva de projeto apresentada na Figura 2.32 baseia-se no número de solicitações equivalentes de eixo padrão de 80 kN.

Figura 2.32 - Efeito progressivo das diversas cargas por eixo simples



Fonte: Carvalho (1998)

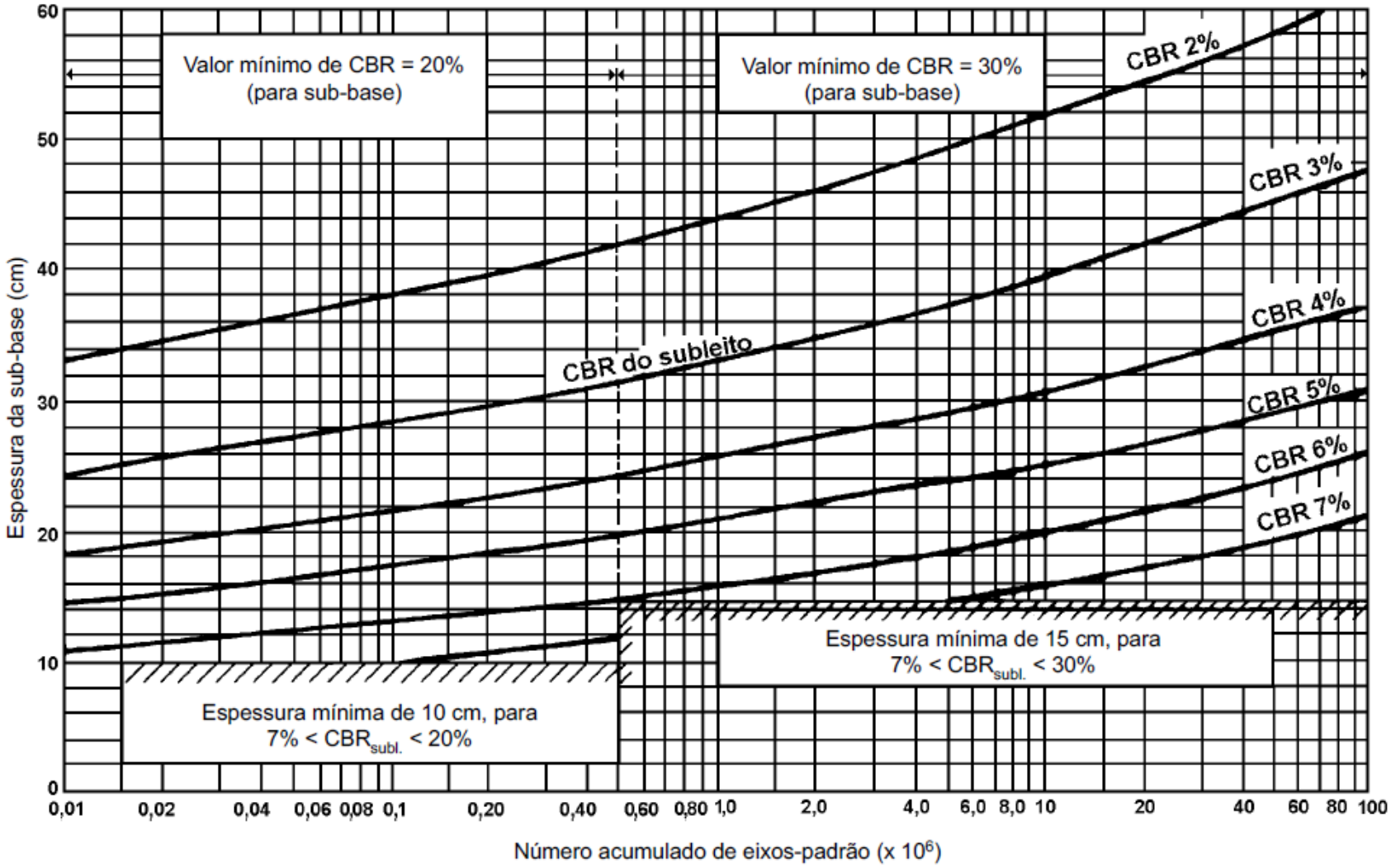
Por meio desta curva obtém-se o fator de equivalência entre cargas a ser multiplicado pelo número previsto de solicitações diárias, o que resultará no número equivalente de solicitações diárias de carga de eixo padrão, devendo-se considerar, para casos de eixos tandem duplos (ETD) ou eixos tandem triplos (ETT), a carga total como sendo dividida por 2 ou 3 eixos simples, respectivamente.

As espessuras de sub-base necessárias, são determinadas em função do valor de CBR do subleito e do número de solicitações do eixo padrão (N) a qual é apresentada na segunda curva de projeto (Figura 2.33).

O método de projeto apresenta as seguintes recomendações:

- Quando $N \geq 0{,}5 \times 10^6$, o material de sub-base deve apresentar um CBR mínimo de 30%;
- Quando $N < 0{,}5 \times 10^6$, o material de sub-base deve apresentar um CBR mínimo de 20%;
- Quando $N < 0{,}5 \times 10^6$ e o subleito apresentar um CBR igual ou superior a 20%, não é necessária a camada de sub-base;
- Quando $N \geq 0{,}5 \times 10^6$ e o subleito apresentar um CBR igual ou superior a 30%, não é necessária a camada de sub-base.

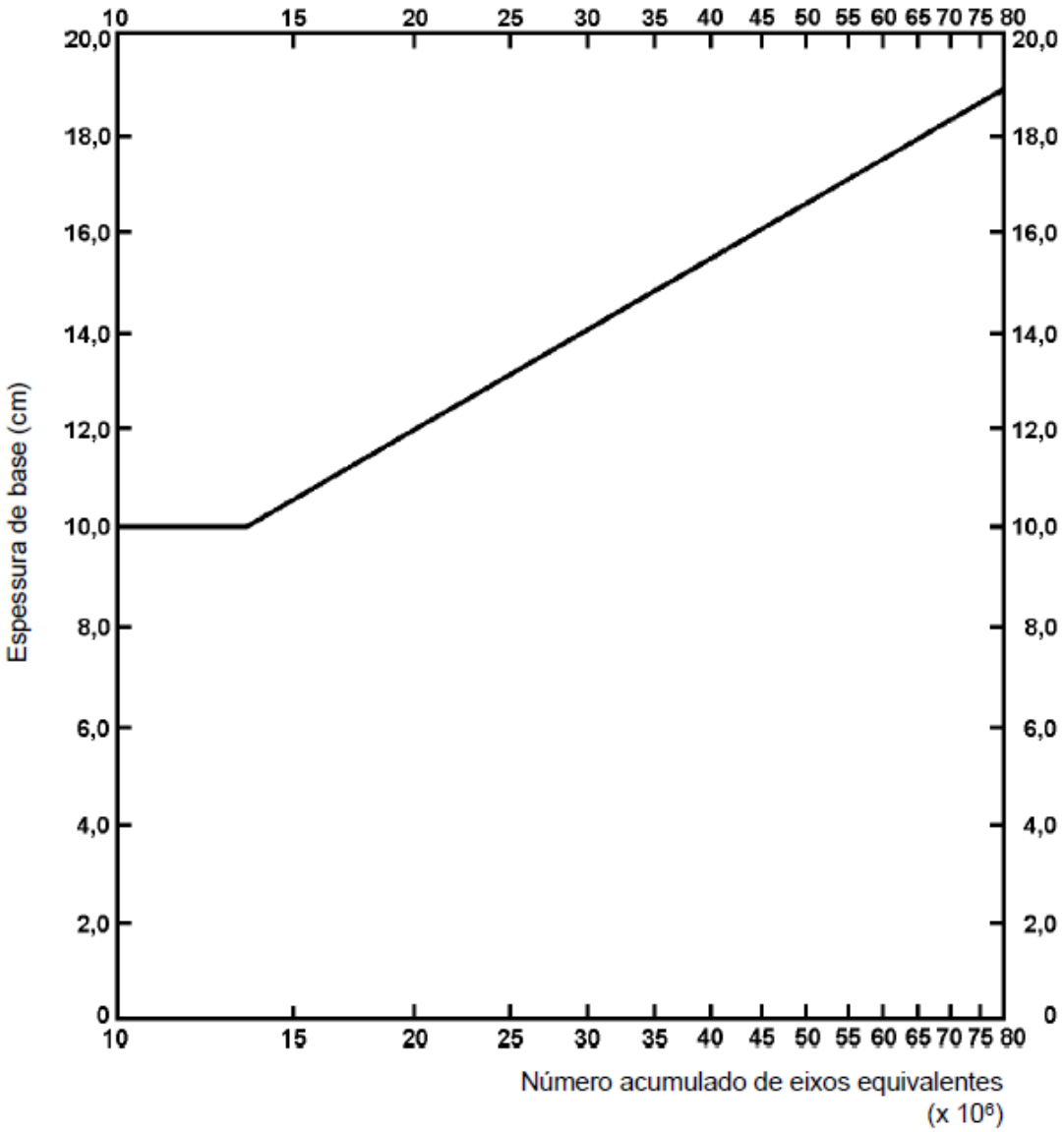
Figura 2.33 - Espessura necessária de sub-base



Fonte: Carvalho (1998)

Por fim, a espessura necessária de base de concreto compactado com rolo ou solo-cimento, em função do número de solicitações do eixo padrão é determinada com base na Figura 2.34. O método em questão considera não ser necessário o emprego de camada de base para um número (N) de solicitações de eixo padrão inferiores a 1,5 x 10^6. Todavia, recomenda-se o emprego de espessura mínima de 10 cm de camada de base para os casos em que o número (N) estiver entre 1,5 x 10^6 e 10^7.

Figura 2.34 - Espessura necessária de base de concreto compactado com rolo ou solo-cimento



Fonte: Carvalho (1998)

2.5.2.2 Método do DNIT

O método de dimensionamento do PBC do DNIT (2005) encontra-se no “Manual de Pavimentos Rígidos” do órgão e é direcionado para aplicação, segundo o próprio DNIT, principalmente em acostamentos, recuos, pátios e outros locais onde o tráfego, além de ser pequeno, flui com baixa velocidade.

O método leva em consideração o CBR do subleito e a carga de roda em “toneladas-força” para dimensionar a espessura total da estrutura de pavimento. A camada de assentamento é considerada como camada de base que pode ser composta por areia ou pó-de-pedra, com espessura igual a 4 cm. Empregando-se apenas 50% da carga por roda, a espessura do pavimento é determinada pela Equação 8:

$$e = \frac{150+150\sqrt{\frac{P}{2}}}{Is+5} \qquad (8)$$

onde:

e = espessura total do pavimento, em cm;

P = carga por roda, em tf;

Is = CBR do subleito, em %.

A espessura da base (camada de assentamento) e revestimento do PBC, é dado pela Equação 9:

$$e_{base+revestimento} = e_{peça} + 4\ cm \qquad (9)$$

Para se determinar a espessura necessária de sub-base, deve-se subtrair da espessura total do pavimento a espessura da base mais revestimento, conforme a Equação 10:

$$e_{sub-base} = e - e_{base+revestimento} \quad (10)$$

O método não deixa claro o motivo de se empregar apenas 50% da carga por roda no dimensionamento da espessura total da estrutura de pavimento. Além disso, embora o órgão recomende expressamente o uso em áreas de baixo volume de tráfego e baixas velocidades, estranha-se o fato do método não levar em conta o tráfego – normalmente descrito na forma do número de repetições de eixo padrão (N) – de projeto, e também por não descrever quais materiais devem ser empregados nas camadas subjacentes, além de não indicar se existem coeficientes de equivalência estrutural entre materiais. Nesses aspectos torna-se um método obsoleto face as atuais tecnologias de projeto.

2.5.2.3 Método da PMSP

O método de dimensionamento da PMSP (2004) para PBC intertravados descrita na instrução de projeto IP-06/2004, segundo a própria PMSP, é aconselhada para ser empregada, preferencialmente, em vias de baixo volume de tráfego.

Quanto à caracterização do tráfego, o método de dimensionamento considera que a carga máxima legal no Brasil é de 100 kN para o eixo simples de rodas duplas (ESRD). Os principais parâmetros de classificação das vias, obtidos da referida instrução, são resumidos no Quadro 2.21.

Quadro 2.21 - Classificação de tráfego das vias

Função predominante	Tráfego previsto	Período de projeto	Volume inicial faixa mais carregada		Equivalente/ Veículo	N	N Característico
			Veículo Leve	Caminhões/ Ônibus			
Via Local	Leve	10	100 a 400	4 a 20	1,50	$2,70 \times 10^4$ a $1,40 \times 10^5$	1×10^5
Via Local e Coletora	Médio	10	401 a 1500	21 a 100	1,50	$1,40 \times 10^5$ a $6,80 \times 10^5$	5×10^5
Vias Coletoras e Estruturais	Meio pesado	10	1501 a 5000	101 a 300	2,30	$1,40 \times 10^6$ a $3,10 \times 10^6$	2×10^6
	Pesado	12	5001 a 10000	301 a 1000	5,90	$1,00 \times 10^7$ a $3,30 \times 10^7$	2×10^7
	Muito pesado	12	> 10000	1001 a 2000	5,90	$3,30 \times 10^7$ a $6,70 \times 10^7$	5×10^7
Faixa Exclusiva de Ônibus	Volume Médio	12		< 500		$3,00 \times 10^6$	1×10^7
	Volume Pesado	12		> 500		$5,00 \times 10^7$	5×10^7

Fonte: PMSP (2004)

A estrutura do PBC é então dimensionada por dois procedimentos de cálculo distintos, utilizando-se, basicamente, de gráficos de leitura direta, de onde se extraem as espessuras necessárias que compõem as camadas do PBC, em função do número N de solicitações de eixo padrão.

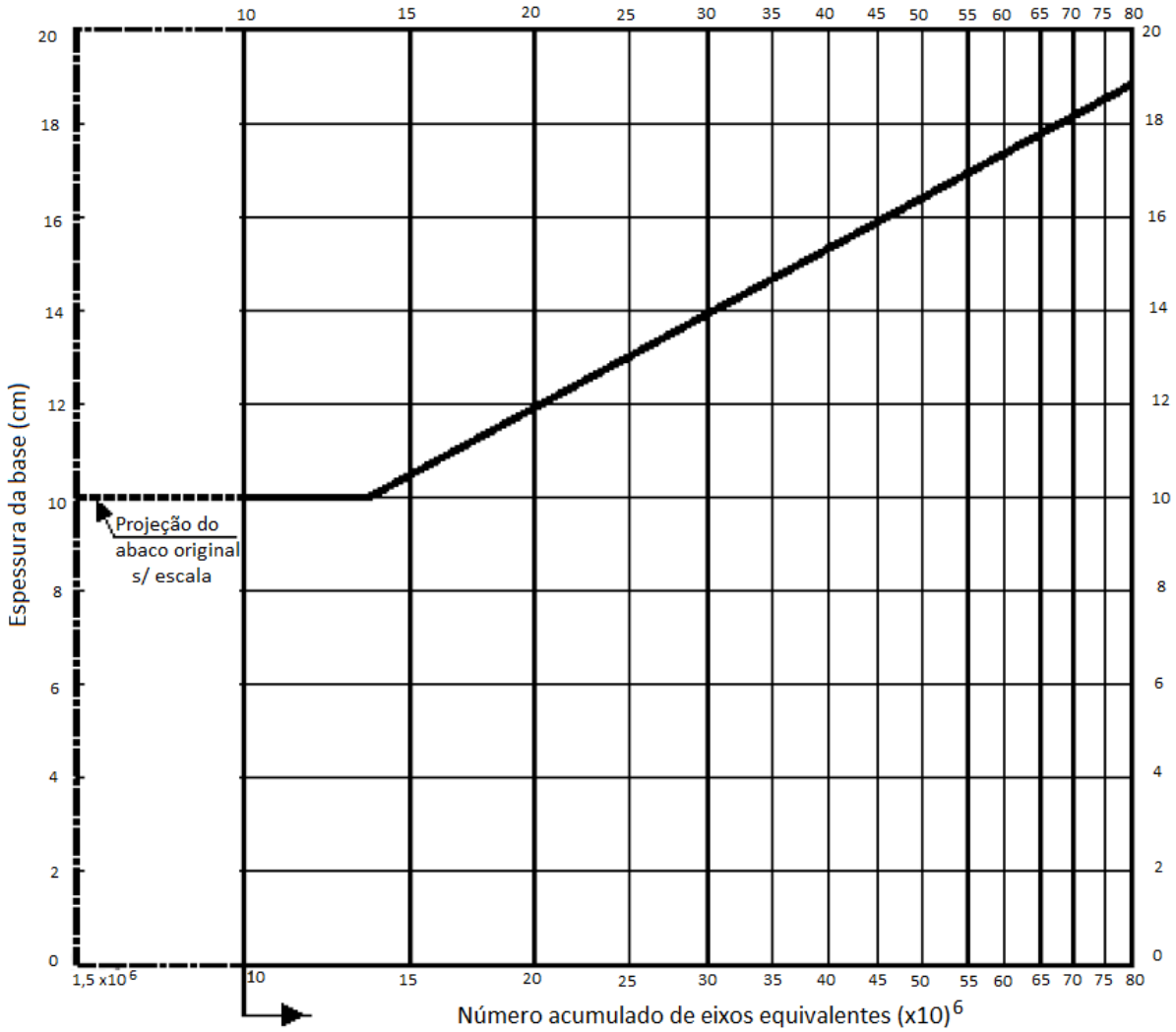
O primeiro procedimento (Procedimento A) é baseado no estudo técnico ET-27 da ABCP – também encontrado em Carvalho (1998) – e é recomendado para vias de tráfego leve onde o número de solicitações do eixo padrão esteja limitado a $N \leq 10^5$. De acordo coma a PMSP (2004), o emprego deste procedimento, para este nível de tráfego, resulta em estruturas mais esbeltas e economicamente mais viáveis quando comparado ao procedimento B, devido não ser necessária a utilização da camada de base.

O segundo procedimento (Procedimento B) é baseado no método da *Portland Cement Association* (PCA) e, de acordo com a PMSP (2004), é mais indicado para o dimensionamento de vias de tráfego médio a meio pesado, onde o número de solicitações de eixo padrão varia entre $1,4 \times 10^5 \leq N \leq 3,1 \times 10^6$.

O Procedimento A utiliza, para o dimensionamento da estrutura do pavimento, os gráficos de leitura direta, conforme apresentado na Figura 2.33 (anterior), a qual fornece as espessuras necessárias de sub-base em função do valor de CBR do subleito e do número N de solicitações, e da Figura 2.35, que por sua vez determina a espessura da base cimentada em função do número N, onde:

- Para tráfego com $N < 1{,}5 \times 10^6$, a camada de base não é necessária;
- Para tráfego com $1{,}5 \times 10^6 \leq N < 1{,}0 \times 10^7$, a espessura mínima da camada de base cimentada será de 10 cm;
- Para tráfego $N \geq 10^7$, a espessura de base cimentada será determinada através da Figura 2.35.

Figura 2.35 - Espessura da base cimentada em função do número N



Fonte: PMSP (2004)

O método emprega a espessura dos blocos do revestimento em função do número N, conforme apresentado no Quadro 2.22.

Quadro 2.22 - Espessura e resistência dos blocos de revestimento – Procedimento A

Tráfego	**Espessura revestimento (cm)**	**Resistência à compressão simples (MPa)**
$N \leq 5x10^5$	6	35
$5x10^5 < N < 0^7$	8	35 a 50
$N \geq 10^7$	10	50

Fonte: PMSP (2004)

De acordo com a PMSP (2004), o Procedimento B determina a espessura de base puramente granular (H_{BG}) em função do número de solicitações de eixo padrão N e do valor do CBR do subleito, através do Quadro 2.23. O procedimento admite a adoção de bases tratadas com cimento, atribuindo um coeficiente de equivalência estrutural igual a 1,65. Após determinado o valor de H_{BG}, é possível determinar a espessura de uma camada de base cimentada em função do coeficiente de equivalência estrutural adotado (K_{BC}= 1,65), conforme a Equação 11. O procedimento recomenda que as espessuras mínimas para camadas de base sejam de:

- 15 cm para materiais puramente granulares;
- 10 cm para materiais tratados com ligante hidráulico.

$$H_{BC} = \frac{H_{BG} - H_{SBG}}{K_{BC}} \quad \text{(cm)} \qquad (11)$$

onde,

H_{BC} = espessura de base cimentada, em cm;

H_{BG} = espessura de base granular, em cm;

H_{SBG} = espessura de sub-base granular, em cm;

K_{BC} = coeficiente estrutural da camada cimentada.

De acordo com o procedimento B da PMSP (2004), os blocos pré-moldados de concreto devem atender a espessura mínima de 8 cm. Blocos de 10 cm de espessura devem ser empregados para os casos em que ocorra condições mais severas de carregamento.

Quadro 2.23 - Espessura necessária de base puramente granular (H_{BG}) – Procedimento B

Nº de Solicitações equivalentes do eixo padrão de 80 kN	**ESPESSURA DA BASE (H_{BG}) [cm]**										
	Valor do CBR do subleito										
	2%	**2,5%**	**3%**	**3,5%**	**4%**	**5%**	**6%**	**8%**	**10%**	**15%**	**20%**
1×10^3	27	21	17								
2×10^3	29	24	20	17							
4×10^3	33	27	23	19	17						
8×10^3	36	30	25	22	19						
1×10^4	37	31	26	23	20						
2×10^4	41	34	29	25	22	17					
4×10^4	44	37	32	28	24	19					
8×10^4	48	40	35	30	27	21	17		Mín. 15		
1×10^5	49	41	36	31	28	22	18				
2×10^5	52	44	38	34	30	24	19				
4×10^5	56	47	41	36	32	26	21				
8×10^5	59	51	44	39	34	28	23				
1×10^6	60	52	45	40	35	29	23	16			
2×10^6	64	55	47	42	38	30	25	17			
4×10^6	68	58	50	45	40	33	27	19			
8×10^6	71	61	53	47	42	34	29	20			
1×10^7	72	62	54	48	43	35	30	21			

Fonte: PMSP (2004)

2.6 Comportamento mecânico do PBC

De modo geral, conforme discutido nos itens anteriores, as deformações permanentes do pavimento e os resultados oriundos das avaliações deflectométricas são utilizados como ferramentas de aferição das condições estruturais do pavimento, ao longo de seu período de projeto, tendo como princípio valores admissíveis estabelecidos na fase de projeto.

Segundo Shackel (1986), quando o PBC incorpora camadas de base ou sub-base com materiais estabilizados com cimento, torna-se necessário limitar as tensões de tração nestas camadas para valores que irão garantir que a fissuração por fadiga não ocorra precocemente, implicando que algumas restrições têm de ser colocadas nas deflexões da superfície. No entanto, ressalta-se que o deslocamento da superfície, por si só, não é o critério de projeto relevante para PBC.

Knapton (1994) verificou que a aparência da superfície de uma área em que a camada de assentamento se tornou instável é muito semelhante à aparência quando a estrutura inteira do pavimento apresenta perda de serventia. Com a finalidade de determinar se uma superfície de pavimento com perda de serventia é resultado da instabilidade da camada de assentamento ou de uma estrutura inadequada de pavimento, o autor recomenda a avaliação deflectométrica do pavimento. O Quadro 2.24 apresenta o critério de avaliação das condições do pavimento com base nas deflexões.

Quadro 2.24 - Critério de avaliação das condições do pavimento com base nas deflexões

Deflexão do Pavimento (10^{-2} mm)	**Condições do Pavimento**
0 – 15	Pavimento em boas condições
15 – 40	Pode estar ocorrendo alguma perda na integridade da superfície do pavimento
40 – 80	O pavimento é muito flexível para o uso rodoviário. A perda de serventia está em iminência de ocorrer.
> 80	Ocorreu a perda de serventia do pavimento e ele deverá ser reconstruído a partir do subleito. O subleito pode necessitar de atenção.

Fonte: Adaptado de Knapton (1994)

Kasahara, Komura e Ikeda (1992) construíram e avaliaram quatro trechos experimentais na cidade de Sapporo no Japão, onde deflexões e afundamentos no pavimento foram analisados para avaliar o desempenho dos PBC.

Durante o período de testes, conduzidos pelos autores, ocorreu um total de 1.879 passagens de cargas de roda equivalente a carga de roda de 50 kN. Os afundamentos em trilhas de rodas, após as 1.879 passagens de carga de roda equivalente, variaram entre 12 e 29 mm. Os valores dos módulos de resiliência equivalentes da camada de blocos de concreto mais material de assentamento foram retroanalisados a partir dos dados de deflexões obtidos com equipamento FWD e variaram entre 200 MPa e 1.010 MPa. O Quadro 2.25 apresenta as características das camadas do pavimento.

Quadro 2.25 - Espessuras das camadas dos trechos experimentais de pavimentos de blocos de concreto

Camadas do pavimento	**Unidade**	**A**	**L1**	**L2**	**L3**
Bloco de Concreto	mm	80	80	80	60
Camada de assentamento	mm	30	30	30	30
Base granular	mm	100	-	-	-
Sub-base granular	mm	250	300	200	200
Camada de proteção contra o congelamento	mm	350	400	450	500

Fonte: Adaptado de Kasahara, Komura e Ikeda (1992)

Kasahara, Komura e Ikeda (1992) argumentam que, o valor do módulo de elasticidade equivalente da camada de blocos de concreto mais material de assentamento depende do tratamento da camada de assentamento.

Conforme explicam Kasahara, Komura e Ikeda (1992) e Shackel (1986), deflexões são estritamente limitadas a, geralmente, menos de 50 x 10^{-2} mm para pavimentos asfálticos. Isso é para evitar fissuras associadas às cargas na superfície dos pavimentos. No entanto, na

superfície do PBC, onde são formadas seções através de redes de juntas de modo que este tipo de pavimento geralmente permite deflexões muito maiores do que pavimentos convencionais. Isto significa que a rigidez global de um PBC pode ser inferior à de um pavimento convencional.

De modo que os PBC podem consistentemente apresentar deflexões de 200 x 10^{-2} mm ou mais, sem apresentar patologias. Por conseguinte, a espessura da base e sub-base necessária num PBC é normalmente menor do que em outras formas alternativas de construção. Além disso, não é conveniente adotar métodos de projeto desenvolvidos para pavimentos asfálticos para PBC porque tais procedimentos são normalmente baseados na manutenção de pavimentos sujeitos a deflexões muito menores que podem, na prática, ser aceitáveis para um PBC (SHACKEL, 1986).

O autor apresenta valores de módulos de resiliência e coeficientes de *Poisson* típicos do PBC, sendo tais valores apresentados no Quadro 2.26.

Quadro 2.26 - Valores de módulos de resiliência e coeficientes de *Poisson* típicos do PBC

Material		Mr (MPa)		Coeficiente de *Poisson* (μ)	
		Variação	Recomendado	Variação	Recomendado
Blocos	Retangulares	500 - 7.000	2.500	0,15 - 0,30	0,30
	Segmentados	900 - 7.500	3.200	0,15 - 0,30	0,30
Base	Granular	200 - 800	350	0,10 - 0,50	0,35
	Estabilizada	1.000 - 30.000	2.300	0,10 - 0,50	0,35
Sub-base	Granular	150 - 450	225	0,10 - 0,50	0,35
	Estabilizada	5.000 - 7.000	1.500	0,10 - 0,50	0,35

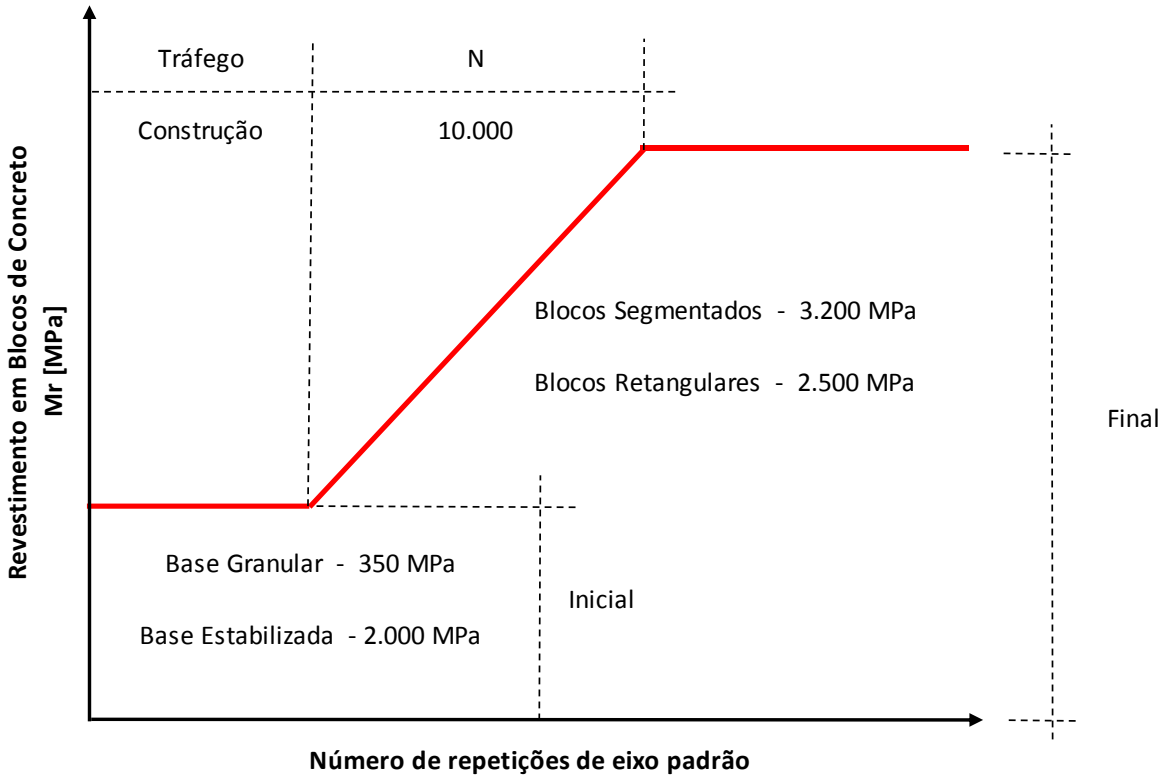
Fonte: Adaptado de Shackel (1986)

De acordo com Shackel (1992), testes de tráfego estabeleceram que os PBC tendem a enrijecer sob o tráfego por causa do intertravamento progressivo dos blocos. Eventualmente, um equilíbrio ou condição de travamento pode ser alcançado. Esta condição tipicamente ocorre durante as primeiras 10.000 repetições de carregamento padrão. Estudos com FWD foram realizados principalmente em PBC que já haviam sofrido tráfego substancial. Consequentemente, os módulos dos levantamentos com FWD representam valores máximos vigentes, em vez daqueles esperados durante início da vida do pavimento.

O autor argumenta que, na concepção mecanicista, isto é desejável para modelar o enrijecimento dos pavimentos imediatamente após a construção. O que pode ser realizado de forma conservadora, assumindo que o módulo do revestimento imediatamente após a construção não vai ultrapassar o da camada de base e que, depois disso, o pavimento irá gradualmente atingir sua rigidez total durante a passagem das primeiras 10.000 cargas de eixo padrão.

Observou-se, então, que durante a fase de construção sob bases granulares o revestimento atingia módulos de resiliência da ordem de 350 MPa, enquanto sob bases cimentadas estes valores chegavam a 2.000 MPa. Já na fase final de intertravamento, após as 10.000 repetições de eixo padrão para peças retangulares, atingia-se valores da ordem de 2.500 MPa enquanto, para peças segmentadas (blocos de 16 faces) os valores chegavam a 3.200 MPa. Isto é representado esquematicamente na Figura 2.36.

Figura 2.36 - Efeito progressivo do intertravamento sobre o tráfego



Fonte: Adaptado de Shackel (1992)

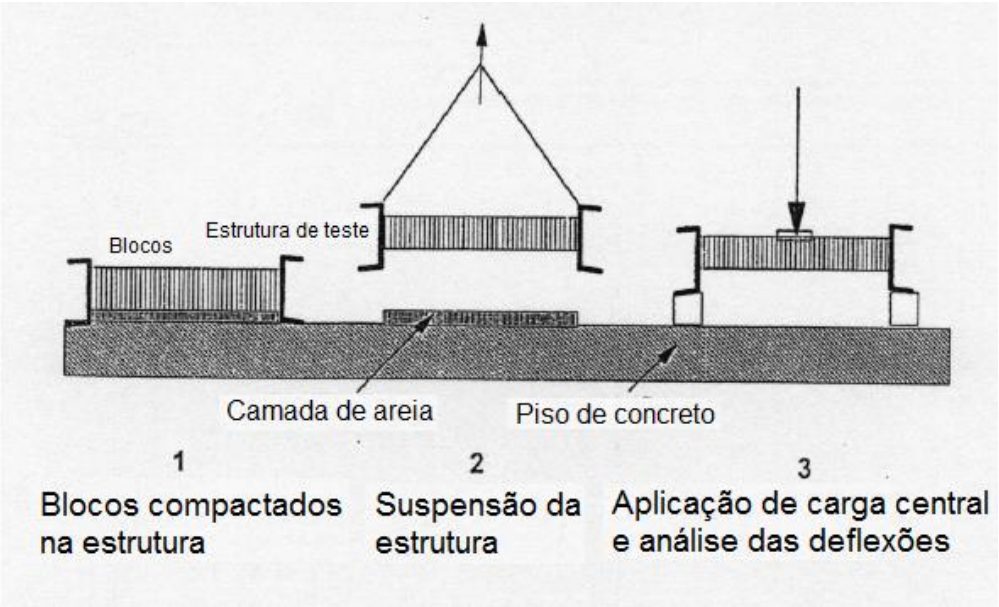
Segundo Shackel (2000a), estudos de FWD em PBC foram conduzidos em vários países, incluindo Holanda, Reino Unido, Japão e Austrália. Estes e outros testes de campo em escala real do PBC compartilham da desvantagem comum de que os dados só podem ser usados para calcular o módulo de resiliência, fazendo uma série de hipóteses sobre a estrutura e os materiais do pavimento. Algumas dessas hipóteses não podem ser verificadas. Consequentemente, deve haver sempre algum grau de incerteza sobre os valores do módulo de resiliência derivados de tais procedimentos. Por estas razões, é desejável dispor de um procedimento de ensaio que permita que o módulo de resiliência possa ser medido diretamente, sem a necessidade de hipóteses não verificáveis.

Tal procedimento foi desenvolvido para PBC pelo autor. Este teste, segundo o mesmo, é menos sujeito a erros de interpretação do que os testes de FWD, mas só pode ser realizado no pavimento recém construído. Consequentemente, o enrijecimento de um PBC que normalmente ocorre sob tráfego não pode ser simulado e, como resultado, as medições de laboratório podem subestimar o módulo de resiliência do PBC em serviço.

Shackel (2000b) descreve a sequência do referido teste de carregamento. Segundo o autor, o teste envolve a colocação e compactação dos blocos em uma estrutura de aço alocada sobre um piso de concreto. Após a compactação, a estrutura de aço, em conjunto com os blocos intactos, pode ser levantada do chão por uma grua. Sob o peso próprio dos blocos o centro do arranjo cede o suficiente para induzir arqueamento e intertravamento entre os blocos individuais, e entre os blocos e a estrutura de teste. Como resultado, os blocos adquirem integridade estrutural e agem como uma laje articulada. Apesar da falta de qualquer apoio, os blocos são, então, capazes de suportar carga vertical significativa. As estruturas sem suporte de pavimento podem ser testadas como uma laje sob apoios com capacidade de 25 kN. Aplica-se uma carga central nas estruturas por meio de uma placa circular rígida com diâmetro de 150 mm. As deflexões nas estruturas são medidas como uma função da carga aplicada, de modo que o módulo quasi-elástico equivalente das estruturas pode ser calculado. Presume-se que o coeficiente de *Poisson* é de 0,3 e que a estrutura de teste possa ser analisada como uma laje elástica isotrópica contínua suportada pelos elementos vizinhos.

A Figura 2.37 apresenta a sequência esquemática do teste de carregamento desenvolvida pelo autor.

Figura 2.37 - Sequência do teste de carregamento desenvolvido por Shackel



Fonte: Adaptado de Shackel (2000b)

3 MÉTODO DE PESQUISA NOS TRECHOS EXPERIMENTAIS

3.1 Localização e caracterização dos trechos experimentais

Os trechos experimentais em PBC analisados nessa pesquisa estão localizados na Av. Professor Almeida Prado dentro do campus da USP, no bairro do Butantã em São Paulo. Precisamente, a partir da intersecção da Av. Professor Almeida Prado com a Av. Professor Mello Moraes, nas proximidades do portão 2 da USP, dá-se início aos trechos revestidos de blocos pré-moldados de concreto os quais se estendem até a Praça Ramos de Azevedo de frente à portaria do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), compreendendo uma extensão aproximada de 750 m de pista simples de duplo sentido de circulação, cuja largura total é de, aproximadamente, 10 m.

É importante observar que destes 750 m de extensão, 100 m correspondem a trecho de Pavimento de Concreto Continuamente Armado (PCCA) que não faz parte do escopo deste estudo.

Para fins deste estudo, a extensão da pista revestida com PBC foi dividida em dois trechos, aqui denominados de “trechos experimentais”, conforme ilustra a Figura 3.1 Além disso, estes dois trechos experimentais foram subdivididos em quatro seções. Sendo que, o Trecho 1 corresponde à Seção 1 (sentido Av. Professor Mello Moraes) e Seção 4 (sentido Praça Ramos de Azevedo). Já o Trecho 2, compreende as seções 2 (sentido Av. Professor Mello Moraes) e 3 (sentido Praça Ramos de Azevedo).

Cabe ainda observar a existência de duas paradas de ônibus no Trecho 1: a parada Poli Civil na seção 1 e parada IPT na seção 4, que atendem a linhas municipais circulares e outras linhas que fazem parada no Terminal de Ônibus USP, na própria Av. Professor Almeida Prado.

Para fins práticos considerou-se um estaqueamento no eixo da via, tendo início nas seções 1 e 4, próximo à Praça Ramos de Azevedo, e terminando nas seções 2 e 3 próximas ao Terminal de ônibus conforme ilustra a Figura 3.2.

Figura 3.1 - Localização dos trechos experimentais em PBC

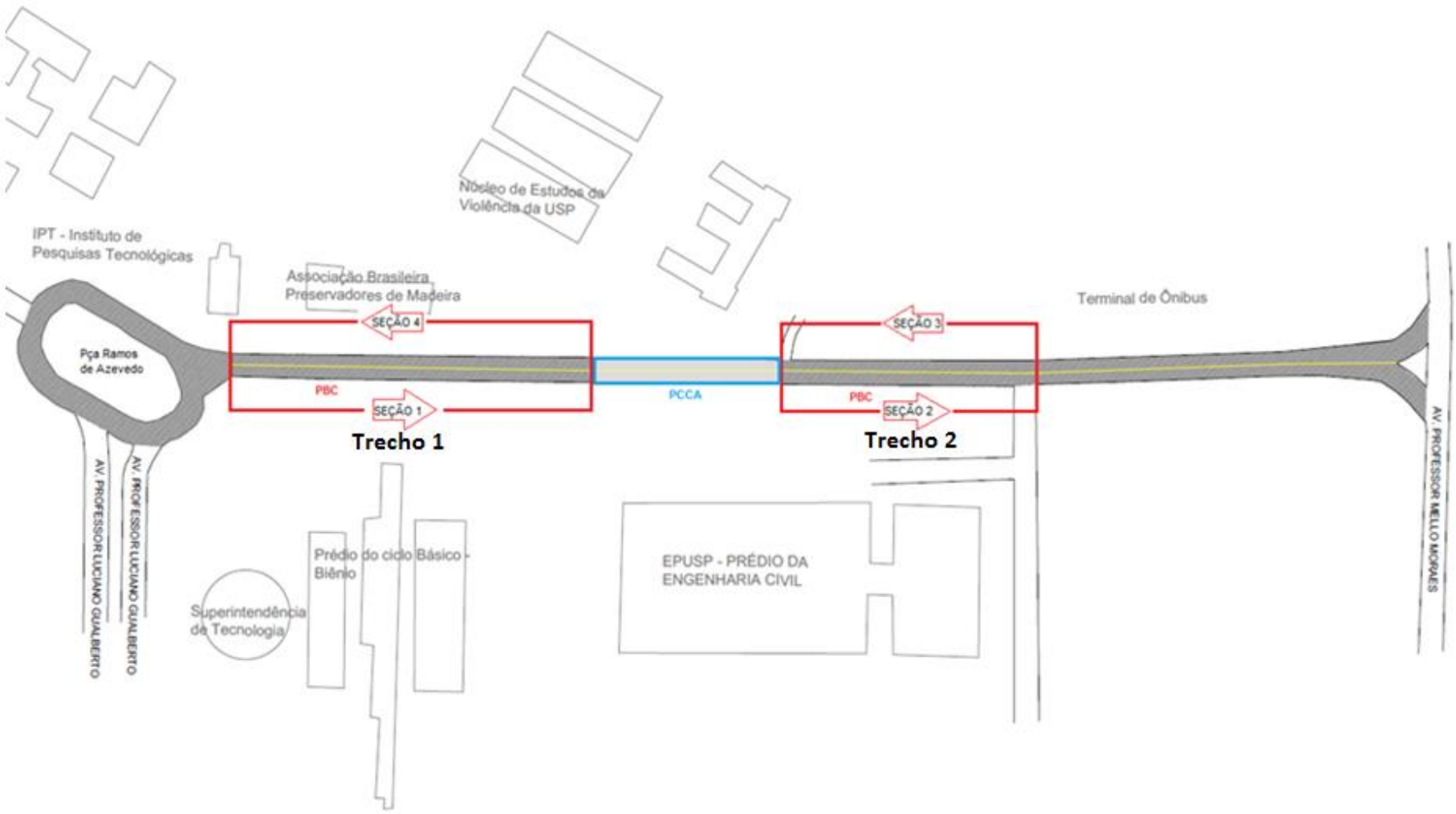
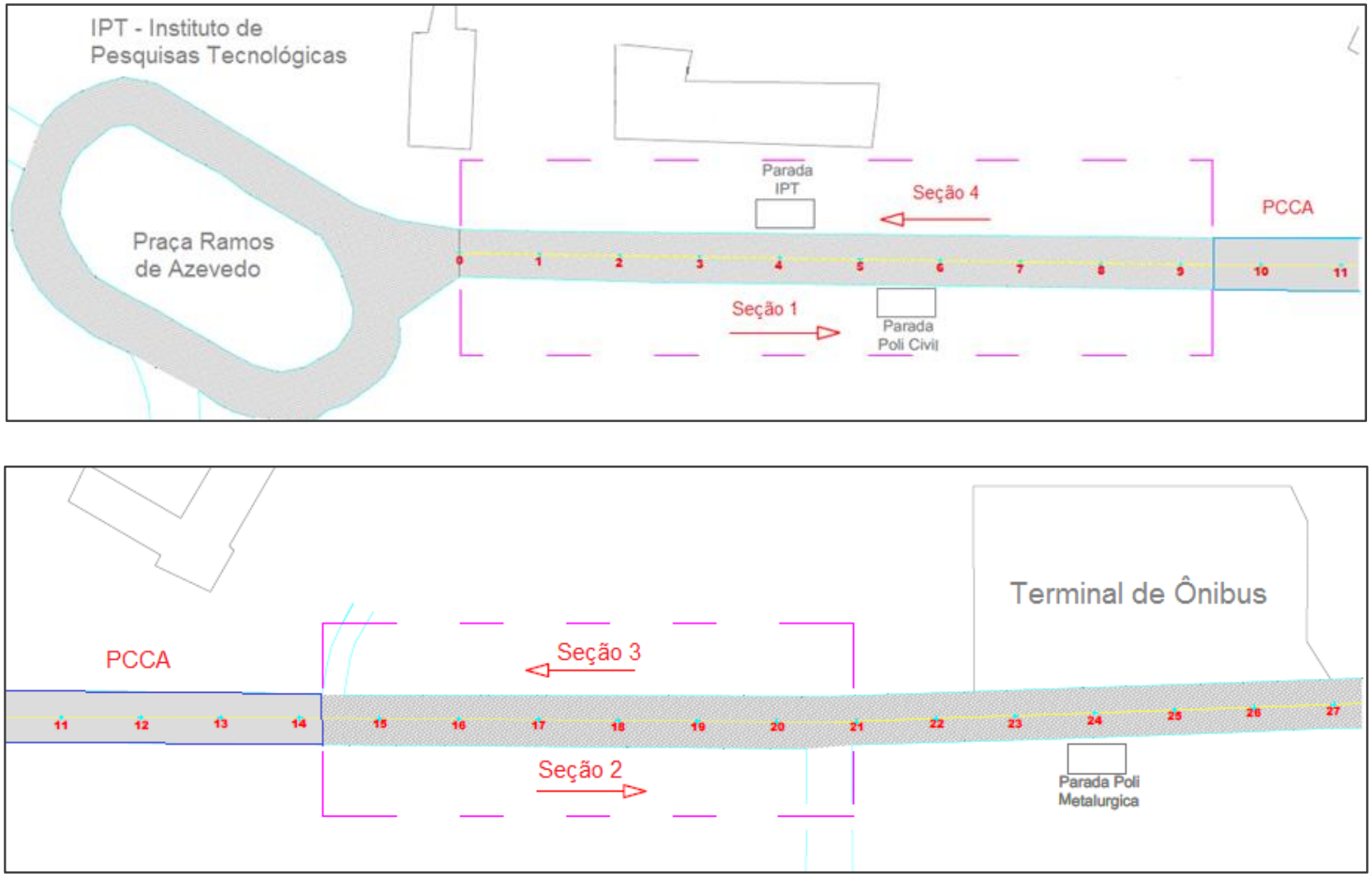


Figura 3.2 - Estaqueamento nos Trechos 1 e 2



3.2 Premissas de projeto para construção dos trechos experimentais

Segundo o memorial de cálculo do projeto de pavimentação da Coordenadoria do Campus da Capital da Universidade de São Paulo (CCCUSP, 2009a), para fins de projeto de pavimentação, considerou-se o método de projeto presente na IP-06 da PMSP (2004) abordado no item 2.5.2.3 deste trabalho.

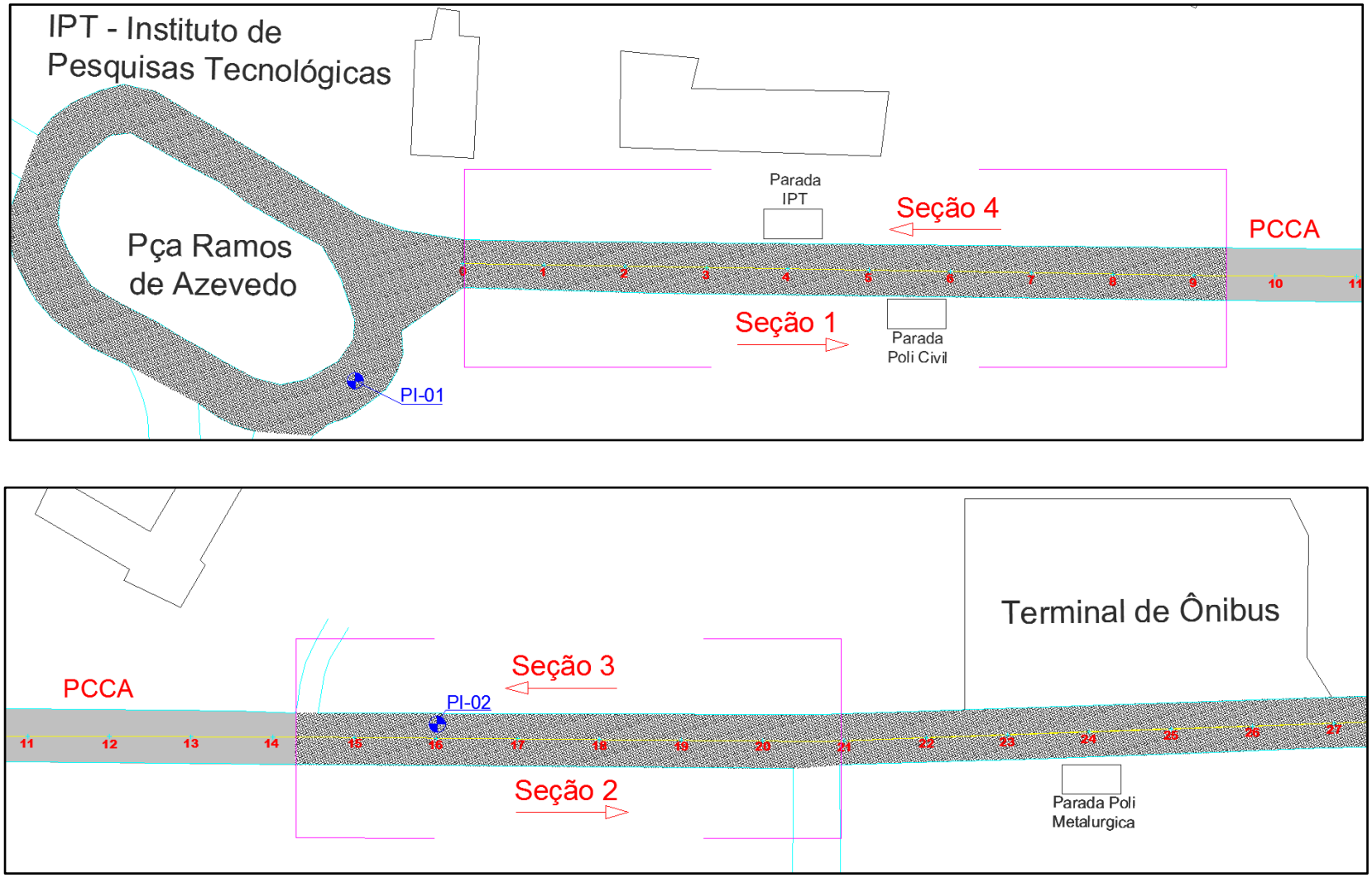
3.2.1 Características geotécnicas

O CCCUSP (2009a) relata que, em julho de 2009 foram realizados, na Avenida Professor Almeida Prado, dois poços de inspeção (PI-01 e PI-02) com a finalidade de verificar os tipos de materiais e espessuras constituintes da estrutura de pavimento existente, bem como, coletar material para execução de ensaios geotécnicos para fins do projeto de construção dos trechos experimentais do PBC e PCCA.

Conforme pode ser observado na Figura 3.3, o espaçamento entre os poços de inspeção no sentido longitudinal é superior a 320 m. Tal espaçamento supera o recomendado por manuais nacionais de projeto de pavimentação, tal como o manual do DNIT (2006), que recomenda espaçamento máximo entre dois furos consecutivos no sentido longitudinal entre 100 e 200 m, e a instrução de projeto IP-DE-P00-001 do DER-SP (2006b) que recomenda espaçamento máximo de 200 m para a fase de projeto básico e não superior a 100 m no caso de projeto executivo.

De acordo com o relatório da empresa que realizou as sondagens não foi verificada a presença do lençol freático nos dois poços de inspeção executados. Os solos verificados foram classificados sendo do tipo A-7-5 de acordo com a classificação HRB – AASHTO. A capacidade de suporte dos solos, caracterizada pelo valor obtido pelo ensaio de CBR, oscilou entre 8% e 9% com expansão variando entre 0,3% e 0,5%. A umidade ótima dos solos compactados variou entre 20,3% e 20,8% e a densidade seca aparente máxima variou entre 15,74 kN/m³ e 16,63 kN/m³. O Quadro 3.1 apresenta o resultado da estrutura existente verificada nos poços de inspeção. O Quadro 3.2 apresenta de forma resumida os resultados dos ensaios geotécnicos obtidos nas amostras coletadas.

Figura 3.3 - Locação dos poços de inspeção PI-01 e PI-02



Fonte: Adaptado de CCCUSP (2009a)

Quadro 3.1 - Resultado dos poços de inspeção

Localização	**Espessuras (cm)**			
Furo nº	Blocos de concreto articulados	Camada de assentamento	CBUQ	Macadame hidráulico
PI-01	10,0	4,0	-	-
PI-02	-	-	11,0	18,0

Fonte: CCCUSP (2009a)

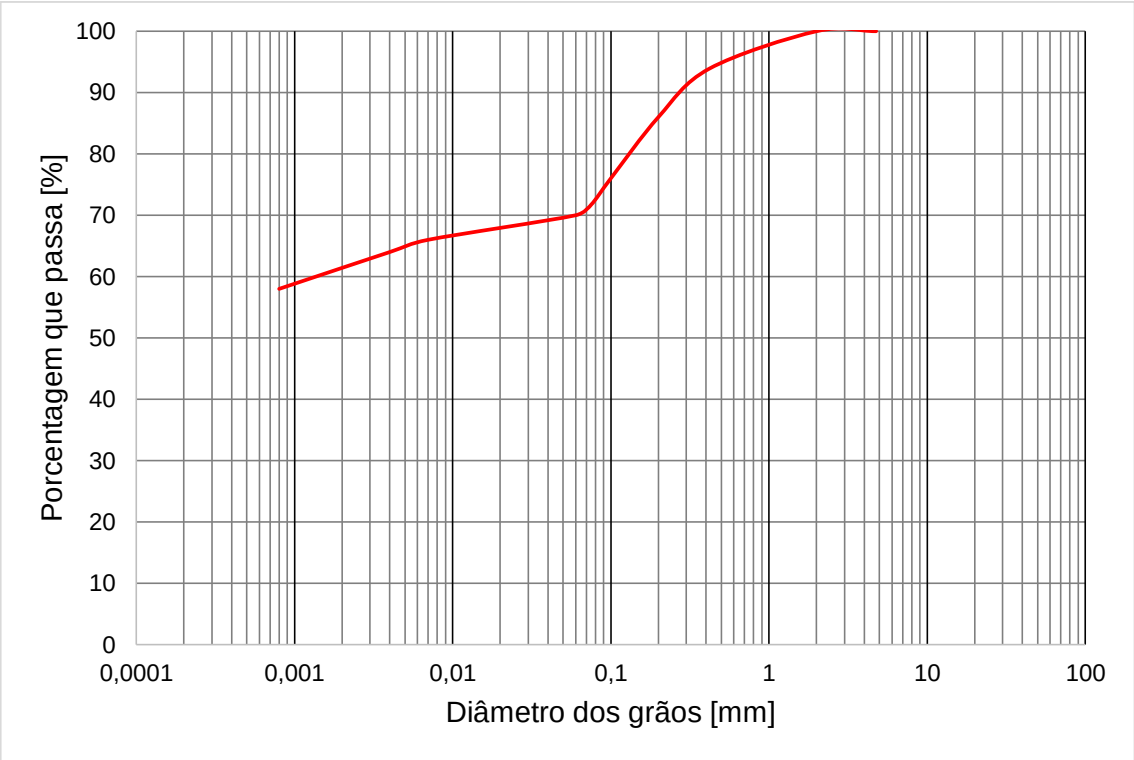
Quadro 3.2 - Resumo dos ensaios geotécnicos das amostras

Descrição	**Unid.**	**Amostra**	
		PI.01	**PI.02**
Profundidade	m	0,15 - 1,00	0,30 - 1,00
Peso específico natural	kN/m³	21,8	25,5
Umidade do solo natural	%	23,6	24,1
Peso específico aparente seco	kN/m³	16,63	15,74
Umidade ótima	%	20,3	20,8
CBR moldado	%	9,0	8,0
Expansão	%	0,5	0,3
Limite de Liquidez	%	47,3	43,6
Limite de Plasticidade	%	32,1	31,2
Índice de Plasticidade	%	15,2	12,4
Classificação HRB		A-7-5	A-7-5

Fonte: Adaptado de CCCUSP (2009a)

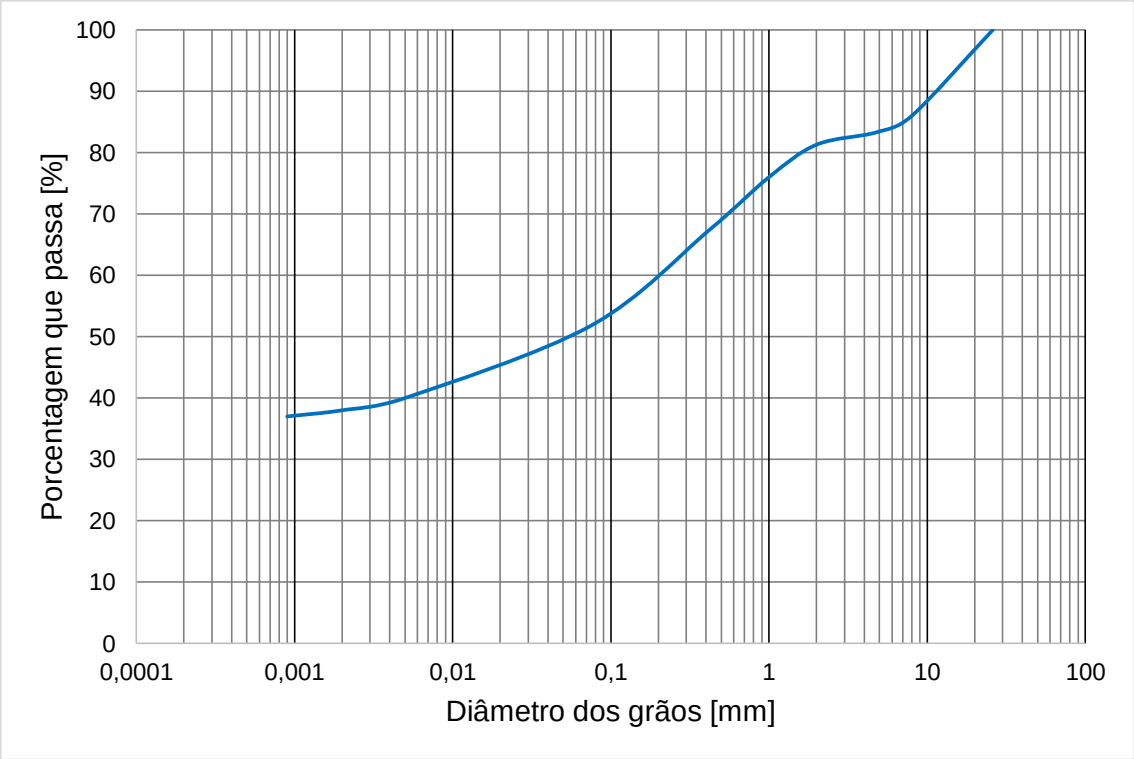
A Figura 3.4 e Figura 3.5 apresentam as curvas de resultados das análises granulométricas realizadas a partir das amostras obtidas nos poços de inspeção PI-01 e PI-02, respectivamente.

Figura 3.4 - Curva granulométrica do material do subleito PI-01



Fonte: CCCUSP (2009a)

Figura 3.5 - Curva granulométrica do material do subleito PI-02



Fonte: CCCUSP (2009a)

3.2.2 Tráfego

De acordo com o projeto de pavimentação CCCUSP (2009a), para efeito de dimensionamento da estrutura do PBC implantado, o tráfego existente na Avenida Professor Almeida Prado foi considerado tráfego pesado por se tratar de uma via arterial. Assim sendo, considerou-se que o volume diário médio (VDM) deve estar entre 5.001 e 10.000 veículos leves e de 301 à 1.000 veículos comerciais, na faixa mais carregada, em conformidade com a IP-06 da PMSP (2004). Em função desta classificação, considerou-se o período de projeto de 12 anos e um número N igual a 1×10^7 repetições de eixo padrão de 80 kN.

É importante observar que o número N em questão foi estimado em função da classificação da via e, em momento algum, a documentação de projeto relata se houve ou não a realização de contagem de veículos para a determinação do número N de projeto.

No entanto, de acordo com dados atuais fornecidos pela Prefeitura do Campus USP da capital, tendo como base de cálculo a contagem de entradas e saídas no Campus e atração de viagens variado por unidade, além dos itinerários de 10 linhas que acessam o campus, a estimativa de tráfego na Avenida Professor Almeida Prado entre a Praça Ramos de Azevedo e o portão 2 na Av. Professor Mello Moraes, para os dois sentidos, é de 24.363 automóveis, 755 ônibus urbanos e 290 caminhões. O que, segundo o método de classificação viária contida na IP-06 da PMSP (2004), resultaria em uma via coletora de tráfego pesado com N variando entre 1×10^7 e $3{,}3 \times 10^7$ repetições de eixo padrão de 80 kN.

3.2.3 Dimensionamento da estrutura do pavimento

Para o dimensionamento da estrutura do PBC intertravados utilizou-se o Procedimento A da IP-06 da PMSP (2004), de acordo com o relatório técnico, por levar em consideração o intertravamento dos blocos e pressupor uma resistência crescente das camadas a partir do subleito. Empregou-se como premissas o tráfego para o período de projeto de 1×10^7 repetições de eixo padrão de 80 kN e CBR do subleito de projeto igual a 8%.

Cabe observar que, conforme tratado no item 2.5.2.3, a PMSP (2004) recomenda a utilização do Procedimento A para vias de baixo volume de tráfego limitadas, preferencialmente, a 1×10^5

repetições de eixo padrão; segundo a própria PMSP (2004), o emprego deste procedimento para este nível de tráfego resulta em estruturas mais esbeltas e economicamente mais viáveis quando comparado ao procedimento B, devido a não necessidade de utilização da camada de base. Todavia, optou-se pela utilização do Procedimento A, para um nível de tráfego acima do recomendado pela IP-06 da PMSP (2004), com o emprego de base de CCR.

3.2.4 Camada de base de CCR

De acordo com Sachet (2012) o CCR pode ser definido como "um concreto que pode ser compactado devido sua consistência seca", empregando-se os mesmos tipos de agregados utilizados na composição de concretos convencionais. Segundo a autora, o uso de CCR, no Brasil, tem sua principal aplicação em construções de barragens. Seu emprego teve avanços expressivos em obras pavimentação rodoviária a partir da década de 1980, seguindo uma tendência mundial a exemplo de países como os EUA.

No caso das obras de pavimentação rodoviária, o CCR tem sido empregado com sucesso como material de base para pavimentação e até mesmo como material de revestimento, sendo o consumo de cimento o fator determinante para tanto. Balbo (2007, p.203) explica que "o consumo de cimento para fabricação de CCR pode variar entre 80 kg/m³ e 380 kg/m³, neste último caso, para uso como revestimento de pavimentos".

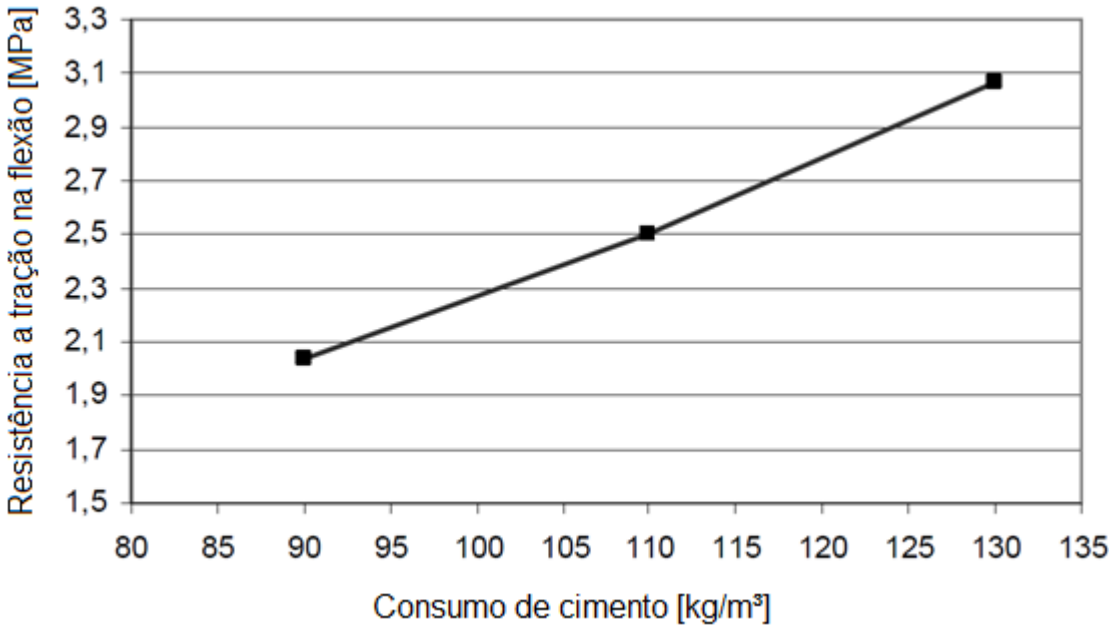
Quanto à capacidade estrutural do material, os módulos de elasticidade do CCR são geralmente altos podendo atingir, segundo Balbo (2007) valores da mesma grandeza da BGTC (em torno de 15.000 MPa para casos em que o consumo de cimento seja inferior a 100 kg/m³) a valores da mesma ordem do concreto convencional de cimento Portland (em torno de 28.000 MPa).

Colim (2009), por exemplo, estudando pavimentos de concreto simples sobre base de CCR obteve, através de retroanálise, módulos de elasticidade para o CCR entre 19.600 e 27.900 MPa para trechos experimentais que apresentavam consumo de cimento de 150 kg/m³. O valor médio para o módulo de elasticidade obtido pela autora, avaliando dezesseis casos, foi de 21.634 MPa com desvio padrão igual a 2.569 MPa. Tais valores de módulos de elasticidade

são compatíveis com os descritos por Ricci (2007) que obteve módulo de elasticidade estático tangente em compressão para o CCR convencional entre 21.088 e 23.134 MPa com valor médio, avaliando três amostras, de 21.770 MPa.

Balbo (2007) ressalta que materiais tratados com cimento e o CCR exercem papel preponderante quando empregados na construção de pavimentos sujeitos ao volume de tráfego entre médio e elevado. Devido a elevada rigidez de tais materiais, quando solicitados pelas cargas de tráfego estes apresentam uma resposta mecânica de placa pois, durante sua fase integra, trabalham em regime crítico de tração na flexão. Valores característicos de resistência a tração na flexão do CCR em função do consumo de cimento, entre 90 e 130 kg/m³, são apresentados por Ricci (2007) como pode ser visto na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Resistência a tração na flexão do CCR convencional em função do consumo de cimento



Fonte: Ricci (2007)

Segundo o memorial de cálculo da CCCUSP (2009a), em função do tráfego pesado na Av. Professor Almeida Prado, recomendou-se o emprego de base cimentada em conformidade com a instrução de projeto IP-06 da PMSP (2004). Deste modo, optou-se pelo emprego CCR

com consumo mínimo de cimento Portland igual a 100 kg/m³, resistência característica mínima a compressão simples aos 7 dias de idade igual a 5 MPa e resistência a tração na flexão do CCR igual ou superior a 2 MPa aos 28 dias.

3.2.5 Verificação mecanicista

A estrutura obtida com o emprego da IP-06 da PMSP (2004) foi verificada através de procedimento mecanicista, utilizando-se da ferramenta computacional ELSYM-5 em conjunto com modelos de fadiga para misturas asfálticas.

Utilizou-se o modelo apresentado por Dormon e Metcalf (1965) como modelo para o cálculo de deformação vertical admissível de compressão no topo da camada de subleito (Equação 12).

$$N = 6{,}067 \times 10^{-10} \times \varepsilon v_{adm}{}^{-4{,}762} \qquad (cm/cm) \qquad (12)$$

onde,

εv_{adm} – é a deformação vertical admissível de compressão no topo da camada de subleito;

N – é o número de solicitações de eixo simples padrão de 80 kN.

Substituindo o N de projeto na Equação 12 obteve-se a deformação vertical admissível de compressão no topo da camada de subleito, onde:

$$\varepsilon v_{adm} = 3{,}931 \times 10^{-4} cm/cm$$

Com a finalidade de avaliar o número de repetições de carga que a camada de CCR suportaria até o início do trincamento, utilizou-se o modelo elaborado por Trichês (1993) (Equação 13)

para consumo de cimento de 120 kg/m³ (não há disponível na literatura modelo para consumo de cimento de 100 kg/m³).

$$\log_{10} N_f = 14{,}911 - 15{,}074 \times RT \qquad (13)$$

onde,

RT – é a relação entre tensões, ou seja, a relação entre a tensão de tração na flexão sofrida na camada dividida pela tensão de tração na flexão característica do material em questão.

Considerando a resistência de tração na flexão aos 28 dias igual 2 MPa e o número de repetições de eixo padrão N igual a 10^7, tem-se:

$$\sigma tf_{adm} = \left(\frac{\log_{10} 10^7 - 14{,}911}{-15{,}074}\right) \times 2{,}0\ MPa = 1{,}05\ MPa$$

Quanto a deflexão reversível admissível no topo da camada de revestimento, a memória de cálculo de pavimentação CCCUSP (2009a) não apresenta critérios para verificação mecanicista de tal parâmetro. Todavia, pode-se admitir valores conforme apontados por Knapton (1994) e ilustrado no Quadro 2.24, sendo consideradas deflexões de até 15 x 10^{-2} mm para pavimentos em boas condições quando sujeitos ao tráfego rodoviário.

Para fins de análise mecanicista por meio do programa ELSYM-5, adotou-se como parâmetros valores convencionais utilizados por órgãos rodoviários e publicações técnicas. Sendo que, para o material do subleito considerou-se uma correlação entre seu módulo de resiliência e a capacidade de suporte constatada através do ensaio de CBR, conforme Equação 14 a seguir:

$$M_R = 18 \times CBR^{0{,}64} \quad (MPa) \qquad (14)$$

De modo que, para o CBR de projeto igual a 8% obteve-se um valor de módulo de resiliência igual a 68,1 MPa.

Os materiais utilizados nas diversas camadas do PBC, bem como seus respectivos módulos de resiliência e coeficientes de *Poisson*, adotados para fins de análise mecanicista no programa ELSYM-5, são indicados no Quadro 3.3 onde, pode-se observar que o módulo de resiliência adotado para camada de sub-base é pouco conservador, uma vez que é comum o emprego de módulo de resiliência entre 100 e 200 MPa para o emprego de macadame seco na camada de sub-base.

Quadro 3.3 - Parâmetros adotados na análise mecanicista

CAMADA	**MR (MPa)**	**Coeficiente de *Poisson***
Blocos pré-moldados de concreto	3.000	0,35
Concreto compactado com rolo	15.000	0,20
Macadame seco	400	0,35
Subleito	68	0,40

Fonte: CCCUSP (2009a)

Ao se considerar o revestimento do pavimento composto por blocos de 10 cm de espessura, assentados sobre uma camada de areia com espessura igual a 5 cm, sobre uma base de CCR de espessura igual a 15 cm e sub-base de macadame seco com espessura de 30 cm, foram obtidos na análise mecanicista valores inferiores aos admissíveis para a deformação vertical no topo do subleito e para a tensão de tração no fundo da camada de base cimentada, conforme apresenta o Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Resultados obtidos na análise mecanicista

Camada	**Posição**			**Resultados Obtidos**		
	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Deflexão ($x10^{-2}$ mm)	σtf (MPa)	εv ($x10^{-4}$ cm/cm)
Topo do revestimento	0	0	0	4	-	-
Base de CCR	14,4	0	24,99	-	0,81	-
Topo do subleito	14,4	0	55,01	-	-	1,613

Fonte: CCCUSP (2009a)

3.2.6 Parâmetros construtivos

De acordo com o projeto executivo (USP-PAV-002-R0B) CCCUSP (2009b), desenvolvido em setembro de 2009, foram estabelecidas as seguintes premissas para o subleito ou camada final de terraplanagem:

- Apresentar CBR maior ou igual a 8% e expansão menor ou igual a 2%;
- Ser isento de matéria orgânica;
- Ser escarificado e compactado (energia normal), na umidade ótima, em uma profundidade de pelo menos 0,20 m;

Além disso, para os segmentos que apresentassem capacidade de suporte de subleito CBR inferior ao valor do CBR de projeto ou expansão superior a 2%, recomendou-se a substituição de solo em toda a largura da plataforma por camada de rachão intertravado, na espessura mínima conforme critério indicado no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 - Critério recomendado para substituição de solos indadequados

Capacidade de suporte CBR	Expansão	Espessura mínima de substituição de solo (m)
2% ≤ CBR < 4%	2% < Exp ≤ 5%	0,8
	Exp > 5%	1,0
4% ≤ CBR < 8%	2% < Exp ≤ 5%	0,5
	Exp > 5%	0,8

Fonte: CCCUSP (2009b)

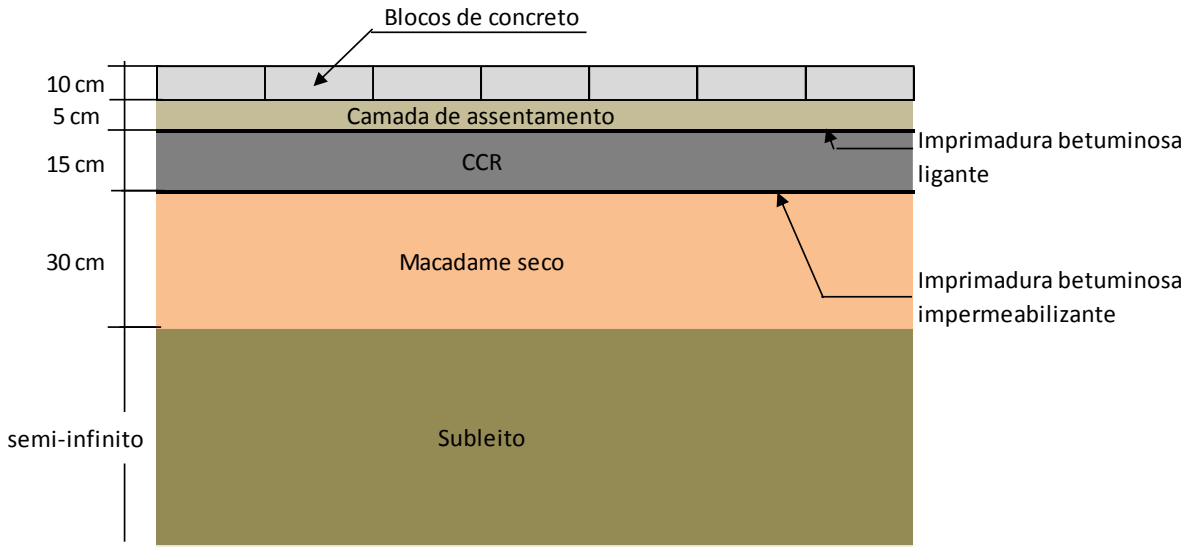
Os materiais empregados nas camadas, espessuras das camadas e especificações técnicas de materiais indicadas no projeto são resumidos no Quadro 3.6. A Figura 3.7 ilustra a seção transversal de projeto do PBC.

Quadro 3.6 - Descrição da seção típica dos trechos experimentais

Material	h (m)	Especificação Técnica
Blocos pré-moldados de Concreto	0,10	DERSA ET-P00/012
Camada de assentamento de areia	0,05	DERSA ET-P00/012
Imprimadura betuminosa ligante	-	PMSP/SP ESP-09
Concreto Compactado com Rolo (CCR)	0,15	DERSA ET-P00/047
Imprimadura betuminosa impermeabilizante	-	PMSP/SP ESP-09
Macadame Seco	0,30	DER/SP ET-DE-P00/027
Melhoria e preparo do subleito	-	PMSP/SP ESP-01

Fonte: CCCUSP (2009b)

Figura 3.7 - Seção de projeto



Fonte: Adaptado de CCCUSP (2009b)

Foram estabelecidos valores das deflexões recuperáveis para a liberação das diversas camadas constituintes da estrutura do pavimento, conforme apresentado no Quadro 3.7. De onde, pode-se observar que foi considerado valor pouco conservador de deflexão recuperável para liberação da camada de base de CCR.

Quadro 3.7 - Critério de liberação das camadas por deflectometria

Camadas da estrutura do pavimento novo	Valor deflectométrico recomendado ($x10^{-2}$ mm)
Preparo e melhoria do subleito (CBR ≥ 8%)	≤ 120
Sub-base macadame seco, topo 0,15 m	≤ 100
Sub-base macadame seco, topo 0,30 m	≤ 90
Base de CCR (idade não especificada)	≤ 45

Fonte: CCCUSP (2009b)

Foram projetados drenos longitudinais subsuperficiais com dimensões 1,00 m x 0,50 m, compostos por material drenante envolto em manta geotêxtil e tubo de polietileno de alta densidade (PEAD) perfurado com diâmetro igual a 0,15 m.

3.3 Construção dos trechos experimentais

Salles (2013), durante estudos do trecho experimental de PCCA na Av. Professor Almeida Prado, relata que as pistas experimentais (PCCA e PBC) foram construídas entre julho e setembro de 2010, no inverno seco paulistano, sendo que a abertura da via se deu no dia 16/09/2010.

De acordo com o projeto executivo CCCUSP (2009b) para a construção dos trechos experimentais do PBC na Av. Professor Almeida Prado foi previsto inicialmente a demolição do pavimento existente, contemplando a remoção de base e revestimento.

Após a melhoria e preparo do subleito e construção das contenções longitudinais, executou-se as camadas de sub-base de macadame seco e da base de CCR, conforme as especificações de projeto indicadas no Quadro 3.6, na sequência foram construídas a camada de assentamento e, em seguida, o assentamento dos blocos de concreto, finalizando com a compactação dos mesmos em conjunto com o material de rejuntamento. Foram empregados blocos de concreto segmentados (blocos de 16 faces) classificados segundo a ABNT 9781

(2013) como blocos Tipo – I, cuja relação comprimento/largura é igual a 2 (dois), dispostos em arranjo espinha-de-peixe a 90º, sendo o assentamento realizado de forma manual.

Conforme discutido no item 2.3 a combinação deste formato de blocos em conjunto com o arranjo espinha-de-peixe fornece melhores condições de intertravamento e consequentemente menores deformações; por tais motivos, são amplamente recomendados para PBC sujeitos ao tráfego rodoviário. A Figura 3.8 ilustra a fase construtiva dos trechos experimentais e a Figura 3.9 apresenta a condição atual da pista.

Figura 3.8 - Foto da fase de construção dos trechos experimentais na transição entre o PBC e o PCCA

Fonte: Salles (2013)

Figura 3.9 - Blocos segmentados dispostos em arranjo espinha-de-peixe nos trechos experimentais

3.4 Avaliação das condições estruturais do pavimento

3.4.1 Inspeções visuais das condições do pavimento

Inicialmente, para a verificação das condições do pavimento, foram realizados levantamentos por meio de inspeções visuais das condições do pavimento. Adotou-se como parâmetro a avaliação dos níveis de severidade de patologias no pavimento estabelecidos pela norma ASTM E2840 (2015). De acordo com a norma em questão, as patologias são indicadores externos de deterioração do pavimento causada pela carga, fatores ambientais, deficiências construtivas, ou uma combinação destes, sendo que os níveis de severidade das patologias são determinados com base na qualidade do pavimento e são considerados subjetivos.

A norma em questão possibilita, através do levantamento dos níveis de severidade das patologias no PBC, a obtenção do ICP. Para tanto, a norma dispõe de onze tipos de patologias subdivididas em três níveis de severidade. O Quadro 3.8 a seguir, resume os níveis de severidade considerados na verificação das condições do pavimento com base nas patologias características do PBC, descritas pela norma ASTM E2840 (2015). O Quadro 3.9 associa as patologias típicas do PBC com suas possíveis causas.

Quadro 3.8 - Níveis de severidade de danos em pavimentos de blocos de concreto

Limites estabelecidos pela norma ASTM E2840-2015

TIPO DE PATOLOGIA	NÍVEIS DE SEVERIDADE			OBSERVAÇÕES
	BAIXO	MÉDIO	ALTO	
1 - Blocos danificados	Uma ou duas rachaduras sem separação, que não são desprendidas ou fragmentadas	Rachaduras avançadas sem separação, fragmentação ou desprendidas nos blocos, mas os blocos não estão desintegrados	Os blocos estão rachados em vários pedaços ou estão desintegrados devido as rachaduras, com pedaços soltos e ou fragmentados	
2 - Depressões	5 a 13 mm	13 a 25 mm	> 25 mm	São áreas superficiais mais baixas que o entorno.
3 - Perda de contenção	6 a 10 mm	10 a 13 mm	> 13 mm	Resultam em deslocamento lateral dos blocos. Verifica-se evidências de aumentos nas juntas
4 - Espaçamento excessivo entre juntas	6 a 10 mm	10 a 13 mm	> 13 mm	As medidas das juntas não devem variar além de 1,5 mm e 4,5 mm
5 - Degraus	3 a 6 mm	6 a 10 mm	> 10 mm	São áreas superficiais onde a elevação de blocos adjacentes diferem ou sofreram rotações. Caracterizados por blocos individuais com elevações diferenciais.
6 - Elevações	6 a 13 mm	13 a 25 mm	> 25 mm	São áreas superficiais mais elevadas que áreas vizinhas geralmente causados por congelamentos diferenciais elevando os solos subjacentes.
7 - Deslocamento horizontal	6 a 13 mm	13 a 20 mm	> 20 mm	Medido a partir do alinhamento longitudinal e transversal
8 - Perda de rejuntamento / Bombeamento	< 13 mm	13 a 25 mm	> 25 mm	Profundidade de perda de rejuntamento medida a partir da borda chanfrada do bloco
9 - Falta de blocos	Perda aleatória de bloco	Perda de dois ou mais blocos em uma área sem prejuízo a qualidade da via	Perda de 10 ou mais blocos em uma área com prejuízo a qualidade da via	
10 - Reparos	O reparo está em boas condições e a qualidade da via não é afetada	O reparo apresenta condições de boa a regular e a qualidade da via está começando a ser deteriorada	O reparo está em condições ruins e a qualidade da via é afetada	Áreas onde blocos perdidos foram reintegrados com material diferente (asfalto, concreto ou agregados)
11 - Afundamentos em trilhas de rodas	6 a 13 mm	13 a 25 mm	> 25 mm	Valor referente a profundidade da trilha de rodas

Fonte: Adaptado de ASTM E2840 (2015)

Quadro 3.9 - Patologias em PBC intertravados e suas possíveis causas

Patologia	**Carga**	**Clima / Durabilidade**	**Umidade / Drenagem**	**Outros Fatores**
1. Blocos danificados	x			x
2. Depressões	x	x	x	
3. Perda de contenção	x			x
4. Espaçamento excessivo entre juntas	x	x		
5. Degraus	x			
6. Elevações		x	x	
7. Deslocamento horizontal	x			
8. Perda de rejuntamento / bombeamento	x	x	x	
9. Falta de blocos	x	x	x	x
10. Reparos	x	x	x	
11. Afundamento em trilha de rodas	x			

Fonte: Adaptado de ASTM E2840 (2015)

3.4.2 Levantamentos deflectométricos

Com o objetivo de analisar as condições estruturais do PBC sobre base cimentada, foram realizados levantamentos deflectométricos com equipamento FWD. Tal procedimento foi possível graças ao apoio técnico da empresa *Dynatest,* que realizou os levantamentos, e também à Prefeitura da USP pelo apoio no fechamento da pista ao tráfego de veículos durante a realização dos procedimentos.

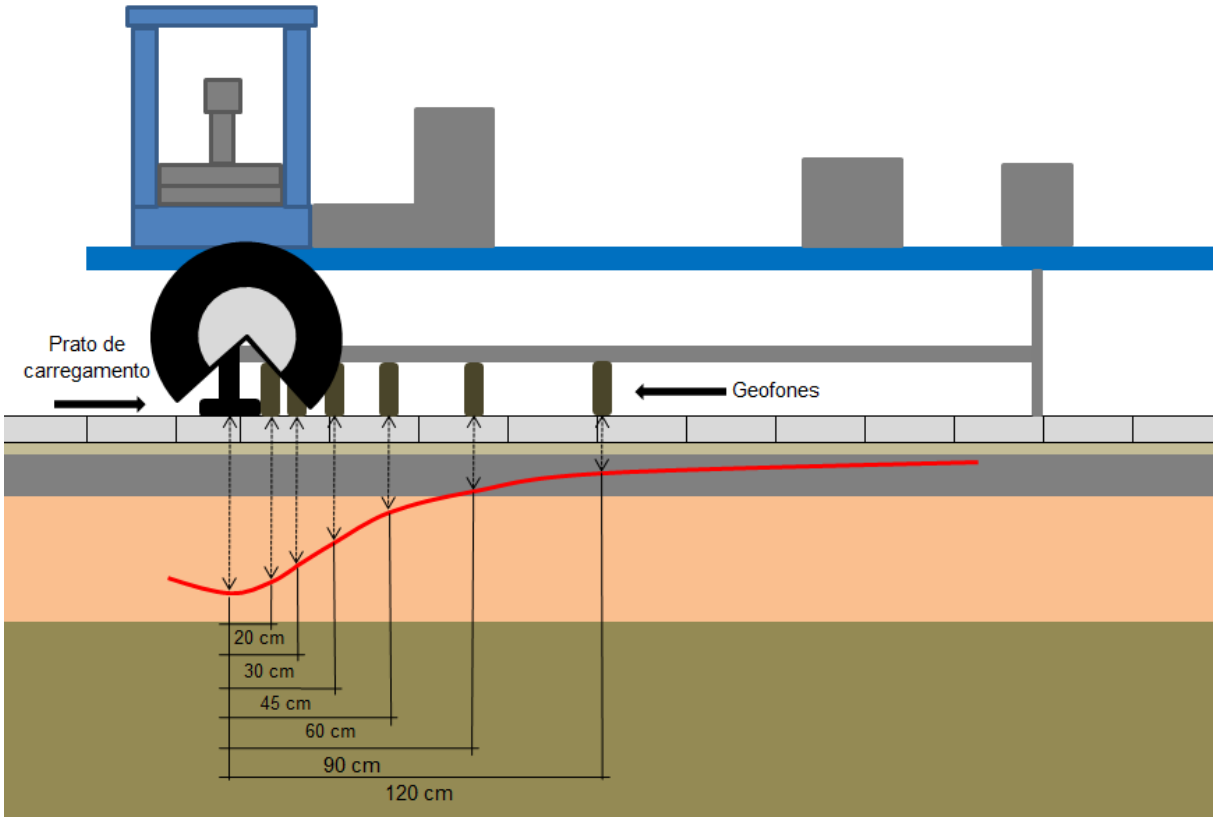
Foram realizadas duas aplicações de carga por ponto de carregamento espaçados de 20 m nas quatro seções dos trechos experimentais. O equipamento utilizado para tal procedimento era constituído por sete geofones espaçados a partir do ponto de carregamento, conforme apresentado no Quadro 3.10:

Quadro 3.10 - Distância dos geofones até o ponto de aplicação de carga

Geofone	**Distância do ponto de aplicação da carga (cm)**
Df_1	0
Df_2	20
Df_3	30
Df_4	45
Df_5	60
Df_6	90
Df_7	120

A carga de impacto utilizada foi de 60 kN e o raio da área de carregamento igual a 15 cm. Os levantamentos foram realizados no eixo de cada seção. A Figura 3.10 ilustra o equipamento FWD utilizado para realização dos levantamentos deflectométricos e o afastamento dos geofones do ponto de aplicação de carga.

Figura 3.10 -Levantamento deflectométrico com FWD



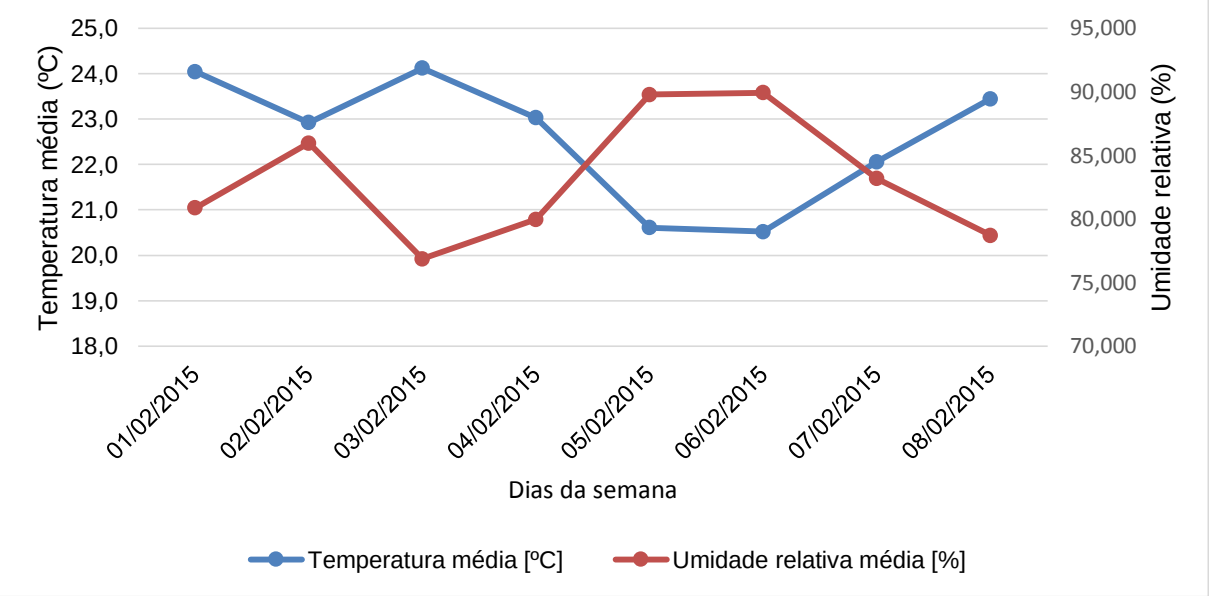
Os levantamentos foram realizados no dia 08 de fevereiro de 2015, no período da manhã, sendo que a temperatura do ar variou entre 26º C e 29º C e a temperatura do pavimento variou entre 24º C e 41º C. O Quadro 3.11 resume as condições climáticas nos dias anteriores a realização dos levantamentos deflectométricos com base em dados fornecidos pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH). Um comparativo entre a temperatura média e a umidade média, na época em que foi realizado o levantamento deflectométrico com o equipamento FWD, é apresentado na Figura 3.11.

Quadro 3.11 - Condições climáticas na época em que foi realizado o FWD

Data	Pluviometria (mm)	Velocidade média do vento (m/s)	Temperatura média (º C)	Umidade relativa média (%)
01/02/2015	1,1	0,627	24,043	80,863
02/02/2015	20,3	0,366	22,922	85,960
03/02/2015	15,1	0,466	24,118	76,856
04/02/2015	0,2	0,376	23,026	79,960
05/02/2015	9,4	0,445	20,610	89,783
06/02/2015	13,3	0,205	20,522	89,926
07/02/2015	11,1	0,313	22,059	83,169
08/02/2015	0,0	0,487	23,445	78,702

Fonte: FCTH[8]

Figura 3.11 - Temperatura x umidade relativa



Fonte: FCTH[8]

[8] Comunicação pessoal por e-mail.

3.4.3 Abertura de cavas

Com a finalidade de verificar a estrutura de pavimento efetivamente construída foram realizadas aberturas de cavas, ao longo das seções dos trechos experimentais, com o objetivo de verificar os materiais empregados nas camadas do pavimento; a espessura de cada camada e a presença de base cimentada, sendo que, para esta última, foi prevista a retirada de corpos de prova (CPs) com auxílio de sonda rotativa dotada de coroa diamantada de 10 cm de diâmetro, para posterior análise do material.

Foram previstas aberturas de doze cavas. Seis destas correspondendo a locais onde foram verificados significativos afundamentos em trilhas de rodas, sendo as demais correspondentes a locais íntegros do pavimento.

As cavas CV01, CV02 e CV06 do trecho 1 e as cavas CV07, CV08 e CV10 do trecho 2 correspondem a locais visivelmente íntegros do pavimento; já as cavas CV03, CV04 e CV05 do trecho 1, bem como as cavas CV09, CV11 e CV12 do trecho 2 correspondem a locais onde foram constatados afundamentos significativos nas trilhas de rodas.

Durante os dias 13 e 20 de julho de 2015 foram realizadas as aberturas das 12 cavas. Tal procedimento foi possível graças ao apoio técnico da empresa EPT - Engenharia e Pesquisas Tecnológicas S.A e também, mais uma vez, com ao apoio da Prefeitura da USP, que providenciou o fechamento da pista durante a realização dos procedimentos.

A Figura 3.12 e a Figura 3.13 ilustram a locação das cavas nas seções 1 a 4. A Figura 3.14 e a Figura 3.15 apresentam os locais escolhidos para abertura das cavas nos trechos 1 e 2, respectivamente.

Figura 3.12 - Locação das cavas no Trecho 1, seções 1 e 4

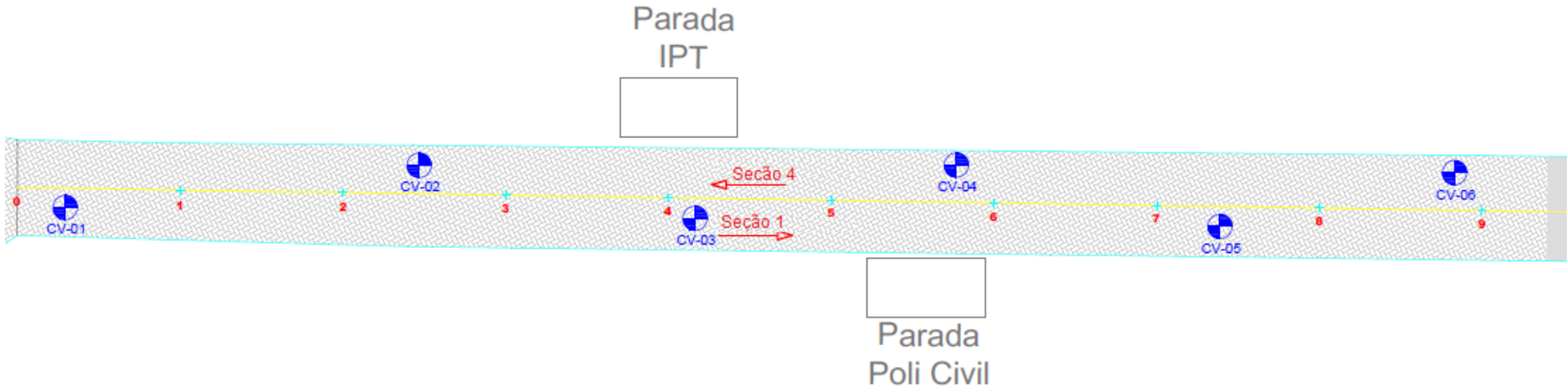


Figura 3.13 - Locação das cavas no Trecho 2, seções 2 e 3

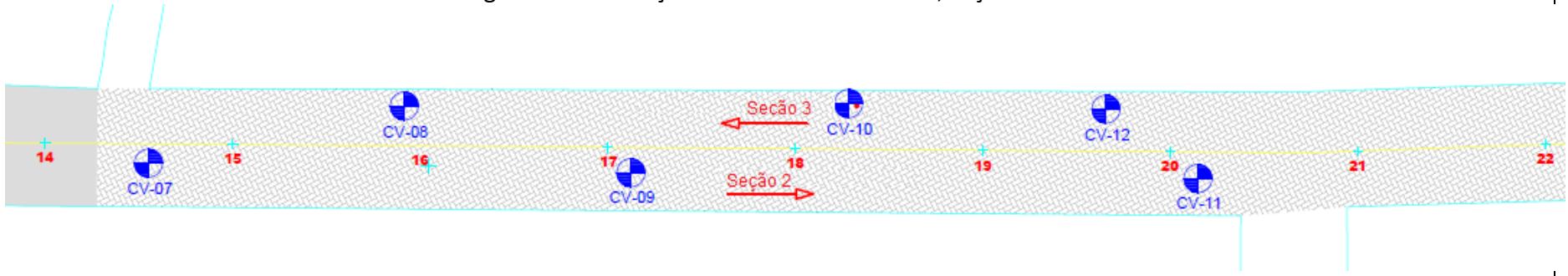


Figura 3.14 - Locais escolhidos para abertura de cavas no trecho 1

(a) Local da cava CV01 na seção 1 – Pavimento Integro

(b) Local da cava CV02 na seção 4 – Pavimento Integro

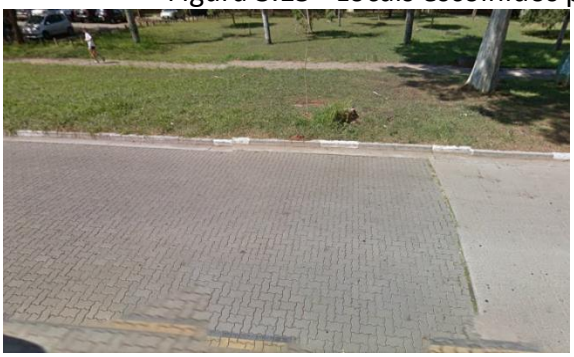
(c) Local da cava CV03 na seção 1 – Fundamento localizado com blocos danificados

(d) Local da cava CV04 na seção 4 – Afundamento em trilha de roda

(e) Local da cava CV05 na seção 1 – Afundamento em trilha de roda

(f) Local da cava CV06 na seção 4 – Pavimento Integro

Figura 3.15 - Locais escolhidos para abertura de cavas no trecho 2



(a) Local da cava CV07 na seção 2 – Pavimento Integro

(b) Local da cava CV08 na seção 3 – Pavimento Integro

(c) Local da cava CV09 na seção 2 – Afundamento localizado

(d) Local da cava CV10 na seção 3 – Pavimento Integro

(e) Local da cava CV11 na seção 2 – Afundamento em trilha de roda

(f) Local da cava CV12 na seção 3 – Afundamento em trilha de roda

4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Avaliação visual das condições do pavimento

Embora o pavimento de blocos de concreto da pista experimental seja relativamente novo, visto que sua operação teve início em setembro de 2010, foram observados danos significativos durante as avaliações visuais realizadas em 08 de fevereiro e em 31 de maio de 2015.

Com base nos parâmetros estabelecidos pela norma ASTM E2840 (2015) foram verificadas as patologias existentes no PBC, bem como seus níveis de severidade, conforme descrito e ilustrado a seguir.

Em pontos localizados foram observados blocos danificados (quebrados ou fissurados), a exemplo da situação ilustrada na Figura 4.1, a qual foi a condição mais severa de quebra de blocos observada em depressão localizada na seção 1. Embora tal ocorrência tenha sido observada apenas de forma localizada, tal situação demonstra um nível de severidade alto, de acordo com o parâmetro adotado para tal patologia.

Figura 4.1 - Blocos danificados e deformação permanente

(a) Blocos danificados na seção 1

(b) Profundidade da depressão igual a 76 mm

Em todas as quatro seções dos trechos experimentais foram observados casos de afastamento excessivo entre juntas, sendo os mais críticos observados nas seções 1 e 4 conforme apresentado na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Espaçamento entre juntas

(a) Espaçamento entre juntas na Seção 1

(b) Detalhe do espaçamento entre juntas na Seção 1, aproximadamente 40 mm

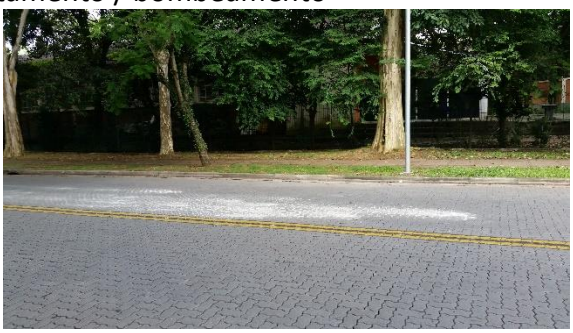
(c) Espaçamento entre juntas na Seção 4

(d) Detalhe do espaçamento entre juntas na Seção 4, aproximadamente 25 mm

Todas as seções estudadas apresentaram perda de rejuntamento através do mecanismo de bombeamento de finos; casos mais críticos foram constatados na seção 4 a exemplo da Figura 4.3.

Figura 4.3 - Perda de rejuntamento / bombeamento

(a) Bombeamento de finos na seção 4



(b) Bombeamento de finos na seção 4

Foi verificado a existência de pequenos reparos em concreto, de modo geral, em boas condições a exemplo das imagens apresentadas na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Reparos

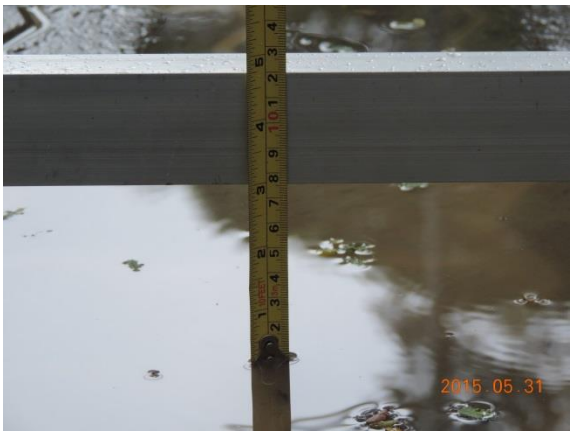
(a) Reparo na seção 4

(b) Reparo na seção 3

Quanto aos afundamentos em trilhas de roda, foram verificadas condições mais severas nas seções 1 e 4 com valores de até 76 mm, conforme ilustra a Figura 4.5. Nas seções 2 e 3 foram constatados afundamentos de trilhas de rodas de até 45 mm. Em todas as quatro seções foram verificados níveis de severidade alto desta patologia, de acordo com os parâmetros estabelecidos pela ASTM E2840 (2015).

Figura 4.5 - Afundamento em trilha de roda

(a) Afundamento em trilha de roda na seção 4



(b) Detalhe da profundidade do afundamento em trilha de roda, igual a 76 mm

Ao longo dos trechos em ambas as pistas, verificou-se a ocorrência de contenções laterais (sarjetas) e contenções transversais danificadas, como visto na Figura 4.6, onde os piores casos ocorrem nas seções 1 e 4. Embora muitas das contenções apresentassem fissuras, na maioria dos casos, não foi constatado afastamento excessivo entre juntas no entorno destas contenções danificadas.

Figura 4.6 - Contenções danificadas

(a) Sarjeta danificada na seção 1

(b) Viga transversal danificada (trecho 1)

A exemplo do ilustrado na Figura 4.6b, constatou-se a existência de três vigas transversais de confinamento, cuja mais danificada encontra-se na seção 1 e 4, próximo as paradas de ônibus Poli Civil e parada IPT.

Embora não conste na relação de patologias descritas na ASTM E2840 (2015), foram verificados outros tipos de danos no pavimento, sendo os mesmos descritos e ilustrados a seguir.

A Figura 4.7a ilustra um poço de inspeção com colarinho danificado e problemas fissurações nos reparos utilizados como arremate. Conforme denotado na Figura 4.7b, foram inseridos blocos cortados em locais onde deveriam estar blocos inteiros causando deslocamento longitudinal dos blocos. Ambos os exemplos apresentados podem ser considerados como casos isolados, devido à baixa frequência de ocorrência do problema nos trechos experimentais, embora tais problemas contribuam para perdas de características estruturais do pavimento.

Figura 4.7 - Problemas construtivos

(a) Problema construtivo (seção 1)

(b) Problemas construtivos (seção 1)

4.2 Índice de condição do pavimento

Em 22 de março de 2016 foi realizada nova verificação das patologias do pavimento, desta vez com a finalidade de determinação do ICP do pavimento em conformidade com a norma ASTM E2840 (2015).

Inicialmente as quatro seções dos dois trechos do PBC foram subdivididas em 14 amostras cujas áreas compreendessem 225 m² ± 90 m². As subdivisões das seções em amostras, bem como suas respectivas extensões e áreas são resumidas no Quadro 4.1.

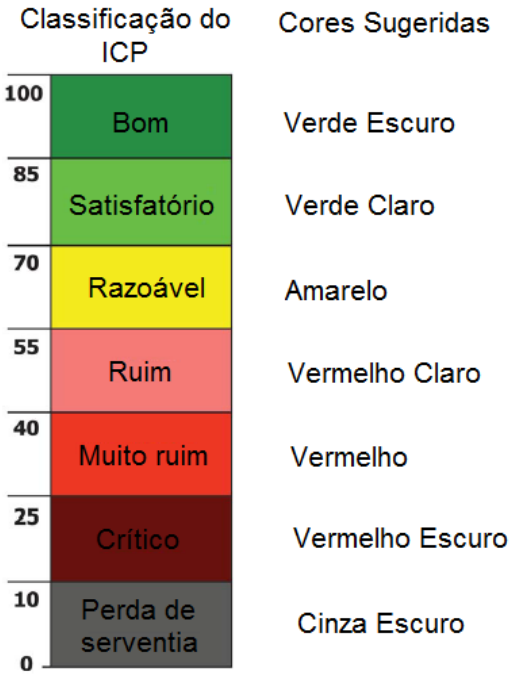
Quadro 4.1 - Amostras para verificação do ICP

Amostra		Extensão (m)	Área (m²)
Seção 1	1A	50	250
	1B	34,30	171,50
	1C	45	225
	1D	55	275
Seção 2	2A	45	225
	2B	47	235
	2C	50,90	254,50
Seção 3	3A	46,40	232
	3B	47	235
	3C	45	225
Seção 4	4A	55	275
	4B	45	225
	4C	34,30	171,50
	4D	50	250

Em seguida foram realizados os levantamentos das patologias em cada uma das amostras em função da unidade de área afetada de acordo com os níveis de severidade indicados no Quadro 3.8. A determinação da densidade de cada patologia, bem como de seu valor de dedução foi realizado com auxílio de uma planilha eletrônica e das curvas disponíveis para tais fins conforme preconiza a norma ASTM E2840 (2015).

De acordo com a ASTM E2840 (2015), o ICP é a classificação numérica da condição do pavimento que varia de 0 a 100, sendo 0 a pior condição possível e 100 a melhor condição possível. A classificação das condições do pavimento é uma descrição verbal da condição do pavimento como uma função do valor ICP que varia de "perda de serventia" a "bom", como apresentado na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Escala de classificação do ICP



Fonte: Adaptado de ASTM E2840 (2015)

Hein, Aho e Burak (2009) com base em estudos de ICP para PBC relacionam valores de referência para manutenção preventiva, reabilitação e reconstrução; segundo os autores, são consistentes com aqueles a serem utilizados para outros tipos de pavimentos, tais como concreto asfáltico e concreto de cimento Portland. Ações de manutenção e reabilitação devem ser sempre baseadas na presença de patologia real; no entanto, para efeitos de planejamento de nível de rede é útil categorizar ações com base em um intervalo de valores de ICP. Para valores de ICP de 71 e acima, as ações são normalmente restritas a manutenções preventivas. Para valores entre 41 e 70, normalmente a ação mais apropriada é alguma forma de reabilitação. Nesta gama, a diferença entre manutenção e reabilitação pode ser um pouco obscura. Para subdividir esta categoria, pavimento com um ICP entre 60 e 70 é tipicamente

um "grande" candidato para tratamento de manutenção. Pavimento com um ICP na faixa de 40-59 normalmente requer ação que recai na categoria de reabilitação. Para pavimento com um valor ICP abaixo de 40, a reconstrução é tipicamente a ação mais eficaz.

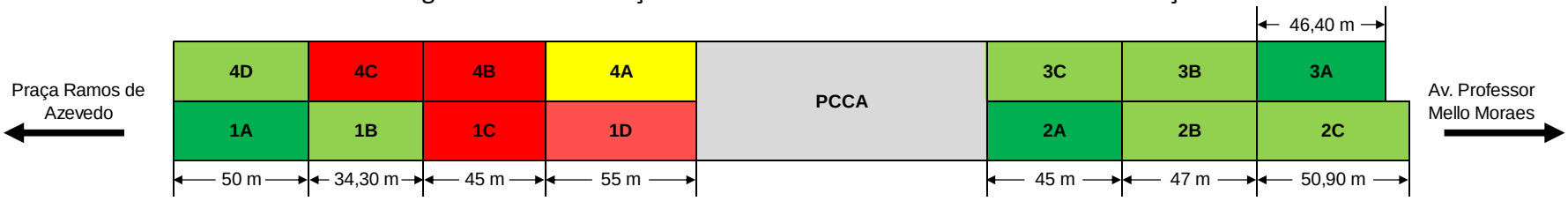
O Quadro 4.2 apresenta a classificação do ICP obtida em cada uma das amostras verificadas nas quatro seções dos dois trechos experimentais estudados. Além disso, a Figura 4.9 ilustra a distribuição das amostras onde foram calculados os ICP em cada seção.

É possível verificar no APÊNDICE A deste trabalho os dados de levantamento das patologias, bem como os resumos de cálculos para a determinação do ICP em cada uma das amostras verificadas.

Quadro 4.2 - ICP calculado em cada amostra

Amostra		Extensão (m)	Área (m²)	ICP	Classificação do ICP
Seção 1	1A	50	250	96	Bom
	1B	34,30	171,50	76	Satisfatório
	1C	45	225	40	Muito ruim
	1D	55	275	47	Ruim
Seção 2	2A	45	225	92	Bom
	2B	47	235	76	Satisfatório
	2C	50,90	254,50	74	Satisfatório
Seção 3	3A	46,40	232	89	Bom
	3B	47	235	76	Satisfatório
	3C	45	225	84	Satisfatório
Seção 4	4A	55	275	66	Razoável
	4B	45	225	33	Muito ruim
	4C	34,30	171,50	30	Muito ruim
	4D	50	250	77	Satisfatório

Figura 4.9 - Distribuição das amostras de ICP calculadas em cada seção



4.3 Deflexões de FWD obtidas

Os levantamentos deflectométricos realizados ao longo das quatro seções, dos dois trechos experimentais estudados, resultaram num total de 36 pontos de aplicação de carga. Tendo em vista que foram realizadas duas aplicações de carga, por ponto de aplicação, obteve-se 72 resultados de bacias de deflexão com o equipamento FWD.

As deflexões máximas (resultados obtidos no geofone Df_1, cuja distância do ponto de aplicação de carga é igual a zero) de cada seção são resumidas no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Faixa de variação das deflexões obtidas diretamente sob o ponto de carregamento nas seções experimentais

Seção	Deflexões ($x10^{-2}$ mm)	Média ($x10^{-2}$ mm)	Mediana ($x10^{-2}$ mm)	Desvio padrão ($x10^{-2}$ mm)	Coeficiente de variação
1	70 a 170	115,19	111,95	31,88	0,28
2	77 a 141	100,45	99,25	19,18	0,19
3	65 a 117	90,44	89,15	19,20	0,21
4	75 a 145	105,90	101,85	26,47	0,25

Os resultados das deflexões obtidas a partir de cada geofone em cada aplicação de carga, bem como a intensidade da carga aplicada em cada um dos levantamentos deflectométricos realizados são apresentados no Quadro 4.4 e Quadro 4.5, respectivamente, 1ª aplicação de carga e 2ª aplicação de carga.

A Figura 4.10 ilustra as deflexões máximas considerando os resultados da 1ª aplicação de carga em cada ponto, onde é possível constatar que os resultados mais desfavoráveis se encontram nas Seções 1 e 4 próximos ao PCCA.

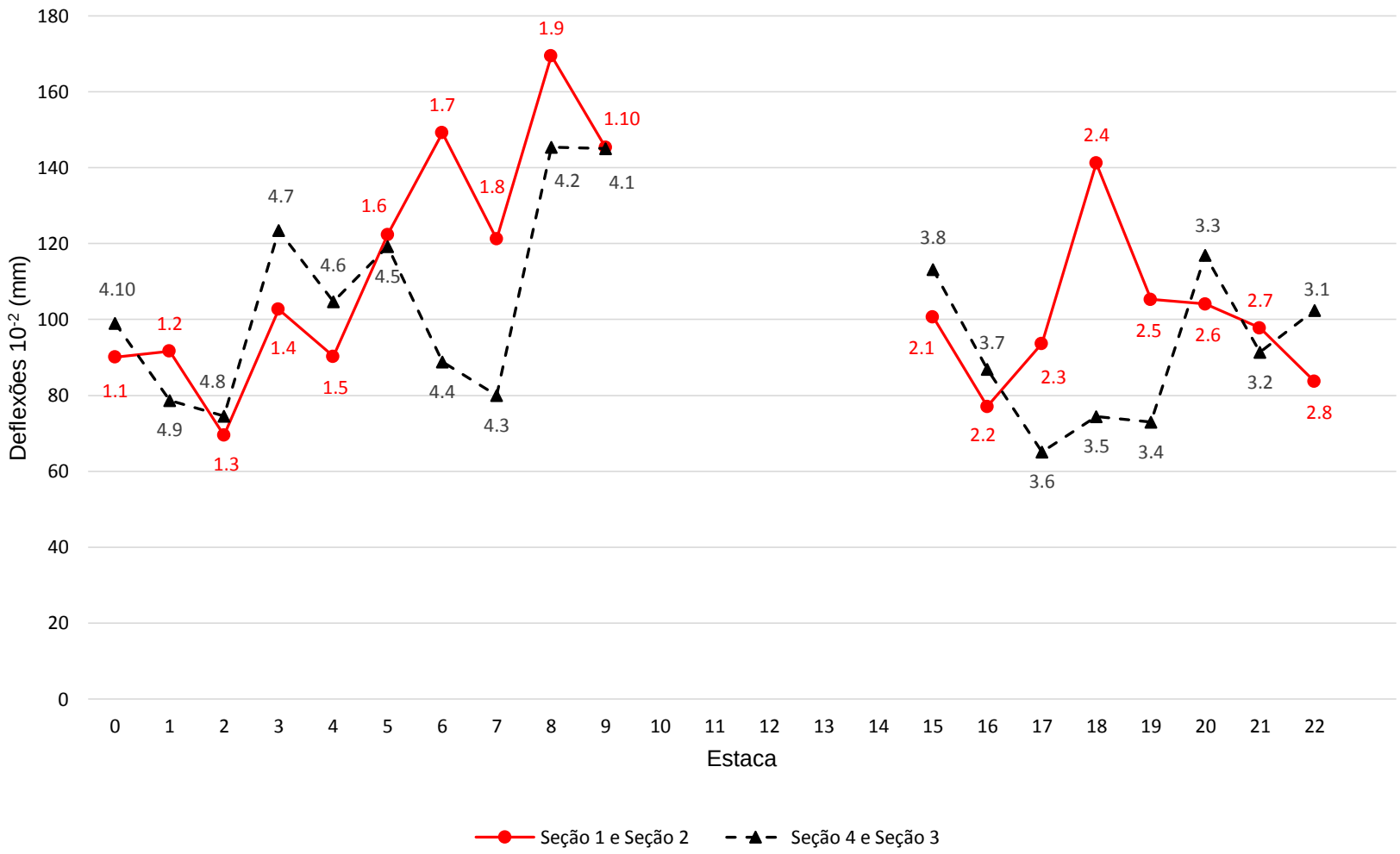
Quadro 4.4 - Dados obtidos a partir do levantamento deflectométrico com FWD da 1ª aplicação de carga

	Pontos de Aplicação de Carga	Carga Aplicada	VALORES DE DEFLEXÃO (10^{-2} mm)						
			1ª Aplicação						
			Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7
		(kN)	0	20	30	45	60	90	120
Seção 1	1.1	57,42	90,1	77,9	58,0	45,5	37,3	29,5	24,4
	1.2	57,76	91,7	80,2	62,5	50,0	42,1	33,2	26,6
	1.3	58,59	69,5	61,9	42,1	27,3	20,2	14,3	12,3
	1.4	57,97	102,7	91,7	69,0	52,5	35,7	26,4	18,2
	1.5	57,07	90,3	71,5	64,6	48,3	40,5	29,8	22,1
	1.6	58,39	122,4	99,8	71,3	51,1	36,1	29,8	24,2
	1.7	56,03	149,2	115,7	96,7	78,9	63,6	46,5	35,6
	1.8	56,17	121,2	100,7	83,2	65,7	52,2	39,7	31,4
	1.9	55,89	169,5	143,5	111,2	92,9	74,3	52,4	38,5
	1.10	56,10	145,3	117,1	93,6	77,6	65,0	39,6	28,4
Seção 2	2.1	57,76	100,7	68,5	48,8	39,4	28,6	20,5	15,5
	2.2	57,90	77,1	66,5	55,6	47,1	36,2	27,7	21,4
	2.3	58,18	93,7	82,5	69,5	54,3	40,0	24,5	14,3
	2.4	57,28	141,2	112,1	93,3	72,1	48,6	23,5	14,6
	2.5	57,76	105,3	86,6	70,6	46,5	34,2	22,5	18,4
	2.6	57,28	104,1	76,2	59,8	40,5	30,5	26,1	19,4
	2.7	56,79	97,8	86,1	62,2	47,5	37,8	30,5	19,5
	2.8	56,93	83,7	66,0	50,4	38,5	30,4	23,2	16,8
Seção 3	3.1	57,42	102,4	87,7	66,7	51,0	41,4	30,7	23,5
	3.2	58,11	91,4	73,5	60,4	45,7	37,5	25,7	20,2
	3.3	57,83	117,0	86,9	63,5	37,5	26,1	17,9	14,0
	3.4	58,73	73,0	63,6	47,5	34,0	23,5	12,5	8,2
	3.5	57,55	74,5	69,7	46,3	29,4	23,4	15,4	12,8
	3.6	58,04	65,1	52,7	39,5	27,8	19,4	13,9	10,8
	3.7	58,87	86,9	62,1	49,9	35,5	27,3	20,0	14,2
	3.8	56,79	113,2	46,2	39,8	36,1	32,5	26,0	21,8
Seção 4	4.1	55,47	145,0	94,0	74,6	58,7	45,3	30,6	20,3
	4.2	56,65	145,4	128,5	100,5	77,8	62,7	44,9	35,0
	4.3	57,83	80,0	75,0	58,2	47,5	40,6	31,8	25,4
	4.4	58,04	88,9	78,7	65,4	52,0	44,6	34,4	19,7
	4.5	57,76	119,2	95,4	70,8	54,4	42,4	32,4	23,3
	4.6	57,21	104,7	102,7	66,9	48,1	39,7	31,8	25,2
	4.7	57,42	123,5	100,4	72,3	49,9	39,3	28,9	23,5
	4.8	58,39	74,6	62,5	45,8	29,6	21,1	17,1	14,9
	4.9	57,55	78,7	72,0	55,3	43,9	34,5	27,4	22,0
	4.10	56,86	99,0	83,0	64,9	51,2	41,7	32,3	26,8

Quadro 4.5 - Dados obtidos a partir do levantamento deflectométrico com FWD da 2ª aplicação de carga

	Pontos de Aplicação de Carga	Carga Aplicada	VALORES DE DEFLEXÃO (10^{-2} mm)						
			2ª Aplicação						
			Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7
		(kN)	0	20	30	45	60	90	120
Seção 1	1.1	57,49	89,9	79,0	56,8	45,7	37,8	30,2	24,7
	1.2	58,04	96,9	81,1	63,5	51,4	43,2	35,3	27,1
	1.3	59,29	74,8	63,3	42,4	27,5	20,9	14,5	12,8
	1.4	57,83	106,9	90,2	69,7	53,1	36,6	27,2	21,3
	1.5	57,97	96,5	67,9	63,8	49,0	40,9	31,3	23,6
	1.6	58,32	110,0	94,4	71,3	52,2	37,2	30,7	24,8
	1.7	56,17	144,0	113,8	96,3	79,7	64,7	47,3	36,5
	1.8	56,45	127,0	99,6	84,5	66,5	53,7	40,6	32,2
	1.9	55,27	166,7	140,0	111,2	93,5	74,8	52,8	39,9
	1.10	56,03	143,0	96,4	93,8	80,0	65,9	39,5	28,0
Seção 2	2.1	57,76	95,8	65,1	48,1	39,5	30,0	22,1	16,9
	2.2	58,11	74,5	64,2	53,3	45,4	36,0	27,3	21,1
	2.3	58,39	92,9	80,7	67,8	53,9	40,5	24,1	14,7
	2.4	57,35	133,9	104,2	88,0	69,7	46,7	24,3	15,4
	2.5	57,49	97,6	86,0	68,4	46,3	34,5	23,2	18,7
	2.6	57,35	103,8	73,1	57,7	40,4	31,1	25,8	19,6
	2.7	57,97	96,1	83,8	62,2	47,9	38,8	31,5	21,0
	2.8	57,35	78,5	61,7	48,6	36,4	29,9	21,9	16,2
Seção 3	3.1	57,69	93,2	82,3	64,7	50,8	41,7	31,0	24,1
	3.2	58,18	87,6	72,6	59,7	46,0	37,8	26,5	20,3
	3.3	57,90	108,4	78,1	57,4	36,3	26,2	18,1	14,4
	3.4	58,46	70,4	60,3	46,3	34,0	24,3	12,9	8,4
	3.5	57,69	70,2	66,0	44,7	29,2	23,5	15,5	13,0
	3.6	57,97	60,8	50,1	37,8	27,5	20,0	14,1	11,4
	3.7	58,87	71,9	60,6	48,8	36,0	26,9	20,0	14,8
	3.8	57,00	111,5	45,5	41,6	38,3	34,2	27,1	21,6
Seção 4	4.1	55,82	85,0	76,3	70,7	57,5	45,8	31,0	20,6
	4.2	56,51	128,8	128,6	99,8	78,8	64,0	45,6	36,1
	4.3	57,90	82,4	71,3	56,7	47,5	40,2	31,9	25,9
	4.4	58,11	86,8	77,0	65,8	53,1	45,3	35,3	20,3
	4.5	57,83	115,9	93,5	70,0	55,2	43,3	33,7	24,1
	4.6	57,42	106,2	86,9	65,1	49,1	40,5	32,2	26,1
	4.7	57,42	123,6	97,7	73,0	50,3	40,0	29,7	24,1
	4.8	58,18	72,7	61,7	44,6	30,1	21,3	17,1	14,8
	4.9	57,62	86,0	71,9	55,4	43,5	35,0	27,6	22,5
	4.10	57,21	98,7	80,9	64,4	52,2	41,2	32,3	27,7

Figura 4.10 - Comportamento do pavimento com base na deflexão máxima



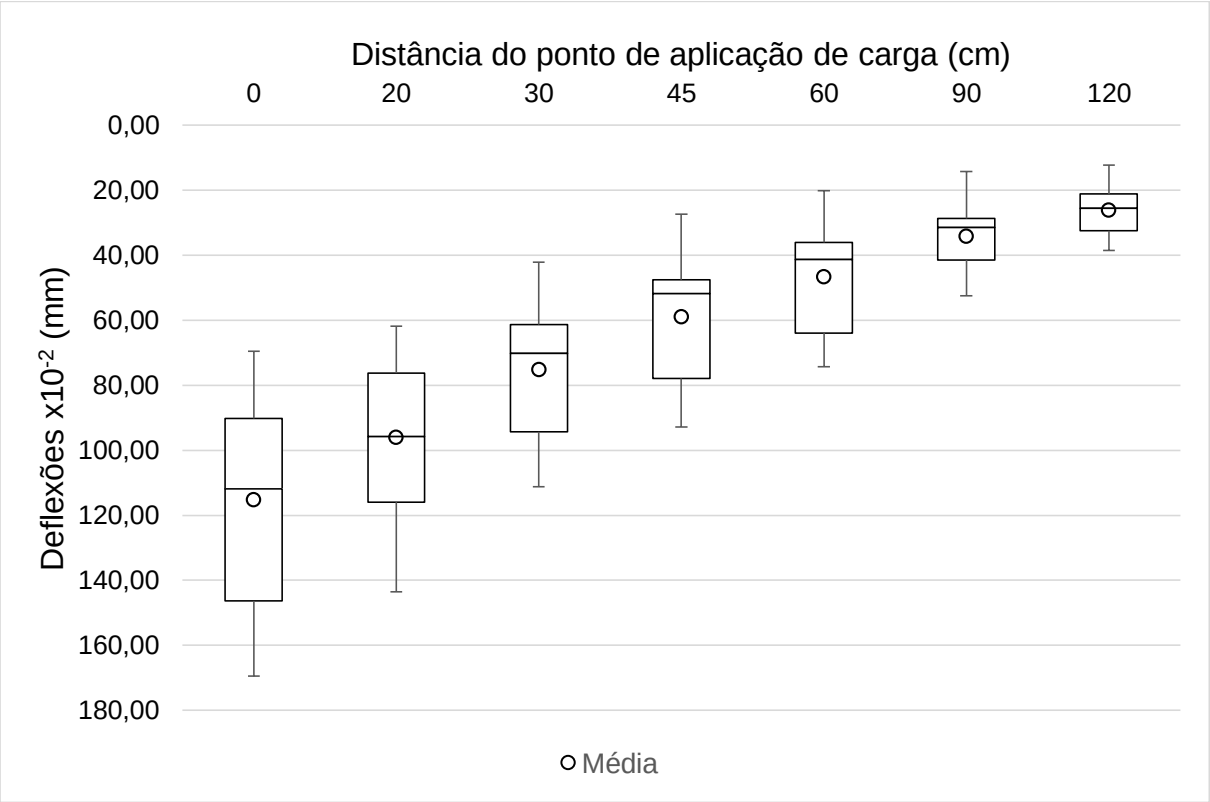
Com a finalidade de determinar, dentro do horizonte de dados colhidos nos levantamentos deflectométricos, quais eram os mais significativos em cada seção de cada trecho experimental do pavimento, optou-se pela elaboração de gráficos *"box-plot"* com a finalidade de realizar uma análise estatística descritiva dos pontos levantados em cada uma das 4 seções dos dois trechos experimentais. Assim sendo, para os resultados obtidos na primeira aplicação de carga, com auxílio de uma planilha eletrônica, foram determinados os limites superiores e inferiores dos resultados "bigode", o intervalo entre o 1º quartil e 3º quartil "caixa", a mediana, a média, e os *outliers* (dados discrepantes) para cada uma das quatro seções estudadas.

Os parâmetros calculados para a construção dos *"box-plot"* são apresentados no Quadro 4.6 até o Quadro 4.9. A partir da Figura 4.11 até Figura 4.14 são apresentados os "*box-plot"* das Seções 1 a 4.

Quadro 4.6 - Parâmetros estatísticos para elaboração do *"box-plot"* da seção 1

Estatística por geofone (x10^{-2} mm)							
Dados	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)
1º Quartil	90,25	76,30	61,38	47,60	36,00	28,73	21,13
Mediana	111,95	95,75	70,15	51,80	41,30	31,50	25,50
3º Quartil	146,28	116,05	94,38	77,93	63,95	41,40	32,45
Limite Inferior	69,50	61,90	42,10	27,30	20,20	14,30	12,30
Limite Superior	169,50	143,50	111,20	92,90	74,30	52,40	38,50
Média	115,19	96,00	75,22	58,98	46,70	34,12	26,17
outliers mín.	-	-	-	-	-	-	-
outliers máx.	-	-	-	-	-	-	-
Desvio padrão	30,24	23,42	19,70	18,50	15,80	10,30	7,44

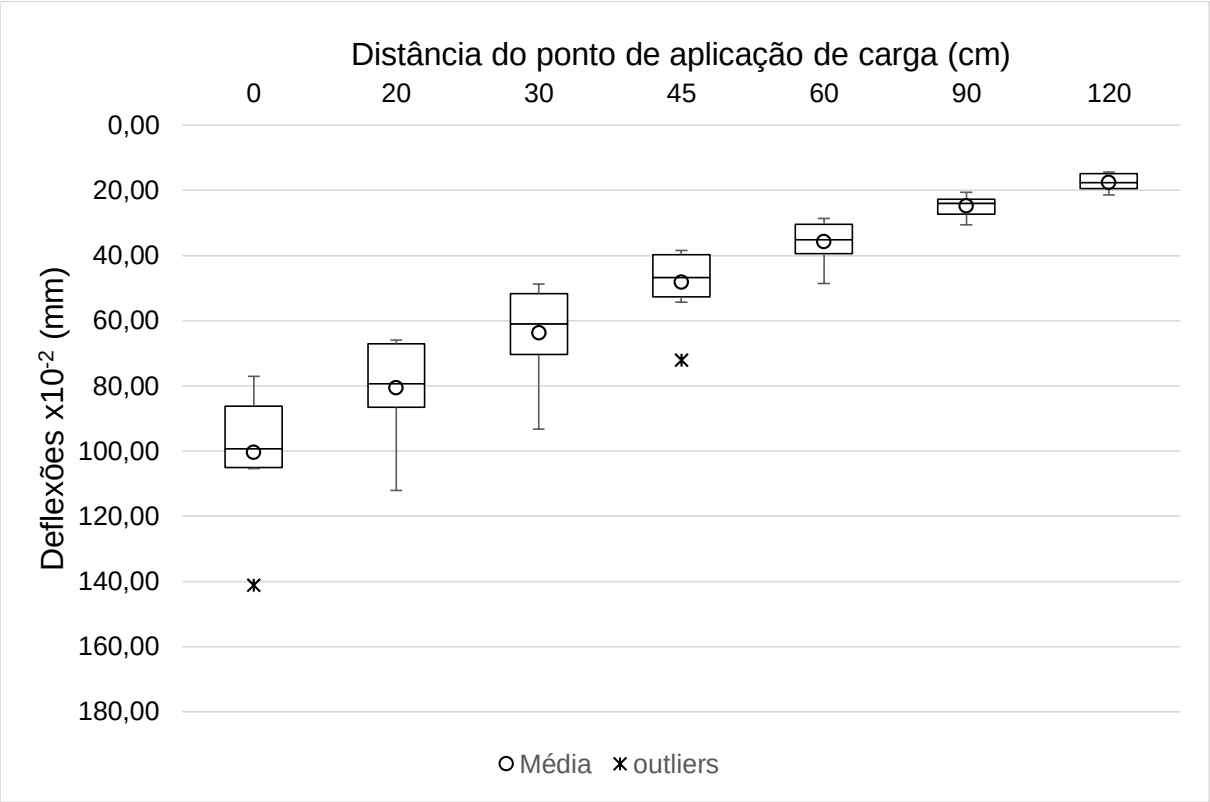
Figura 4.11 - Análise estatística das deflexões na Seção 1



Quadro 4.7 - Parâmetros estatísticos para elaboração do *"box-plot"* da seção 2

Estatística por geofone (x10^{-2} mm)							
Dados	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)
1º Quartil	86,20	67,00	51,70	39,68	30,43	22,68	14,83
Mediana	99,25	79,35	61,00	46,80	35,20	24,00	17,60
3º Quartil	105,00	86,48	70,33	52,60	39,45	27,30	19,48
Limite Inferior	77,10	66,00	48,80	38,50	28,60	20,50	14,30
Limite Superior	105,30	112,10	93,30	54,30	48,60	30,50	21,40
Média	100,45	80,56	63,78	48,24	35,79	24,81	17,49
outliers mín.	-	-	-	-	-	-	-
outliers máx.	141,20	-	-	72,10	-	-	-
Desvio padrão	17,94	14,32	13,41	10,27	6,10	2,97	2,42

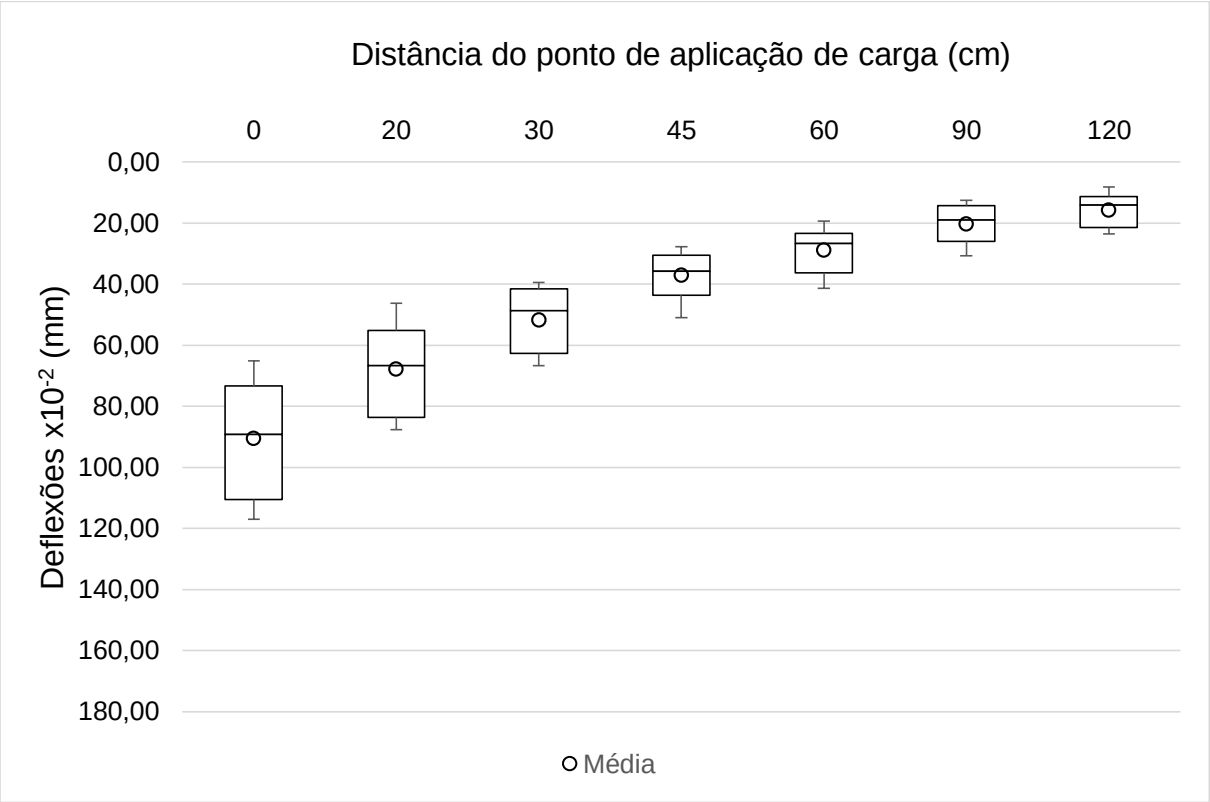
Figura 4.12 - Análise estatística das deflexões na Seção 2



Quadro 4.8 - Parâmetros estatísticos para elaboração do *"box-plot"* da seção 3

Estatística por geofone (x10^{-2} mm)							
Dados	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)
1º Quartil	73,38	55,05	41,43	30,55	23,43	14,28	11,30
Mediana	89,15	66,65	48,70	35,80	26,70	18,95	14,10
3º Quartil	110,50	83,55	62,73	43,65	36,25	25,93	21,40
Limite Inferior	65,10	46,20	39,50	27,80	19,40	12,50	8,20
Limite Superior	117,00	87,70	66,70	51,00	41,40	30,70	23,50
Média	90,44	67,80	51,70	37,13	28,89	20,26	15,69
outliers mín.	-	-	-	-	-	-	-
outliers máx.	-	-	-	-	-	-	-
Desvio padrão	17,96	13,88	9,88	7,30	7,10	6,14	5,15

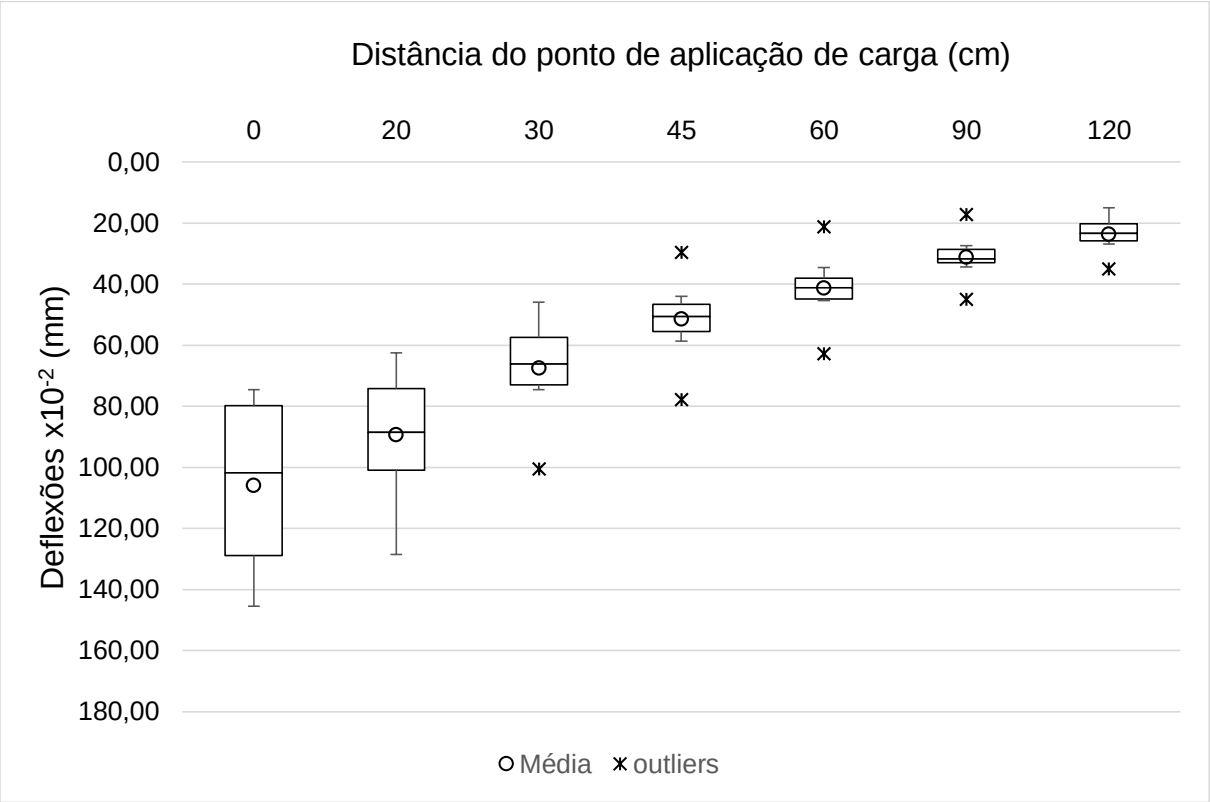
Figura 4.13 - Análise estatística das deflexões na Seção 3



Quadro 4.9 - Parâmetros estatísticos para elaboração do *"box-plot"* da seção 4

Estatística por geofone (x10^{-2} mm)							
Dados	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)
1º Quartil	79,68	74,25	57,48	46,60	38,10	28,53	20,15
Mediana	101,85	88,50	66,15	50,55	41,15	31,80	23,40
3º Quartil	128,88	100,98	72,88	55,48	44,78	32,90	25,75
Limite Inferior	74,60	62,50	45,80	43,90	34,50	27,40	14,90
Limite Superior	145,40	128,50	74,60	58,70	45,30	34,40	26,80
Média	105,90	89,22	67,47	51,31	41,19	31,16	23,61
outliers mín.	-	-	-	29,60	21,10	17,10	-
outliers máx.	-	-	100,50	77,80	62,70	44,90	35,00
Desvio padrão	25,11	18,09	13,75	11,49	9,73	6,48	5,00

Figura 4.14 - Análise estatística das deflexões na Seção 4



4.4 Estrutura de pavimento encontrada

Durante a abertura das cavas constataram-se significativas variações nos tipos de materiais empregados nas diferentes camadas do pavimento e em suas respectivas espessuras, em comparação com a estrutura de projeto discutida no item 3.2. Os blocos pré-moldados da camada de revestimento apresentaram espessuras variando entre 9,4 cm e 10 cm. A Figura 4.15 ilustra a situação verificada.

Figura 4.15 - Detalhe da espessura do bloco retirado da cava CV03 (igual a 9,4 cm)

Na camada de assentamento, verificou-se o emprego de dois materiais distintos: areia grossa e pó-de-pedra, cujas espessuras variaram entre valores próximos a zero e 11 cm, conforme apresentado na Figura 4.16.

Figura 4.16 - Detalhe da espessura da camada de assentamento na cava CV07 (areia grossa, 11 cm)

Quanto ao material empregado como camada de base, constatou-se, na maioria das cavas, a presença de material cimentado, classificado como CCR. Entretanto, durante as tentativas de extração de CPs, deste material, com auxílio de sonda rotativa, conforme apresentado na Figura 4.17, a camada apresentou processo de desagregação do material o que impossibilitou a retirada de CPs íntegros, como pode ser observado na Figura 4.18, permitindo, apenas, a retirada de três CPs com espessuras de, aproximadamente, 8,5 cm, 5,5 cm e 2 cm, respectivos às cavas CV01, CV04 e CV09, conforme ilustrado na Figura 4.19.

Figura 4.17 - Tentativa de extração de CP na cava CV01

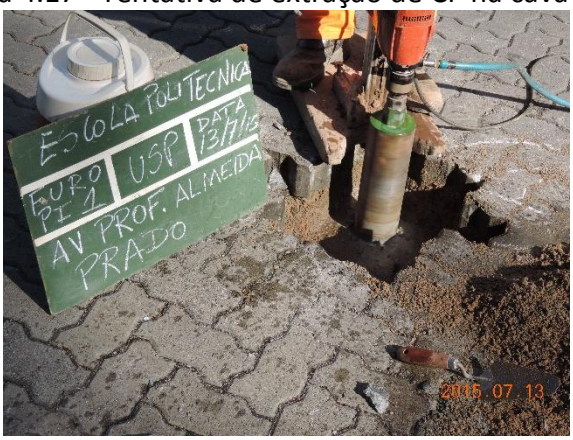


Figura 4.18- Materiais das camadas de assentamento e base coletados na cava CV08

Figura 4.19 - CPs coletados nas cavas CV01 e CV04

(a) CP coletado na cava CV01, espessura aproximada de 8,5 cm

(b) CP coletado na cava CV04, espessura aproximada de 5,5 cm

Na camada de sub-base verificou-se a ocorrência de materiais classificados como brita graduada simples (BGS) e bica corrida com significativa variação nas espessuras. Como camada empregada para fins de reforço de subleito foi verificado o emprego dos materiais rachão e bica corrida (Figura 4.20), os quais foram verificados apenas no trecho 2, seções 2 e 3.

Figura 4.20 - Material de reforço de subleito coletado na cava CV08

A profundidade total das doze cavas variou entre 29 cm (cava CV06) e 105 cm (cava CV07). Os tipos de materiais empregados na estrutura do pavimento e suas respectivas espessuras verificadas nas aberturas das cavas são resumidos no Quadro 4.10 e no Quadro 4.11.

Quadro 4.10 - Características dos materiais encontrados nas aberturas de cavas do trecho 1

SEÇÃO 1

	Cava 01		Cava 03		Cava 05	
	Material	h (cm)	Material	h (cm)	Material	h (cm)
Revestimento	Bloco de concreto	9,70	Bloco de concreto	9,40	Bloco de concreto	9,80
Material de assentamento	Areia grossa	8,00	Areia grossa	6,50	Pó-de-pedra	7,90
Base	CCR	8,50	BGS	24,60	BGS	14,30
Sub-base	BGS	12,80	-	-	Bica corrida	9,30
Reforço	-	-	-	-	-	-

SEÇÃO 4

	Cava 02		Cava 04		Cava 06	
	Material	h (cm)	Material	h (cm)	Material	h (cm)
Revestimento	Bloco de concreto	10,00	Bloco de concreto	10,00	Bloco de concreto	10,00
Material de assentamento	Pó-de-pedra	8,00	Pó-de-pedra	6,00	Pó-de-pedra	7,00
Base	CCR	14,00	CCR	10,00	Bica corrida	12,00
Sub-base	Bica corrida	10,00	BGS	29,00	-	-
Reforço	-	-	-	-	-	-

Quadro 4.11 - Características dos materiais encontrados nas aberturas de cavas do trecho 2

SEÇÃO 2

	Cava 07		Cava 09		Cava 11	
	Material	h (cm)	Material	h (cm)	Material	h (cm)
Revestimento	Bloco de concreto	9,80	Bloco de concreto	10,00	Bloco de concreto	9,50
Material de assentamento	Areia grossa	11,00	Pó-de-pedra	2,00	Pó-de-pedra	5,50
Base	Pó-de-pedra	1,20	CCR	2,00	CCR	15,00
Sub-base	Bica corrida	83,00	BGS	15,00	BGS	9,00
Reforço	-	-	Rachão	36,00	Bica corrida	27,00

SEÇÃO 3

	Cava 08		Cava 10		Cava 12	
	Material	h (cm)	Material	h (cm)	Material	h (cm)
Revestimento	Bloco de concreto	10,00	Bloco de concreto	10,00	Bloco de concreto	10,00
Material de assentamento	Areia grossa	6,00	Pó-de-pedra	5,00	-	-
Base	CCR	17,00	CCR	7,00	BGS	86,00
Sub-base	BGS	8,00	BGS	18,00	-	-
Reforço	Rachão	58,00	Bica corrida	35,00	-	-

A partir de amostra da camada de assentamento coletada na cava CV08, classificada como pó-de-pedra, foi realizada a determinação de sua composição granulométrica conforme preconiza a norma ABNT NBR NM 248 (2003).

A determinação do material fino que passa pela peneira de abertura igual a 0,075 mm, por processo de lavagem, foi realizada em conformidade com a norma ABNT NBR NM 46 (2003). A Figura 4.21 ilustra a amostra antes e depois do procedimento de lavagem. A porcentagem de material que passa em cada uma das peneiras utilizadas na análise granulométrica da amostra é resumida no Quadro 4.12.

Figura 4.21- Amostra da cava CV08 para determinação da composição granulométrica

(a) amostra após secagem em estufa e antes do processo de lavagem

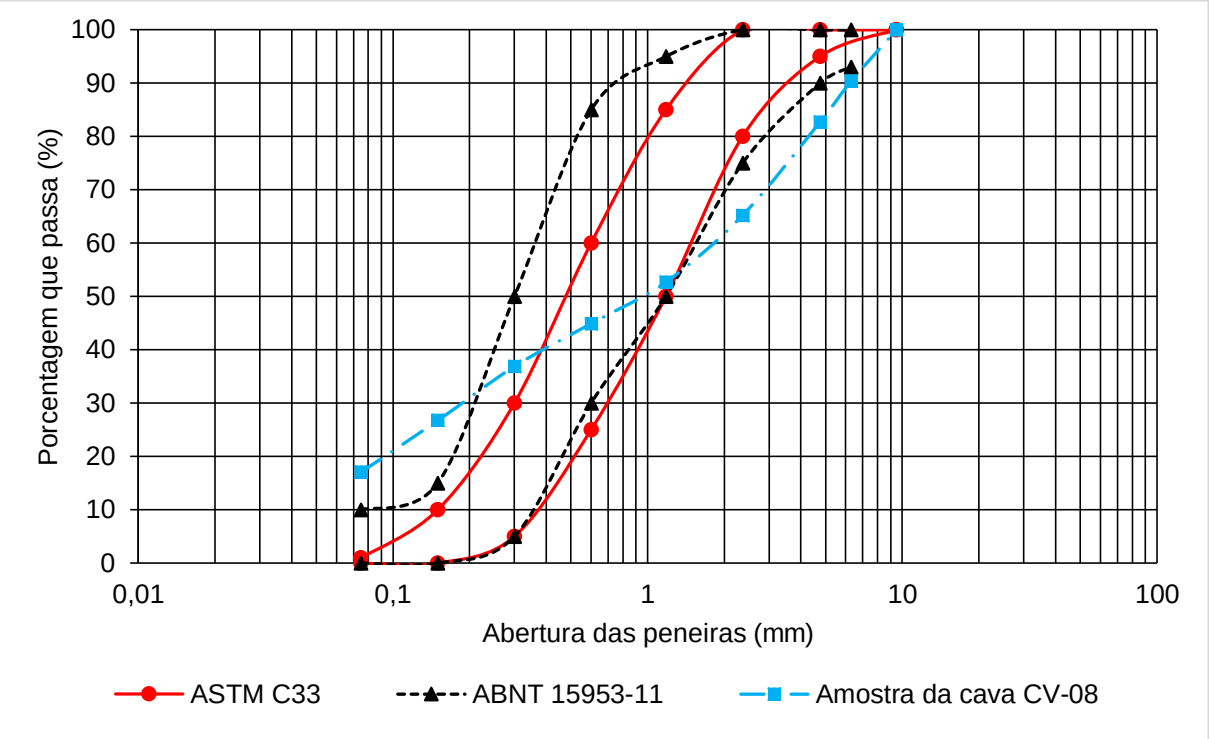
(b) amostra seca em estufa após processo de lavagem

Quadro 4.12 - Resumo da análise granulométrica do material coletado na cava CV08

Abertura da peneira (mm)	Porcentagem que passa (%)
9,5	100
6,3	90
4,75	83
2,36	65
1,18	53
0,6	45
0,3	37
0,15	27
0,075	17

O comparativo dos resultados obtidos na determinação da composição granulométrica da amostra coletada na cava CV08 com as faixas granulométricas recomendadas pela ABNT e pela norma ASTM em conjunto com os limites adicionais recomendados pelo ICPI quanto a porcentagem máxima de material que passa pela peneira de abertura igual a 0,075 mm, para materiais empregados na camada de assentamento do PBC, é apresentado na Figura 4.22.

Figura 4.22 - Análise granulométrica de material da camada de assentamento coletado na cava CV-08

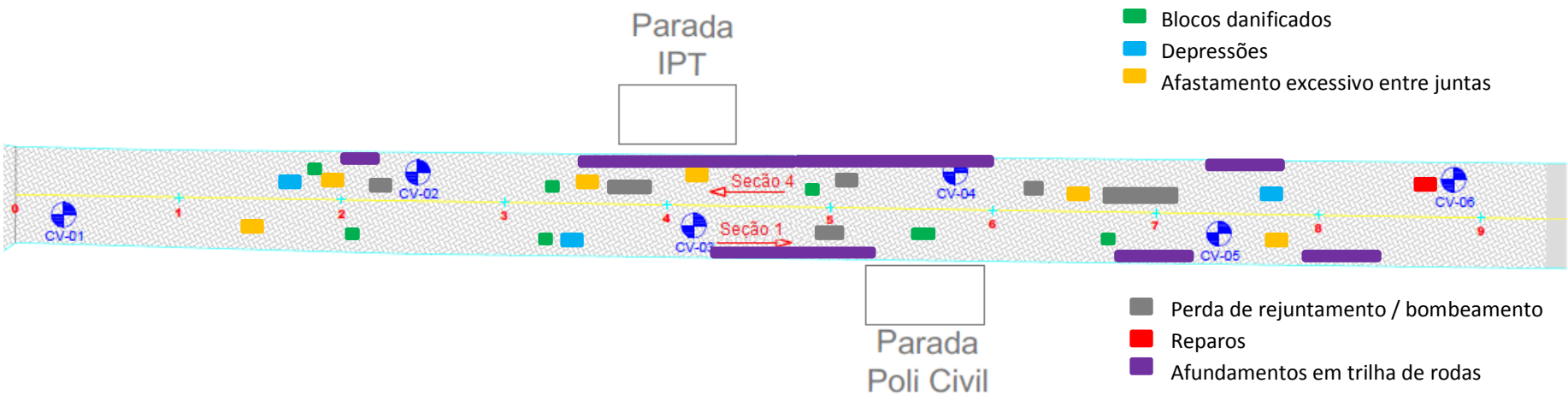


A Figura 4.23 e a Figura 4.24 resumem os resultados das avaliações destrutivas e não destrutivas realizadas nos dois trechos experimentais onde, são apresentadas as deflexões máximas, os materiais e respectivas espessuras verificadas nas aberturas de cavas e ainda as patologias verificadas em cada seção.

Figura 4.23 - Resumo dos resultados dos estudos realizados no trecho 1

Deflexões (D_0 x 10^{-2} mm)

Seção	Estaca 0	Estaca 1	Estaca 2	Estaca 3	Estaca 4	Estaca 5	Estaca 6	Estaca 7	Estaca 8	Estaca 9
1	90,1	91,7	69,5	102,7	90,3	122,4	149,2	121,2	169,5	145,3
4	99,0	78,7	74,6	123,5	104,7	119,2	88,9	80,0	145,4	145,0



Cava CV01

Blocos de concreto	9,7 cm
Areia	8,0 cm
CCR (com retirada de CP)	8,5 cm
BGS	12,8 cm

Cava CV02

Blocos de concreto	10,0 cm
Pó-de-pedra	8,0 cm
CCR (material solto)	14,0 cm
Bica corrida	10,0 cm

Cava CV03

Blocos de concreto	9,4 cm
Areia	6,5 cm
BGS	24,6 cm

Cava CV04

Blocos de concreto	10,0 cm
Pó-de-pedra	6,0 cm
CCR (com CP de 5,5 cm)	10,0 cm
BGS	29,0 cm

Cava CV05

Blocos de concreto	9,8 cm
Pó-de-pedra	7,9 cm
BGS	14,3 cm
Bica corrida	9,3 cm

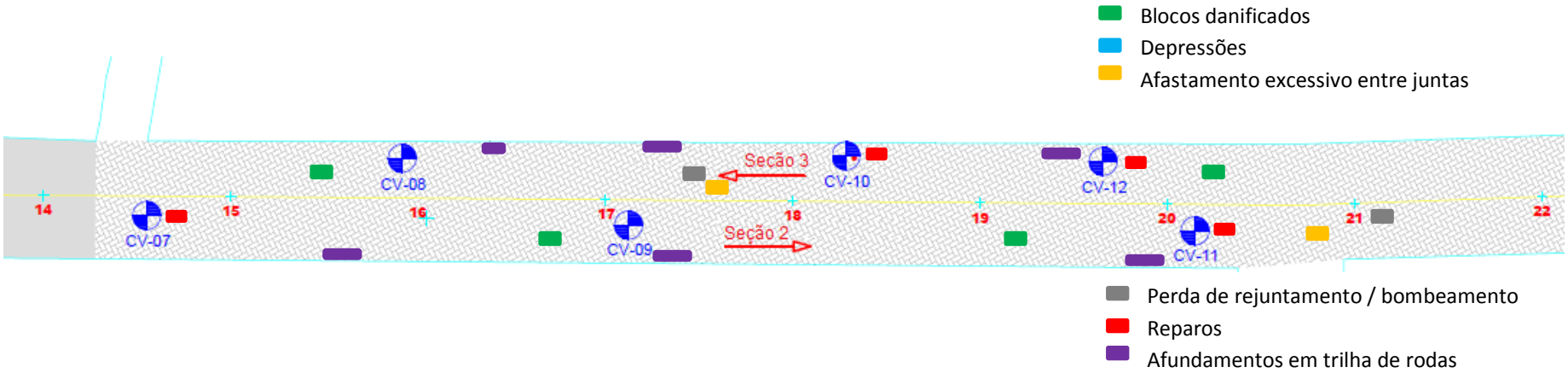
Cava CV06

Blocos de concreto	10,0 cm
Pó-de-pedra	7,0 cm
Bica corrida	12,0 cm

Figura 4.24 - Resumo dos resultados dos estudos realizados no trecho 2

Deflexões (D_0 x 10^{-2} mm)

Seção	Estaca 15	Estaca 16	Estaca 17	Estaca 18	Estaca 19	Estaca 20	Estaca 21	Estaca 22
2	100,7	77,1	93,7	141,2	105,3	104,1	97,8	83,7
3	113,2	86,9	65,1	74,5	73,0	117,0	91,4	102,4



Cava CV07

Blocos de concreto	9,8 cm
Areia	11,0 cm
Pó-de-pedra	1,2 cm
Bica corrida	83,0 cm

Cava CV08

Blocos de concreto	10,0 cm
Areia	6,0 cm
CCR (material solto)	17,0 cm
BGS	8,0 cm
Rachão	58,0 cm

Cava CV09

Blocos de concreto	10,0 cm
Pó-de-pedra	2,0 cm
CCR (com retirada de CP)	2,0 cm
BGS	15,0 cm
Rachão	36,0 cm

Cava CV10

Blocos de concreto	10,0 cm
Pó-de-pedra	5,0 cm
CCR (material solto)	7,0 cm
BGS	18,0 cm
Bica corrida	35,0 cm

Cava CV11

Blocos de concreto	9,5 cm
Pó-de-pedra	5,5 cm
CCR (material solto)	14,3 cm
BGS	9,0 cm
Bica corrida	27,0 cm

Cava CV12

Blocos de concreto	10,0 cm
BGS	86,0 cm

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Pista x projeto

Com base nos resultados apresentados no item 4.3, constatou-se que os valores das deflexões obtidas em pista foram muito superiores ao esperado para o PBC sobre base cimentada tendo em vista que, de acordo com o apresentado no Quadro 3.4, a deflexão no topo do revestimento com base na análise mecanicista era da ordem de 4 x 10^{-2} mm. Todavia, conforme visto no item 2.6, por se tratar de um revestimento onde ocorrem descontinuidades, em função da rede de juntas característica nos PBC, geralmente ocorrem deflexões muito maiores do que em pavimentos convencionais. De modo que os PBC podem consistentemente apresentar deflexões de 200 x 10^{-2} mm ou mais, sem apresentar patologias (SHACKEL, 1986).

Neste sentido é importante observar que embora o carregamento de 60 kN aplicado no pavimento pelo equipamento FWD seja maior que o usual de 40 kN (empregado com intuito de simular o carregamento de duas rodas de um ESRD (usualmente 80 kN), a análise do comportamento estrutural do pavimento com base nas bacias de deflexão obtidas sugere resultados típicos de pavimento flexível, divergindo assim do comportamento esperado de pavimento rígido dado o emprego da base cimentada sob o revestimento de blocos pré-moldados de concreto.

Tal resultado levaria a duas linhas de raciocínio: a primeira, que a base de CCR encontra-se severamente danificada, devido a fadiga, impossibilitando assim, que a devida condição de suporte e atenuação das tensões provenientes do carregamento ocorram na estrutura do pavimento conforme projetado; a outra é que a execução da obra pode ter ocorrido em dissonância com o projeto executivo impactando diretamente nas condições de dano verificadas em campo.

Neste sentido, a abertura de cavas no pavimento forneceu algumas respostas quanto à estrutura existente nos trechos experimentais, de modo que, a partir dos dados obtidos, pode-

se traçar um comparativo entre os tipos de materiais encontrados em campo e suas respectivas espessuras com aqueles especificados no projeto dos trechos experimentais.

Quadro 5.1 - Comparativo dos materiais e espessuras das camadas do pavimento

	Dados de projeto		**Dados de campo**	
	Material	**h (m)**	**Material**	**h (m)**
Revestimento	Blocos pré-moldados de concreto	0,10	Blocos pré-moldados de concreto	0,094 - 0,100
Material de Assentamento	Areia	0,05	Areia grossa Pó-de-pedra	0,06 - 0,11 0,02 - 0,08
Base	CCR	0,15	CCR BGS Bica corrida	0,02 - 0,17 0,14 - 0,86 0,12
Sub-base	Macadame Seco	0,30	Bica corrida BGS	0,10 - 0,83 0,08 - 0,29
Reforço	Rachão	0,50 - 1,00	Rachão Bica Corrida	0,36 - 0,58 0,27 - 0,35

O Quadro 5.1 compara os materiais e espessuras de projeto *versus* campo, o que leva naturalmente a reflexões quanto às divergências verificadas.

Conforme tratado no item 2.4.1, de acordo com a norma ABNT NBR 9781 (2013) as atuais tolerâncias dimensionais admissíveis dos blocos de concreto são de ± 3 mm no comprimento, largura ou espessura do bloco. Todavia, a revisão da norma ABNT NBR 9781 vigente durante o período de projeto e construção dos trechos era a de 1987 a qual, estabelecia tolerância de

até 5 mm na espessura do bloco e de 3 mm no comprimento e largura dos blocos. Tais tolerâncias também admitidas na especificação técnica ET-P00/012 de 1985 da DERSA (1985), constante do projeto, conforme visto no Quadro 3.6.

Assim sendo, a amostra de revestimento (bloco de concreto) verificada na cava CV03 não atenderia a respectiva norma NBR e especificação técnica da DERSA (1985) por apresentar espessura 6 mm menor que a indicada em projeto.

Cabendo ainda observar que, a norma ABNT NBR 9781 na revisão de 1987 e atual de 2013 estabelecem – para o tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha – resistência a compressão dos blocos maior ou igual a 35 MPa, o que poderia ser obtido com blocos com espessura entre 6 e 8 cm. Sendo que, apenas para o tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados, a norma recomenda resistência característica à compressão maior ou igual a 50 MPa.

Quanto à camada de assentamento, as variações de espessuras encontradas são bastante significativas pois, de acordo com o memorial de cálculo do projeto de pavimentação CCCUSP (2009a) a espessura de material de assentamento deveria ser uniforme e igual a 5 cm. Além disso, conforme abordado no item 2.4.2.3, incrementos na espessura da camada de assentamento ocasionam deformações permanentes (afundamento em trilha de rodas) mais significativas, fato este que foi constatado a partir dos resultados apresentados na Figura 4.23 e Figura 4.24.

Outro aspecto importante diz respeito ao cuidado com a distribuição granulométrica do material empregado na camada de assentamento dada sua importância na manutenção das condições estruturais do pavimento, conforme discutido no item 2.4.2.2.

Neste sentido, conforme se pode verificar na Figura 4.22 a distribuição granulométrica do material empregado na camada de assentamento, coletado na cava CV08, não se enquadra nas recomendações da ABNT e muito menos na ASTM com limites estabelecidos pelo ICPI (2007). Além disso, a quantidade verificada de material fino que passa pela peneira de abertura igual a 0,075 mm, aproximadamente 17%, é muito superior aos limites estabelecidos pela norma brasileira e norte americana, respectivamente, 10% e 1%.

Conforme discutido nos itens 2.4.2.2 e 2.4.2.4 o excesso de partículas mais finas que 0,075 mm, com a percolação das águas da chuva pelas juntas do pavimento, forma uma lama que além de lubrificar a camada mantém as partículas finas em suspensão favorecendo sua expulsão por mecanismo de bombeamento, resultando em instabilidade do revestimento e afundamentos em trilhas de rodas, conforme observado nos trechos avaliados.

Do mesmo modo, internacionalmente, não se recomenda o emprego de pó-de-pedra na execução da camada de assentamento devido ao material não fornecer condições adequadas de drenagem. Como pode se constatar na Figura 4.23 as cavas onde foram verificados a existência de pó-de-pedra na camada de assentamento coincidem com os pontos de perda de material de rejuntamento / bombeamento de finos.

Do confronto entre os requisitos estruturais de projeto e aqueles verificados em campo, a camada de base foi a que apresentou os resultados mais insatisfatórios. Além da já tratada falta de integridade da camada, verificada durante as tentativas de remoção de CPs, constatou-se grande variabilidade de espessuras e de materiais em campo. As divergências nos materiais encontrados nesta camada denotam falhas no controle tecnológico dos materiais e no gerenciamento da obra.

O fato de que, em algumas cavas, o material encontrado na camada de base tenha sido classificado como BGS, pode evidenciar o emprego de cimento em quantidade inferior àquela indicada em projeto, resultando no material solto verificado em, aproximadamente, 80% das cavas.

O que por sua vez contribuiu para a ocorrência das significativas deformações permanentes verificadas pois, conforme descrito por Cook e Knapton (1996), pesquisas têm sugerido que quando os blocos são colocados diretamente sobre o material granular, os níveis de deformações permanentes medidos são até duas vezes maiores que os valores medidos em pavimentos betuminosos em circunstâncias semelhantes.

A própria aparência do material extraído da camada de base põe em dúvida se realmente a camada executada trata-se de CCR ou de uma BGTC, conforme pode ser constatado na Figura 5.1.

Figura 5.1 - Amostra extraída da camada de base na cava CV01

Tal dúvida torna-se ainda maior, pois com base em Rocha (2015) que na ocasião entrevistou profissionais responsáveis das empresas de projeto e construção, a respeito do então recém-construído PBC da Av. Professor Almeida Prado onde, descreve o processo construtivo da estrutura do pavimento conforme segue: "[...] a obra começou com a troca de 60 cm do solo e um dimensionamento que incluiu uma camada de sub-base de BGS com 30 cm espessura, camada de base de BGTC com 15 cm de espessura, lastro de areia para o assentamento dos blocos com 5 cm de espessura e blocos pré-moldados de concreto com espessura de 10 cm".

É importante observar que algumas das divergências encontradas, quanto aos materiais empregados na camada de sub-base e camada de base, já eram apontadas na publicação em questão.

Por fim, com o intuito de verificar se o material retirado da camada de base realmente tratava-se de material cimentado, foi realizado teste de carbonatação na amostra extraída da cava CV01 e em material solto extraído da cava CV08.

De acordo com Araújo e Panossian (2011), "o ensaio de carbonatação consiste na visualização da alteração do pH do concreto, o que é possível pela aspersão de um indicador de pH [...]". O indicador de pH utilizado trata-se de uma solução de fenolftaleína diluído em uma proporção 50 ml de álcool etílico e 50 ml de água destilada para cada 1g de fenolftaleína.

O ensaio de carbonatação é preconizado pela DIN EN 14630 (2007) (norma alemã) e, conforme explica o site da empresa de cimento Itambé (2009), o concreto normalmente possui pH entre

12,6 e 13,5, sendo que as áreas que apresentam carbonatação o pH é reduzido para valores próximos de 8,3. Neste sentido, a aspersão da solução de fenolftaleína em regiões carbonatadas não apresentam alteração na coloração em regiões cujo pH seja inferior a 8,3. Regiões não carbonatadas assumem cores entre rosa e vermelho, sendo este último em regiões com valores de pH mais elevados (ARAÚJO e PANOSSIAN, 2011). Na Figura 5.2 são apresentados os resultados do teste de carbonatação os quais evidenciam a total ausência de cimento no material desagregado (material solto) coletado na cava CV08.

Figura 5.2 - Resultados do teste de carbonatação

(a) teste de carbonatação na amostra retirada da cava CV01

(b) teste de carbonatação em material de base “solto” retirado na cava CV08

5.2 Retroanálise dos módulos de resiliência das camadas do pavimento

A partir dos resultados deflectométricos obtidos com FWD, conforme apresentados no Quadro 4.4, e dos dados da estrutura real obtidos nas aberturas de cavas nos trechos experimentas, foram realizadas retroanálises com o objetivo de se obter os módulos de resiliência das camadas constituintes do pavimento. Para tanto, empregou-se o software BAKFAA da *Federal Aviation Administration* (FAA) como ferramenta de retroanálise.

O BAKFAA é uma ferramenta computacional desenvolvida pela FAA para avaliações de pistas aeroportuárias de pavimentos asfálticos a qual, permite realizar a retroanálise dos módulos das camadas que constituem o pavimento, a partir dados de levantamentos deflectométricos obtidos com FWD.

A versão do programa utilizada foi *BAKFAA – FAA Backcalculation (2.0.0.0) with LEAF (2003.6.11.0)* que, permite a opção de se trabalhar no Sistema Internacional de Unidades (SI).

Como parâmetros de entrada, além dos valores das deflexões obtidos em cada um dos geofones, faz-se necessário ainda indicar ao programa qual a intensidade da carga aplicada sobre o pavimento, bem como o raio da área de aplicação da carga. Sendo importante observar que, para “rodar o programa” é necessário atribuir valores de partida dos módulos de resiliência das camadas do pavimento, aqui chamados de “módulos sementes”, seus respectivos coeficientes de *Poisson* e respectivas espessuras das camadas.

O programa permite considerar a camada como aderida ou não aderida além disso, é possível fixar um ou mais “módulos sementes” fazendo com que seu valor não varie durante a análise feita pelo programa.

Para que fossem estabelecidos os “módulos sementes” do conjunto blocos pré-moldados de concreto e camada de assentamento, que compreendem o revestimento, foram tomados como base os valores de módulos indicados por Shackel (1992) em função do intertravamento conforme visto na Figura 2.36.

Devido aos resultados obtidos nos levantamentos deflectométricos e as estruturas verificadas nas aberturas de cavas nos trechos experimentais, assumiu-se que a base cimentada se

encontrava degradada. Sendo assim, foram considerados módulos de elasticidade semelhantes aos da BGTC.

Deste modo, para tal material, bem como para outros materiais encontrados nas camadas de base e sub-base, foram empregados módulos dentro dos limites conforme indicados por Balbo (2007).

O Quadro 5.2 apresenta as faixas de módulos de resiliência e de coeficientes de *Poisson* dos materiais verificados na estrutura real considerados na entrada de dados da retroanálise.

Quadro 5.2 - Faixas de variação dos módulos de resiliência e coeficientes de *Poisson*

Material	**Módulos de Resiliência (MPa)**	**Coeficiente de *Poisson***
Bloco de concreto + camada de assentamento	350 - 3.200	0,15 - 0,20
CCR (cimento, 100 kg/m³)	10.000 - 18.000	0,15 - 0,20
BGTC (integra)	10.000 - 18.000	0,15 - 0,20
BGTC (degradada por fadiga)	< 2.000 - 10.000	0,15 - 0,25
BGS (camadas de Base)	300 - 500	0,35 - 0,40
BGS (camadas de Sub-base)	60 - 150	0,35 - 0,40
Rachão	150 - 250	0,35 - 0,40
Bica Corrida	80 - 160	0,35 - 0,40

Com base nos *"box-plot"* elaborados a partir dos levantamentos deflectométricos das quatro seções estudadas, apresentados no item 4.3, foram escolhidos os pontos de aplicação de carga, para cada seção, que estivessem dentro do intervalo da caixa e, preferencialmente, mais próximo dos pontos médios de cada geofone conforme é apresentado na Figura 5.3 a

Figura 5.6. Assim, foram escolhidos para o procedimento de retroanálise os dados dos seguintes pontos de aplicação de carga:

- Na seção 1 – Pontos: 1.2, 1.6, 1.8 e 1.10;
- Na seção 2 – Pontos: 2.1, 2.5, 2.6 e 2.8;
- Na seção 3 – Pontos: 3.2, 3.4, 3.5 e 3.7;
- Na seção 4 – Pontos: 4.3, 4.4, 4.5, 4.7 e 4.10.

Figura 5.3 - Pontos de aplicação de carga escolhidos para retroanálise na Seção 1

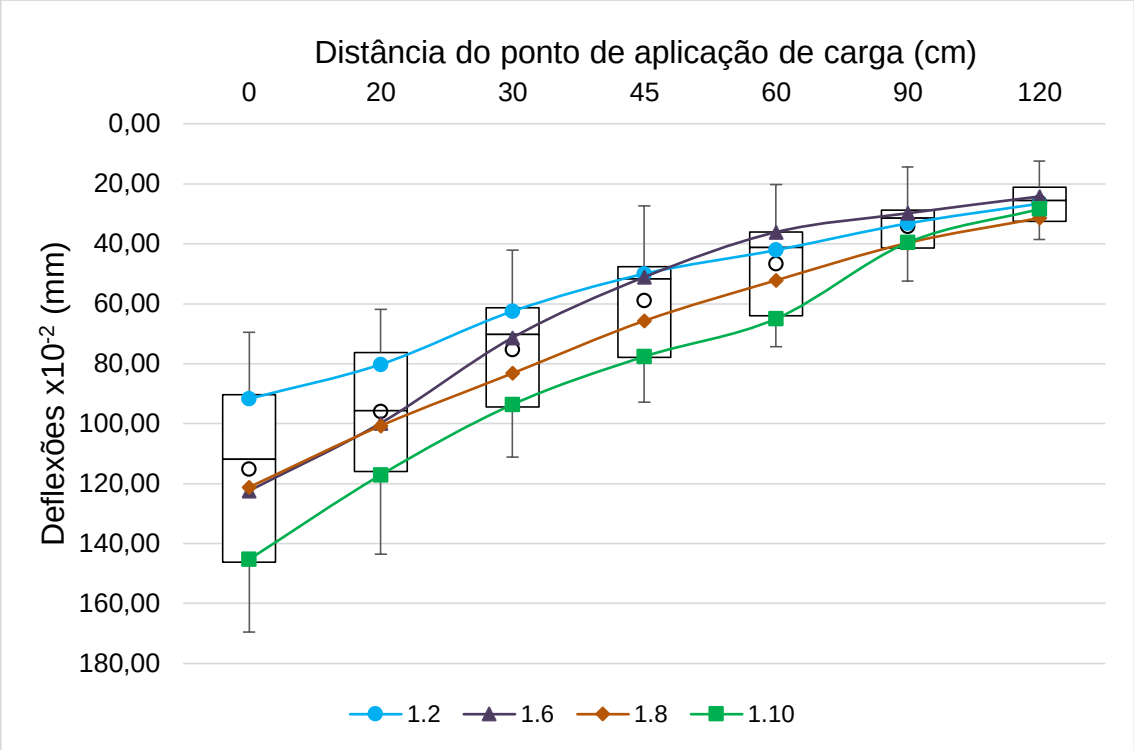


Figura 5.4 - Pontos de aplicação de carga escolhidos para retroanálise na Seção 2

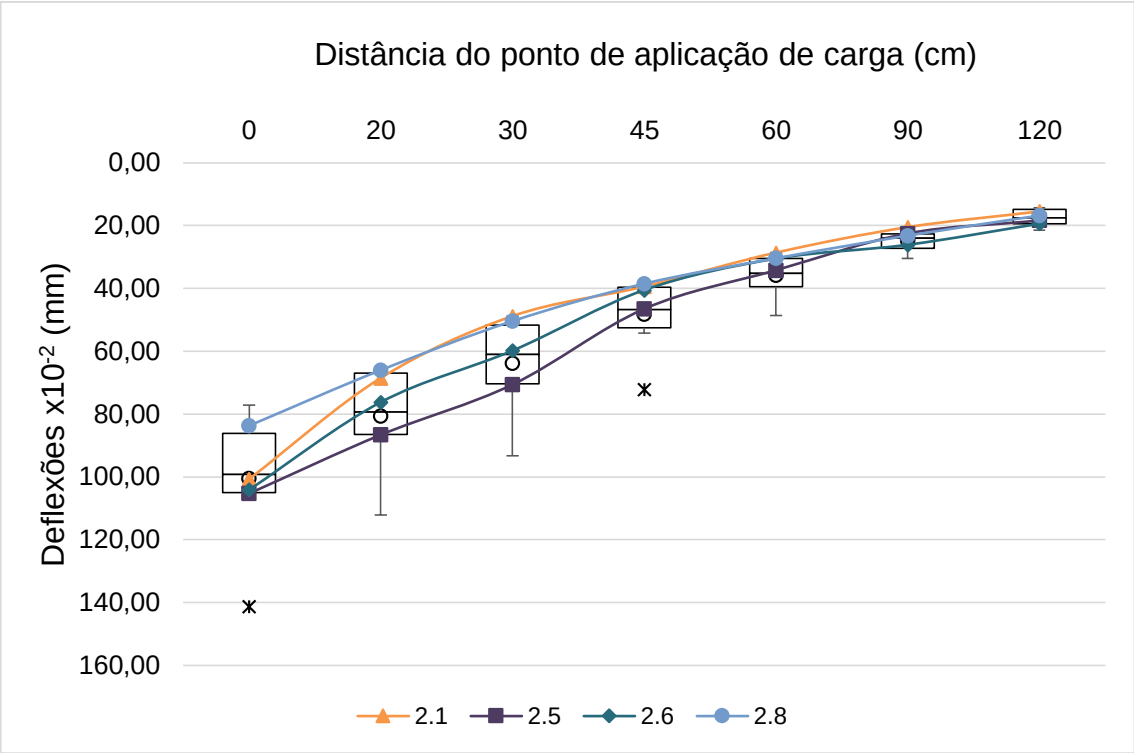


Figura 5.5 - Pontos de aplicação de carga escolhidos para retroanálise na Seção 3

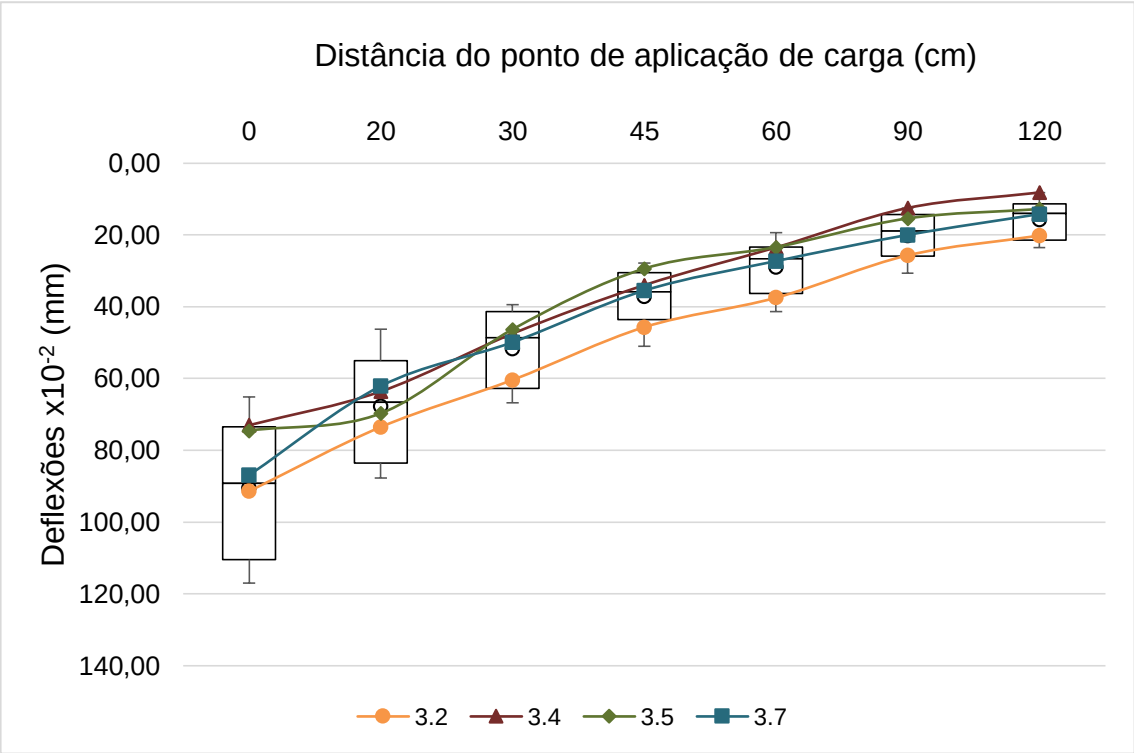
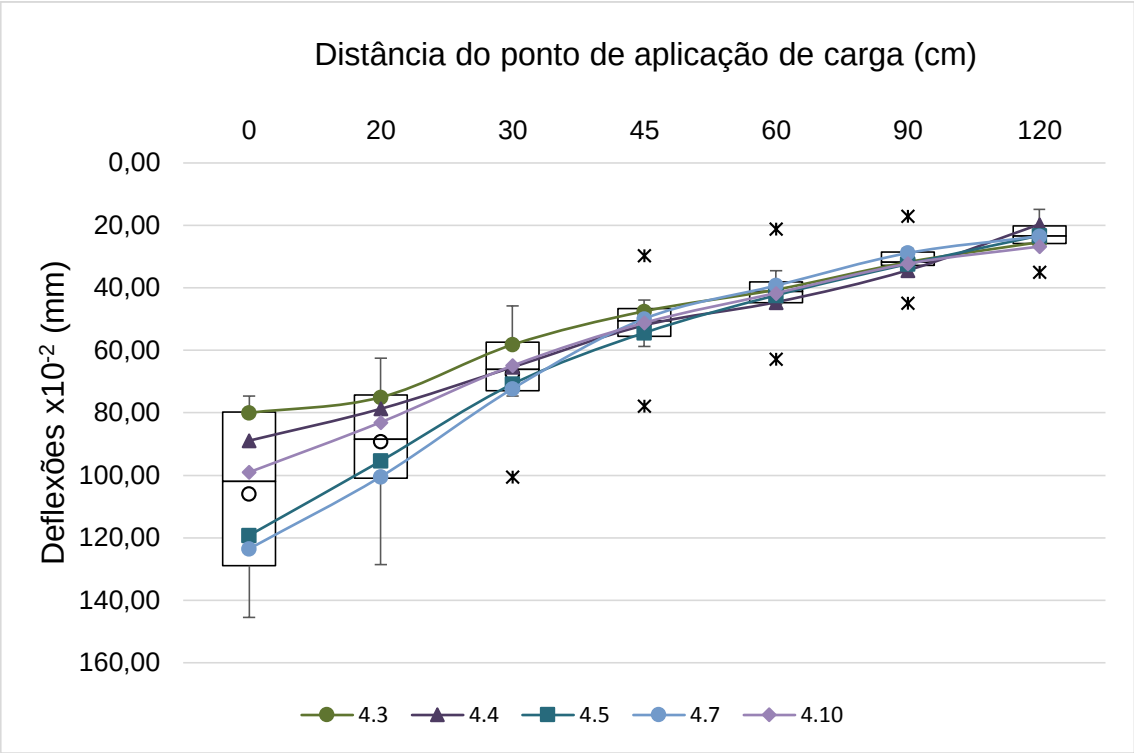


Figura 5.6 - Pontos de aplicação de carga escolhidos para retroanálise na Seção 4



A partir da proximidade da localização dos pontos de FWD, escolhidos para a retroanálise com os pontos de abertura das cavas, foram determinadas as estruturas para retroanálise no programa BAKFAA, conforme segue:

Seção 1

- Ponto de aplicação do FWD 1.2, corresponde a estrutura encontrada na cava CV-01;
- Ponto de aplicação do FWD 1.6, corresponde a estrutura encontrada na cava CV-03;
- Ponto de aplicação do FWD 1.8, corresponde a estrutura encontrada na cava CV-05;
- Ponto de aplicação do FWD 1.10, corresponde a estrutura encontrada na cava CV-06;

Seção 2

- Ponto de aplicação do FWD 2.1, corresponde a estrutura encontrada na cava CV-07;
- Ponto de aplicação do FWD 2.5, corresponde a estrutura encontrada na cava CV-10;
- Ponto de aplicação do FWD 2.6, corresponde a estrutura encontrada na cava CV-11;
- Ponto de aplicação do FWD 2.8, corresponde a estrutura encontrada na cava CV-11;

Seção 3

- Ponto de aplicação do FWD 3.2, corresponde a estrutura encontrada na cava CV-12;
- Ponto de aplicação do FWD 3.4, corresponde a estrutura encontrada na cava CV-10;
- Ponto de aplicação do FWD 3.5, corresponde a estrutura encontrada na cava CV-10;
- Ponto de aplicação do FWD 3.7, corresponde a estrutura encontrada na cava CV-08;

Seção 4

- Ponto de aplicação do FWD 4.3, corresponde a estrutura encontrada na cava CV-04;
- Ponto de aplicação do FWD 4.4, corresponde a estrutura encontrada na cava CV-04;
- Ponto de aplicação do FWD 4.5, corresponde a estrutura encontrada na cava CV-04;
- Ponto de aplicação do FWD 4.7, corresponde a estrutura encontrada na cava CV-02;
- Ponto de aplicação do FWD 4.10, corresponde a estrutura encontrada na cava CV-01;

Desta forma, são resumidos no Quadro 5.3 a Quadro 5.6 os parâmetros de entrada para as retroanálises no programa BAKFAA. Em todos os casos estudados considerou-se o valor de 80 MPa como módulo de resiliência do subleito de partida para as retroanálises. Além disso, em todos os casos retroanalisados as camadas foram consideradas como não aderidas.

Quadro 5.3 - Parâmetros para retroanálise da Seção 1 no programa BAKFAA – FAA

			Seção 1							
			1.2		1.6		1.8		1.10	
	Material	μ	h (cm)	$E_{(semente)}$ (MPa)	h (cm)	$E_{(semente)}$ (MPa)	h (cm)	$E_{(semente)}$ (MPa)	h (cm)	$E_{(semente)}$ (MPa)
Revestimento	Blocos pré-moldados de concreto	0,20	9,70	3.200	9,40	3.200	9,80	3.200	10,00	3.200
	Areia grossa		8,00		6,50		-		-	
	Pó de Pedra		-		-		7,90		7,00	
Base	CCR / BGTC	0,20	8,50	15.000	-	-	-	-	-	-
	BGS	0,30	-	-	24,60	350	14,30	350	-	-
	Bica Corrida		-	-	-	-	-	-	12,00	160
Sub-base	Bica Corrida	0,35	-	-	-	-	9,30	120	-	-
	BGS		12,80	150	-	-	-	-	-	-
Reforço	Rachão	0,35	-	-	-	-	-	-	-	-
	Bica Corrida		-	-	-	-	-	-	-	-

Quadro 5.4 - Parâmetros para retroanálise da Seção 2 no programa BAKFAA – FAA

			Seção 2							
			2.1		2.5		2.6		2.8	
	Material	μ	h (cm)	$E_{(semente)}$ (MPa)	h (cm)	$E_{(semente)}$ (MPa)	h (cm)	$E_{(semente)}$ (MPa)	h (cm)	$E_{(semente)}$ (MPa)
Revestimento	Blocos pré-moldados de concreto	0,20	9,80	3.200	10,00	3.200	9,50	3.200	9,50	3.200
	Areia grossa		11,00		-		-		-	
	Pó de Pedra		1,20		5,00		5,50		5,50	
Base	CCR / BGTC	0,20	-	-	7,00	15.000	15,00	15.000	15,00	15.000
	BGS	0,30	-	-	-	-	-	-	-	-
	Bica Corrida		83,00	160	-	-	-	-	-	-
Sub-base	Bica Corrida	0,35	-	-	-	-	-	-	-	-
	BGS		-	-	18,00	150	9,00	150	9,00	150
Reforço	Rachão	0,35	-	-	-	-	-	-	-	-
	Bica Corrida		-	-	35,00	120	27,00	120	27,00	120

Quadro 5.5 - Parâmetros para retroanálise da Seção 3 no programa BAKFAA – FAA

			Seção 3							
			3.2		3.4		3.5		3.7	
	Material	**μ**	**h (cm)**	**$E_{(semente)}$ (MPa)**	**h (cm)**	**$E_{(semente)}$ (MPa)**	**h (cm)**	**$E_{(semente)}$ (MPa)**	**h (cm)**	**$E_{(semente)}$ (MPa)**
Revestimento	Blocos pré-moldados de concreto	0,20	10,00	3.200	10,00	3.200	10,00	3.200	10,00	3.200
	Areia grossa		-		-		-		6,00	
	Pó de Pedra		-		5,00		5,00		-	
Base	CCR / BGTC	0,20	-	-	7,00	15.000	7,00	15.000	17,00	15.000
	BGS	0,30	86,00	400	-	-	-	-	-	-
	Bica Corrida		-	-	-	-	-	-	-	-
Sub-base	Bica Corrida	0,35	-	-	-	-	-	-	-	-
	BGS		-	-	18,00	150	18,00	150	8,00	150
Reforço	Rachão	0,35	-	-	-	-	-	-	58,00	200
	Bica Corrida		-	-	35,00	120	35,00	120	-	-

Quadro 5.6 - Parâmetros para retroanálise da Seção 4 no programa BAKFAA – FAA

			Seção 4									
			4.3		4.4		4.5		4.7		4.10	
	Material	μ	h (cm)	$E_{(semente)}$ (MPa)	h (cm)	$E_{(semente)}$ (MPa)	h (cm)	$E_{(semente)}$ (MPa)	h (cm)	$E_{(semente)}$ (MPa)	h (cm)	$E_{(semente)}$ (MPa)
Revestimento	Blocos pré-moldados de concreto	0,20	10,00	3.200	10,00	3.200	10,00	3.200	10,00	3.200	9,70	3.200
	Areia grossa		-		-		-		-		8,00	
	Pó de Pedra		6,00		6,00		6,00		8,00		-	
Base	CCR / BGTC	0,20	10,00	15.000	10,00	15.000	10,00	15.000	14,00	15.000	8,50	15.000
	BGS	0,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Bica Corrida		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sub-base	Bica Corrida	0,35	-	-	-	-	-	-	10,00	120	12,80	120
	BGS		29,00	150	29,00	150	29,00	150	-	-	-	-
Reforço	Rachão	0,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Bica Corrida		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Após o processamento de dados pelo programa foram determinados os módulos de resiliência retroanalisados das estruturas encontradas no pavimento, conforme os parâmetros acima tratados. O Quadro 5.7 apresenta os módulos de resiliência retroanalisados das camadas de revestimento, base e subleito.

Quadro 5.7 - Módulos de resiliência das camadas retroanalisados com auxílio do programa BAKFAA (MPa)

Seções	Pontos de Aplicação de Carga	Revestimento	Base	Subleito
1	1.2	2.302	15.904	70
	1.6	3.075	9.657	56
	1.8	701	3.301	54
	1.10	3.252	3.305	46
2	2.1	1.552	192	98
	2.5	3.827	10.056	69
	2.6	2.988	18.321	65
	2.8	704	3.719	107
3	3.2	4.567	158	79
	3.4	3.741	12.866	210
	3.5	2.903	1.305	112
	3.7	2.196	453	108
4	4.3	1.981	15.385	73
	4.4	3.623	19.181	147
	4.5	4.521	278	78
	4.7	1.693	960	80
	4.10	2.531	10.952	72

No caso dos valores dos módulos de resiliência retroanalisados da camada de revestimento, observou-se uma faixa de variação que compreende desde valores típicos do PBC sobre bases granulares, a valores típicos de módulos de resiliência do PBC sobre bases cimentadas, devidamente intertravados.

Os módulos retroanalisados das camadas de base variaram entre valores típicos de camadas granulares a valores de módulos de resiliência comuns a camadas cimentadas, tais como a BGTC e CCR com pouco consumo de cimento.

Os módulos de resiliência do subleito dos trechos experimentais, determinados por retroanálise, apresentaram valores compatíveis com o determinado a partir do CBR de projeto.

O Quadro 5.8 resume as faixas de variação encontradas para os módulos de resiliência em cada uma das seções dos trechos experimentais, em função do tipo de material verificado nas aberturas de cavas.

Quadro 5.8 - Resumo dos módulos de resiliência retroanalisados em cada seção

		Seção 1	**Seção 2**	**Seção 3**	**Seção 4**
Camada	**Material**	**$E_{(retroanalisado)}$ (MPa)**	**$E_{(retroanalisado)}$ (MPa)**	**$E_{(retroanalisado)}$ (MPa)**	**$E_{(retroanalisado)}$ (MPa)**
Revestimento	Blocos pré-moldados de concreto	701 - 3.252	704 - 3.827	2.196 - 4.567	1.693 - 4.521
	Areia				
	Pó-de-pedra				
Base	CCR / BGTC	3.301 - 15.904	3.719 - 18.321	1.305 - 12.866	278 - 19.181
	BGS	-	-	158 - 453	-
	Bica corrida	-	192	-	-
Sub-base	Bica corrida	120	-	-	92 - 187
	BGS	443	201 - 420	59 - 139	130 - 168
Reforço	Bica corrida	-	-	318	-
	Rachão	-	128 - 134	239 - 346	-
Subleito	Solo	46 - 70	65 - 107	79 - 210	72 - 147

As significativas variações encontradas nos módulos de resiliência nos trechos experimentais evidenciam problemas construtivos e incompatibilidades entre a estrutura projetada e a estrutura construída, principalmente nas camadas de base e revestimento, denotando estados distintos de degradação da base cimenta e perdas nas condições de intertravamento do revestimento.

A inobservância durante a fase construtiva dos requisitos de projeto, controle de materiais e espessuras de camadas, contribuíram para ocorrência precoce das patologias verificadas no pavimento. Exemplo disto é a variação no material e espessura de camada de assentamento verificados uma vez que, a espessura desta camada tem grande influência nas deformações plásticas do PBC.

5.3 Comparativo das bacias de deformação medidas e retroanalisadas

Conforme trata a norma ASTM D5858 (2015), a precisão dos módulos retroanalisados finais é afetada pela tolerância permitida no âmbito do procedimento para determinar uma correspondência entre as deflexões calculadas e medidas. Para avaliar está "correspondência" foi utilizada a abordagem do cálculo do erro quadrático médio percentual (RMSE, do inglês) preconizado pela referida norma. O RMSE é utilizado para avaliar a correspondência entre as bacias de deflexão calculadas e medidas e é definido conforme a Equação 15:

$$RMSE = 100\left\{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{\left(d_{calculado_i}-d_{medido_i}\right)}{d_{medido_i}}\right]^2\right\}^{1/2} \qquad (15)$$

onde,

n – é o número de sensores usados para medir a bacia de deflexão;

d_{medido} – deflexões medidas no ponto i;

$d_{calculado}$ – deflexões calculadas no ponto i.

A norma ASTM D5858 (2015) recomenda um limite máximo de tolerância de 1 a 2% sobre o RMSE. Todavia, a norma orienta que há vários fatores que afetam a precisão e aplicabilidade das retroanálises dos módulos das camadas, alguns dos quais incluem:

- A combinação de diferentes camadas em uma camada estrutural;
- O número de pontos de deflexão e limitação no número de camadas utilizadas na análise;
- O "ruído" ou imprecisões contidas na própria medição do sensor;
- Pequenos desvios que estão perto em magnitude ao erro aleatório estabelecido para os sensores;
- As descontinuidades tais como fissuras no pavimento, especialmente se localizada entre a carga e o sensor;
- Suposição incorreta da existência e da profundidade de uma camada dura aparente (profundidades inferiores a 1,5m podem exigir uma análise dinâmica);
- As diferenças entre espessuras de camadas assumidas e reais.
- Devido a medições imprecisas ou indisponíveis ou variabilidade ponto-a-ponto, argilas saturadas diretamente abaixo de materiais de base;
- Solos extremamente fracos sob a base e que recobrem solos muito mais duros;
- Distribuições de pressão de carga não uniformes na área de contato do pavimento de carga, não-linear, não homogéneos, ou materiais anisotrópicos na estrutura do pavimento (em especial o subleito);
- Para camadas sucessivas, uma proporção de rigidez (Mr camada superior / Mr camada inferior) inferior a 0,5.

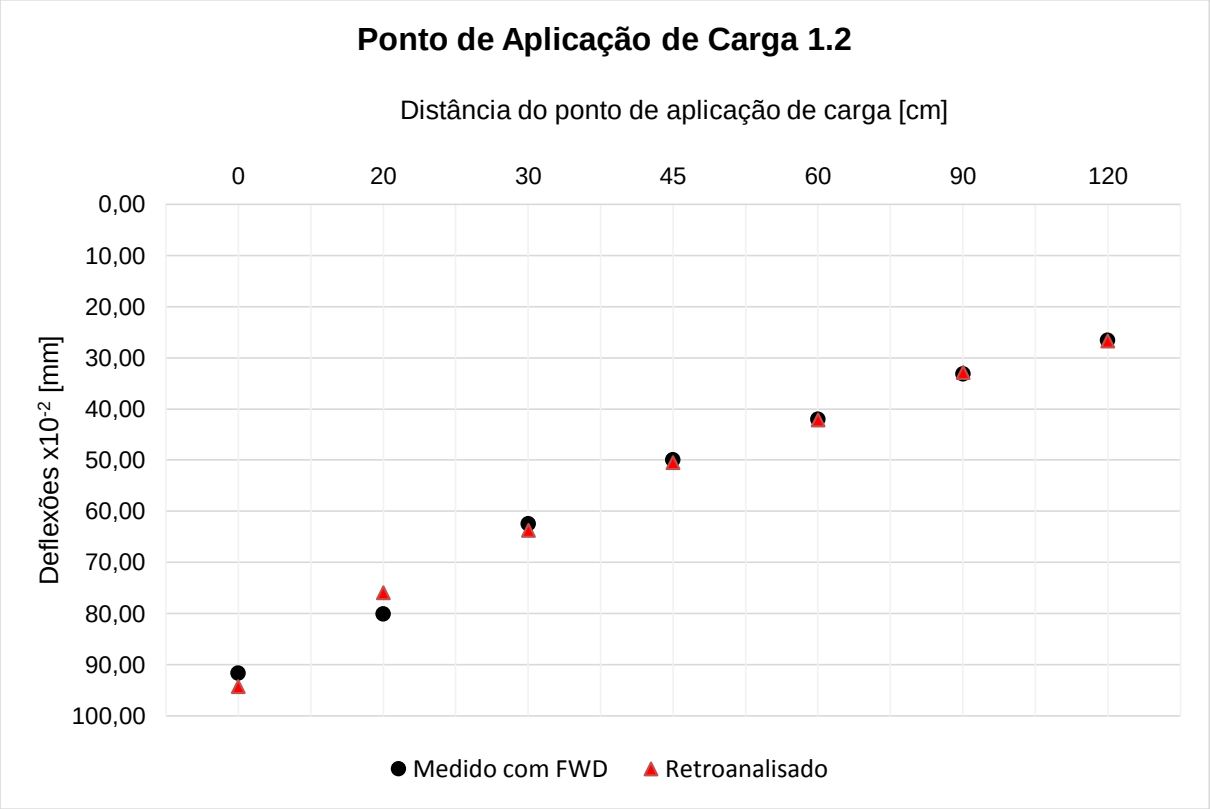
Dentre estes, devido ao fato de se tratar de um pavimento formado por uma rede de juntas que caracterizam descontinuidades e a possibilidade de diferenças entre espessuras de camadas assumidas e reais, conforme descrito acima, ocorreram dificuldades em se estabelecer valores de RMSE dentro do recomendado pela norma ASTM D5858 (2015).

No Quadro 5.9 ao Quadro 5.25 são apresentados os comparativos entre os dados das bacias de deflexões verificadas em campo com o equipamento FWD (valores medidos) e daquelas retroanalisadas pelo programa BAKFAA (valores calculados). A Figura 5.7 a Figura 5.23 comparam graficamente as bacias de deflexão verificadas em campo com aquelas retroanalisadas no programa BAKFAA.

Quadro 5.9 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 1.2 na Seção 1

Descrição	Valores das Deflexões ($x10^{-2}$ mm)							RMSE
	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)	
Medido com FWD	91,70	80,20	62,50	50,00	42,10	33,20	26,60	**2,48%**
Retroanalisado	94,39	75,94	63,79	50,48	42,19	32,93	26,73	
Erro Percentual	2,93%	-5,31%	2,06%	0,95%	0,22%	-0,83%	0,49%	

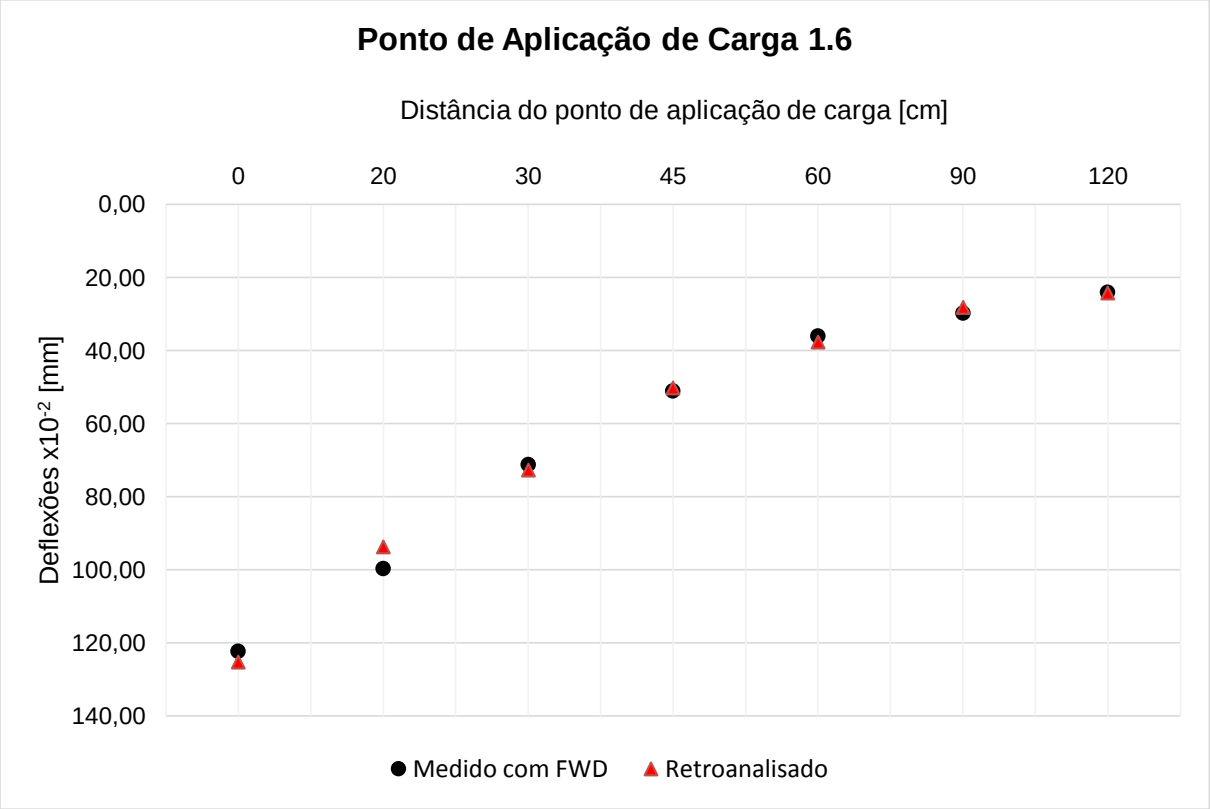
Figura 5.7 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 1.2



Quadro 5.10 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 1.6 na Seção 1

Descrição	Valores das Deflexões ($x10^{-2}$ mm)							RMSE
	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)	
Medido com FWD	122,40	99,80	71,30	51,10	36,10	29,80	24,20	
Retroanalisado	125,29	93,76	72,77	50,30	37,80	28,29	24,36	**3,72%**
Erro Percentual	2,36%	-6,05%	2,06%	-1,56%	4,71%	-5,06%	0,66%	

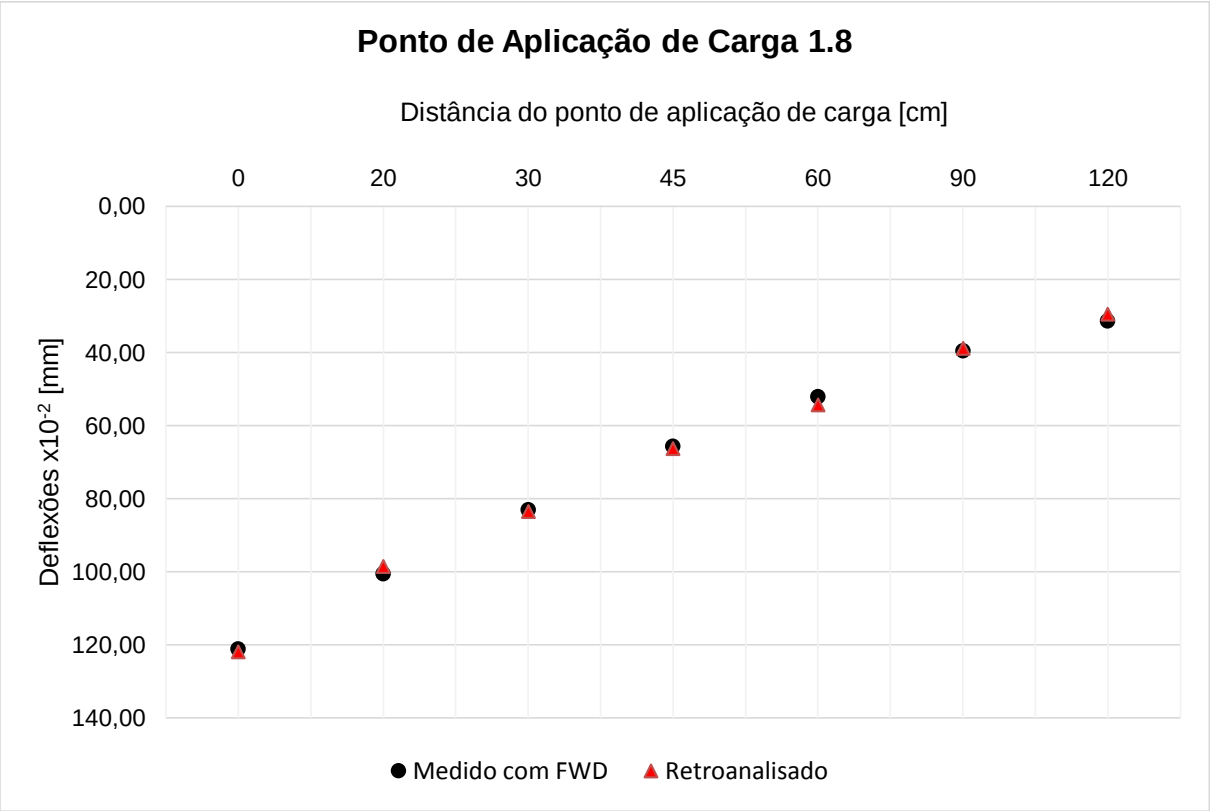
Figura 5.8 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 1.6



Quadro 5.11 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 1.8 na Seção 1

Descrição	Valores das Deflexões ($x10^{-2}$ mm)							RMSE
	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)	
Medido com FWD	121,20	100,70	83,20	65,70	52,20	39,70	31,40	
Retroanalisado	121,97	98,63	83,54	66,40	54,36	38,90	29,62	**2,91%**
Erro Percentual	0,63%	-2,05%	0,41%	1,06%	4,13%	-2,03%	-5,67%	

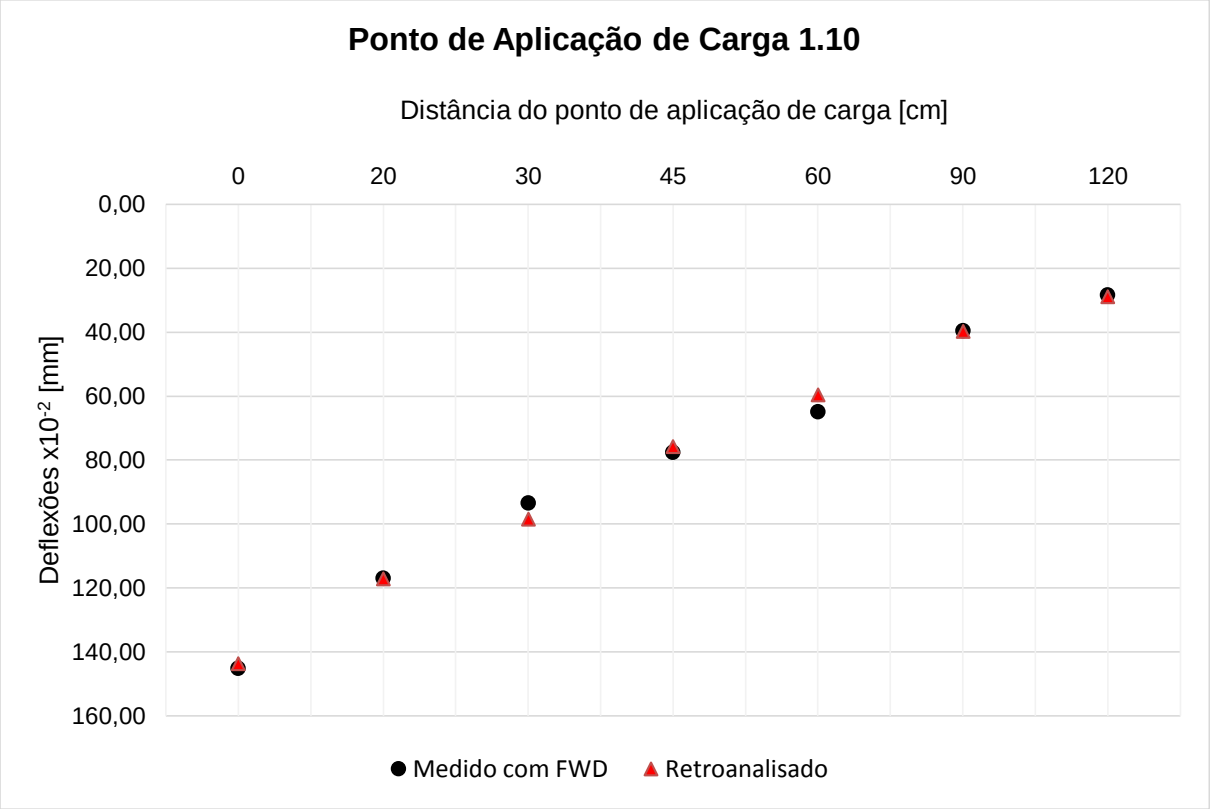
Figura 5.9 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 1.8



Quadro 5.12 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 1.10 na Seção 1

Descrição	Valores das Deflexões ($x10^{-2}$ mm)							RMSE
	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)	
Medido com FWD	145,30	117,10	93,60	77,60	65,00	39,60	28,40	
Retroanalisado	143,85	117,27	98,55	75,79	59,57	39,85	28,98	**3,94%**
Erro Percentual	-1,00%	0,15%	5,29%	-2,33%	-8,36%	0,63%	2,06%	

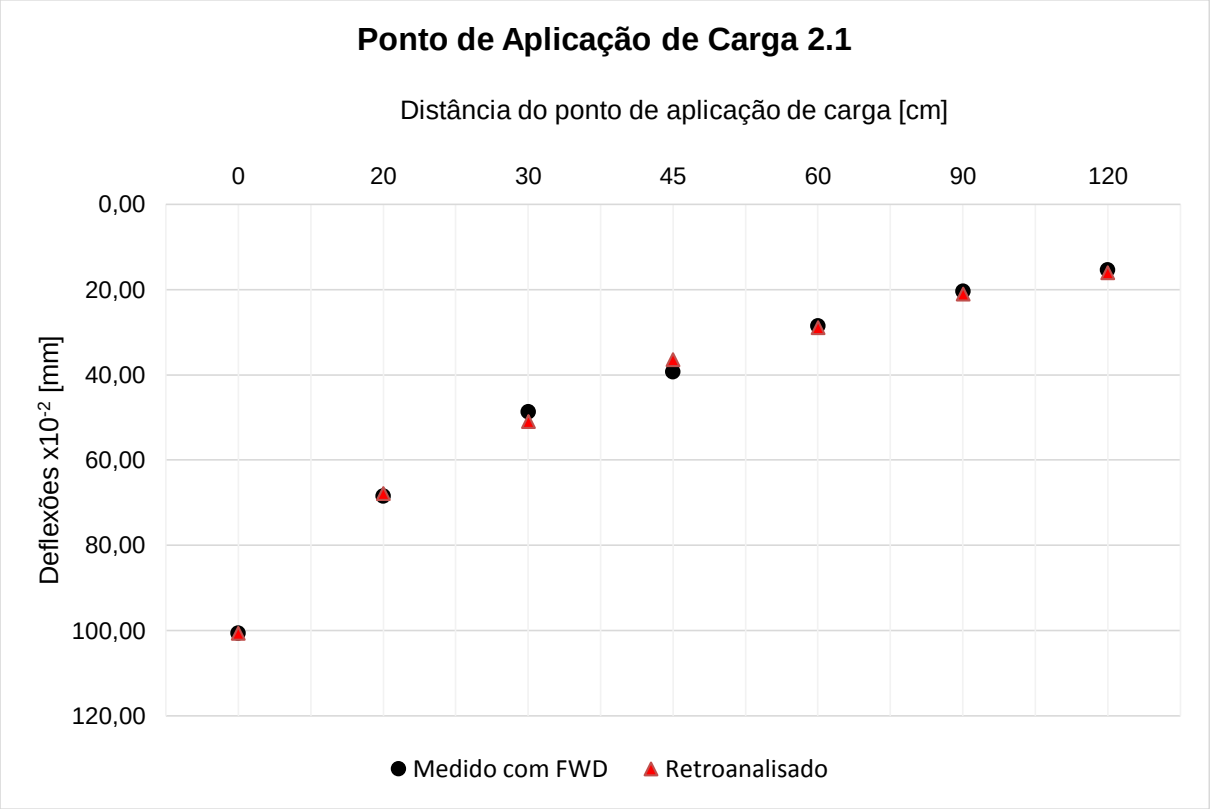
Figura 5.10 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 1.10



Quadro 5.13 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 2.1 na Seção 2

Descrição	Valores das Deflexões ($x10^{-2}$ mm)							RMSE
	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)	
Medido com FWD	100,70	68,50	48,80	39,40	28,60	20,50	15,50	
Retroanalisado	100,72	67,88	51,00	36,53	29,02	21,02	16,05	**3,69%**
Erro Percentual	0,02%	-0,90%	4,51%	-7,29%	1,45%	2,51%	3,52%	

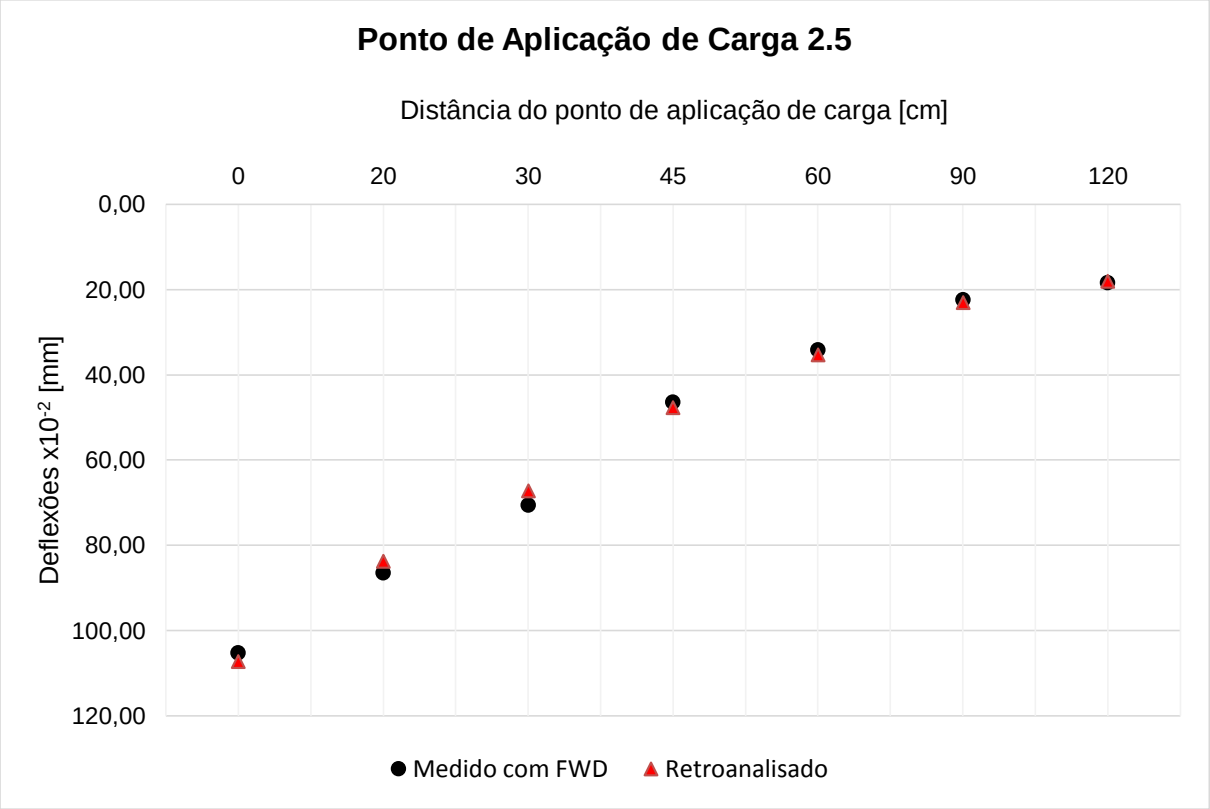
Figura 5.11 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 2.1



Quadro 5.14 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 2.5 na Seção 2

Descrição	Valores das Deflexões ($x10^{-2}$ mm)							RMSE
	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)	
Medido com FWD	105,30	86,60	70,60	46,50	34,20	22,50	18,40	**3,07%**
Retroanalisado	107,35	83,75	67,29	47,70	35,39	23,13	18,09	
Erro Percentual	1,95%	-3,29%	-4,69%	2,57%	3,47%	2,80%	-1,68%	

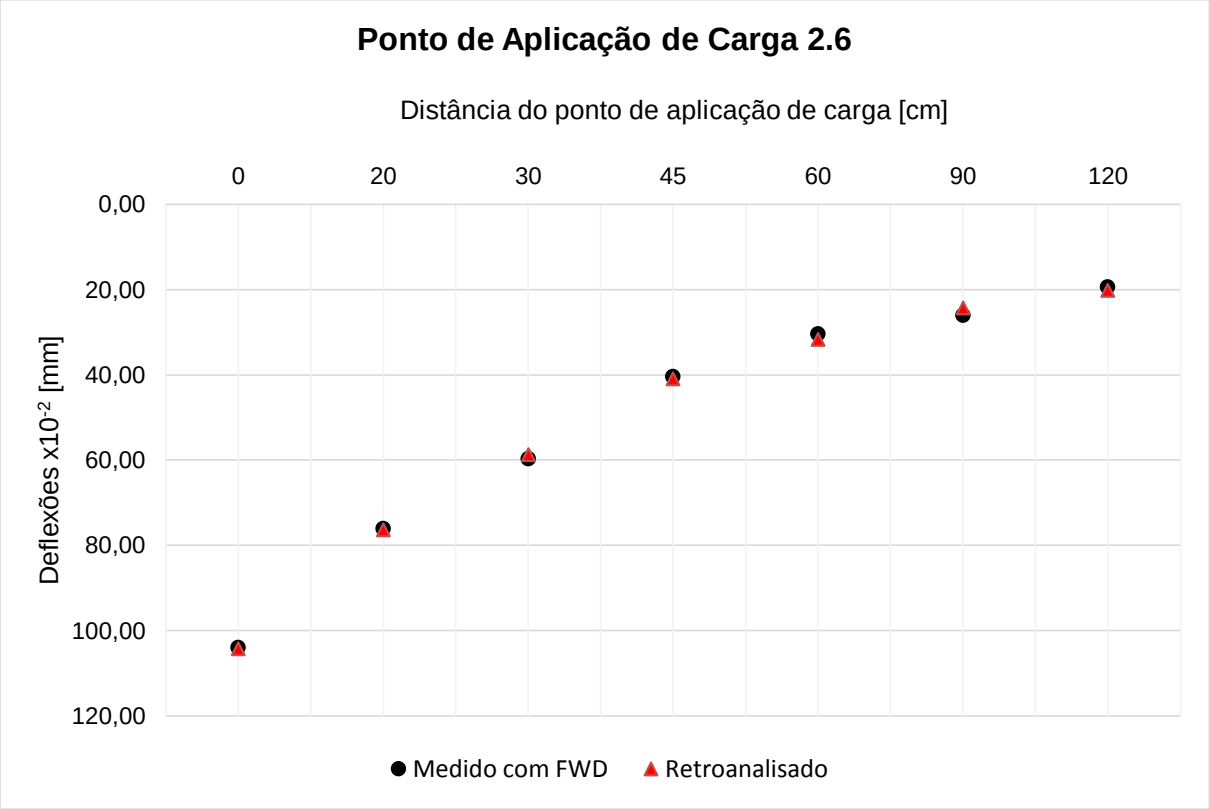
Figura 5.12 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 2.5



Quadro 5.15 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 2.6 na Seção 2

Descrição	Valores das Deflexões ($x10^{-2}$ mm)							RMSE
	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)	
Medido com FWD	104,10	76,20	59,80	40,50	30,50	26,10	19,40	
Retroanalisado	104,28	76,38	58,74	41,00	31,70	24,27	20,24	**3,55%**
Erro Percentual	0,17%	0,24%	-1,77%	1,22%	3,93%	-7,01%	4,34%	

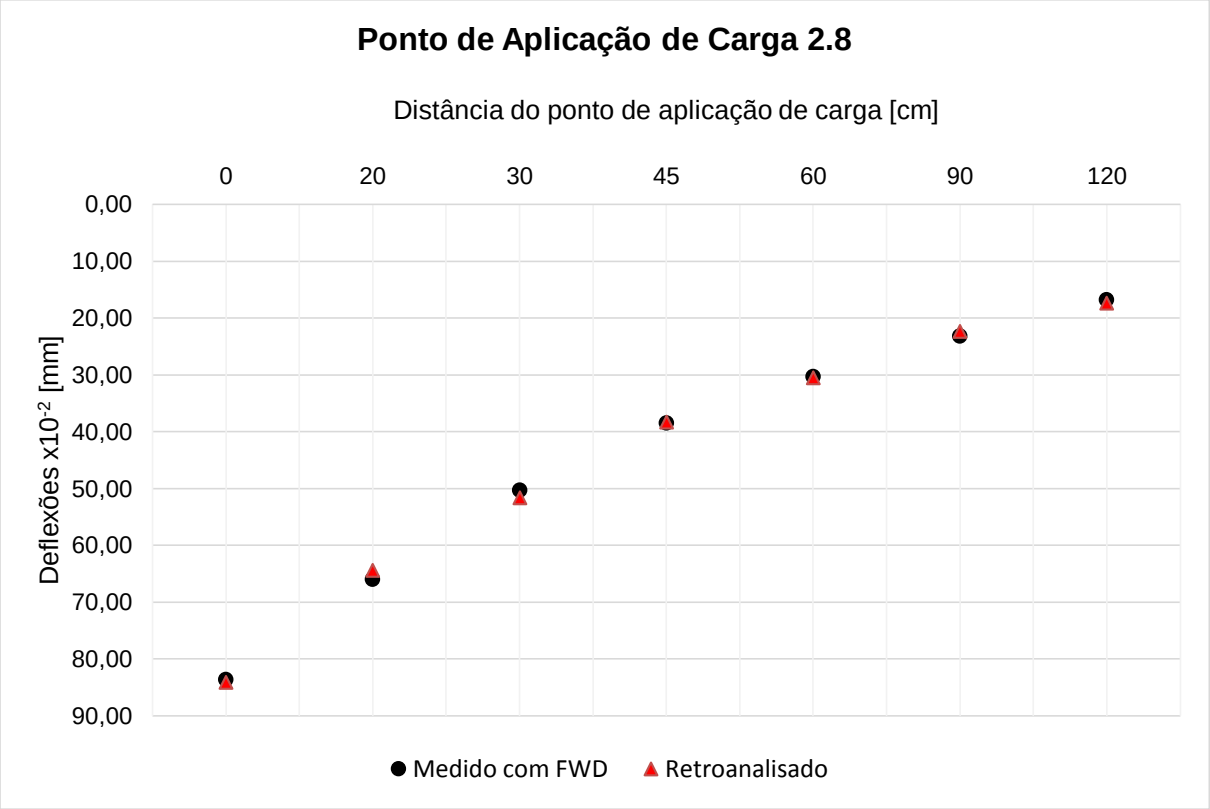
Figura 5.13 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 2.6



Quadro 5.16 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 2.8 na Seção 2

Descrição	Valores das Deflexões ($x10^{-2}$ mm)							RMSE
	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)	
Medido com FWD	83,70	66,00	50,40	38,50	30,40	23,20	16,80	
Retroanalisado	84,19	64,42	51,72	38,37	30,55	22,42	17,36	**2,25%**
Erro Percentual	0,59%	-2,39%	2,61%	-0,33%	0,49%	-3,36%	3,32%	

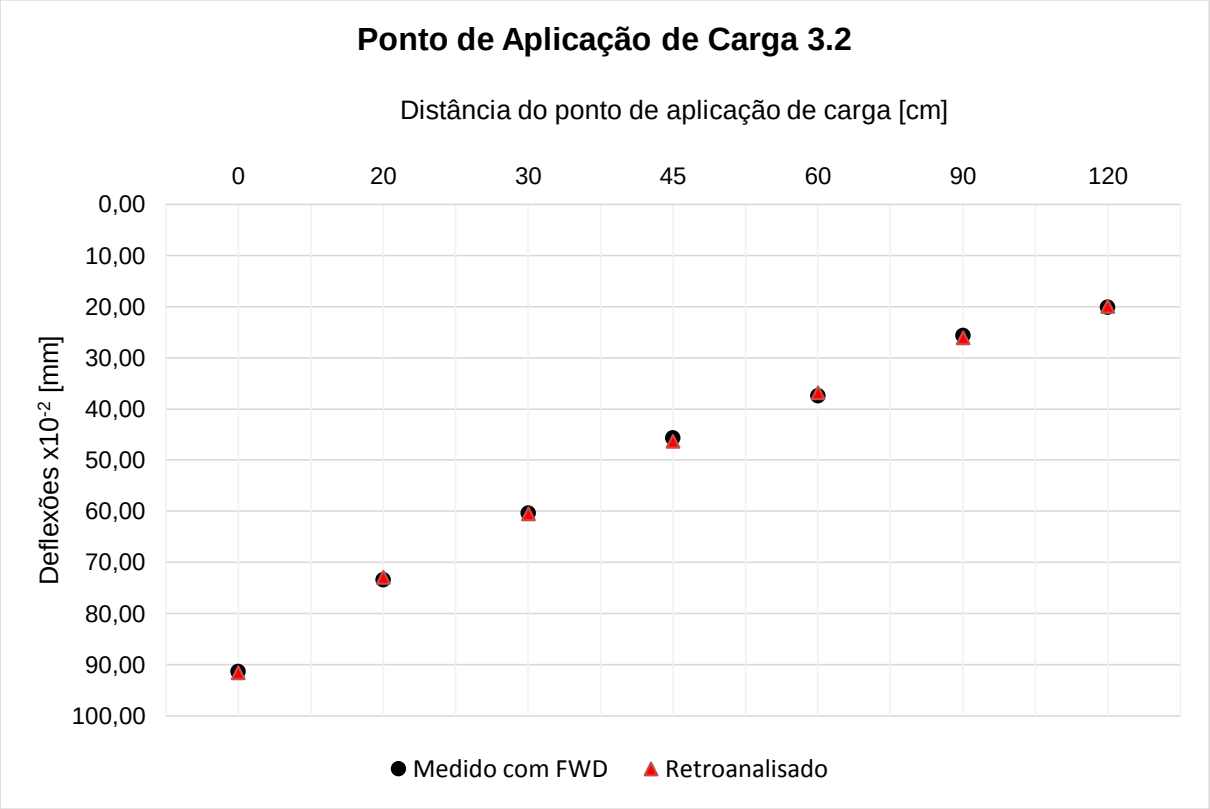
Figura 5.14 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 2.8



Quadro 5.17 -Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 3.2 na Seção 3

Descrição	Valores das Deflexões ($x10^{-2}$ mm)							RMSE
	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)	
Medido com FWD	91,40	73,50	60,40	45,70	37,50	25,70	20,20	
Retroanalisado	91,60	72,95	60,53	46,35	36,91	26,09	19,93	**1,15%**
Erro Percentual	0,22%	-0,76%	0,22%	1,43%	-1,59%	1,52%	-1,33%	

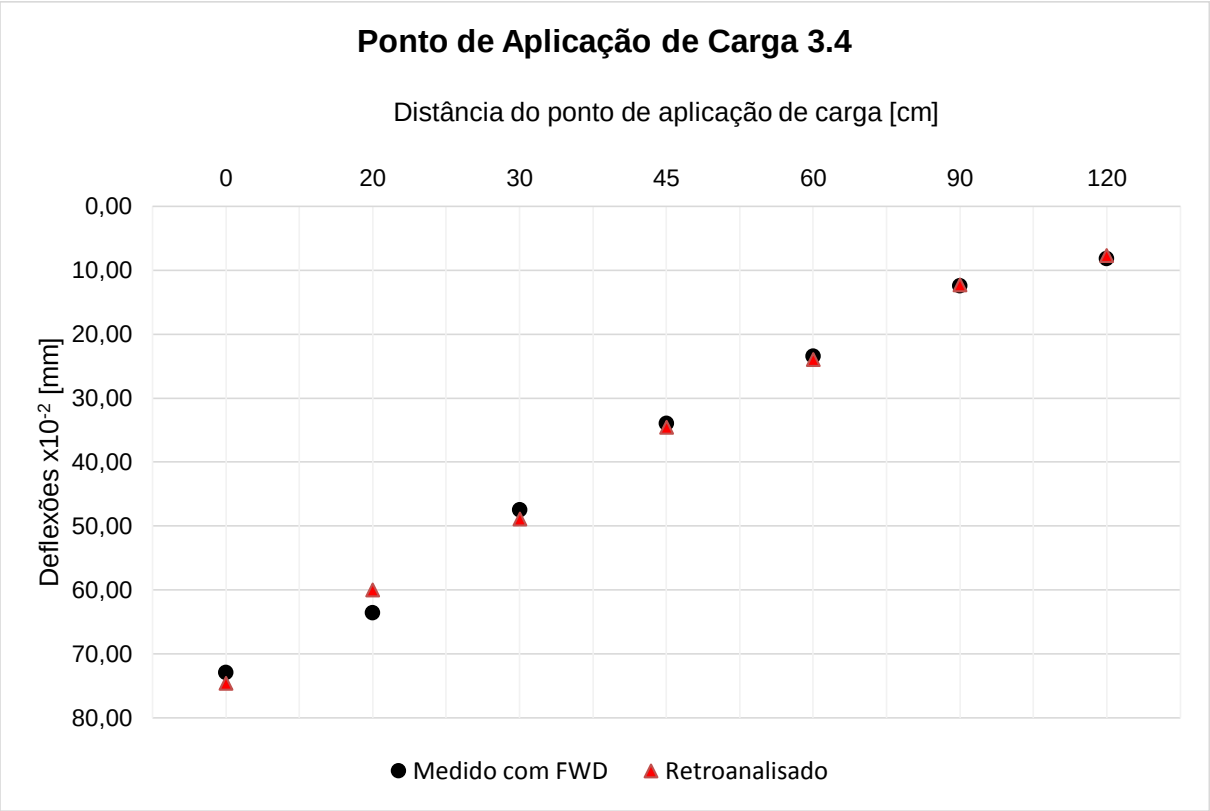
Figura 5.15 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 3.2



Quadro 5.18 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 3.4 na Seção 3

Descrição	Valores das Deflexões ($x10^{-2}$ mm)							RMSE
	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)	
Medido com FWD	73,00	63,60	47,50	34,00	23,50	12,50	8,20	**3,54%**
Retroanalisado	74,62	60,02	48,96	34,58	23,98	12,26	7,74	
Erro Percentual	2,22%	-5,63%	3,07%	1,69%	2,02%	-1,90%	-5,56%	

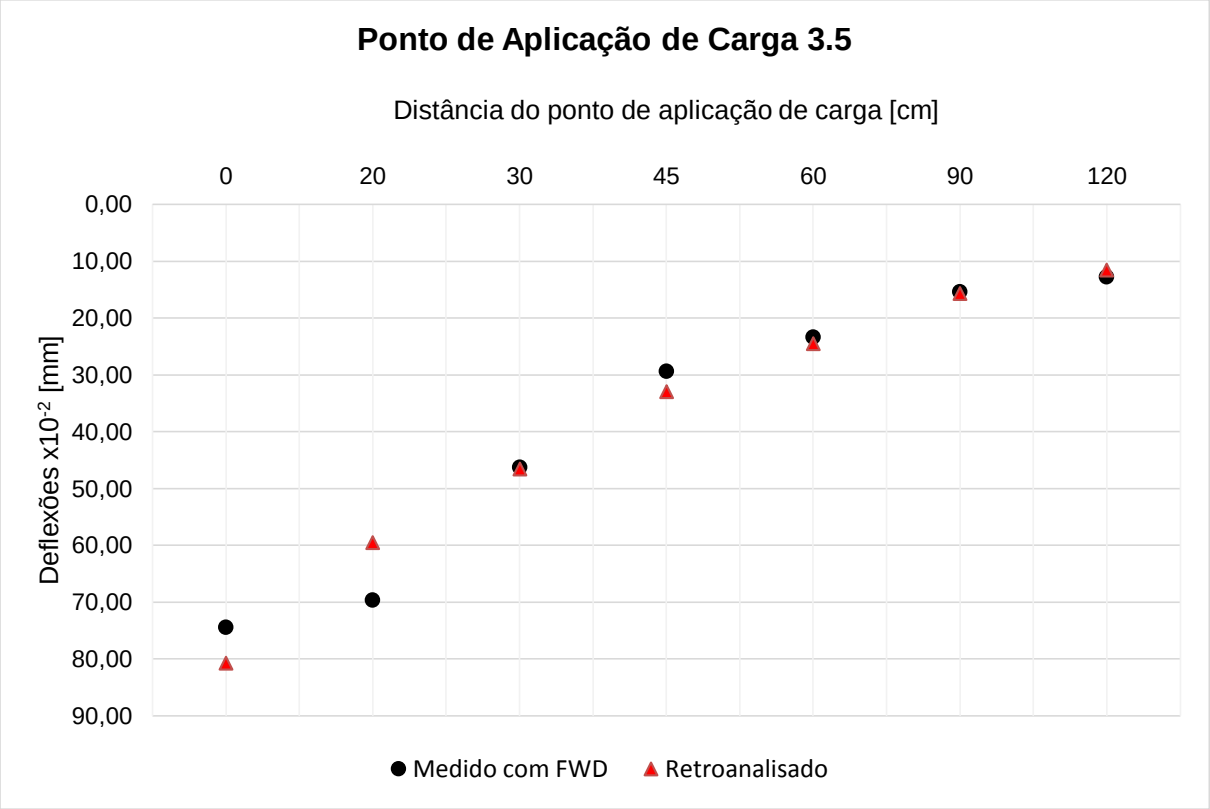
Figura 5.16 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 3.4



Quadro 5.19 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 3.5 na Seção 3

Descrição	Valores das Deflexões ($x10^{-2}$ mm)							RMSE
	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)	
Medido com FWD	74,50	69,70	46,30	29,40	23,40	15,40	12,80	
Retroanalisado	80,78	59,57	46,61	32,96	24,52	15,76	11,58	**8,86%**
Erro Percentual	8,43%	-14,53%	0,66%	12,11%	4,79%	2,32%	-9,57%	

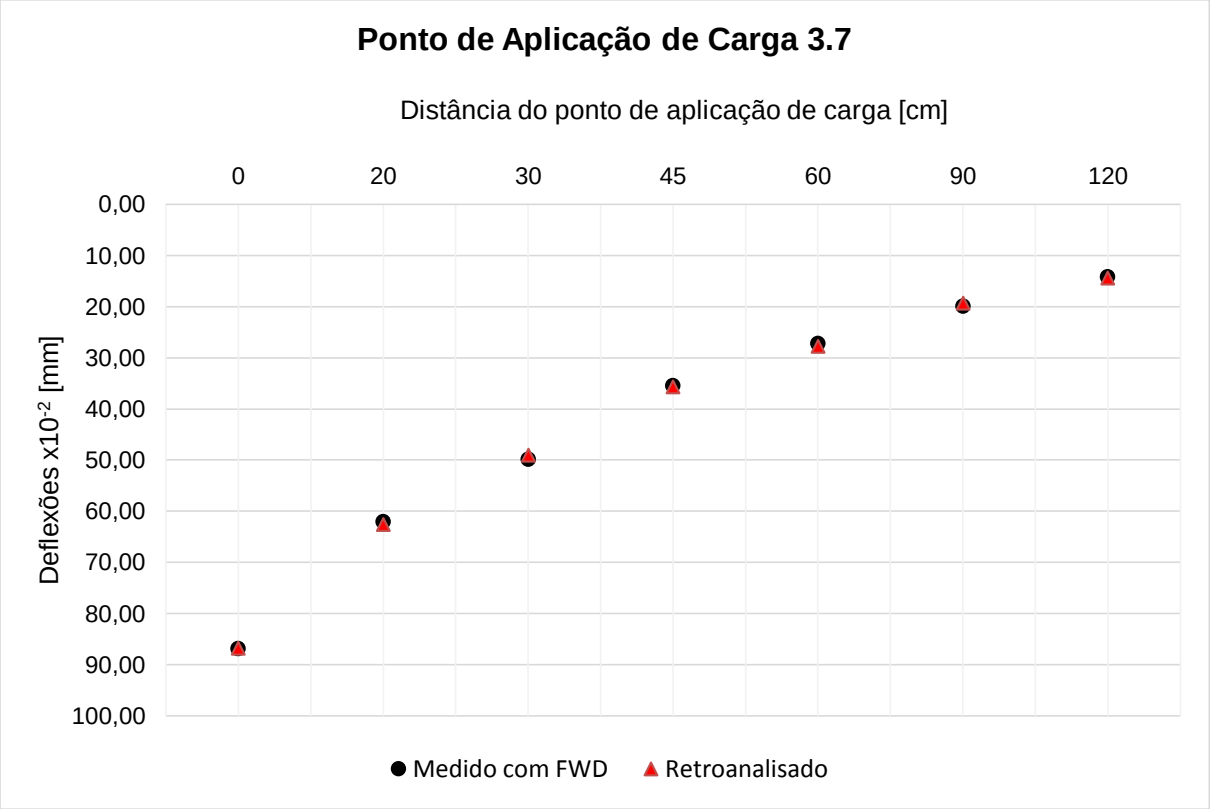
Figura 5.17 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 3.5



Quadro 5.20 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 3.7 na Seção 3

Descrição	Valores das Deflexões (x10^{-2} mm)							RMSE
	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)	
Medido com FWD	86,90	62,10	49,90	35,50	27,30	20,00	14,20	
Retroanalisado	86,79	62,67	49,10	35,70	27,80	19,36	14,46	**1,71%**
Erro Percentual	-0,12%	0,92%	-1,60%	0,55%	1,84%	-3,18%	1,82%	

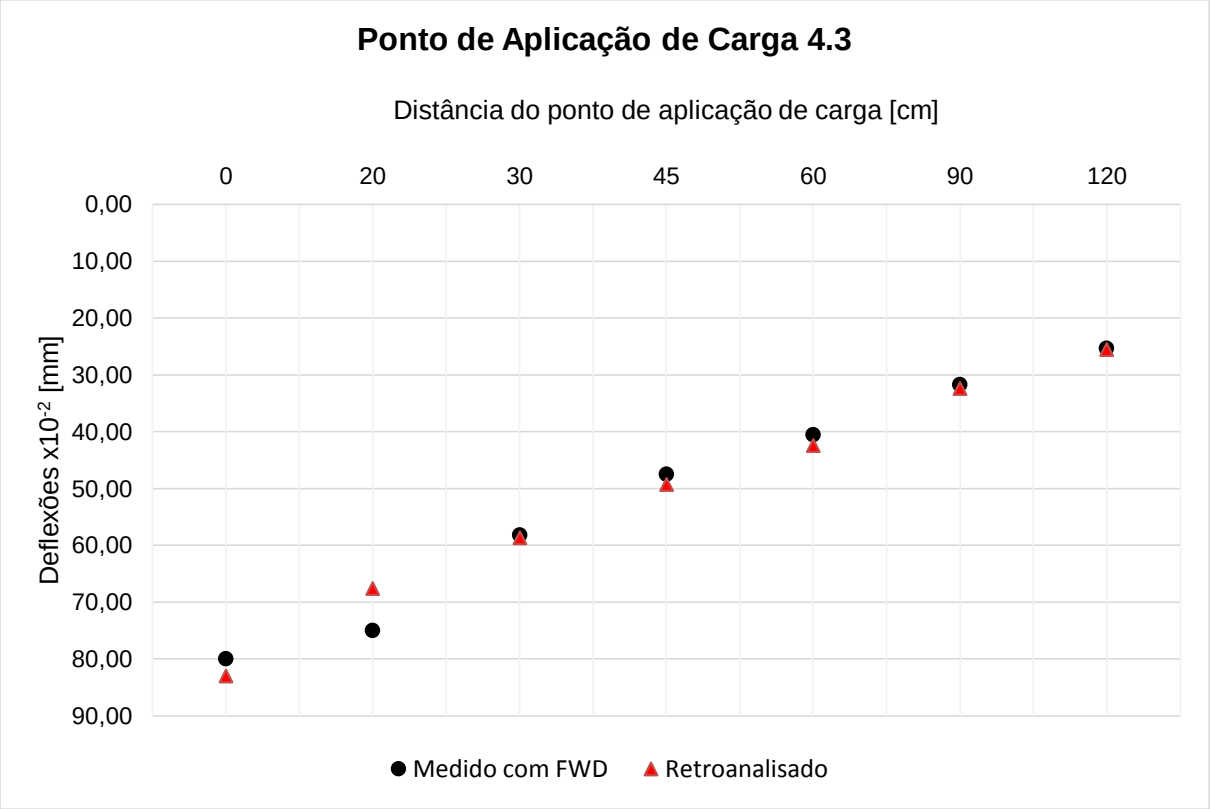
Figura 5.18 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 3.7



Quadro 5.21 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 4.3 na Seção 4

Descrição	Valores das Deflexões (x10^{-2} mm)							RMSE
	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)	
Medido com FWD	80,00	75,00	58,20	47,50	40,60	31,80	25,40	**4,65%**
Retroanalisado	82,99	67,61	58,76	49,33	42,46	32,38	25,54	
Erro Percentual	3,73%	-9,85%	0,96%	3,86%	4,57%	1,84%	0,54%	

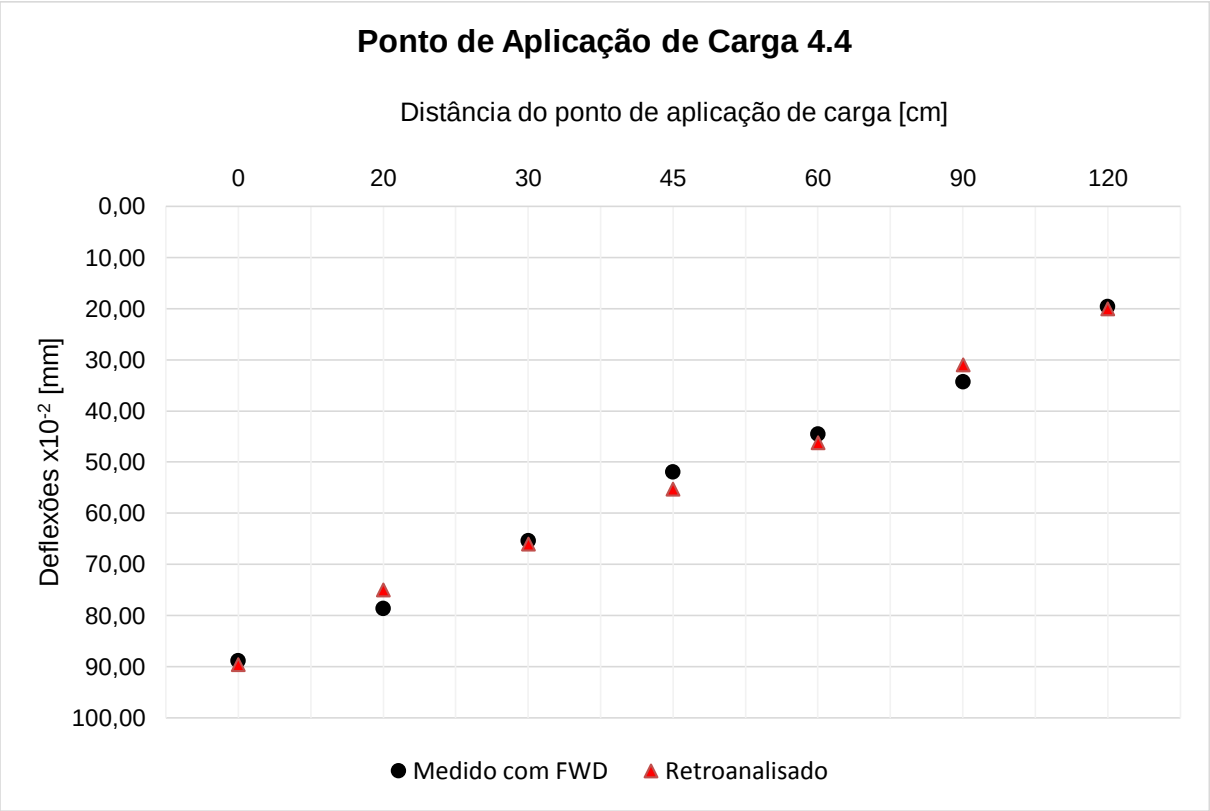
Figura 5.19 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 4.3



Quadro 5.22 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 4.4 na Seção 4

Descrição	Valores das Deflexões (x10^{-2} mm)							RMSE
	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)	
Medido com FWD	88,90	78,70	65,40	52,00	44,60	34,40	19,70	
Retroanalisado	89,65	75,01	66,08	55,35	46,20	30,99	20,09	**5,08%**
Erro Percentual	0,84%	-4,69%	1,04%	6,44%	3,59%	-9,92%	1,98%	

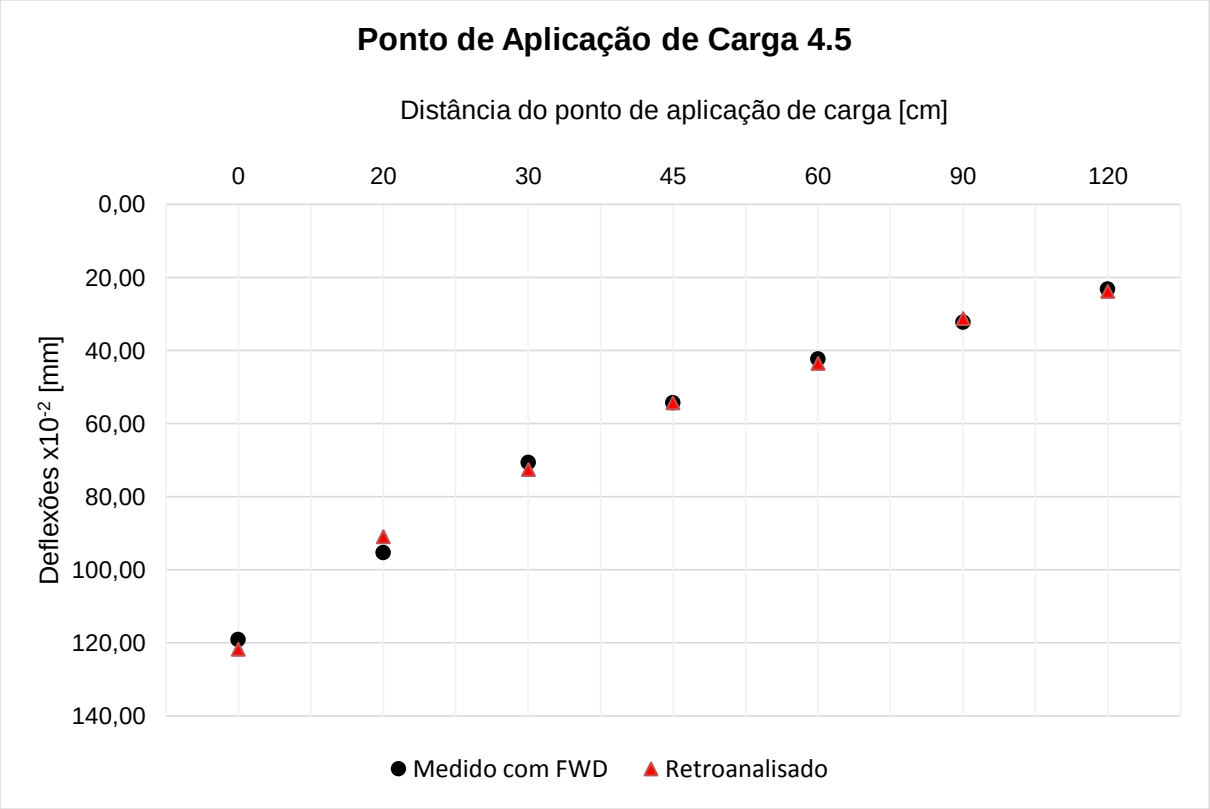
Figura 5.20 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 4.4



Quadro 5.23 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 4.5 na Seção 4

Descrição	Valores das Deflexões ($x10^{-2}$ mm)							RMSE
	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)	
Medido com FWD	119,20	95,40	70,80	54,40	42,40	32,40	23,30	
Retroanalisado	121,89	91,00	72,61	54,34	43,60	31,34	23,85	**2,86%**
Erro Percentual	2,25%	-4,61%	2,55%	-0,12%	2,83%	-3,27%	2,36%	

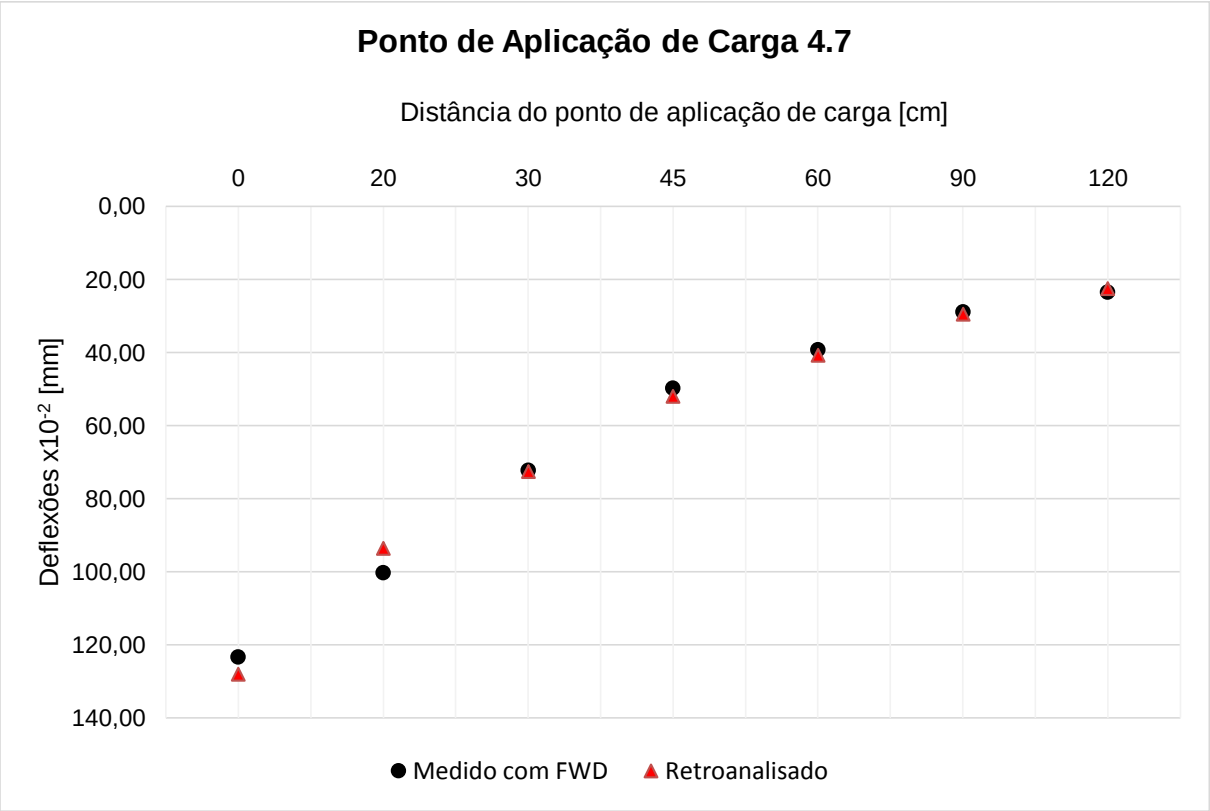
Figura 5.21 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 4.5



Quadro 5.24 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 4.7 na Seção 4

Descrição	Valores das Deflexões ($x10^{-2}$ mm)							RMSE
	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)	
Medido com FWD	123,50	100,40	72,30	49,90	39,30	28,90	23,50	**4,01%**
Retroanalisado	128,15	93,61	72,67	52,03	40,77	29,55	22,58	
Erro Percentual	3,76%	-6,77%	0,50%	4,26%	3,75%	2,24%	-3,90%	

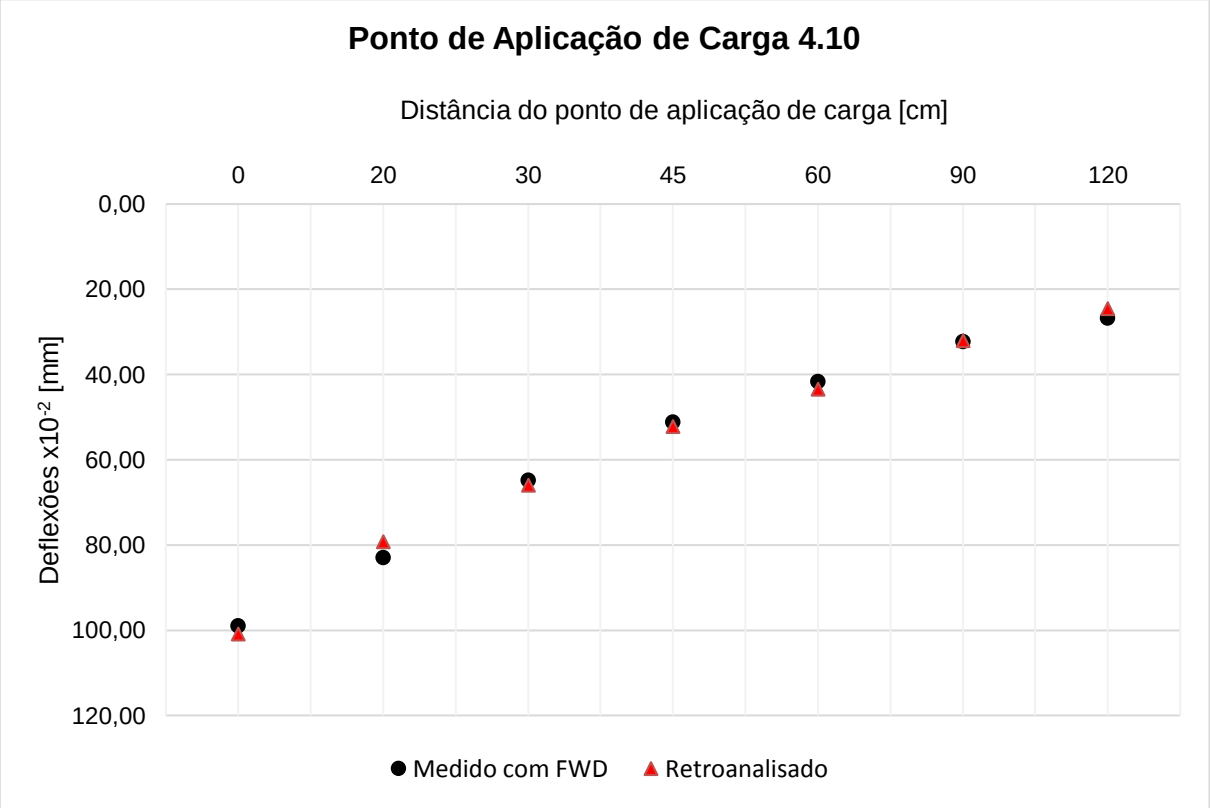
Figura 5.22 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 4.7



Quadro 5.25 - Comparativo entre as deflexões medidas e retroanlisadas no ponto de aplicação de carga 4.10 na Seção 4

Descrição	Valores das Deflexões ($x10^{-2}$ mm)							RMSE
	Df1 (0)	Df2 (20 cm)	Df3 (30 cm)	Df4 (45 cm)	Df5 (60 cm)	Df6 (90 cm)	Df7 (120 cm)	
Medido com FWD	99,00	83,00	64,90	51,20	41,70	32,30	26,80	
Retroanalisado	100,92	79,26	66,01	52,25	43,45	32,11	24,58	**4,10%**
Erro Percentual	1,94%	-4,51%	1,71%	2,05%	4,20%	-0,60%	-8,27%	

Figura 5.23 - Comparativo entre bacias de deflexão medida e retroanalisada para o ponto de aplicação de carga 4.10



6 CONCLUSÕES

O objetivo central deste trabalho foi analisar criticamente o comportamento estrutural e funcional do PBC sobre base cimentada, utilizando-se como meio para este fim, o estudo do pavimento experimental localizado na Avenida Professor Almeida Prado na Universidade de São Paulo. Por meio da análise do projeto para construção do pavimento e do confronto com a literatura e com os dados das avaliações destrutivas e não destrutivas realizadas, observou-se que:

- A quantidade de poços de inspeção para coleta e análise dos materiais de subleito, ainda na fase de projeto, foi inferior aquelas recomendadas por manuais técnicos amplamente empregados no país, dada a extensão do pavimento. Todavia, o valor considerado como modulo de resiliência do subleito de projeto, determinado em função do CBR de projeto, oriundo dos ensaios realizados com o material retirado dos poços de inspeção, mostrou-se adequado quando comparado com os módulos de resiliência do subleito obtidos através das retroanálises;
- A abertura de cavas nos trechos experimentais evidenciou falhas no controle tecnológico dos materiais empregados na estrutura do pavimento e também falhas no gerenciamento da construção dos trechos experimentais. Tais fatos contribuíram para o nível de severidade de danos verificados em campo;
- A significativa variabilidade constatada na espessura da camada de assentamento contribuiu para o aparecimento de deformações permanentes ao longo dos trechos avaliados. Além disso, a inobservância no controle da granulometria do material empregado nesta camada resultou na ocorrência de pontos de perda de material através das juntas do pavimento, em função do mecanismo de bombeamento de finos, o que também contribuiu para o aumento nas deformações permanentes;
- A análise do comportamento estrutural do pavimento com base nas bacias de deflexão resultou em comportamento distinto do esperado para o PBC sobre base cimentada, sugerindo resultados característicos de bacias de deflexão de pavimento flexível,

divergindo do comportamento esperado de pavimento rígido dado o emprego da base cimentada;

- Em função das condições verificadas em campo do material empregado na camada base, inferiu-se que o mesmo não atende as premissas de projeto em decorrência do estado de desagregação deste material e da incompatibilidade dos módulos de resiliência retroanalisados em comparação com aqueles provenientes da literatura;
- Os resultados das retroanálises indicaram módulos de resiliência da camada de base com significativas variações entre 158 e 19.181 MPa o que compreende, desde valores típicos de camadas granulares até valores de módulos comuns a camadas cimentadas como o BGTC e o CCR com pouco consumo de cimento, isto confirma que durante as obras não foi respeitado o material especificado em projeto para a base, em boa parte da área construída;
- No caso dos valores dos módulos de resiliência retroanalisados da camada de revestimento, observou-se uma faixa de variação entre 701 e 4.567 MPa o que corresponde a valores condizentes com a literatura e que compreende desde valores típicos do PBC sobre bases granulares, sem o devido intertravamento dos blocos, a valores típicos de módulos de resiliência do PBC sobre bases cimentadas devidamente intertravados;
- Ocorreram dificuldades em se estabelecer valores de RMSE dentro do recomendado pela norma ASTM D5858 (2015) (RMSE de 1 a 2%), no que tange a correspondência entre as deflexões calculadas e medidas. Atribui-se tal dificuldade ao fato de se tratar de um pavimento formado por uma rede de juntas que caracterizam descontinuidades e a possibilidade de diferenças entre espessuras de camadas assumidas e reais, uma vez que, a norma orienta que estes são fatores que afetam a precisão e aplicabilidade das retroanálises dos módulos de resiliência das camadas do pavimento;
- As seções 1 e 4 foram as que apresentaram maiores danos as condições estruturais do pavimento, conforme indicado pela análise dos níveis de severidade das patologias e classificação do ICP destas seções. Acredita-se que parte disso é devido a existência, nestas seções, de paradas de ônibus que, de tal forma, impõem ao pavimento maiores níveis de frenagem e aceleração o que tende a agravar o processo de degradação nestas seções;

- As deformações permanentes associadas ao tráfego, em todas as quatro seções dos dois trechos experimentais avaliados, apresentaram valores superiores a 15 mm o que, conforme a literatura, indica o fim da vida de serviço da estrutura do pavimento.

Recomendações para estudos futuros:

- Avaliar a influência da elevada tolerância de material fino na faixa granulométrica da camada de assentamento, bem como sua natureza mineralógica e correlacioná-la com a incidência de patologias no PBC ao longo de seu horizonte de projeto, com a finalidade de estabelecer limites mais conservadores para este material dentro das normas brasileiras;
- Estudar o mecanismo de transmissão de esforços do PBC devido a tensão de cisalhamento entre os blocos e o material de rejuntamento;
- Construir e monitorar trecho experimental, com a finalidade de analisar o custo do ciclo de vida do PBC e compará-lo com os de pavimentos asfálticos e de concreto simples;
- Simular o efeito da camada base aderida ao subleito no comportamento estrutural do PBC;
- Avaliar o efeito da espessura da camada de assentamento no comportamento dos módulos de resiliência retroanalisados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. **Guide for design of pavements structures**, Washington, D.C., 1993.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **C33**: Standard specification for concrete aggregates. West Conshohocken, 1999.

_____. **C936**: Standard specification for solid concrete interlocking paving units. West Conshohocken, 2008.

_____. **C144:** Standard Specification for aggregate for masonry mortar. West Conshohocken, 2011.

_____. **D5858**: Standard guide for calculating in situ elastic moduli of pavement materials using layered elastic theory, Standard D5858 – 96. West Conshohocken, 2015.

_____. **E2840:** Standard practice for pavement condition index surveys for interlocking concrete roads and parking lots, West Conshohocken, 2015.

ANDERTON, G. L. **Concrete paving blocks:** Facilities Engineering Applications Program (FEAP) Demonstration, FY89, US Army Engineering and Housing Support Center, Huntsville, 1991.

ARAÚJO, A., PANOSSIAN, Z. **Inspeção rotineira de estruturas de concreto armado expostas a atmosferas agressivas**. REVISTA TÉCHNE, Edição nº 177, dezembro de 2011. Disponível em: http://techne.pini.com.br/engenhariacivil/177/artigo2859072.aspx. Visitado em: 04/06/2016 as 14h01, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Manual de Pavimento Intertravado:** Passeio Público. São Paulo, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9780:** Peças de concreto para pavimentação determinação da resistência à compressão: Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 12307:** Regularização do subleito: Procedimento. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR NM 46:** Agregados: Determinação do material fino que passa através da peneira de 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 248:** Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 15953:** Pavimento intertravado com peças de concreto: Execução. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 9781:** Peças de concreto para pavimentação: Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projetos e restauração. Oficina de Textos, São Paulo, 2007.

BEATY, A.N.S. **Bedding sands for concrete block pavements subject to heavy channelized loading**. Second International Workshop on Concrete Block Paving, Oslo, p. 234 – 241, 1994.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION – BSI. **BS7533:** British standard guide for structural design of pavements constructed with clay or concrete block pavers, BSI, London, 1992.

_____. **BS7533 – 1:** Guide for structural design of heavy duty pavements constructed of clay pavers or precast concrete paving block, BSI, London, 2001.

_____. **BS7533 – 2:** Guide for structural design of light duty pavements constructed of clay pavers or precast concrete paving block, BSI, London, 2002.

_____. **BS EN 12620**: Aggregates for concrete. BSI, London 2002.

BURAK, R.J. **Construction details and guide specification for interlocking concrete pavement**, INFRA 2002, Montréal, Québec, 2002a.

_____. **Segmental concrete pavements for municipal and heavy use industrial or port applications**, Second Material Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Montréal, Québec, 2002b.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION – CSA. **A231.2:** Precast concrete pavers, Table 4 Grading Limits for Fine Aggregates, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, 1995.

_____. **A23.1 (FA1):** Concrete Materials and Methods of Concrete Construction, Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, 2004.

_____. **A179:** Mortar and grout for unit masonry, Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, 2004.

CARVALHO, M.D. **Pavimento com peças pré-moldadas de concreto:** 4ª ed., Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 1998.

COLIM, G. M. **Estudo dos fatores que afetam a transferência de carga em juntas de pavimentos de concreto simples**. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

COOK, I. D., KNAPTON, J. **A design method for lightly trafficked and pedestrian pavements**, Fifth International Concrete Block Paving Conference, p. 17-52, Tel-Aviv, June, 1996.

COORDENADORIA DO CAMPUS DA CAPITAL DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – CCCUSP. **Projeto de pavimentação**: Memorial de cálculo. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009a.

COORDENADORIA DO CAMPUS DA CAPITAL DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – CCCUSP. **Projeto de pavimentação**: Projeto executivo USP-PAV-002-R0B. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009b.

CRUZ, L.O.M. **Pavimento Intertravado de concreto:** Estudo dos elementos e métodos de dimensionamento, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO – DER/SP. **Pavimento com peças pré-moldadas de concreto:** Especificação Técnica, ET-DE-P00/048, Secretaria de Transportes, São Paulo, 2006a.

_____. **Projeto de pavimentação:** Instrução de Projeto, IP-DE-P00/001, Secretaria de Transportes, São Paulo, 2006b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Agregado miúdo para concreto de cimento**. Norma Rodoviária: Especificação de Materiais EM-038/97, Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico - IPR, Rio de Janeiro, 1997a.

_____. **Pavimentação:** pavimentos com peças pré-moldadas de concreto. Norma Rodoviária: Especificação de Serviço ES-327/97, Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico - IPR, Rio de Janeiro, 1997b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. **Manual de pavimentos rígidos**. Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisas, Instituto de Pesquisa Rodoviária. 2ª Ed. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **Manual de pavimentação:** IPR-719. Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Coordenação Geral de Estudos e Pesquisas, Instituto de Pesquisa Rodoviária. 3ª Ed. Rio de Janeiro, 2006.

DESENVOLVIMENTO RODOVIÁRIO S.A. – DERSA. **Especificação de pavimento articulado de concreto.** Especificação Técnica ET-P00/012. São Paulo, 1985.

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG – DIN EN 14630. **Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete**, Structures Test Methods Determination of Carbonation Depth in Hardened Concrete by the Phenolphthalein Method. Berlin, 2007.

DORMON, G. M.; METCALF, C. T. **Design Curves for Flexible Pavements Based on Layered System Theory**. Highway Research Record 71, Highway Research Board. Washington, D.C., 1965.

DOWSON, A.J. **Back-to-basics measuring the progress of understanding of over 35 years of the use of concrete block paving in the UK**. 9th International Conference on Concrete Block Paving. Buenos Aires, 2009.

HACHIYA, Y., YIN, J., SATO, K. **Application of block pavements for ports**, Third international Workshop on Concrete Block Paving, Catagena de Indias, p.22-1 – 22-7, 1998.

HALLACK, A. **Dimensionamento de pavimentos com revestimento de peças pré-moldadas de concreto para áreas portuárias e industriais**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo – Escola Politécnica. São Paulo, 1998.

HEIN, D.K., AHO, B., BURAK, R. **Development of a pavement condition index procedure for interlocking concrete pavements**,9th International Conference on Concrete Block Pavements, Buenos Aires, 2009.

HEIN, D. K., BURAK, R.J., RADA, G.R**. Development of a North American standard for the structural design of interlocking concrete pavements for municipal street roadways**, 9th International Conference on Concrete Block Paving. Buenos Aires, 2009.

INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE – ICPI. **Glossary of terms for segmental concrete pavement**, ICPI Tech Spec nº 1, Chantilly, 2006.

_____. **Bedding sand selection for interlocking concrete pavements in vehicular applications**, ICPI Tech Spec nº 17, Chantilly, 2007.

_____. **Structural design of interlocking concrete pavement for roads and parking lots**, ICPI Tech Spec nº 4, Chantilly, 2010.

_____. **Application guide for interlocking concrete pavements**, ICPI Tech Spec nº 10, Chantilly, 2012.

_____. **Edge restraints for interlocking concrete pavements**, ICPI Tech Spec nº 3, Chantilly, 2014.

INTERPAVE. **Concrete block paving:** guide to the properties design, construction, reinstatement and maintenance of concrete block pavements. Second Edition, The Precast Concrete Paving & Kerb Association, 2012.

ITAMBÉ. **Carbonatação do concreto**. Junho de 2009. Disponível em: http://www.cimentoitambe.com.br/carbonatacaodoconcreto/. Visitado em: 24/05/2016 as 15h19.

KASAHARA, A., KOMURA, M., IKEDA, S. **Performance of concrete pavement on low-volume road**, Fourth International Conference on Concrete Block Pavements, Auckland, p. 21 – 29, 1992.

KNAPTON, J. **Paver laying course materials:** State of art. Second International Workshop on Concrete Block Paving, Oslo, p. 246 – 264, 1994.

_____. **The romans and their roads:** the original small element pavement technologist, Fifth International Concrete Block Paving Conference, p. 17-52, Tel-Aviv, June, 1996.

KNAPTON, J., BARBER, S. D. **UK research into concrete block pavement design**, University of Newcastle, Newcastle, p. 33 – 37, 1980.

KNAPTON, J., SMITH, D.R. **Port and industrial pavement design with concrete pavers**, Interlocking Concrete Pavement Institute, Second edition, Ontario, 2012.

MADRID, G.G., GIRALDO, E.A., GONZÁLEZ, G.A. **Water infiltration through concrete block pavements up to 26 years old**. 7th International Conference on Concrete Block Paving, Sun City, 2003.

National Institute for Transport and Road Research – NITRR. **Structural design of segmental block pavements for Southern Africa**. Urban Transport Guidelines. Pretória, 1987

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO – PMSP. **Dimensionamento de pavimentos com blocos intertravados de concreto:** Instrução de Projeto, IP-06/2004, Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras, São Paulo, 2004.

RICCI, Gino. **Estudo de características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados de construção e de demolição para pavimentação**. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

ROCHA, S. **Para aprender a lição**: Trecho de 1 km na avenida USP utiliza pavimento intertravado de alta resistência e concreto inovador. Revista Prisma. Disponível em: http://www.revistaprisma.com.br/novosite/noticia.asp?cod=3059. Visitado em: 21/11/2015 as 17h29, 2015.

SACHET, Taís. **Estudo de propriedades mecânicas de concretos compactados com incorporação de fresados para bases de pavimentos**. Tese (doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

SALLES, L. S. **Análise do comportamento de pavimento experimental de concreto continuamente armado de curta extensão**. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

SHACKEL, B. **The design of interlocking concrete block pavements for road traffic**, First International Conference on Concrete Block Paving. Newcastle, 1980.

_____. **The analysis and design of concrete block paving subject to road traffic and heavy industrial loading**, Second International Conference on Concrete Block Paving. Delft, 1984.

_____. **Computer-aided design and analysis of concrete segmental pavements**, First International Workshop on Interlocking Concrete Pavements. Melbourne, 1986.

_____. **Design and construction of interlocking concrete block pavements.** Elsevier, New York and London, 1990.

_____. **Computer Based Procedures for the Design and Specification of Concrete Block Pavements.** Fourth International Concrete Block Paving Conference, Vol. 1, p. 79-87, Auckland, February 1992.

_____. **The development and application of mechanistic design procedures for concrete block paving**, Sixth International Conference on Concrete Block Paving, Tokyo, 2000a.

_____. **Loading tests of conventional and ecological concrete block paving**, Sixth International Conference on Concrete Block Paving, Tokyo, 2000b.

_____. **The challenges of concrete block paving as a mature technology**, Seventh International Conference on Concrete Block Paving, Sun City, 2003.

_____. **The objective selection of concrete block paving for engineering projects**, 8th International Conference on Concrete Block Paving. San Francisco, 2006.

SHACKEL, B., LIM, D. O. O. **Mechanisms of paver interlock**, Seventh International Conference on Concrete Block Paving, Sun City, 2003.

SOUSA, M. **Pise leve e aproveite a paisagem**. Revista Prisma, Edição nº 58 p. 32 – 34, agosto de 2015. Disponível em: http://issuu.com/marcosmandarimdesousa/docs/prisma_58__ago_2015. Visitado em: 21/11/2015 as 18h17, 2015.

THE INDIAN ROADS CONGRESS – TIRC. **Guidelines for the use of interlocking block pavement**, The Indian Roads Congress, New Delhi, 2004.

TRICHÊS, G. **Concreto compactado com rolo para aplicação na pavimentação**: Estudo do comportamento na fadiga e proposição de metodologia de dimensionamento. Tese. ITA, São José dos Campos, 1993.

APÊNDICE A – Levantamentos de campo para determinação do ICP

Conforme discutido no item 4.2 foram realizados os levantamentos das condições superficiais do pavimento para fins de determinação do ICP das seções dos trechos experimentais. Para tanto, empregou-se o método preconizada pela norma ASTM E2840 (2015) a qual, relaciona onze tipos de patologias, típicas do PBC, subdivididas em três níveis de severidade.

Inicialmente, as seções foram subdivididas em amostras conforme os limites estabelecidos pela norma e, em seguida, foram realizados os levantamentos das patologias. Foi utilizada para determinação de distâncias uma trena de 50 m, para determinação do afastamento entre juntas, profundidade do material de rejuntamento e distâncias curtas foi empregada trena de 3 m; fita métrica e régua, para determinação dos afundamentos em trilhas de roda e depressões utilizou-se de régua metálica de 3 m. Os resultados dos levantamentos são apresentados no Quadro A.1 até o Quadro A.14.

Quadro A.1 - Levantamento da amostra 1A da seção 1

Pavimento de Blocos de Concreto Intertravados
Ruas e áreas de estacionamento
Ficha de dados de levantamentos das condições por unidade de amostra

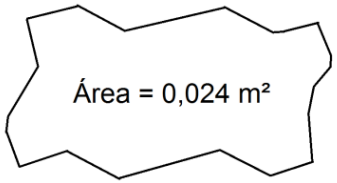
Local: Av. Professor Almeida Prado — Data: 22/03/2016
Seção: 1A — Comprimento da Amostra: 50 m
Índice de Condições do Pavimento (ICP): 96 — Área da Amostra: 250 m²

Código da Patologia e Tipo

1. Blocos danificados
2. Depressões
3. Perda de contenção
4. Espaçamento excessivo entre juntas
5. Degrau
6. Elevação
7. Deslocamento horizontal
8. Perda de rejuntamento / Bombeamento
9. Falta de blocos
10. Reparos
11. Afundamento em trilha de rodas

Patologia	Quantidade (m²)			Densidade			Valor de dedução		
	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
1.			0,072			0,03%			2
2.									
3.									
4.	2,100			0,84%			2		
5.									
6.									
7.									
8.									
9.									
10.									
11.									

Esboço:



Parâmetros

Maior valor de dedução individual (MVD):	2
Número permitido de deduções (m):	10
Valor de dedução total (VDT):	4
Valor dedução corrigido (VDC):	4

ICP

ICP = 96
Classificação do ICP: BOM

Quadro A.2 - Levantamento da amostra 1B da seção 1

Pavimento de Blocos de Concreto Intertravados
Ruas e áreas de estacionamento
Ficha de dados de levantamentos das condições por unidade de amostra

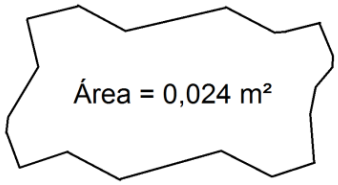
Local: Av. Professor Almeida Prado — Data: 22/03/2016
Seção: 1B — Comprimento da Amostra: 34,30 m
Índice de Condições do Pavimento (ICP): 76 — Área da Amostra: 171,50 m²

Código da Patologia e Tipo

1. Blocos danificados
2. Depressões
3. Perda de contenção
4. Espaçamento excessivo entre juntas
5. Degrau
6. Elevação
7. Deslocamento horizontal
8. Perda de rejuntamento / Bombeamento
9. Falta de blocos
10. Reparos
11. Afundamento em trilha de rodas

Patologia	Quantidade (m²)			Densidade			Valor de dedução		
	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
1.	0,048	0,072	0,336	0,03%	0,04%	0,20%	0	1	2
2.			0,880			0,51%			22
3.									
4.									
5.									
6.									
7.									
8.									
9.									
10.									
11.									

Esboço:



Parâmetros

Maior valor de dedução individual (MVD):	22
Número permitido de deduções (m):	8,16
Valor de dedução total (VDT):	25
Valor dedução corrigido (VDC):	24

ICP

ICP = 76
Classificação do ICP: SATISFATÓRIO

Quadro A.3 - Levantamento da amostra 1C da seção 1

Pavimento de Blocos de Concreto Intertravados
Ruas e áreas de estacionamento
Ficha de dados de levantamentos das condições por unidade de amostra

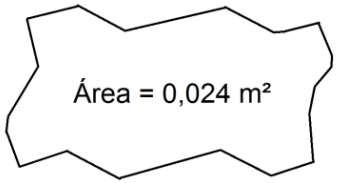
Local: Av. Professor Almeida Prado — Data: 22/03/2016
Seção: 1C — Comprimento da Amostra: 45 m
Índice de Condições do Pavimento (ICP): 40 — Área da Amostra: 225 m²

Código da Patologia e Tipo

1. Blocos danificados
2. Depressões
3. Perda de contenção
4. Espaçamento excessivo entre juntas
5. Degrau
6. Elevação
7. Deslocamento horizontal
8. Perda de rejuntamento / Bombeamento
9. Falta de blocos
10. Reparos
11. Afundamento em trilha de rodas

Patologia	Quantidade (m²)			Densidade			Valor de dedução		
	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
1.	0,048	0,072	0,408	0,02%	0,03%	0,18%	0	1	2
2.									
3.									
4.									
5.									
6.									
7.									
8.			1,886			0,84%			2
9.									
10.									
11.			18,675			8,30%			56

Esboço:



Parâmetros

Maior valor de dedução individual (MVD):	56
Número permitido de deduções (m):	5,04
Valor de dedução total (VDT):	61
Valor dedução corrigido (VDC):	60

ICP

ICP = 40
Classificação do ICP: MUITO RUIM

Quadro A.4 - Levantamento da amostra 1D da seção 1

Pavimento de Blocos de Concreto Intertravados
Ruas e áreas de estacionamento
Ficha de dados de levantamentos das condições por unidade de amostra

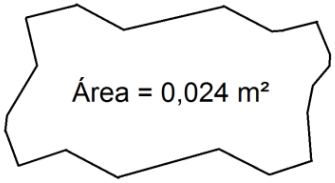
Local: Av. Professor Almeida Prado — Data: 22/03/2016
Seção: 1D — Comprimento da Amostra: 55 m
Índice de Condições do Pavimento (ICP): 47 — Área da Amostra: 275 m²

Código da Patologia e Tipo

1. Blocos danificados
2. Depressões
3. Perda de contenção
4. Espaçamento excessivo entre juntas
5. Degrau
6. Elevação
7. Deslocamento horizontal
8. Perda de rejuntamento / Bombeamento
9. Falta de blocos
10. Reparos
11. Afundamento em trilha de rodas

Patologia	Quantidade (m²)			Densidade			Valor de dedução		
	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
1.			0,168			0,06%			2
2.									
3.									
4.			0,220			0,08%			3
5.									
6.									
7.									
8.									
9.									
10.									
11.	11,605	4,050	1,470	4,22%	1,47%	0,53%	16	16	17

Esboço:



Parâmetros

Maior valor de dedução individual (MVD):	49
Número permitido de deduções (m):	5,68
Valor de dedução total (VDT):	54
Valor dedução corrigido (VDC):	53

ICP

ICP = 47
Classificação do ICP: RUIM

Quadro A.5 - Levantamento da amostra 2A da seção 2

Pavimento de Blocos de Concreto Intertravados
Ruas e áreas de estacionamento
Ficha de dados de levantamentos das condições por unidade de amostra

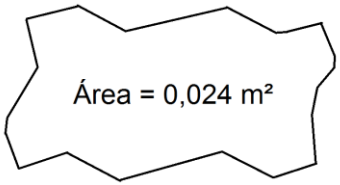
Local: Av. Professor Almeida Prado — Data: 22/03/2016
Seção: 2A — Comprimento da Amostra: 45 m
Índice de Condições do Pavimento (ICP): 92 — Área da Amostra: 225 m²

Código da Patologia e Tipo

1. Blocos danificados
2. Depressões
3. Perda de contenção
4. Espaçamento excessivo entre juntas
5. Degrau
6. Elevação
7. Deslocamento horizontal
8. Perda de rejuntamento / Bombeamento
9. Falta de blocos
10. Reparos
11. Afundamento em trilha de rodas

Patologia	Quantidade (m²)			Densidade			Valor de dedução		
	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
1.									
2.									
3.									
4.									
5.									
6.									
7.									
8.									
9.									
10.		0,048			0,02%			0	
11.		0,600			0,27%			8	

Esboço:



Parâmetros

Maior valor de dedução individual (MVD):	8
Número permitido de deduções (m):	9,45
Valor de dedução total (VDT):	8
Valor dedução corrigido (VDC):	8

ICP

ICP = 92
Classificação do ICP: BOM

Quadro A.6 - Levantamento da amostra 2B da seção 2

Pavimento de Blocos de Concreto Intertravados
Ruas e áreas de estacionamento
Ficha de dados de levantamentos das condições por unidade de amostra

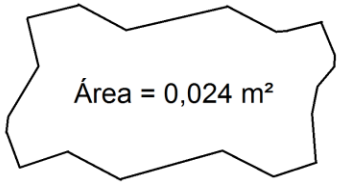
Local: Av. Professor Almeida Prado — Data: 22/03/2016
Seção: 2B — Comprimento da Amostra: 47 m
Índice de Condições do Pavimento (ICP): 76 — Área da Amostra: 235 m²

Código da Patologia e Tipo

1. Blocos danificados
2. Depressões
3. Perda de contenção
4. Espaçamento excessivo entre juntas
5. Degrau
6. Elevação
7. Deslocamento horizontal
8. Perda de rejuntamento / Bombeamento
9. Falta de blocos
10. Reparos
11. Afundamento em trilha de rodas

Patologia	Quantidade (m²)			Densidade			Valor de dedução		
	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
1.			0,120			0,05%			2
2.									
3.									
4.									
5.									
6.									
7.									
8.									
9.									
10.									
11.			2,025			0,86%			22

Esboço:



Parâmetros

Maior valor de dedução individual (MVD):	22
Número permitido de deduções (m):	8,16
Valor de dedução total (VDT):	24
Valor dedução corrigido (VDC):	24

ICP

ICP = 76
Classificação do ICP: SATISFATÓRIO

Quadro A.7 - Levantamento da amostra 2C da seção 2

Pavimento de Blocos de Concreto Intertravados
Ruas e áreas de estacionamento
Ficha de dados de levantamentos das condições por unidade de amostra

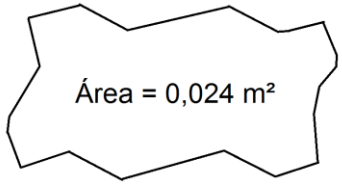
Local: Av. Professor Almeida Prado — Data: 22/03/2016
Seção: 2C — Comprimento da Amostra: 50,90 m
Índice de Condições do Pavimento (ICP): 74 — Área da Amostra: 254,50 m²

Código da Patologia e Tipo

1. Blocos danificados
2. Depressões
3. Perda de contenção
4. Espaçamento excessivo entre juntas
5. Degrau
6. Elevação
7. Deslocamento horizontal
8. Perda de rejuntamento / Bombeamento
9. Falta de blocos
10. Reparos
11. Afundamento em trilha de rodas

Patologia	Quantidade (m²)			Densidade			Valor de dedução		
	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
1.			0,024			0,01%			2
2.									
3.									
4.		1,050			0,41%			3	
5.									
6.									
7.									
8.			0,700			0,28%			1
9.									
10.	0,048			0,02%			0		
11.		0,938	0,750		0,37%	0,29%		8	14

Esboço:



Parâmetros

Maior valor de dedução individual (MVD):	22
Número permitido de deduções (m):	8,16
Valor de dedução total (VDT):	28
Valor dedução corrigido (VDC):	26

ICP

ICP = 74
Classificação do ICP: SATISFATÓRIO

Quadro A.8 - Levantamento da amostra 3A da seção 3

Pavimento de Blocos de Concreto Intertravados
Ruas e áreas de estacionamento
Ficha de dados de levantamentos das condições por unidade de amostra

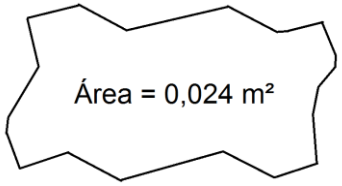
Local: Av. Professor Almeida Prado — Data: 22/03/2016
Seção: 3A — Comprimento da Amostra: 46,40 m
Índice de Condições do Pavimento (ICP): 89 — Área da Amostra: 232 m²

Código da Patologia e Tipo

1. Blocos danificados
2. Depressões
3. Perda de contenção
4. Espaçamento excessivo entre juntas
5. Degrau
6. Elevação
7. Deslocamento horizontal
8. Perda de rejuntamento / Bombeamento
9. Falta de blocos
10. Reparos
11. Afundamento em trilha de rodas

Patologia	Quantidade (m²)			Densidade			Valor de dedução		
	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
1.			0,072			0,03%			2
2.									
3.									
4.									
5.									
6.									
7.									
8.									
9.									
10.	0,048			0,02%			0		
11.		1,183			0,51%			9	

Esboço:



Parâmetros

Maior valor de dedução individual (MVD):	9
Número permitido de deduções (m):	9,36
Valor de dedução total (VDT):	11
Valor dedução corrigido (VDC):	11

ICP

ICP = 89
Classificação do ICP: BOM

Quadro A.9 - Levantamento da amostra 3B da seção 3

Pavimento de Blocos de Concreto Intertravados
Ruas e áreas de estacionamento
Ficha de dados de levantamentos das condições por unidade de amostra

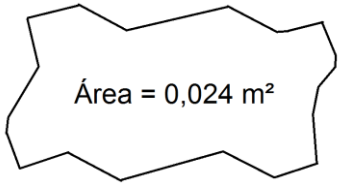
Local: Av. Professor Almeida Prado — Data: 22/03/2016
Seção: 3B — Comprimento da Amostra: 47 m
Índice de Condições do Pavimento (ICP): 76 — Área da Amostra: 235 m²

Código da Patologia e Tipo

1. Blocos danificados
2. Depressões
3. Perda de contenção
4. Espaçamento excessivo entre juntas
5. Degrau
6. Elevação
7. Deslocamento horizontal
8. Perda de rejuntamento / Bombeamento
9. Falta de blocos
10. Reparos
11. Afundamento em trilha de rodas

Patologia	Quantidade (m²)			Densidade			Valor de dedução		
	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
1.									
2.									
3.									
4.			0,529			0,23%			6
5.									
6.									
7.									
8.			2,565			1,09%			2
9.									
10.	0,072			0,03%			0		
11.			1,650			0,70%			20

Esboço:



Parâmetros

Maior valor de dedução individual (MVD):	20
Número permitido de deduções (m):	8,35
Valor de dedução total (VDT):	28
Valor dedução corrigido (VDC):	24

ICP

ICP = 76
Classificação do ICP: SATISFATÓRIO

Quadro A.10 - Levantamento da amostra 3C da seção 3

Pavimento de Blocos de Concreto Intertravados
Ruas e áreas de estacionamento
Ficha de dados de levantamentos das condições por unidade de amostra

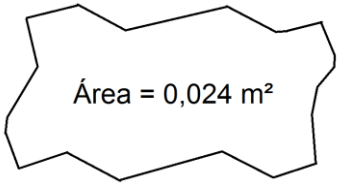
Local: Av. Professor Almeida Prado — Data: 22/03/2016
Seção: 3C — Comprimento da Amostra: 45 m
Índice de Condições do Pavimento (ICP): 84 — Área da Amostra: 225 m²

Código da Patologia e Tipo

1. Blocos danificados
2. Depressões
3. Perda de contenção
4. Espaçamento excessivo entre juntas
5. Degrau
6. Elevação
7. Deslocamento horizontal
8. Perda de rejuntamento / Bombeamento
9. Falta de blocos
10. Reparos
11. Afundamento em trilha de rodas

Patologia	Quantidade (m²)			Densidade			Valor de dedução		
	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
1.			0,960			0,43%			3
2.									
3.									
4.									
5.									
6.									
7.									
8.									
9.									
10.									
11.	0,650			0,29%					14

Esboço:



Parâmetros

Maior valor de dedução individual (MVD):	13
Número permitido de deduções (m):	8,99
Valor de dedução total (VDT):	17
Valor dedução corrigido (VDC):	16

ICP

ICP = 84
Classificação do ICP: BOM

Quadro A.11 - Levantamento da amostra 4A da seção 4

Pavimento de Blocos de Concreto Intertravados
Ruas e áreas de estacionamento
Ficha de dados de levantamentos das condições por unidade de amostra

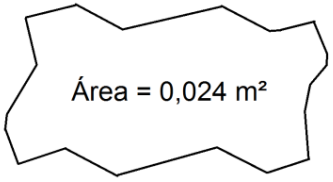
Local: Av. Professor Almeida Prado — Data: 22/03/2016
Seção: 4A — Comprimento da Amostra: 55 m
Índice de Condições do Pavimento (ICP): 66 — Área da Amostra: 275 m²

Código da Patologia e Tipo

1. Blocos danificados
2. Depressões
3. Perda de contenção
4. Espaçamento excessivo entre juntas
5. Degrau
6. Elevação
7. Deslocamento horizontal
8. Perda de rejuntamento / Bombeamento
9. Falta de blocos
10. Reparos
11. Afundamento em trilha de rodas

Patologia	Quantidade (m²)			Densidade			Valor de dedução		
	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
1.									
2.	1,647			0,60%			4		
3.									
4.			1,416			0,51%			8
5.									
6.									
7.									
8.	20,550		0,498	7,47%		0,18%	1		1
9.									
10.		0,120			0,04%			0	
11.			4,380			1,59%			28

Esboço:



Parâmetros

Maior valor de dedução individual (MVD):	28
Número permitido de deduções (m):	7,61
Valor de dedução total (VDT):	42
Valor dedução corrigido (VDC):	34

ICP

ICP = 66
Classificação do ICP: RAZOÁVEL

Quadro A.12 - Levantamento da amostra 4B da seção 4

Pavimento de Blocos de Concreto Intertravados
Ruas e áreas de estacionamento
Ficha de dados de levantamentos das condições por unidade de amostra

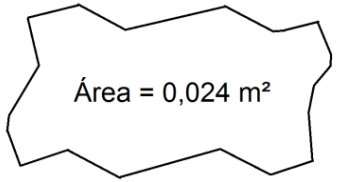
Local: Av. Professor Almeida Prado — Data: 22/03/2016
Seção: 4B — Comprimento da Amostra: 45 m
Índice de Condições do Pavimento (ICP): 33 — Área da Amostra: 225 m²

Código da Patologia e Tipo

1. Blocos danificados
2. Depressões
3. Perda de contenção
4. Espaçamento excessivo entre juntas
5. Degrau
6. Elevação
7. Deslocamento horizontal
8. Perda de rejuntamento / Bombeamento
9. Falta de blocos
10. Reparos
11. Afundamento em trilha de rodas

Patologia	Quantidade (m²)			Densidade			Valor de dedução		
	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
1.			0,216			0,10%			2
2.									
3.									
4.			1,050			0,47%			8
5.									
6.									
7.									
8.	2,600		3,565	1,16%		1,58%	0		2
9.									
10.									
11.			22,500			10,00%			61

Esboço:



Parâmetros

Maior valor de dedução individual (MVD):	61
Número permitido de deduções (m):	4,58
Valor de dedução total (VDT):	73
Valor dedução corrigido (VDC):	67

ICP

ICP = 33
Classificação do ICP: MUITO RUIM

Quadro A.13 - Levantamento da amostra 4C da seção 4

Pavimento de Blocos de Concreto Intertravados
Ruas e áreas de estacionamento
Ficha de dados de levantamentos das condições por unidade de amostra

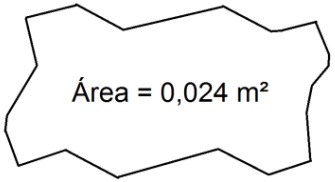
Local: Av. Professor Almeida Prado — Data: 22/03/2016
Seção: 4C — Comprimento da Amostra: 34,30 m
Índice de Condições do Pavimento (ICP): 30 — Área da Amostra: 171,50 m²

Código da Patologia e Tipo

1. Blocos danificados
2. Depressões
3. Perda de contenção
4. Espaçamento excessivo entre juntas
5. Degrau
6. Elevação
7. Deslocamento horizontal
8. Perda de rejuntamento / Bombeamento
9. Falta de blocos
10. Reparos
11. Afundamento em trilha de rodas

Patologia	Quantidade (m²)			Densidade			Valor de dedução		
	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
1.		0,024	0,024		0,01%	0,01%		1	2
2.									
3.									
4.			2,320			1,35%			14
5.									
6.									
7.									
8.		0,460	2,800		0,27%	1,63%		1	2
9.									
10.									
11.			23,663			13,80%			64

Esboço:



Parâmetros

Maior valor de dedução individual (MVD):	64
Número permitido de deduções (m):	4,31
Valor de dedução total (VDT):	84
Valor dedução corrigido (VDC):	70

ICP

ICP = 30
Classificação do ICP: MUITO RUIM

Quadro A.14 - Levantamento da amostra 4D da seção 4

Pavimento de Blocos de Concreto Intertravados
Ruas e áreas de estacionamento
Ficha de dados de levantamentos das condições por unidade de amostra

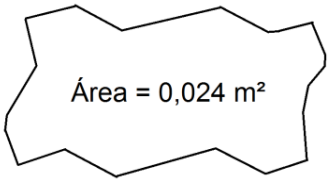
Local: Av. Professor Almeida Prado — Data: 22/03/2016
Seção: 4D — Comprimento da Amostra: 50 m
Índice de Condições do Pavimento (ICP): 77 — Área da Amostra: 250 m²

Código da Patologia e Tipo

1. Blocos danificados
2. Depressões
3. Perda de contenção
4. Espaçamento excessivo entre juntas
5. Degrau
6. Elevação
7. Deslocamento horizontal
8. Perda de rejuntamento / Bombeamento
9. Falta de blocos
10. Reparos
11. Afundamento em trilha de rodas

Patologia	Quantidade (m²)			Densidade			Valor de dedução		
	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
1.			0,192			0,08%			2
2.			0,240			0,10%			12
3.									
4.			2,287			0,91%			13
5.									
6.									
7.									
8.		0,462			0,18%				1
9.									
10.									
11.	3,540			1,42%					14

Esboço:



Parâmetros

Maior valor de dedução individual (MVD):	14
Número permitido de deduções (m):	8,90
Valor de dedução total (VDT):	42
Valor dedução corrigido (VDC):	23

ICP

ICP = 77
Classificação do ICP: SATISFATÓRIO

VITA

Eric Ribeiro da Silva, natural de Abatiá – Paraná, é matemático graduado em 2004 pela Universidade Braz Cubas (UBC) e engenheiro civil graduado em 2013 pela Universidade Nove de Julho (UNINOVE).

Foi bolsista de iniciação científica no Instituto de Estudos Avançados do Centro Técnico Aeroespacial em 2004.

Em 2005 ingressou como professor titular de cargo, na rede pública estadual de ensino, lecionando as disciplinas de matemática e física.

Em 2010 ingressou no curso de especialização em física para professores do ensino médio, na modalidade de educação a distância, pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), obtendo o título em 2011.

Entre 2011 e 2013 realizou estágio na Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo, atuando nas áreas de projeto e gerenciamento de projetos e obras.

Em 2014 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP, desenvolvendo pesquisas voltadas ao estudo do comportamento estrutural e funcional de pavimentos de blocos pré-moldados de concreto.

Em 2015 atuou como docente do curso de engenharia civil da Universidade Braz Cubas, onde ministrou as disciplinas Estradas e Vias de Transporte e Geologia e Mecânica dos Solos.

Atualmente trabalha como professor de ensino superior, ministrando aulas no curso de engenharia civil na Universidade Nove de Julho.