Universidade do Minho
Escola de Engenharia

RENATO JOSÉ POÇO LOURENÇO

ANÁLISE DO RISCO NO DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS

junho de 2015

ANÁLISE DO RISCO NO DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS

RENATO JOSÉ POÇO LOURENÇO

UMinho | 2015

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

RENATO JOSÉ POÇO LOURENÇO

ANÁLISE DO RISCO NO DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS

Dissertação de Mestrado
Engenharia Urbana

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Jorge Carvalho Pais

junho de 2015

AGRADECIMENTOS

A presente Dissertação, desenvolvida sob a orientação do Professor Doutor Jorge Carvalho Pais, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, foi possível concretizar-se através dos elementos e condições proporcionadas pelo Laboratório de Pavimentos Rodoviários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, a quem apresento o meu profundo agradecimento.

Ao Professor Doutor Jorge Carvalho Pais, expresso o meu total reconhecimento e gratidão, pelo incentivo, estímulo e amizade, sem o qual não me teria sido possível abraçar este projeto. Ao Professor Doutor Jorge Carvalho Pais, devo o acompanhamento e orientação na elaboração de todo o documento, tendo tido o privilégio de usufruir dos seus ensinamentos, aliados à sua capacidade técnica e pedagógica ímpares, os quais permitiram um acréscimo valioso na minha formação no domínio da Pavimentação Rodoviária.

Aos meus Pais, Fausto e Esmeralda, que de forma carinhosa e preocupada, sempre me incentivaram e criaram as condições necessárias para o meu desenvolvimento em termos humanos e académicos. Aqui fica o meu afetuoso reconhecimento.

Ao meu irmão David, por toda a sua amizade, e pelo seu apoio na revisão do documento.

Ao meu filho João Miguel, para que acredite que, com trabalho, dedicação e persistência, conseguimos sempre atingir os nossos sonhos e objetivos, tendo-se como mínimo, a nossa realização e o prémio do dever cumprido.

Por fim, dedico este trabalho à Ana Isabel e ao João Miguel, pelo incentivo, compreensão e apoio incondicional ao longo de todo este trabalho, sem os quais não teria conseguido ultrapassar esta etapa.

RESUMO

A crescente necessidade na definição de soluções de reforço de pavimentos rodoviários no âmbito da reabilitação das vias existentes, é uma realidade atual, prevendo-se que a maioria dos investimentos financeiros na rede rodoviária, num futuro próximo, se concentre neste tipo de trabalhos.

Neste sentido, pretende-se dar um contributo que permita a conceção de soluções mais eficazes e equilibradas, abordando-se para tal, metodologias de cálculo utilizadas no dimensionamento de reforço de pavimentos flexíveis.

Apoiando-se numa caraterização exaustiva de estruturas de pavimento em serviço num troço de Estrada Nacional, objeto de um caso de estudo, a presente Dissertação apresenta conclusões quanto ao risco, ou grau de confiança, que poderá ser esperado no dimensionamento de reforços de pavimentos.

Foi assim possível, com base na análise e estudo de uma situação real, concluir-se que as metodologias usualmente utilizadas no dimensionamento de reforços, nomeadamente as que se baseiam na retroanálise das estruturas existentes, são um suporte fiável para os fins a que se destinam, conduzindo a resultados bastantes satisfatórios do ponto de vista da confiança conferida ao utilizador.

PALAVRAS CHAVE

Reforço de Pavimentos Flexíveis

Reabilitação

Metodologias de Dimensionamento

Análise de Risco

ABSTRACT

The definition of new solutions for road pavements' overlays, in the framework of rehabilitation of existing roads, is a present need and it is expected that the majority of investment in the road network, in the near future, will be focused on this type of work.

Thus, this work intends to contribute to the design of more effective and balanced solutions, addressing design methodologies used in the rehabilitation of flexible road pavements.

Based on a comprehensive characterization of the in service road pavement of a National Highway, subject of a case study, this Dissertation presents conclusions about the risk, or degree of confidence, that can be expected with the design of road pavement overlays.

It was then possible, based in the analysis of a real life situation, to conclude that the methodologies normally applied in the dimensioning of reinforcements, namely those based in the back-analysis of existing structures, are a reliable support for the required needs, leading to very satisfactory user confidence levels.

KEYWORDS

Reinforcement of Flexible Pavements

Rehabilitation

Design Methodologies

Risk Analysis

Índice

1 Introdução 1

1.1 Enquadramento 1

1.2 Objetivos e metodologia 3

1.3 Organização da Dissertação 5

2 Métodos de Dimensionamento de Reforço de Pavimentos Flexíveis 7

2.1 Âmbito 7

2.2 Método das Espessuras Efetivas 8

2.3 Método das Deflexões Reversíveis 15

2.4 Método da AASHTO 19

3 Caso de Estudo – Caracterização das Condições Existentes 32

3.1 Considerações Gerais 32

3.2 Inspeção visual em contínuo 33

3.3 Medição do cavado de rodeiras 34

3.4 Avaliação da capacidade de carga com defletómetro de impacto (FWD) 37

3.5 Ensaios destrutivos (poços de amostragem e carotes) 46

3.6 Tráfego 54

3.7 Condições Climáticas 59

4 Caso de Estudo – Dimensionamento do Reforço de Pavimentos 65

4.1 Considerações Gerais 65

4.2 Caracterização mecânica do pavimento existente e da fundação (retroanálise) 67

4.2.1 Introdução 67

4.2.2 Retroanálise – Zona 1 – Via Direita (norte-sul) 68

4.2.3 Retroanálise – Zona 1 – Via Esquerda (sul-norte) 75

4.2.4 Retroanálise – Zona 2 – Via Direita (norte-sul) 85

4.2.5 Retroanálise – Zona 2 – Via Esquerda (sul-norte) 89
4.3 Caracterização mecânica das camadas de reforço (Metodologia Shell) 91
4.3.1 Introdução 91
4.3.2 Cálculo das características volumétricas das misturas betuminosas 92
4.3.3 Cálculo da rigidez do betume (S_b) 92
4.3.4 Cálculo do módulo de rigidez 94
4.4 Critérios de ruína considerados no dimensionamento 96
4.4.1 Introdução 96
4.4.2 Critério de Fadiga por Tração 96
4.4.3 Critério de Deformação Permanente 97
4.5 Dimensionamento e definição das Soluções de Reforço 98
5 Análise do Risco no Dimensionamento através de Verificação em Contínuo 104
5.1 Introdução 104
5.2 Verificação em Contínuo das Soluções de Reforço 105
5.3 Análise do Risco no Dimensionamento das Soluções de Reforço 114
6 Considerações Finais 118
6.1 Introdução 118
6.2 Conclusões 118
6.3 Desenvolvimento em trabalhos futuros 119
Referências bibliográficas 120
Anexo 122

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Ábaco do Asphalt Institute (AI, 1983) para o cálculo da espessura de um pavimento constituído apenas com camadas de betão betuminoso (Tn) 14
Figura 2.2 – Exemplo de aproximação de defletograma calculado ao defletograma medido (defletogramas obtidos através do programa de cálculo *JPavBack*). 18
Figura 2.3 – Relação entre o tráfego e o nível de serviço - pavimento novo e após reforço..... 25
Figura 3.1 – Equipamento utilizado na medição do cavado de rodeira 35
Figura 3.2 – Profundidade do cavado das rodeiras no sentido norte-sul (Via Direita) para trechos de 100 metros 35
Figura 3.3 – Profundidade do cavado das rodeiras no sentido sul-norte (Via Esquerda) para trechos de 100 metros 36
Figura 3.4 – Equipamento utilizado nos ensaios de capacidade de carga (FWD) 37
Figura 3.5 – Deflexões máximas registadas ao longo do sentido norte-sul..... 39
Figura 3.6 – Deflexões máximas registadas ao longo do sentido sul-norte..... 39
Figura 3.7 – Deflexões de todos os sensores, registadas ao longo do sentido norte-sul 40
Figura 3.8 – Deflexões de todos os sensores, registadas ao longo do sentido sul-norte 40
Figura 3.9 – Representação do método das diferenças acumuladas e identificação dos trechos homogéneos no sentido norte-sul..... 42
Figura 3.10 – Representação do método das diferenças acumuladas e identificação dos trechos homogéneos no sentido sul-norte..... 42
Figura 3.11 – Representação esquemática da distribuição dos trechos homogéneos em cada um dos sentidos de tráfego..... 45
Figura 3.12 – Representação esquemática das zonas de dimensionamento 46
Figura 3.13 – Representação esquemática da localização dos poços no perfil transversal da via 47
Figura 3.14 – Representação esquemática da localização prevista para a abertura de poços e a extração de carotes 49
Figura 3.15 – Aspeto dos materiais encontrados nos poços de amostragem P1 e P2 (à direita e à esquerda, respetivamente)..... 52
Figura 3.16 – Aspeto dos materiais encontrados nos poços de amostragem P3 e P4 (à direita e à esquerda, respetivamente)..... 52

Figura 3.17 – Carotes C1, C2 e C3 (à direita, ao centro e à esquerda, respetivamente) 52
Figura 3.18 – Carotes C4, C5 e C6 (à direita, ao centro e à esquerda, respetivamente) 53
Figura 3.19 – Carotes C7 e C8 (à direita e à esquerda, respetivamente)..... 53
Figura 3.20 – Carotes C9 e C10 (à direita e à esquerda, respetivamente) 53
Figura 3.21 – Caracterização geométrica do eixo padrão de 80 kN..... 57
Figura 3.22 – Gráfico das Normais Climatológicas – Braga – período 1971/2000 (fonte: IPMA) 60
Figura 3.23 – Gráfico representativo da curva de ponderação de temperaturas (Shell)..... 62
Figura 3.24 – Gráfico que relaciona a temperatura média mensal ponderada do ar (TMMA) com a temperatura de serviço de misturas betuminosas..... 64
Figura 5.1 – Módulo de rigidez das camadas betuminosas existentes na via direita 107
Figura 5.2 – Módulo de rigidez das camadas betuminosas existentes na via esquerda..... 107
Figura 5.3 – Módulo de rigidez das camada de base granular existente na via direita..... 108
Figura 5.4 – Módulo de rigidez das camada de base granular existente na via esquerda..... 108
Figura 5.5 – Módulo de rigidez das camada de sub-base granular existente na via direita 109
Figura 5.6 – Módulo de rigidez das camada de sub-base granular existente na via esquerda.. 109
Figura 5.7 – Módulo de rigidez da fundação do pavimento existente na via direita 110
Figura 5.8 – Módulo de rigidez da fundação do pavimento existente na via esquerda..... 110

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Fatores de Conversão (adaptado de AI, 1983) 12
Tabela 2.2 – Cenários abrangidos pela metodologia AASHTO (AASHTO, 1986) 20
Tabela 2.3 – Coeficientes de drenagem (adaptado de AASHTO, 1986) 24
Tabela 2.4 – Valores recomendados para o Grau de Confiança (adaptado de AASHTO, 1986) . 27
Tabela 2.5 – Nível de Serviço Terminal *versus* Opinião do utilizador (adaptado de AASHTO, 1986)..... 29
Tabela 3.1 – Resumo das degradações identificadas e estado de conservação do pavimento existente..... 34
Tabela 3.2 – Condições de ensaio na avaliação da capacidade de carga 38
Tabela 3.3 – Temperaturas registadas durante os ensaios de avaliação da capacidade de carga 38
Tabela 3.4 – Definição dos trechos homogéneos no sentido norte-sul (Via Direita) 43
Tabela 3.5 – Definição dos trechos homogéneos no sentido sul-norte (Via Esquerda)..... 44
Tabela 3.6 – Localização prevista para a abertura de poços e a extração de carotes..... 48
Tabela 3.7 – Localização efetiva (real) da abertura dos poços e da extração de carotes. 49
Tabela 3.8 – Resumo dos poços de amostragem executados no pavimento existente 50
Tabela 3.9 – Resultados dos ensaios laboratoriais sobre os solos de fundação recolhidos..... 51
Tabela 3.10 – Resumo das carotes extraídas do pavimento existente 51
Tabela 3.11 – Tráfego no ano de entrada em serviço (2015)..... 54
Tabela 3.12 – Tráfego no ano horizonte (2025) 55
Tabela 3.13 – Classificação dos veículos automóveis segundo a EP - Estradas de Portugal..... 56
Tabela 3.14 – Fatores de agressividade para transformação em eixos padrão de 80 kN considerados pela EP – Estradas de Portugal..... 57
Tabela 3.15 – Tráfego representado em número acumulado de eixos padrão de 80 kN..... 59
Tabela 3.16 – Normais Climatológicas – Braga – 1971/2000 (fonte: IPMA)..... 60
Tabela 3.17 – Fatores de ponderação mensais e temperatura média mensal ponderada do ar (TMMA), obtidos com base nas Normais Climatológicas – Braga – 1971/2000..... 62
Tabela 3.18 – Temperaturas de Serviço das camadas betuminosas a utilizar em reforço..... 64
Tabela 4.1 – Misturas betuminosas de reforço (V_a , V_b e VMA)..... 92
Tabela 4.2 – Misturas betuminosas de reforço – cálculo da rigidez do betume (S_b) 94

Tabela 4.3 – Misturas betuminosas de reforço – Módulos de rigidez (E) 95
Tabela 4.4 – Constituição das estruturas de pavimento existente nos pontos analisados..... 100
Tabela 4.5 – Soluções de reforço do pavimento existente nas zonas de dimensionamento..... 100
Tabela 4.6 – Resultados - Fadiga por Tração (camadas de reforço e existentes)..... 101
Tabela 4.7 – Resultados - Deformação Permanente 102
Tabela 5.1 – Danos à fadiga (nas camadas de reforço e existentes) e à deformação permanente, com e sem reforço, nos pontos ensaiados com FWD (pontos de ensaio de 1 a 51)..... 112
Tabela 5.2 – Danos à fadiga (nas camadas de reforço existentes) e à deformação permanente, com e sem reforço, nos pontos ensaiados com FWD (pontos de ensaio de 52 a 102)..... 113
Tabela 5.3 – Resultados da análise dos danos à fadiga nas Camadas Betuminosas de Reforço 115
Tabela 5.4 – Resultados da análise dos danos à fadiga nas Camadas Betuminosas Existentes 115
Tabela 5.5 – Resultados da análise dos danos à deformação permanente..... 116
Tabela 0.1 – Características das camadas, via direita sem reforço (pontos de 1 a 51)..... 123
Tabela 0.2 – Características das camadas, via direita sem reforço (pontos de 52 a 102)..... 124
Tabela 0.3 – Defletogramas calculados, via direita sem reforço (pontos de 1 a 51)..... 125
Tabela 0.4 – Defletogramas calculados, via direita sem reforço (pontos de 52 a 102)..... 126
Tabela 0.5 – Características das camadas, via esquerda sem reforço (pontos de 1 a 51) 127
Tabela 0.6 – Características das camadas, via esquerda sem reforço (pontos 52 a 102)..... 128
Tabela 0.7 – Defletogramas calculados, via esquerda sem reforço (pontos de 1 a 51)..... 129
Tabela 0.8 – Defletogramas calculados, via esquerda sem reforço (pontos de 52 a 102)..... 130
Tabela 0.9 – Características das camadas, via direita com reforço (pontos de 1 a 51)..... 131
Tabela 0.10 – Características das camadas, via direita com reforço (pontos de 52 a 102)..... 132
Tabela 0.11 – Defletogramas calculados, via direita com reforço (pontos de 1 a 51)..... 133
Tabela 0.12 – Defletogramas calculados, via direita com reforço (pontos de 52 a 102) 134
Tabela 0.13 – Características das camadas, via esquerda com reforço (pontos de 1 a 51) 135
Tabela 0.14 – Características das camadas, via esquerda com reforço (pontos 52 a 102)..... 136
Tabela 0.15 – Defletogramas calculados, via esquerda com reforço (pontos de 1 a 51)..... 137
Tabela 0.16 – Defletogramas calculados, via esquerda com reforço (pontos de 52 a 102)..... 138

1 Introdução

1.1 Enquadramento

Na atual conjuntura nacional, em que a grande maioria da rede rodoviária já se encontra construída de acordo com os Planos Rodoviários Nacionais das últimas três décadas, torna-se necessário por parte das entidades exploradoras, a aposta na reabilitação da respetiva rede, nomeadamente no que respeita aos pavimentos rodoviários.

Houve um decréscimo acentuado no que respeita à construção de novas vias, sendo a reabilitação um cenário que agora assume um papel preponderante na atividade da exploração rodoviária. A rede existente começa a dar sinais de envelhecimento e degradação, e inerentemente de decréscimo de qualidade de serviço, pelo que se prevê, num futuro próximo, o investimento em intervenções de reabilitação e melhoria das condições existentes.

Neste sentido, é premente o empenho nas metodologias a adotar no dimensionamento das estruturas, com principal incidência nas estruturas de pavimento flexível, pois é o tipo de estrutura que se encontra aplicado na maioria das vias que compõem a rede rodoviária nacional e municipal.

Existem diversas técnicas de reabilitação de um pavimento flexível, sendo uma das mais utilizadas a aplicação de camadas de reforço, pelo que o presente trabalho incidirá na análise deste tipo de reabilitação, mais propriamente nas metodologias de dimensionamento utilizadas.

Para o dimensionamento de estruturas de pavimento, quer novas, quer de reforço, existem diversos tipos de metodologias, sendo algumas das quais descritas em capítulos subsequentes. Contudo, a escolha do tipo de metodologia a adotar, parte do seu utilizador. O mesmo terá em consideração a informação disponível que possui sobre a estrutura, o grau de confiança e inerente rigor que pretende, e a experiência que tem na sua utilização.

Assim, com o presente trabalho entendeu-se como útil efetuar uma abordagem relativamente ao risco, ou inversamente, o grau de confiança, associado a uma das principais metodologias de dimensionamento utilizadas no nosso País. Para tal, efetuou-se a sua aplicação a um caso

prático, nomeadamente a uma reabilitação de um pavimento flexível em serviço na rede rodoviária nacional.

Por tal motivo, o presente trabalho envolveu uma forte componente de reconhecimento das condições locais, bem como de ensaios de campo e de laboratório, informação esta que sustentou o dimensionamento de soluções de reforço, analisadas *A posteriori* quanto ao seu desempenho e risco associados.

Fazendo-se um pequeno enquadramento do que será entendível quanto ao risco, ou, de significado oposto, o grau de confiança, na ótica do dimensionamento de pavimentos rodoviários, apresentam-se algumas das definições constantes em bibliografia da especialidade (AASHTO, 1986):

> "... é a probabilidade de o nível de serviço prestado pelo pavimento ao utilizador, se manter em condições adequadas (igualmente na ótica do utilizador), durante todo o período de dimensionamento."
>
> "... é a probabilidade de a solicitação para o qual um pavimento foi dimensionado, não ser ultrapassada durante a sua vida útil"
>
> "... é a probabilidade da estrutura de pavimento garantir a sua performance, ao longo do período de dimensionamento, sob todas as condições a que está sujeita em serviço."
>
> "... é a probabilidade de qualquer tipo de patologia, ou combinação de patologias, manterem-se dentro de níveis admissíveis à utilização, até ao final da vida útil da estrutura."
>
> "... é a probabilidade de uma determinada secção de estrutura de pavimento, dimensionada por determinada metodologia, cumprir satisfatoriamente a sua função, quando solicitada pelo tráfego e pelas condições exteriores, durante o seu período de dimensionamento ou vida útil."

No caso de estudo que se apresenta nesta Dissertação, não se prevê a avaliação do risco ou do grau de confiança, sob o ponto de vista do nível de serviço ou do tráfego solicitante, pois tal

análise de comportamento só poderia efetuar-se ao longo e no final da vida útil das soluções de reforço previstas na reabilitação da(s) estrutura(s).

Prevê-se sim, uma análise do risco ou do grau de confiança, quanto aos resultados que a metodologia de dimensionamento confere na verificação dos critérios de ruína preconizados, quando efetuada uma análise global sobre a totalidade da amostra. Refira-se que, numa situação prática corrente, apenas se preconiza a investigação, sobre pontos considerados característicos do estado da estrutura em termos da sua vida residual.

Resumidamente, com aplicação de um reforço dimensionado com determinada metodologia, pretende-se conhecer qual a percentagem de pontos ensaiados que se enquadra dentro de valores aceitáveis, no que respeita ao cumprimento dos dois critérios de ruína usualmente previstos no dimensionamento de pavimentos flexíveis, nomeadamente, a fadiga por tração na base das camadas betuminosas (de reforço e existentes) e a deformação permanente no topo do solo de fundação.

Espera-se assim, que as conclusões e informações obtidas ao longo deste estudo, contribuam para o aumento do conhecimento da especialidade, e inerentemente, sejam um auxílio válido no dimensionamento e otimização das soluções de reforço a aplicar na reabilitação de pavimentos rodoviários.

1.2 Objetivos e metodologia

O objetivo do presente estudo centra-se na avaliação do risco decorrente da utilização de metodologias de cálculo no dimensionamento de soluções de reforço de pavimentos rodoviários flexíveis.

Para tal, e de acordo com o plano de trabalhos proposto para a elaboração da presente Dissertação, desenvolveu-se um conjunto de atividades, as quais de forma sucinta se elencam seguidamente:

- Estudo e sintetização de metodologias utilizadas no dimensionamento de reforço de pavimentos;

- Seleção e reconhecimento visual de pavimento rodoviário em serviço para objeto de caso de estudo;
- Recolha de informação relativa ao histórico de construção e de manutenção da(s) estrutura(s) de pavimento no troço de via objeto de estudo, e de dados relativos ao tráfego solicitante;
- Análise e tratamento dos dados de tráfego obtidos, projetando os mesmos para o ano horizonte de projeto; período de dimensionamento para reforço igual a 10 anos;
- Elaboração de plano de prospeção de auscultação do pavimento existente ao longo de todo o troço de via em estudo, especificamente, cerca de 20 quilómetros de Estrada Nacional em serviço no distrito de Braga;
- Realização de ensaios de carga com defletómetro de impacto (FWD), ao longo de toda a extensão em estudo, nos dois sentidos de circulação (perfil transversal tipo de 2x1 via) e num período do ano considerado desfavorável em termos de capacidade resistente (mês de novembro);
- Análise e tratamento dos dados de defletometria obtidos pelos ensaios de carga;
- Definição e subdivisão do troço em estudo em trechos de comportamento estrutural homogéneo;
- Definição da localização de ensaios destrutivos a executar no pavimento, nomeadamente a extração de carotes e a execução de poços de reconhecimento, com vista a definição da(s) estrutura(s) de pavimento aplicada(s) ao longo do troço no que respeita à sua constituição (materiais e espessuras);
- Realização de ensaios laboratoriais sobre amostras recolhidas no pavimento, destacando-se ensaios aos solos de fundação;
- Previsão dos módulos de rigidez das diversas camadas constituintes da(s) estrutura(s) e respetivas fundações, recorrendo-se a um procedimento de retroanálise, tendo por objeto pontos ensaiados com comportamento semelhante ao de um defletograma característico, identificado em fase anterior, o qual representa o percentil 85 da totalidade da amostra ensaiada (totalidade dos pontos da via onde foram efetuados os ensaios de carga);
- Dimensionamento e definição de soluções de reforço ao longo do troço a reabilitar;
- Previsão dos módulos de rigidez das camadas constituintes da(s) estrutura(s) de pavimento existente(s), e das respetivas fundações, considerando todos os pontos da via

objeto de ensaios de carga;

- Verificação em contínuo, com base em todos os pontos ensaiados, das soluções de reforço anteriormente definidas e, análise da sua conformidade face aos critérios de dimensionamento, ou de ruína, preconizados pela metodologia utilizada;
- Análise estatística dos resultados obtidos quanto à verificação em contínuo das soluções, com vista à avaliação do risco, ou grau de confiança, que a metodologia de dimensionamento utilizada permitiu obter no presente caso de estudo;
- Conclusões do estudo e sua potencial aplicação no dimensionamento de soluções de reforço, para reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis.

1.3 Organização da Dissertação

No seguimento da apresentação das atividades e objetivos anteriormente descritos, a presente Dissertação foi estruturada em seis capítulos conforme se enuncia:

Capítulo 1 – Introdução

Neste capítulo efetuam-se considerações gerais relativamente ao potencial interesse e enquadramento do presente estudo e define-se os objetivos e atividades previstas para se alcançar o proposto.

Capítulo 2 – Métodos de Dimensionamento de Reforço de Pavimentos Flexíveis

Neste capítulo descreve-se de forma sucinta três metodologias de cálculo usualmente utilizadas no dimensionamento de soluções de reforço de pavimentos rodoviários. Uma das metodologias exposta, nomeadamente a baseada no procedimento das deflexões reversíveis, é utilizada em cálculo desenvolvido no presente trabalho, sendo objeto de maior detalhe no Capítulo 4.

Capítulo 3 – Caso de Estudo - Caracterização das Condições Existentes

Neste capítulo efetua-se uma descrição pormenorizada das estruturas de pavimento existentes, num troço de Estrada Nacional (EN), que serve como caso de estudo ao presente trabalho. Encontra-se assim, informação relativa ao reconhecimento visual dos pavimentos existentes, bem como, informação relativa a um plano de auscultação executado, o qual incluiu ensaios de carga com defletómetro de impacto (FWD), ensaios

destrutivos com recolha de amostras e, ensaios laboratoriais. De referir igualmente a apresentação dos dados de tráfego e respetiva projeção para o ano horizonte, com vista ao dimensionamento.

Capítulo 4 – Caso de Estudo – Dimensionamento do Reforço de Pavimentos

Neste capítulo descreve-se de forma detalhada o desenvolvimento do dimensionamento de soluções de reforço das estruturas de pavimento encontradas ao longo do troço a reabilitar enquanto caso de estudo. O referido dimensionamento baseou-se no procedimento de deflexões reversíveis, ou retroanálise, tendo-se considerado dois trechos de comportamento estrutural homogéneo e definido duas soluções de reforço distintas.

Capítulo 5 – Análise do Risco no Dimensionamento através de Verificação em Contínuo

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos na verificação em contínuo, ou seja, em todos os pontos ensaiados com defletómetro de impacto, das soluções de reforço definidas no capítulo anterior, face aos critérios de ruína de dimensionamento. Com base no cálculo do dano para cada um dos critérios, apresenta-se a percentagem de pontos, ou localizações ensaiadas, que se encontram em conformidade. Tal situação permite estabelecer uma relação entre o dimensionamento, e o risco ou grau de confiança, conferido pela metodologia utilizada.

Capítulo 6 – Considerações Finais

Neste capítulo resumem-se as principais conclusões ou ilações possíveis de obter com o estudo, indicando-se a título sugestivo, potenciais temas relacionados, para continuidade e evolução em trabalhos futuros.

2 Métodos de Dimensionamento de Reforço de Pavimentos Flexíveis

2.1 Âmbito

No presente capítulo pretende efetuar-se uma descrição generalista de três métodos de dimensionamento utilizados no reforço de pavimentos flexíveis, referentes a soluções que contemplam a aplicação de misturas betuminosas.

Na generalidade, os métodos de dimensionamento do reforço de pavimentos em tudo se assemelham aos métodos de dimensionamento de pavimentos novos, sendo igualmente necessário proceder-se à definição de uma estrutura que assegure em termos funcionais os padrões de qualidade e segurança exigidos e, uma capacidade resistente que assegure as solicitações de tráfego e climáticas, sem sofrer degradações que ponham em causa a funcionalidade da estrutura a ser idealizada.

A acuidade, ao nível do conhecimento das condições do pavimento a reforçar, tem um papel preponderante no sucesso da aplicação de qualquer método de cálculo de reforço. Esse conhecimento permite definir a constituição e capacidade resistente residual da estrutura a reforçar, o que é imprescindível para fins de dimensionamento.

O primeiro método que se abordará, nomeadamente o Método das Espessuras Efetivas preconizado pelo Asphalt Institute, sendo um método empírico, é usualmente utilizado como método de pré-dimensionamento ou em estradas de tráfego reduzido.

O segundo método a expor, trata-se do método conhecido por Método das Deflexões Reversíveis, o qual pretende determinar características mecânicas da estrutura de um pavimento existente, através da análise da resposta deste a ensaios de capacidade de carga. Atualmente é das metodologias mais utilizadas para efeitos de dimensionamento de reforço de pavimentos.

Por fim, o terceiro método, designado neste documento por Método da AASHTO, contempla em linhas gerais uma abordagem diversificada, englobando o conceito da relação entre capacidade resistente e solicitação e o conceito de vida residual. Apresenta diversas metodologias de

cálculo, geralmente sustentadas numa base empírica, estando muito direcionado para a realidade do seu país de origem, nomeadamente os Estados Unidos da América.

Sendo assim, nos seguintes subcapítulos serão desenvolvidos os seguintes métodos de dimensionamento:

- Método das Espessuras Efetivas;
- Método das Deflexões Reversíveis;
- Método da AASHTO.

2.2 Método das Espessuras Efetivas

O Método das Espessuras Efetivas, desenvolvido pelo Asphalt Institute (AI) em 1983, define-se como sendo um procedimento expedito utilizado para determinar a espessura de uma camada de reforço, tendo a particularidade de poder ser utilizado em qualquer tipo de estrutura de pavimento, ou seja, em pavimentos flexíveis, rígidos, ou semirrígidos. Neste trabalho irá apenas ser abordado o dimensionamento inerente a pavimentos flexíveis.

Este método, à semelhança de outros métodos de dimensionamento, introduz o conceito de "vida útil" ou de "vida residual" do pavimento a reforçar. Neste sentido, o método faz um paralelismo entre a capacidade residual que a estrutura apresenta, ou seja, a sua "vida útil", e a sua espessura, considerando que existe uma diminuição da mesma ao longo da "vida útil".

Considera-se que o pavimento a reforçar possui uma espessura menor do que aquela que efetivamente apresenta na realidade, espessura esta diretamente relacionada com a sua "vida residual". É entendido que o histórico de solicitações a que a estrutura foi sujeita provocou uma diminuição da sua capacidade resistente e, teoricamente, a uma diminuição da sua espessura. À espessura alcançada, correspondente à "vida" do pavimento aquando do reforço, denomina-se espessura efetiva.

Prosseguindo, o método poderá subdividir-se nas seguintes quatro etapas:

- Determinação das características de resistência do solo de fundação;

- Determinação da espessura e composição de todas as camadas do pavimento;
- Cálculo do tráfego solicitante e da espessura efetiva;
- Cálculo da espessura da camada de reforço.

Relativamente à primeira etapa, é de referir que durante longos anos, a capacidade resistente da fundação de um pavimento foi caracterizada pelo seu "índice californiano de capacidade de carga" (California Bearing Ratio – CBR). Devido ao facto de as condições de um carregamento aplicado a um solo no ensaio CBR, serem bastante diferentes das provocadas pelo tráfego, houve a necessidade de adotar-se como parâmetro caracterizador da relação do estado tensão e extensão instaladas, o módulo de rigidez do solo de fundação (E_{SF}).

Existem variadas formas de determinação do módulo de rigidez, passando pelos ensaios em laboratório, como é o exemplo dos ensaios de compressão triaxial ou, pelos ensaios *in situ*, como é o caso dos ensaios de carga com placa ou os ensaios de carga dinâmicos, podendo referir-se o ensaio com defletómetro de impacto (Falling Weight Deflectometer – FWD).

Dada a larga experiência de caracterização dos solos através do índice CBR, foi possível efetuar correlações deduzidas por via empírica, relacionando o referido índice com o módulo de rigidez da fundação. É exemplo desta situação, o trabalho desenvolvido pela Shell (Shell, 1985), o qual com base em ensaios de carregamento dinâmico realizados *in situ* sobre solos e camadas granulares, propôs uma relação que permite efetuar a estimativa do módulo de rigidez, através da seguinte expressão:

$$E_{SF} = 10 \times CBR \qquad (2.1)$$

em que:

- E_{SF} – módulo de rigidez do solo de fundação (MPa);
- CBR – índice CBR (%).

Uma outra relação de interesse referir, proposta no Reino Unido por Powell et al. (1984), resultado de um estudo realizado sobre solos com alguma coesão, e validada para solos

semelhantes aos que podem ser encontrados na fundação de pavimentos em Portugal, é traduzida pela seguinte expressão:

$$E_{SF} = 17{,}6 \times CBR^{0{,}64} \quad (2.2)$$

em que:

- E_{SF} – módulo de rigidez do solo de fundação (MPa);
- CBR – índice CBR (%).

Neste seguimento, a referir que o AI propõe uma classificação simplificada para a determinação do CBR, a qual poderá ser expressa pela especificação E240 do LNEC (1970), agrupando os solos nas seguintes três classes:

- **Solos Pobres** – incluem todos os solos que contêm uma quantidade significativa de finos, englobando-se os solos classificados nos grupos A4 e seguintes da especificação E240 (LNEC). A esta classe corresponde um CBR típico igual a 3%;
- **Solos Médios** – incluem os solos que apresentam resistência sob condições severas de teor em água, englobando-se os solos classificados nos grupos A-2-6 e A-2-7 da especificação E240 (LNEC). A esta classe corresponde um CBR típico igual a 8%;
- **Solos Bons** – incluem os solos que apresentam bom comportamento sob condições severas de teor em água (excluindo a hipótese de saturação), englobando-se os solos classificados nos grupos A1, A3, A-2-4 e A-2-5 da especificação E240 (LNEC), em particular os bem graduados. A esta classe corresponde um CBR típico igual a 17%.

Relativamente à segunda etapa, nomeadamente a determinação da espessura e constituição de cada camada que compõe o pavimento existente, será necessário proceder-se à recolha de dados históricos relativos à construção e a operações de manutenção que a estrutura sofreu durante a sua vida. Caso tal não seja possível, será necessário proceder-se à definição de uma campanha de prospeção que dê resposta à necessidade em causa.

Para se obter as espessuras e constituição de cada camada que constitui a estrutura, no pressuposto de não existir qualquer tipo de informação disponível, torna-se imperativo recorrer a ensaios destrutivos, como por exemplo, a execução de poços de amostragem e/ou a extração de carotes, podendo em ambos os casos, efetuar-se a recolha de amostras para posterior caracterização laboratorial.

Tais trabalhos deverão ser definidos com base numa criteriosa análise, a qual poderá ter como ponto de partida a realização de uma inspeção visual em contínuo do pavimento, a qual permita a identificação dos materiais presentes ao nível da camada de desgaste, bem como, o estado de conservação do pavimento, e outras condicionantes que influenciem, ou possam influenciar o comportamento da estrutura.

De realçar que, a definição dos referidos ensaios, no tipo, número e localização dos mesmos, deverá igualmente atender à possível subdivisão do troço a reabilitar em trechos de comportamento estrutural homogéneo, com eventuais soluções de reabilitação distintas.

A terceira etapa do método consiste no cálculo do tráfego solicitante e da espessura efetiva, conceito já abordado anteriormente.

Relativamente ao tráfego solicitante, com base em dados relativos ao volume e ao tipo de veículos que irão circular na via, entre outros, terá de se proceder à conversão desses valores, através de conceitos e métodos que oportunamente se referirá, na estimativa do número acumulado de eixos-padrão de 80 kN no ano horizonte de projeto.

No que respeita ao cálculo da espessura efetiva, tal é realizado através do somatório das diferentes espessuras efetivas das camadas que constituem o pavimento a reforçar.

Tabela 2.1 – Fatores de Conversão (adaptado de AI, 1983)

Tipo	**Descrição do material**	**Fator de Conversão (C)**
I	Leito do pavimento, qualquer que ele seja.	0,0
II	Base ou sub-base granulares britadas de granulometria extensa e CBR > 20. (C = 0,1 se IP > 6)	0,1 - 0,2
III	Base ou sub-base de solos com IP < 10 e estabilizados com cal ou cimento.	0,2 - 0,3
IV	**a)** Misturas betuminosas a frio em bases, muito fendilhadas e com rodeiras de grande expressão.	0,3 - 0,5
	b) Pavimento rígido (mesmo que com camada de desgaste em mistura betuminosa) e que vai ser partido antes do reforço, em secções com 0,5 metros ou menos. Usar C = 0,3 quando a laje tiver sido diretamente aplicada sobre o solo de fundação.	
	c) Base ou sub-base granulares britadas, estabilizadas com cimento, que se apresentem com fendilhamento de contração extensa (usar C = 0,3 quando as fissuras tiverem 1 cm de espessura ou mais e o material se apresentar instabilizado).	
V	**a)** Misturas betuminosas a quente em camada de desgaste e de base que exibam fendilhamento apreciável e interligado.	0,5 - 0,7
	b) Misturas betuminosas a frio em bases, com fendilhamento fino e com rodeiras de pequena expressão.	
	c) Pavimento rígido com fendilhamento apreciável, com áreas formadas de 1 a 4 metros quadrados.	
VI	**a)** Misturas betuminosas a quente em camada de desgaste e de base que exibam fendilhamento fino, com pequena interligação e com rodeiras pequenas.	0,7 - 0,9
	b) Misturas betuminosas a frio em bases, sem fendilhamento e com rodeiras de muito pequena expressão.	
	c) Pavimento rígido com fendilhamento pequeno, com áreas formadas de dimensão inferior a 1 metro quadrado.	
VII	**a)** Misturas betuminosas a quente em camada de desgaste e de base sem fendilhamento e com rodeiras praticamente inexistentes.	0,9 - 1,0
	b) Pavimento rígido com camada de desgaste em mistura betuminosa, completamente estável e exibindo fendilhamento de reflexão desprezável.	
	c) Pavimento rígido praticamente novo.	

A espessura efetiva de cada camada é obtida através do produto de um fator de conversão pela espessura real da camada. Neste sentido, o AI indica fatores de conversão, os quais variam com base na constituição e condição de cada camada, com o intuito de se proceder à transformação das mesmas em camadas unicamente constituídas por betão betuminoso, equivalentes em termos de resistência.

Através da aplicação do conhecimento relativo à constituição e espessura de todas as camadas que constituem a estrutura a reforçar, é possível identificar o correspondente fator de conversão que melhor se ajusta a cada camada em análise, e em seguida, efetuar-se o cálculo das respetivas espessuras efetivas, recorrendo-se à seguinte expressão:

$$Te_i = h_i \times C \tag{2.3}$$

em que:

- Te_i – espessura efetiva da camada em análise;
- h_i – espessura real da camada em análise;
- C – fator de conversão indicado pelo AI (Tabela 2.1) para a camada em análise;
- i – índice relativo à camada em análise.

Prosseguindo, o cálculo da espessura efetiva total a considerar no cálculo do reforço, é traduzido pelo somatório das espessuras efetivas das diversas camadas que constituem a estrutura, obtendo-se através da seguinte expressão:

$$Te = \sum_{i=1}^{n} Te_i \tag{2.4}$$

em que:

- Te - espessura efetiva total a considerar para o cálculo do reforço;
- n – número total de camadas que compõe a estrutura a reforçar.

Como última etapa do método, o AI apresenta um ábaco (Figura 2.1), através do qual, usando como dados de entrada o módulo de rigidez da fundação (E_{SF}) e a estimativa do número acumulado de eixos-padrão de 80 kN que irá solicitar a estrutura, é possível calcular a espessura necessária para um pavimento constituído unicamente por betão betuminoso, espessura esta designada por Tn.

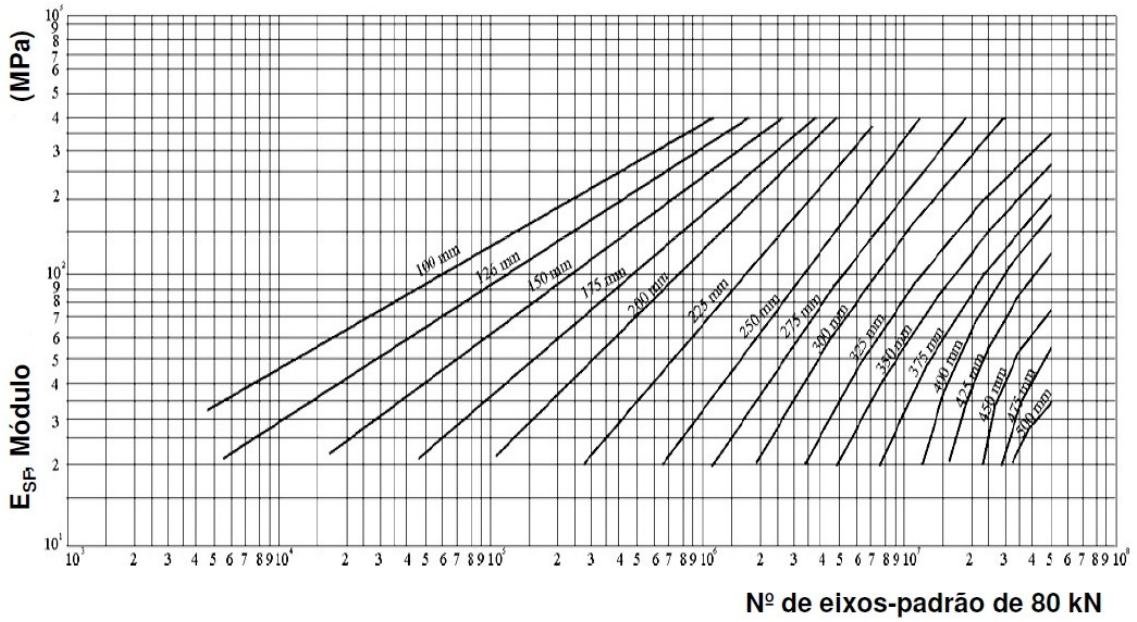


Figura 2.1 – Ábaco do Asphalt Institute (AI, 1983) para o cálculo da espessura de um pavimento constituído apenas com camadas de betão betuminoso (Tn)

Por fim, efetuando-se a diferença entre a espessura necessária para o pavimento "novo", Tn, e a espessura efetiva, Te, esta última que representa o pavimento existente, obtém-se a espessura adequada para a camada de reforço, conforme traduz a seguinte expressão:

$$\mathrm{To} = \mathrm{Tn} - \mathrm{Te} \tag{2.5}$$

em que:

- To – espessura da camada de reforço;
- Tn – espessura total do pavimento (Figura 2.1);
- Te - espessura efetiva do pavimento existente.

2.3 Método das Deflexões Reversíveis

O Método das Deflexões Reversíveis consiste num procedimento de análise para a definição da espessura de uma camada de reforço, o qual foi aplicado desde os finais dos anos 60 (Pereira, 1970), tendo entretanto sofrido sucessivas transformações com os desenvolvimentos havidos relativamente aos meios de cálculo, modelos de comportamento, métodos de avaliação da capacidade de suporte, entre outros.

O método obriga a que inicialmente seja executada uma campanha de ensaios de carga, por exemplo através de defletómetro de impacto (FWD), de forma a efetuar a avaliação da capacidade de carga da estrutura de pavimento a reforçar.

Através dos resultados dos ensaios de carga, é possível obter para cada ponto ensaiado ao longo do troço a reabilitar, o defletograma de resposta correspondente, conhecendo-se assim a deflexão do pavimento em vários locais, relativamente ao ponto de aplicação de uma carga, carga essa aplicada na superfície do pavimento.

De forma a representarem de forma fiel as condições da capacidade de carga de uma estrutura de pavimento, os ensaios de carga devem obedecer a uma metodologia da qual se destacam algumas recomendações:

- Os pontos a ensaiar devem situar-se nas rodeiras externas, para cada sentido de circulação, espaçados de no máximo 200 metros, ou seja, 100 metros relativamente à diretriz da via;
- Devem ser efetuados na época do ano que corresponda à situação mais desfavorável no que respeita à capacidade de carga (Verão para pavimentos com elevadas espessuras de camadas betuminosas e Outono ou Inverno, durante o período de chuvas, para pavimentos em que a resistência das camadas não ligadas é significativa);
- A temperatura da superfície do pavimento, a temperatura imediatamente abaixo da sua superfície (1 a 2 cm) e a temperatura do ar, devem ser registadas;
- Relativamente ao local ensaiado, deve-se registar se o mesmo se encontra em situação de escavação ou aterro e a classe de fendilhamento que o pavimento apresenta.

Após terminados os trabalhos de campo é necessário efetuar o tratamento dos dados recolhidos, destacando-se nomeadamente os seguintes passos:

- Normalização dos dados para a carga de pico considerada;
- Definição de trechos com comportamento estrutural homogéneo, por exemplo através da aplicação do Método das Diferenças Acumuladas desenvolvido pela AASHTO;
- Determinação do defletograma característico de cada trecho homogéneo, identificado com base no cálculo do percentil 85 das deflexões medidas por cada sensor (cada um deles correspondente a uma distância diferente do ponto de aplicação da carga).

Uma vez determinados os defletogramas característicos respeitantes a cada trecho homogéneo identificado, efetua-se a comparação dos mesmos com os defletogramas reais resultantes dos ensaios de carga, elegendo-se para cada um dos referidos trechos, os defletogramas reais que mais se aproximam dos característicos correspondentes. Os defletogramas eleitos, relativos a pontos/locais ensaiados, passam então a ser, em termos de dimensionamento, os mais representativos do trecho a que respeitam.

Quando existem vários defletogramas reais idênticos ao defletograma característico desse trecho, deverão considerar-se na análise pelo menos dois defletogramas para efeitos da caracterização da capacidade de carga do pavimento.

Prosseguindo, para cada ponto ensaiado sobre o qual se considere que o seu defletograma é representativo, há a necessidade de se conhecer a estrutura do pavimento, em termos de constituição e espessura das camadas.

Caso tal não seja possível através da recolha de informação de dados referentes à construção e operações de manutenção a que o pavimento foi sujeito, torna-se necessário recorrer à execução de ensaios destrutivos, nomeadamente a abertura de poços e a extração de carotes.

Na sequência da abertura dos poços de amostragem, para além da medição da espessura das diferentes camadas encontradas, torna-se possível a identificação da constituição das mesmas, a respetiva recolha de amostras, bem como, alcançado o solo de fundação, a determinação do seu teor em água e da sua baridade *in situ*.

No caso do defletograma de impacto (FWD) ou de outro tipo de ensaio de carga, conhecendo-se o valor da carga que provocou a reação no pavimento, e por sua vez o respetivo defletograma, é possível definir-se uma deformada no pavimento semelhante a esse defletograma, recorrendo-se a um programa de cálculo automático do estado de tensão-deformação, desde que se tenha o conhecimento prévio da espessura e dos materiais constituintes das camadas.

Neste sentido, de forma a se ter o conhecimento das características dos materiais *in situ*, a metodologia propõe a comparação do defletograma representativo para determinado trecho, com um defletograma a ser calculado, tendo por base o conhecimento da estrutura, bem como, uma estimativa dos parâmetros que caracterizam os seus materiais, nomeadamente o módulo de rigidez e o coeficiente de Poisson.

Sendo assim, num primeiro cálculo procede-se à estimativa dos módulos de rigidez e coeficientes de Poisson para cada camada, obtendo-se uma primeira deformada. Seguidamente compara-se essa deformada, bacia de deflexão, ou defletograma calculado, com o defletograma representativo.

De referir que, os módulos de rigidez das camadas betuminosas influenciam significativamente a deflexão máxima e as deflexões até aproximadamente metade da extensão total de alcance do defletómetro. Por sua vez, o módulo de rigidez das camadas granulares não tratadas e do solo de fundação, influenciam todo o defletograma, afetando-o com um efeito de translação em bloco (menores módulos resultam em maiores deflexões e vice-versa). Contudo têm principal incidência na restante metade da extensão de alcance do defletograma, ou seja, nas zonas mais distantes do centro de aplicação da carga.

Tendo este conhecimento prévio, torna-se possível, procedendo à alteração dos módulos de rigidez das camadas e por tentativas sucessivas, aproximar o defletograma calculado ao defletograma representativo ou medido. A Figura 2.2, meramente exemplificativa, apresenta quatro defletogramas, correspondentes a quatro tentativas, em que, fazendo variar os módulos de rigidez das camadas de determinada estrutura, se aproxima o defletograma calculado (a vermelho) ao defletograma medido (a azul). O procedimento de cálculo descrito, intitula-se de retroanálise.

Seguindo esse procedimento, quando os defletogramas calculado e medido se sobrepõem, pode admitir-se que as características mecânicas assumidas no defletograma calculado são representativas das características que o pavimento apresentava aquando da realização do ensaio de carga.

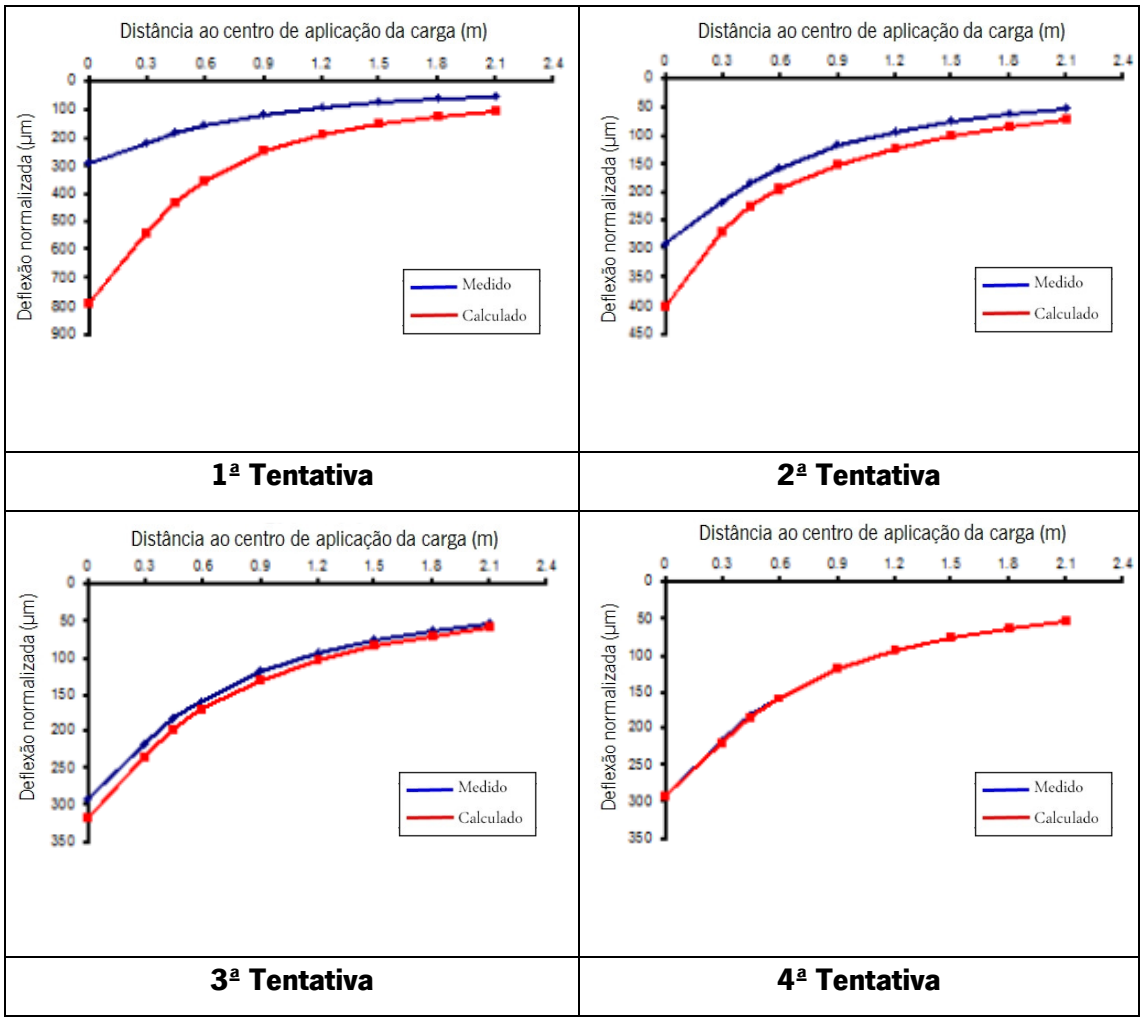


Figura 2.2 – Exemplo de aproximação de defletograma calculado ao defletograma medido (defletogramas obtidos através do programa de cálculo *JPavBack*).

Desta forma, fica assim caracterizada a estrutura existente a reforçar, conhecendo-se a constituição das suas camadas e respetivas espessuras através de dados históricos ou de ensaios ao pavimento e as características mecânicas das mesmas, através da metodologia de cálculo descrita.

Prosseguindo, para se efetuar o dimensionamento de uma camada de reforço adota-se uma metodologia de dimensionamento de um pavimento flexível, como de novo se tratasse, em que se considera a camada de reforço (material novo cujas características se conhece) sobre a estrutura de pavimento existente caracterizada pelo método das deflexões reversíveis.

De observar que, relativamente ao módulo de rigidez das camadas betuminosas obtido através da retroanálise, é necessário para fins de dimensionamento, proceder à sua correção com base na temperatura de ensaio.

Sendo assim, conhecendo-se a temperatura do pavimento aquando do ensaio e a temperatura de serviço das misturas, a qual varia com a temperatura do ar e com a profundidade a que cada camada se encontra, é necessário proceder-se à correção dos módulos de rigidez, por exemplo através da seguinte expressão (Ullidtz & Peattie, 1980):

$$\frac{E_T}{E_{15}} = 1 - 1{,}384x \log\frac{T}{15} \tag{2.6}$$

sendo,

- E_T – módulo de rigidez da mistura à temperatura T (°C);
- E_{15} – módulo de rigidez da mistura à temperatura de 15 °C;
- T – temperatura da mistura betuminosa, correspondente ao módulo de rigidez E_T (°C).

2.4 Método da AASHTO

A metodologia desenvolvida pela AASHTO (1986) relativamente ao reforço de pavimentos é transversal a todo o tipo de camadas de reforço e a todo o tipo de pavimentos a reforçar, abrangendo assim os cenários apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Cenários abrangidos pela metodologia AASHTO (AASHTO, 1986)

Reforço	**Pavimento Existente**
Flexível (betão betuminoso)	Flexível (betão betuminoso)
Flexível (betão betuminoso)	Rígido (betão de cimento)
Rígido (betão de cimento)	Flexível (betão betuminoso)
Rígido (betão de cimento)	Rígido (betão de cimento)

Esta metodologia emprega o conceito da relação entre capacidade e solicitação, usual no dimensionamento de um pavimento novo, e o conceito de vida residual, que implicitamente reúne o estado do pavimento existente e o estado do pavimento após reforço, no final da sua vida útil.

Por ora, apenas se abordará a metodologia respeitante ao cenário Flexível-Flexível, ou seja, camada de reforço executada com material betuminoso, sobre pavimento flexível existente.

A metodologia adota como equação geral de dimensionamento para reforço de um pavimento, a seguinte expressão:

$$SC_{REF} = SC_{GLO} - F_{VR} \times SC_{PEX} \tag{2.7}$$

sendo,

- SC_{REF} – capacidade estrutural da camada de reforço;
- SC_{GLO} – capacidade estrutural global (reforço + pavimento existente);
- F_{VR} - Fator de Vida Residual;
- SC_{PEX} - capacidade estrutural do pavimento existente antes do reforço.

Para aplicação da metodologia pressupõe-se o desenvolvimento das etapas seguidamente descritas.

a) Definição de Trechos Homogéneos

À semelhança de outras metodologias, esta prevê a definição de trechos homogéneos ao longo do troço a beneficiar. Tal consiste na identificação das fronteiras que subdividem a estrutura em trechos uniformes que se considerem semelhantes, ao nível das condições de estado, capacidade de suporte da fundação, histórico construtivo e de manutenção, e do perfil transversal tipo.

A realização de uma correta definição dos trechos homogéneos terá um reflexo significativo na legitimidade e rigor de toda a metodologia de dimensionamento, pelo que o conhecimento aprofundado da zona em estudo é de elevada preponderância.

b) Análise do Tráfego

A metodologia prevê a determinação do número acumulado de eixos padrão de 18 kip, ou seja de 80 kN, ao longo da extensão a reabilitar e para o final do período de dimensionamento (ano horizonte) considerado para a estrutura de reforço.

Relativamente aos dados de tráfego a obter, a situação ideal seria ter o conhecimento do tráfego que solicitou a estrutura de pavimento existente até ao momento imediatamente anterior ao reforço, pois tal informação poderia apoiar a análise da estimativa da vida residual da estrutura, nomeadamente o Fator de Vida Residual (F_{VR}). Contudo, por vezes tal não é possível, assumindo o valor do tráfego estimado que se prevê que venha a solicitar a estrutura reforçada, um papel indispensável no dimensionamento.

Ou seja, o tráfego estimado para o período de dimensionamento considerado para o reforço é fundamental para calcular a Capacidade Estrutural Global (SC_{GLO}).

c) Caracterização de Materiais

Para efeitos de dimensionamento de uma reabilitação, a metodologia prevê a caracterização de três grupos, nomeadamente os seguintes:

Propriedades das camadas da estrutura existente

Através dos ensaios de carga e análise da respetiva deflexão, é possível efetuar a previsão do módulo de rigidez das diferentes camadas que compõem a estrutura existente, sendo praticável efetuar-se uma análise camada a camada.

A previsão referida, com base nos dados de um qualquer tipo de equipamento de avaliação de deflexão dinâmica, permite ter o conhecimento do módulo de rigidez dos materiais *in situ*, o que acrescenta fiabilidade ao estudo.

Sendo assim, através dos ensaios de deflexão torna-se possível a obtenção dos módulos de rigidez de todas as camadas que constituem a estrutura de pavimento, havendo a registar a particularidade desta metodologia, em que, no que respeita às camadas constituídas por material betuminoso, prevê a correção dos respetivos módulos para uma temperatura de referência igual a 70º F (21,11º C) através da seguinte expressão:

$$E_{70ºF} = F_e \times E_{tp} \tag{2.8}$$

sendo,

- $E_{70ºF}$ – módulo de rigidez da camada betuminosa, corrigido;
- F_e – fator de ajustamento da camada (obtido através de ábaco específico);
- E_{tp} – módulo de rigidez da camada betuminosa, obtido dos ensaios.

Propriedades da fundação da estrutura existente

De forma análoga à anteriormente descrita, através de retroanálise, também é possível obter-se o módulo de rigidez da fundação da estrutura existente.

Contudo, a AASHTO apresenta um procedimento alternativo para cálculo do módulo da fundação, o qual assenta na configuração da bacia de deflexão, tendo em consideração o raio definido pelo bolbo de tensões no interface estrutura-fundação e a relação deste raio com as

distâncias a que se efetua a medição das deflexões.

Este método alternativo obriga a que se proceda a uma estimativa do valor dos módulos das diferentes camadas de pavimento e a que se proceda ao cálculo do raio do bolbo de tensões. Por esse motivo, este método poderá resultar em resultados pouco precisos para a estimativa do módulo de fundação, pelo que, sempre que possível, deverá optar-se pela retroanálise.

Propriedades da(s) camada(s) de reforço

Sendo uma camada de reforço constituída por material novo e nunca antes solicitado, existe facilidade na determinação das respetivas características mecânicas para efeitos de dimensionamento. A dificuldade está na escolha do tipo de material que melhor se ajustará à estrutura específica que se pretende reforçar, devendo ter-se em consideração não só a solicitação em termos de tráfego previsto, mas também outros fatores fundamentais, como sendo o estado de conservação da estrutura existente, a zona climática em que se prevê a sua aplicação e a espessura da camada que se prevê aplicar, entre outros.

d) Análise da Capacidade Estrutural do Pavimento existente (SC_{PEX})

A capacidade estrutural do pavimento existente baseia-se na obtenção das propriedades dos materiais através de ensaios de carga, conforme anteriormente descrito, permitindo assim aferir as características resistentes dos mesmos *in situ*.

Para pavimentos flexíveis, o método prevê que a capacidade estrutural do pavimento existente (SC_{PEX}) é equivalente ao número estrutural (SN_{PEX}), grandeza esta que seguidamente se descreve.

O conceito de número estrutural (SN) de um pavimento flexível contempla a relação entre resistência e espessura, de todas as camadas acima da fundação, sendo representado pela seguinte expressão:

$$SN = \sum_{i=1} a_i D_i$$

(2.9)

sendo,

- a_i – coeficiente da camada (i);
- D_i – espessura da camada (i) em polegadas;
- i – número da camada, variável de 1 até n.

O coeficiente de camada, função do respetivo módulo de rigidez, é obtido de forma diferente, dependendo do tipo de material e de camada. A metodologia define assim três tipos de coeficientes:

- a_1 – coeficiente de camada de desgaste em material betuminoso;
- a_2 – coeficiente de camada de base em material granular, em material betuminoso ou em material granular tratado com cimento;
- a_3 – coeficiente de camada de sub-base em material granular.

Os respetivos coeficientes podem ser obtidos através de ábacos específicos, ou através de expressões.

Para além do exposto, deve referir-se que o método igualmente contempla a eficácia do sistema de drenagem instalado na via. Prevê assim, sem analisar especificamente qualquer tipo de órgãos ou sistema de drenagem, uma escala de desempenho da mesma, deixando ao critério do utilizador, de acordo com a sua experiência e conhecimento do local, o enquadramento em cinco níveis de qualidade (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Coeficientes de drenagem (adaptado de AASHTO, 1986)

Qualidade do Sistema de Drenagem	Intervalo de tempo para o sistema drenar o pavimento	Percentagem num ano, em que a estrutura de pavimento está exposta a níveis de humidade próximos da saturação			
		Menos de 1%	*1 - 5%*	*5 - 25%*	*Mais de 25%*
Excelente	2 horas	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
Bom	1 dia	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
Razoável	1 semana	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.00 - 0.80	0.80
Fraco	1 mês	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
Muito fraco	não drena	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

A drenagem tem um papel preponderante no comportamento e desempenho de uma estrutura de pavimento, afetando a estrutura no seu todo, com um impacto mais significativo nas camadas não tratadas. Neste sentido, os coeficientes de drenagem apenas se aplicam a estas camadas.

Sendo assim, a equação geral que expressa o número estrutural (SN), considerando as condições de drenagem do pavimento, traduz-se pela seguinte expressão:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \tag{2.10}$$

sendo,

- a_i – coeficiente da camada (i);
- D_i – espessura da camada (i) em polegadas;
- m_i – coeficiente de drenagem da camada (i).

e) Análise da Capacidade Estrutural Global (SC_{GLO})

Para pavimentos flexíveis, o método prevê que a capacidade estrutural global (SC_{GLO}) é equivalente ao número estrutural (SN_{GLO}) que resultará do cálculo.

O dimensionamento implica o conhecimento do tráfego solicitante até ao fim do período de vida útil (N_y), bem como, o nível de serviço terminal (p_t) pretendido.

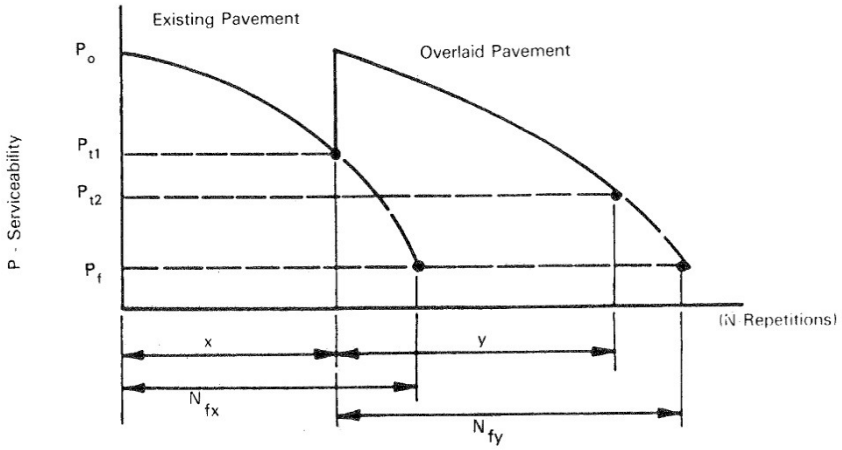


Figura 2.3 – Relação entre o tráfego e o nível de serviço - pavimento novo e após reforço

O dimensionamento de uma estrutura de pavimento pelo presente método da AASHTO compreende o cálculo do número estrutural (SN), o qual necessita dos seguintes dados de entrada:

W_{18} – Tráfego estimado

Para efeitos de dimensionamento é necessário proceder-se à transformação do tráfego médio diário anual de veículos pesados, subdividido por classes de veículos, num número equivalente de eixos-padrão de 18 kip (80 kN), projetado e acumulado até ao final do período de dimensionamento (ano horizonte).

De forma a transformar a multiplicidade de classes de tráfego existentes em um número equivalente, o manual propõe a utilização de fatores de equivalência de carga, os quais representam um rácio para cada tipo de eixo (simples, tandem ou tridem), o qual permite induzir um dano equivalente à passagem de um eixo-padrão de 18 kip (80 kN).

Os referidos fatores de equivalência podem ser obtidos em ábacos específicos, e assentam em ensaios de campo que foram efetuados para caracterizar o espectro de cargas dos veículos pesados que circulam na rede rodoviária dos E.U.A.. Neste sentido, podem obter-se, tendo em consideração o tipo de eixo, o tipo de pavimento (flexível ou rígido), o número estrutural (SN) e o nível de serviço terminal (p_t).

Sendo os fatores de equivalência dependentes do número estrutural (SN), caso no final do dimensionamento o número estrutural calculado, seja diferente do inicialmente estimado, deverá efetuar-se novo cálculo do tráfego equivalente, alterando o número estrutural.

R - Grau de Confiança

O grau de confiança traduz a probabilidade de uma estrutura de pavimento apresentar, na manutenção de condições de serviço adequadas, durante o período de dimensionamento para a qual foi idealizada.

As condições ou estado da estrutura são definidas antecipadamente pelo utilizador do método,

através do nível de serviço terminal, ou seja, para o fim do período de dimensionamento. Por sua vez, o utilizador poderá também pré-determinar o risco que pretende assumir no dimensionamento, dependendo de vários fatores, tais como, o custo inicial da obra, os custos de manutenção, os volumes de tráfego, os eventuais constrangimentos na exploração e, inerentes perdas de receita por decréscimo do nível de serviço, entre outros.

O método aborda diversos parâmetros de dimensionamento, nomeadamente ao nível da fase de construção e da fase de exploração, entre outros, efetuando um vasto estudo estatístico tendo em consideração a experiência acumulada na rede rodoviária dos Estados Unidos da América. Com base nestes estudos, o método sugere valores para o grau de confiança a adotar no dimensionamento, consoante a classificação funcional da via em estudo (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 – Valores recomendados para o Grau de Confiança (adaptado de AASHTO, 1986)

Classificação Funcional da Via	**Grau de Confiança recomendado (%)**	
	Urbana	*Rural*
Vias Coletoras Principais	85 - 99,9	80 - 99,9
Vias Distribuidoras Principais	80 - 99	75 - 95
Vias Distribuidoras Locais	80 - 95	75 - 95
Vias Locais	50 - 80	50 - 80

S_0 – Desvio padrão

Diretamente relacionado com o grau de confiança (R), está o desvio padrão da função normal, função esta utilizada em estudos estatísticos sobre dados obtidos em ensaios específicos.

A metodologia aconselha como valores de referência para o desvio padrão (S_0), o valor de 0,35 para pavimentos rígidos e 0,45 para pavimentos flexíveis.

M_R - Módulo de rigidez do material de fundação

O módulo de rigidez da fundação pode ser obtido através de ensaios laboratoriais ou *in situ*,

preferencialmente respeitantes à época do ano mais desfavorável, ou através de correlações existentes, com base no tipo e propriedades do solo.

A metodologia propõe duas abordagens. A primeira, realizando ensaios de resistência em laboratório, fazendo variar o teor de humidade. Posteriormente, estimando-se ou obtendo-se o teor de água *in situ* da fundação, efetua-se a respetiva correspondência. A segunda, realizando ensaios de carga sobre o pavimento, e posteriormente, através de retroanálise conforme procedimento já anteriormente referido, obtém-se o respetivo módulo da fundação.

A metodologia propõe que, caso seja possível, se obtenham os módulos para cada época do ano e se efetue uma média ponderada com base numa escala de dano. Ou seja, com base nos valores dos diferentes módulos de rigidez conhecidos, obtém-se através de um ábaco recomendado, o respetivo dano, e através da média dos valores, encontra-se o módulo de rigidez da fundação para dimensionamento.

ΔPSI – Variação da Condição de Serviço

A condição de serviço de um pavimento é a capacidade que esse pavimento possui de servir o tipo de tráfego para o qual é destinado. O manual define seis níveis de condição de serviço, numa escala de 0 (zero) a 5 (cinco), atribuindo o nível 0 (zero) a uma estrada intransitável e o nível 5 (cinco) a uma estrada em perfeitas estado de utilização.

O método aconselha como nível de condição de serviço mínimo o valor de 2,5 para estradas principais com elevados volumes de tráfego, e o valor de 2,0 para estradas com menor importância.

Em estudos efetuados com base na opinião dos utilizadores, efetuou-se uma correspondência entre esse mesmo juízo e a condição de serviço terminal da estrada, ou seja, no fim do seu período de vida útil (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 – Condição de Serviço Terminal *versus* Opinião do utilizador (adaptado de AASHTO, 1986)

Condição de Serviço Terminal	**Opinião do Utilizador (% de utilizadores que consideram o nível como inaceitável)**
3.0	12
2.5	55
2.0	85

Apesar da condição de serviço mais elevada corresponder ao valor 5,0, para pavimentos flexíveis o método aconselha que se adote o valor de 4,2 como representativo da condição de serviço inicial.

Uma vez estabelecido a condição de serviço inicial (p_0) e a condição serviço terminal (p_t), poderá aplicar-se a seguinte expressão que reflete a variação da condição de serviço:

$$\Delta PSI = p_0 - p_t \tag{2.11}$$

sendo,

- ΔPSI – variação da condição de serviço da estrada;
- p_0 – condição de serviço inicial (no ano de abertura);
- p_t – condição de serviço terminal (no ano horizonte).

Por fim, de forma a se obter o número estrutural (SN) representativo do conjunto, pavimento existente e reforço, a metodologia propõe o recurso a um ábaco de cálculo ou, caso se pretenda optar pelo cálculo analítico, o recurso à seguinte expressão:

$$\log_{10} W_{18} = Z_R \times S_0 + 9.36 \times \log_{10}(SN+1) - 0.20 + \frac{log_{10}\left[\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log_{10} M_R - 8.07 \tag{2.12}$$

sendo,

- W_{18} – tráfego estimado para o final do período de dimensionamento, expresso em milhões de eixos padrão de 18 kip (80 kN);
- Z_R - grau de confiança, expresso em percentagem (%);
- S_0 – desvio padrão associado ao grau de confiança;
- M_R - módulo de rigidez do material de fundação expresso em libras por polegada quadrada (psi);
- ΔPSI – variação da condição de serviço da estrada;
- SN – número estrutural.

f) Fator de Vida Residual (F_{VR})

A determinação do fator de vida residual (F_{VR}) consiste na obtenção de um fator de ajustamento, a aplicar à capacidade estrutural do pavimento (SC), capacidade esta equivalente ao número estrutural (SN).

O intuito deste ajustamento é conceder uma abordagem mais realista ao dimensionamento, fazendo-o depender do valor de vida residual antes do reforço (R_{LX}) e do valor de vida residual do conjunto pavimento existente e reforço (R_{LY}).

A determinação da vida residual do pavimento existente antes do reforço (R_{LX}) reveste-se de alguma subjetividade e, inerentemente, de difícil obtenção. Contudo, a metodologia da AASHTO indica cinco abordagens para a obtenção do mesmo, cabendo ao utilizador do método a escolha da que melhor se ajusta à sua realidade, nomeadamente entre as que seguidamente se elencam:

- Análise de ensaios de defletometria;
- Análise de dados de tráfego;
- Análise do tempo de serviço;
- Análise do nível de serviço;
- Análise de reconhecimento visual.

A determinação do fator de vida residual (F_{VR}), para além do conhecimento do valor da vida residual do pavimento antes do reforço (R_{LX}), obriga também à determinação do valor de vida residual do conjunto pavimento existente e reforço (R_{LY}).

Este último valor, ou seja, o $R_{LY,}$ está diretamente relacionado com os parâmetros de dimensionamento escolhidos pelo utilizador do método, principalmente no que respeita aos níveis de serviço e ao período de dimensionamento, para a estrutura após reforço.

g) Dimensionamento do Reforço

O dimensionamento da camada de reforço a aplicar sobre a estrutura existente obriga à obtenção dos dados previamente descritos no subcapítulo anterior.

Adaptando a equação geral de dimensionamento para reforço de um pavimento, ao cenário Flexível-Flexível, a espessura de material betuminoso necessária para a camada de reforço, h_0, poderá ser obtida pela seguinte expressão:

$$h_0 = (SN_{GLO} - F_{VR} \times SN_{PEX})/a_0 \tag{2.13}$$

sendo,

- h_0 – espessura da camada de reforço em material betuminoso;
- a_0 – coeficiente da camada de reforço;
- SN_{GLO} – número estrutural global (reforço + pavimento existente);
- SN_{PEX} – número estrutural do pavimento existente antes do reforço;
- F_{VR} - Fator de Vida Residual.

3 Caso de Estudo – Caracterização das Condições Existentes

3.1 Considerações Gerais

A estrada que servirá como caso de estudo para o presente trabalho, desenvolve-se no distrito de Braga, apresentando o troço sobre o qual se pretende efetuar a reabilitação do pavimento, uma extensão aproximada de 20,443 km, nomeadamente, entre o km 63+017 e o km 83+460.

O seu traçado desenvolve-se no sentido norte-sul e caracteriza-se como sendo um traçado sinuoso, em terreno acidentado, desde o seu início até aproximadamente metade da extensão a reabilitar, localização a partir da qual, o terreno assume características mais planas e consequentemente o traçado apresenta-se mais suave em planta e perfil longitudinal.

Com os trabalhos de reabilitação pretende-se que a largura da plataforma da estrada seja conservada, prevendo-se a manutenção do perfil transversal-tipo atual, o qual, na generalidade, apresenta uma faixa de rodagem com 6,50 metros de largura, com duas vias de circulação, e bermas pavimentadas com 0,50 metros de largura, em média.

A estrutura de pavimento existente é na maioria da extensão, uma estrutura do tipo flexível, cuja camada de desgaste aparenta ser uma mistura em Betão Betuminoso atualmente designada por *AC14 surf*. A referir como exceção, entre o km 78+325 e o km 78+750, a existência de uma estrutura de pavimento do tipo articulado (Branco et al, 2005), cuja camada de desgaste é constituída por paralelepípedos de granito, excluindo-se esta da análise do presente trabalho.

Na ausência de dados históricos disponíveis, e considerando-se como essencial no dimensionamento de uma estrutura de reforço o conhecimento de informação sobre a estrutura que se pretende reabilitar, nomeadamente, a sua constituição e condição, obrigou a que fosse necessário proceder-se a diversas medidas no sentido de obtenção de tal informação. Neste seguimento, efetuou-se uma campanha de prospeção ao pavimento existente.

A referida campanha, a desenvolver em subcapítulos seguintes, contemplou uma inspeção visual em contínuo, a medição do cavado de rodeiras, a execução de ensaios não destrutivos, nomeadamente, ensaios de avaliação da capacidade de carga com defletómetro de impacto

(FWD), a execução de ensaios destrutivos, nomeadamente, poços de amostragem e extração de carotes, e, ensaios *in situ* e ensaios em laboratório sobre amostras recolhidas para o efeito.

3.2 Inspeção visual em contínuo

Através de uma inspeção visual em contínuo foi possível identificar o tipo e estado de conservação da estrutura de pavimento existente ao longo de todo o troço a reabilitar, tendo-se registado os principais tipos de degradação.

Efetuou-se uma avaliação por tipo de degradação, classificando-se de forma expedita as diversas patologias, das quais, com maior presença, se destacam as seguintes:

- Fendilhamento (longitudinal e transversal);
- Fendilhamento (tipo pele de crocodilo de malha larga e malha estreita);
- Rodeiras;
- Ninhos;
- Reparações.

Na Tabela 3.1 poderá analisar-se um resumo do estado de conservação e tipo de degradações identificadas na estrutura de pavimento existente e respetiva percentagem de incidência relativamente à extensão total do troço a reabilitar.

Como é usual no processo de degradação de pavimentos betuminosos, as patologias anteriormente referidas encontram-se por diversas vezes associadas entre si. Na inspeção, verificou-se uma elevada ocorrência de fendilhamento do tipo pele de crocodilo, por vezes já associado à existência de ninhos. Tal situação demonstra o avançado estado de degradação da estrutura existente, o que obriga a uma cuidada análise das soluções de reforço a preconizar ao longo do troço.

Tabela 3.1 – Resumo das degradações identificadas e estado de conservação do pavimento existente

Estado / Degradações	**Ocorrência (%)**
Fendilhamento (longitudinal e transversal)	34.5%
Fendilhamento (tipo pele de crocodilo – malha larga)	31.2%
Fendilhamento (tipo pele de crocodilo – malha estreita)	12.4%
Rodeiras	8.7%
Ninhos	2.9%
Reparações	0.2%
Pavimento em bom estado	8.0%
Pavimento em paralelepípedos de granito	2.1%

3.3 Medição do cavado de rodeiras

De forma a se avaliar a condição do estado do pavimento relativamente à sua regularidade e deformação, efetuou-se a medição da profundidade dos cavados das rodeiras observados na zona de passagem dos rodados esquerdo e direito, para ambos os sentidos, com medições espaçadas de 10 metros.

Para tal, recorreu-se a uma barra rígida acoplada na dianteiro de um veículo, dotada de cinco lasers, dois acelerómetros e um sensor inercial de movimento, equipamento este pertencente ao Laboratório de Pavimentos Rodoviários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (Figura 3.1).

Figura 3.1 – Equipamento utilizado na medição do cavado de rodeira

Com base na média das medições a cada 10 metros, apresenta-se para trechos de 100 metros, nas Figuras 3.2 e 3.3, os resultados relativos às rodeiras direita e esquerda, para ambos os sentidos, norte-sul (via direita) e sul-norte (via esquerda).

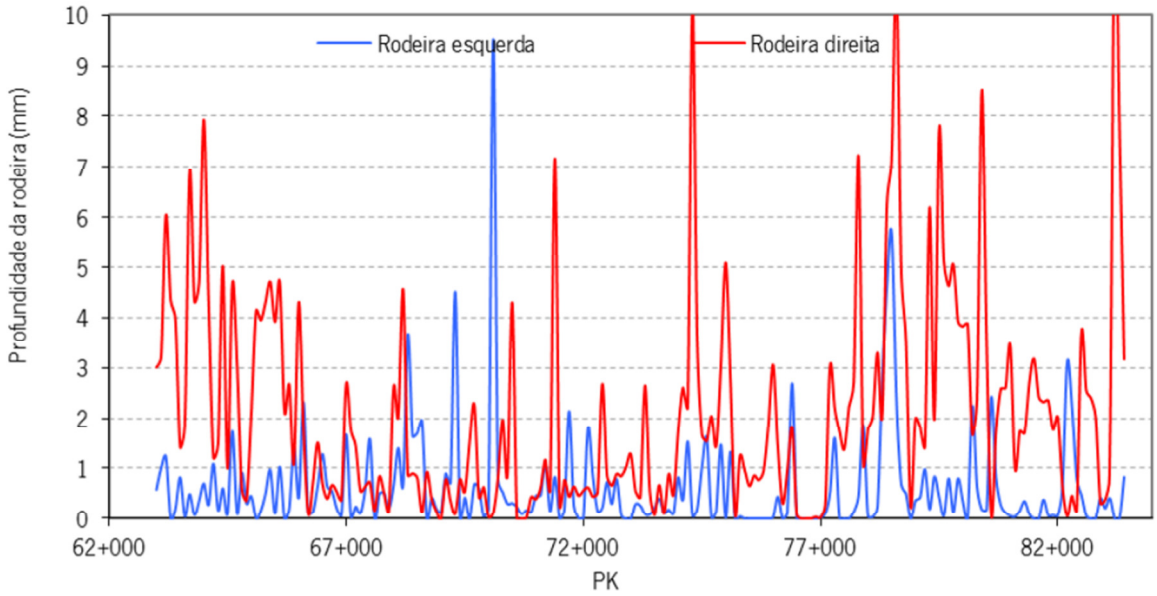


Figura 3.2 – Profundidade do cavado das rodeiras no sentido norte-sul (Via Direita) para trechos de 100 metros

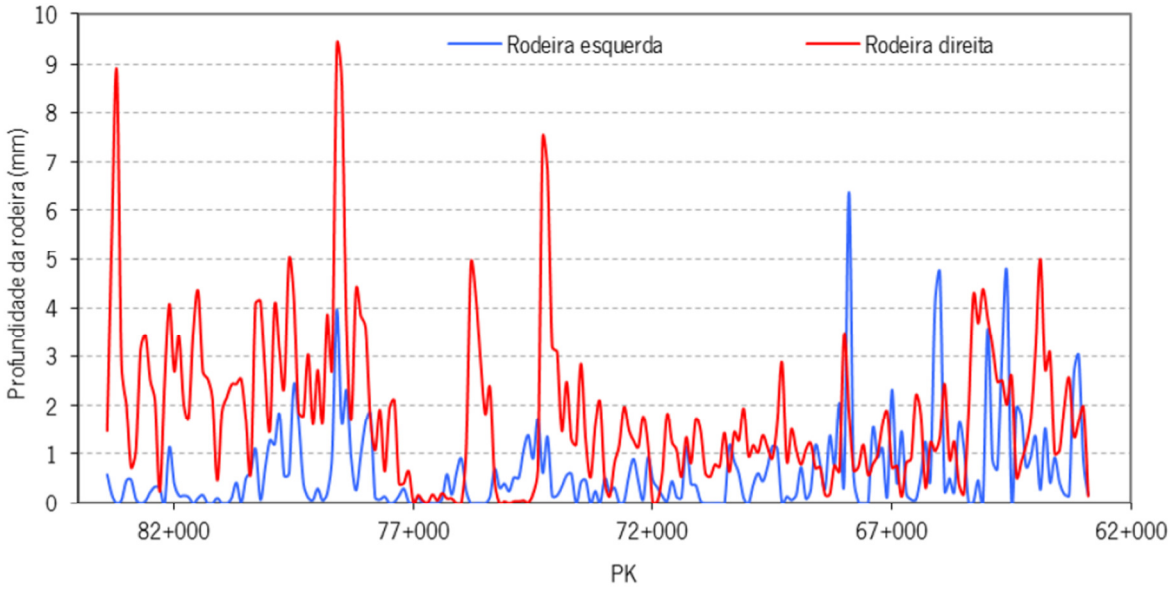


Figura 3.3 – Profundidade do cavado das rodeiras no sentido sul-norte (Via Esquerda) para trechos de 100 metros

Da análise dos dados obtidos poderá verificar-se que na generalidade as profundidades observadas na rodeiras direita, são superiores às da rodeira esquerda, situação esta explicável devido à inclinação transversal da plataforma pender para o exterior, ou seja para a direita, o que provoca um agravamento da sobrecarga do tráfego. A referir igualmente que, o facto da rodeira direita ser a que se encontra mais no exterior, em situações de aterro em que haja assentamentos, por razões óbvias, esta rodeira é a que está sujeita a deformações superiores.

No sentido norte-sul verificam-se, ao longo de todo o troço, profundidades superiores às verificadas no sentido sul-norte e a registar igualmente que, no sentido sul-norte, a partir sensivelmente do km 73+000 até ao km inicial (km 63+017), verifica-se uma diminuição das profundidades comparativamente com o resto da extensão.

Esta última situação referida poderá ser explicada devido ao facto de, nesta parte do traçado, o mesmo se desenvolver maioritariamente em meia encosta (perfil misto), o que coloca o sentido sul-norte, preferencialmente numa situação de apoio em escavação.

3.4 Avaliação da capacidade de carga com defletómetro de impacto (FWD)

Foi realizada uma campanha de auscultação ao pavimento existente através da realização de ensaios de capacidade de carga utilizando um defletómetro de impacto (FWD). O equipamento utilizado pertence ao Laboratório de Pavimentos Rodoviários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (Figura 3.4).

Figura 3.4 – Equipamento utilizado nos ensaios de capacidade de carga (FWD)

O defletómetro de impacto trata-se de um equipamento de ensaio não destrutivo, o qual aplica na superfície do pavimento uma carga de impacto, resultante da queda de uma massa de uma determinada altura. Os deslocamentos verticais na superfície do pavimento, induzidos pela carga, são medidos em vários pontos através de geofones nela apoiados, a diferentes distâncias do centro de aplicação da carga.

As principais condições de ensaio consideradas na avaliação da capacidade de carga, nomeadamente, o valor da carga de pico aplicada, o raio da placa de transmissão da carga e a distância dos sensores (geofones) ao centro de aplicação da carga, apresentam-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Condições de ensaio na avaliação da capacidade de carga

Carga aplicada (kN)	**Raio da placa (mm)**	**Distância dos sensores (mm)**								
		Df1	***Df2***	***Df3***	***Df4***	***Df5***	***Df6***	***Df7***	***Df8***	***Df9***
65	150	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100

Os ensaios foram realizados em pontos afastados de 200 m, sobre as rodeiras externas em cada um dos sentidos, o que corresponde à distância de 100 m entre dois pontos consecutivos segundo a diretriz da via.

Para cada ponto ensaiado, para além do registo da deflexão em cada um dos sensores, efetuou-se a leitura das temperaturas do ar e da superfície do pavimento, bem como, o registo da hora e da referência quilométrica. Efetuou-se igualmente, decorridas cada 2 horas de ensaio, a medição da temperatura média do pavimento à profundidade de 2,0 centímetros (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Temperaturas registadas durante os ensaios de avaliação da capacidade de carga

Localização	**Temperaturas (ºC)**
Ar	13 a 20
Superfície	9 a 25
Pavimento	15 a 18.7

De referir que os ensaios foram realizado no mês de novembro, ou seja, durante um período de elevada pluviosidade na região.

Após a realização dos ensaios é necessário proceder-se à análise e tratamento dos dados obtidos, tendo-se em vista a identificação e subdivisão do troço a reabilitar em trechos com comportamento estrutural homogéneo, procurando-se, na medida do possível, um seccionamento igual para os dois sentidos e, adotando-se sempre aquele em que se registam deflexões características mais elevadas.

Numa primeira fase, é necessário converter todos os dados, normalizando as cargas de pico aplicadas em cada ponto ensaiado, para a carga de 65 kN.

Nas Figuras 3.5 a 3.8, apresenta-se em forma de gráfico, as deflexões máximas e as deflexões registadas em cada um dos sensores, já normalizadas, ao longo da extensão em análise e para cada um dos sentidos.

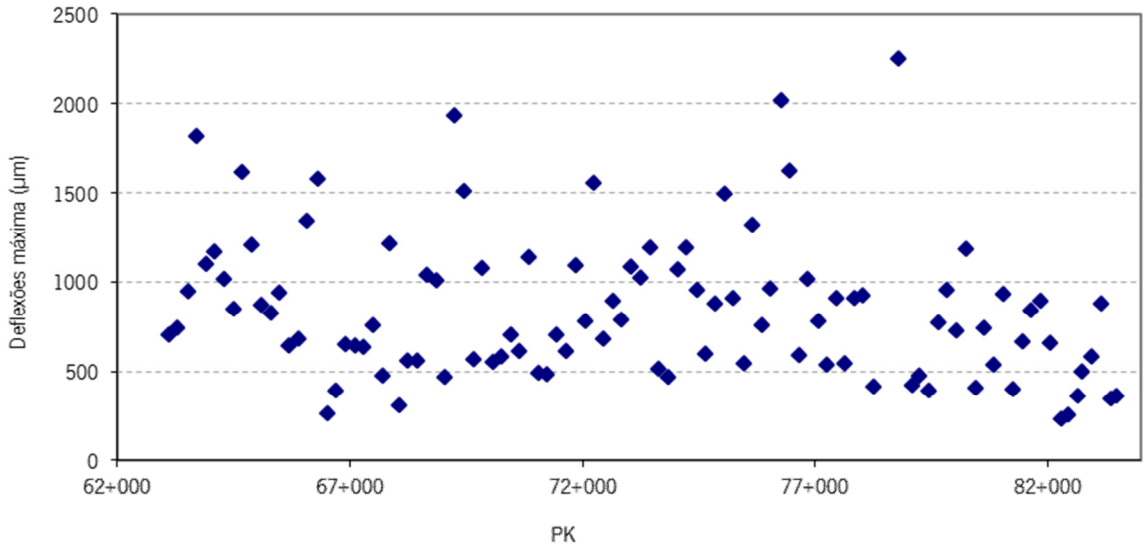


Figura 3.5 – Deflexões máximas registadas ao longo do sentido norte-sul

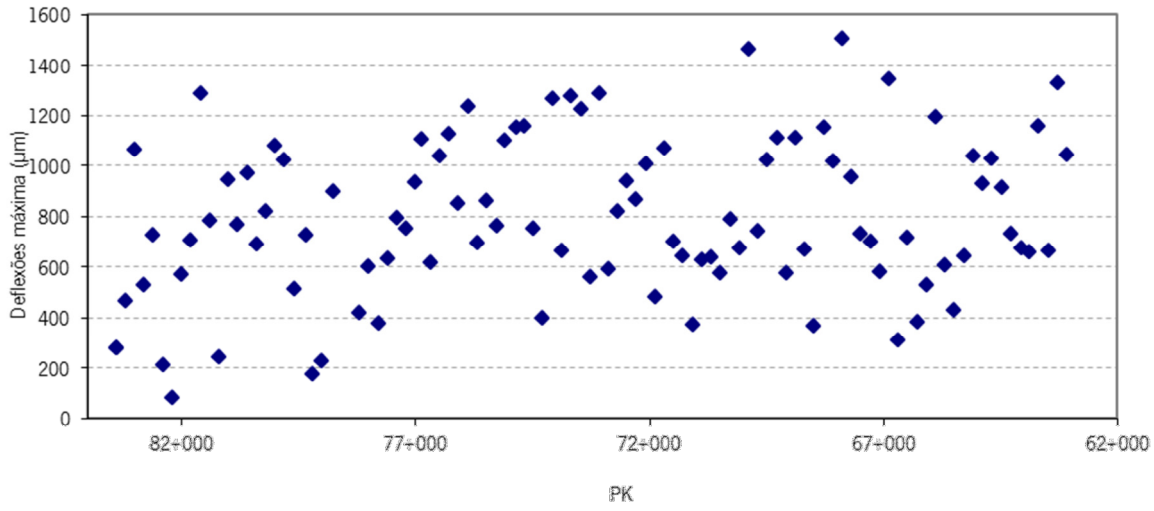


Figura 3.6 – Deflexões máximas registadas ao longo do sentido sul-norte

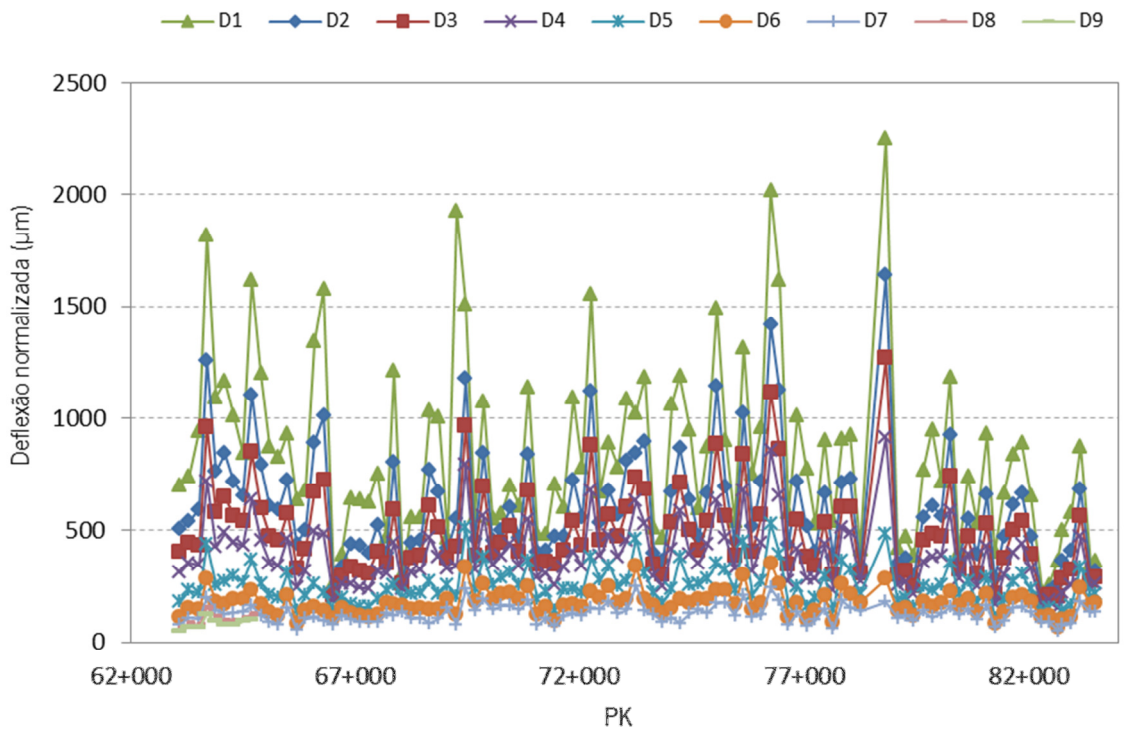


Figura 3.7 – Deflexões de todos os sensores, registadas ao longo do sentido norte-sul

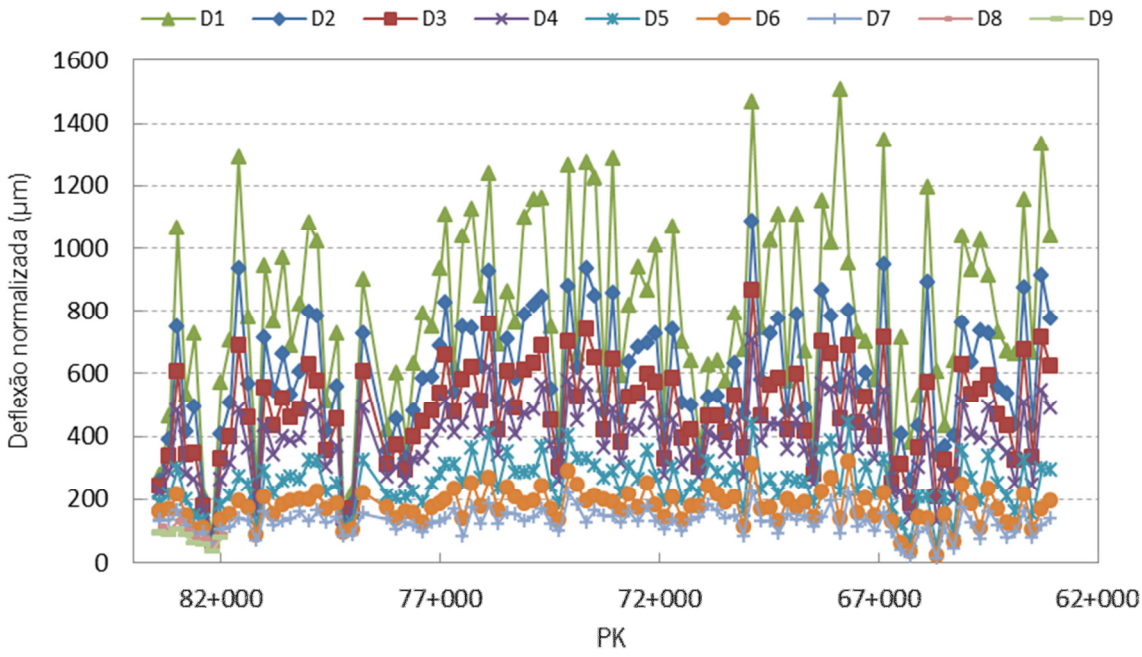


Figura 3.8 – Deflexões de todos os sensores, registadas ao longo do sentido sul-norte

A referir, como se pode visualizar nas Figuras 3.7 e 3.8, existe uma elevada heterogeneidade ao longo do troço em estudo relativamente aos valores das deflexões obtidas nos diversos sensores.

Seguidamente, mediante a aplicação do procedimento da AASHTO, nomeadamente o Método das Diferenças Acumuladas, definiram-se os trechos homogéneos, recorrendo-se para tal às seguintes expressões:

$$\mathrm{Dif.A_{acum_i}} = \mathrm{A_{acum_i}} - \mathrm{d_{méd}} \times (\mathrm{k_i} - \mathrm{k_0}) \tag{3.1}$$

$$\mathrm{A_{acum}} = \sum_{\mathrm{i-1}}^{\mathrm{n}} \left[\frac{\mathrm{d_{i-1}} + \mathrm{d_i}}{2} \times (\mathrm{k_i} - \mathrm{k_{i-1}}) \right] \tag{3.2}$$

$$\mathrm{d_{méd}} = \frac{\mathrm{A_{acum}}}{\mathrm{k_n} - \mathrm{k_0}} \tag{3.3}$$

em que:

- $\mathrm{Dif.A_{acumi}}$ – diferenças acumuladas;
- $\mathrm{A_{acum}}$ – área acumulada em cada ponto ensaiado;
- $\mathrm{d_{méd}}$ – deflexão média;
- k – distância correspondente ao ponto ensaiado.

A aplicação do método das diferenças acumuladas resultou, para cada um dos sentidos, na identificação de trechos de comportamento homogéneo, apresentando-se nas Figuras 3.9 e 3.10, de forma esquemática, os trechos identificados.

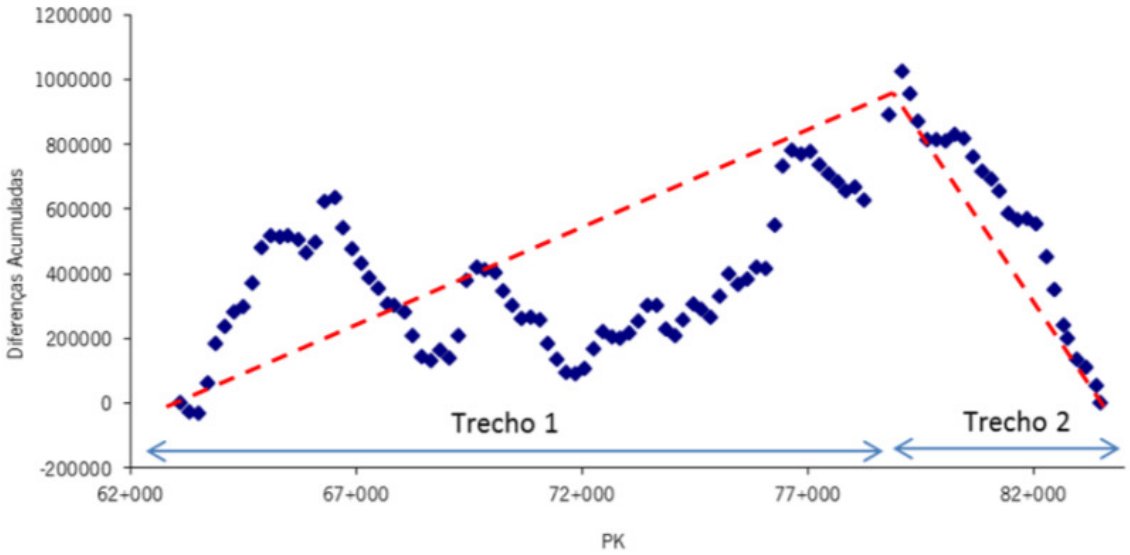


Figura 3.9 – Representação do método das diferenças acumuladas e identificação dos trechos homogéneos no sentido norte-sul

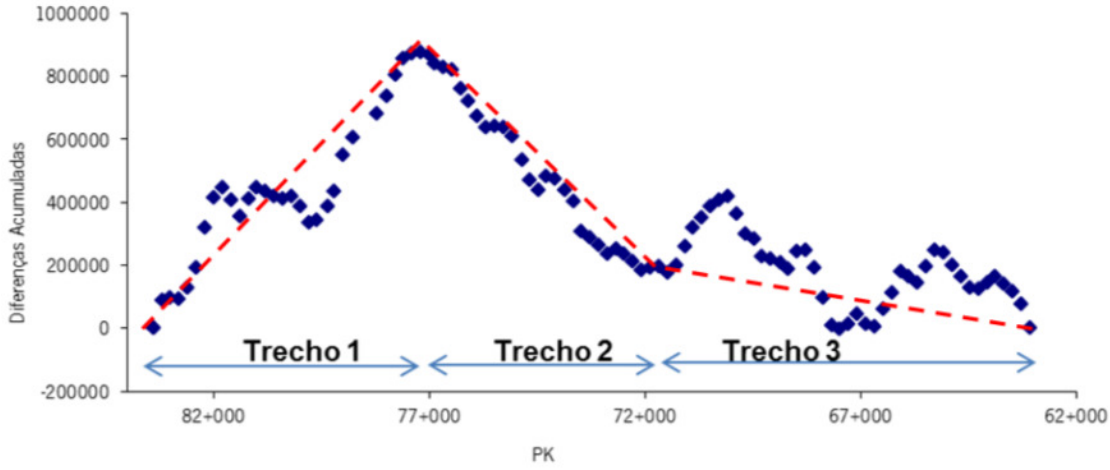


Figura 3.10 – Representação do método das diferenças acumuladas e identificação dos trechos homogéneos no sentido sul-norte

Analisando-se o conjunto de pontos correspondentes às diferenças acumuladas ao longo da extensão em estudo, é possível, através do traçado de semirretas nos gráficos acima apresentados, identificar os trechos com inclinação constante, reconhecendo-se de forma expedita uma possível subdivisão em trechos homogéneos.

Esta subdivisão tem de ser complementada com a análise das deflexões medidas no pavimento, e mais concretamente com a sua variação ao longo da estrada. A título de exemplo, na Figura 3.10, relativa ao sentido sul-norte, facilmente se reconhecem oito zonas em que as diferenças acumuladas mudam de inclinação e que consequentemente corresponderiam a zonas de comportamento homogéneo. No entanto, a análise conjunta das diferenças acumuladas com as deflexões medidas no pavimento, conduze a apenas 2 zonas homogéneas.

Seguidamente, após definidos os trechos homogéneos anteriormente identificados de forma gráfica, determinou-se a deformada característica de cada trecho homogéneo definido, assumindo-se que a mesma é fielmente refletida pelo cálculo do percentil 85, constituindo-se assim, uma base de interpretação e comparação dos resultados da defletometria. Poderá analisar-se os respetivos resultados nas Tabelas 3.4 e 3.5.

Tabela 3.4 – Definição dos trechos homogéneos no sentido norte-sul (Via Direita)

Trecho	PK inicial	PK final		Deflexões (mm/1000)								
				Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Df8	Df9
1	63+017	79+000	Percentil 85	1257	879	703	555	364	234	175	133	103
			Máximo	2253	1641	1267	917	532	353	250	186	142
			Mínimo	263	230	209	186	139	82	57	41	31
			Desvio Padrão	410	270	204	150	88	58	41	31	25
			Média	911	658	525	416	266	181	129	99	80
2	79+000	83+460	Percentil 85	882	640	516	416	283	205	154	119	95
			Máximo	1182	924	741	586	359	244	178	141	113
			Mínimo	229	201	185	152	93	64	50	42	38
			Desvio Padrão	253	179	140	110	69	46	33	25	19
			Média	603	456	376	309	215	156	118	93	76

Tabela 3.5 – Definição dos trechos homogéneos no sentido sul-norte (Via Esquerda)

Trecho	PK inicial	PK final		Deflexões (mm/1000)								
				Df1	Df2	Df3	Df4	Df5	Df6	Df7	Df8	Df9
1	83+460	77+500	Percentil 85	966	726	570	466	286	200	152	116	94
			Máximo	1289	933	689	498	327	223	164	132	109
			Mínimo	84	73	69	66	60	53	47	41	36
			Desvio Padrão	315	218	160	118	68	43	29	22	18
			Média	624	474	385	314	217	159	121	97	80
2	77+500	72+000	Percentil 85	1222	849	659	517	356	246	173	133	101
			Máximo	1286	934	759	618	406	292	219	167	132
			Mínimo	399	345	302	258	187	127	81	55	42
			Desvio Padrão	247	151	112	84	56	41	30	23	18
			Média	922	687	556	447	294	201	143	109	86
3	72+000	63+017	Percentil 85	1119	791	635	508	325	222	161	123	100
			Máximo	1505	1085	864	707	441	321	225	171	136
			Mínimo	311	258	186	131	49	22	15	10	8
			Desvio Padrão	300	199	153	123	85	62	45	35	28
			Média	809	590	473	379	245	168	120	91	73

Apresenta-se na Figura 3.11, de forma esquemática, a definição dos trechos de comportamento homogéneo definidos anteriormente.

Conforme já referido, para além dos ensaios de capacidade de carga com defletómetro de impacto, faz parte da campanha de prospeção da estrutura de pavimento existente, a realização de ensaios destrutivos sobre a mesma. Tal se deve ao facto de ser fundamental identificar-se as espessuras e constituição das diferentes camadas que compõem a estrutura.

Neste sentido, é de todo conveniente que o plano de prospeção para a execução dos referidos ensaios destrutivos, nomeadamente, poços de amostragem e carotes, tenha em consideração os trechos de comportamento estrutural homogéneo definidos.

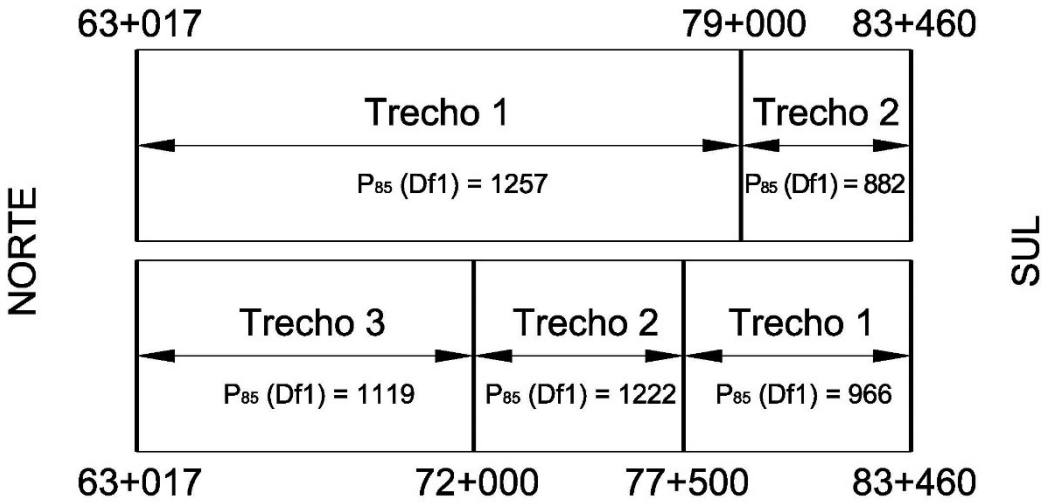


Figura 3.11 – Representação esquemática da distribuição dos trechos homogéneos em cada um dos sentidos de tráfego

Para tal, na medida do possível, torna-se vantajoso que se estabeleça um seccionamento igual para os dois sentidos, adotando-se sempre o trecho em que se registam deflexões características mais elevadas.

Sendo assim, da análise da disposição dos trechos homogéneos para cada um dos sentidos, de forma a proceder-se a um zonamento do troço por perfil (vias direita e esquerda), efetuou-se uma distribuição baseada nos registos das deflexões características mais elevadas. Neste seguimento, identificaram-se dois trechos homogéneos comuns a ambos os sentidos, os quais se designa como zonas de dimensionamento. As referidas zonas de dimensionamento, representam-se esquematicamente na Figura 3.12.

As zonas de dimensionamento identificadas tendo em consideração os dois sentidos e a extensão total da via a reabilitar são fundamentais para a correta definição do plano de prospeção de ensaios destrutivos a executar, os quais serão descritos no subcapítulo seguinte.

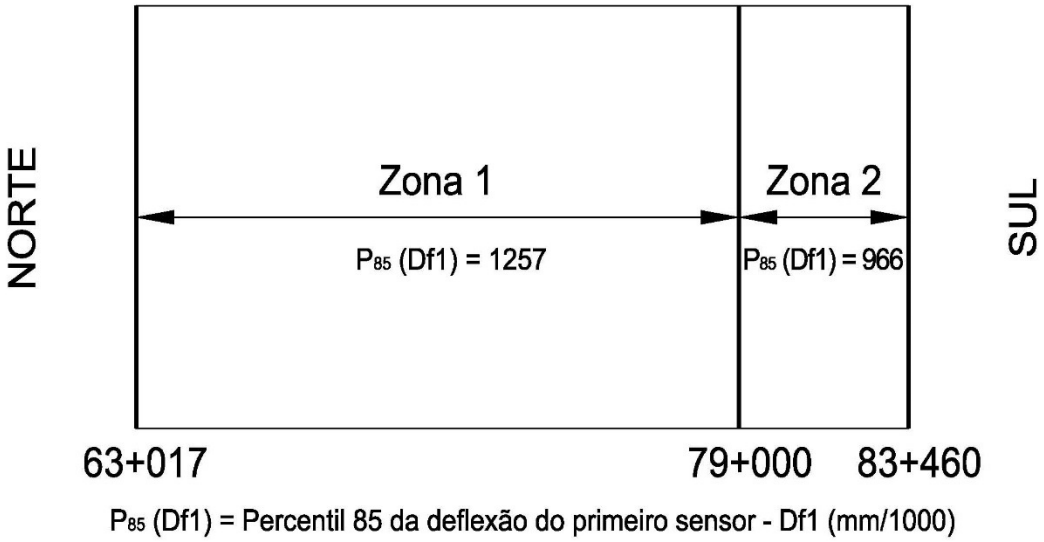


Figura 3.12 – Representação esquemática das zonas de dimensionamento

Ressalva-se que o zonamento anteriormente identificado poderá ser objeto de alteração no decorrer do dimensionamento do reforço, sendo nesta fase, uma primeira aproximação para apoio na definição do plano de prospeção.

3.5 Ensaios destrutivos (poços de amostragem e carotes)

Após a realização dos ensaios com defletómetro de impacto, e após o devido tratamento dos respetivos dados obtidos, foi possível identificar dois trechos de comportamento estrutural homogéneo, ou zonas de dimensionamento, comuns a ambos os sentidos da via. A partir desse seccionamento definiu-se o plano de prospeção para os ensaios destrutivos.

O plano de prospeção, o qual no presente caso contempla a realização de poços de amostragem e a extração de carotes, tem como principais objetivos o seguinte:

- Verificação da constituição do pavimento existente (espessura e composição das várias camadas que o constituem) e da fundação do mesmo;

- Determinação das baridades e teores de água *in situ* das camadas não ligadas e dos solos de fundação;
- Recolha de amostras de solos de fundação e posterior realização de ensaios laboratoriais.

Os poços foram realizados no pavimento, junto à berma, com uma secção de aproximadamente 0,80 x 0,80 m^2 e com profundidade suficiente para atingir o solo de fundação, permitindo assim, além da identificação da natureza dos materiais e aferição da espessura das camadas que constituem o pavimento betuminoso existente, a recolha de amostras de solos.

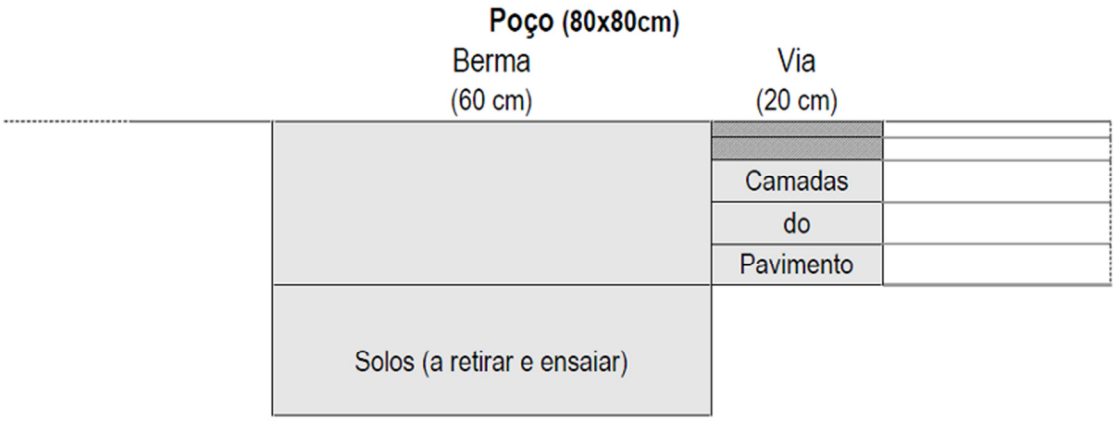


Figura 3.13 – Representação esquemática da localização dos poços no perfil transversal da via

A extração de carotes, a qual incidiu sobre as misturas betuminosas do pavimento existente, foi realizada sobre a rodeira externa da via em que é realizada a sondagem, sendo assim possível, com base na análise dos tarolos recolhidos, avaliar a variabilidade local das espessuras das camadas betuminosas aplicadas (Tabela 3.10).

De forma a cumprir os objetivos pretendidos com a prospeção a executar, considerou-se como necessário, a abertura de 4 poços de amostragem no pavimento flexível da faixa de rodagem e bermas e, a realização de 10 carotes na faixa de rodagem, incluindo ensaios *in situ* e a recolha de amostras para posterior caracterização laboratorial (Tabelas 3.8 e 3.9).

Com base nas duas zonas de dimensionamento definidas identificaram-se os pontos de ensaio em cada um dos sentidos, que mais se aproximavam aos defletogramas característicos, ou seja, aos defletogramas do percentil 85.

Reconhecidas essas potenciais localizações, efetuou-se a análise das mesmas em termos de implantação na via e respetivo espaçamento entre si, de forma a minorar riscos de segurança durante a fase de execução da prospeção e, a alcançar uma amostragem representativa que abrangesse a globalidade do troço a requalificar. Com base nesta metodologia, definiu-se a localização para a abertura dos 4 poços, tendo-se distribuído 2 por cada sentido (Tabela 3.6).

Relativamente à localização para a extração das carotes no pavimento, tendo-se já definido a abertura dos poços em pontos de ensaio característicos, não se adotou este critério para a escolha dos locais, mas sim, procurou-se distribuir a sua localização de forma equitativa ao longo do troço, dentro do possível, coincidente com os pontos ensaiados com o defletómetro de impacto (Tabela 3.6).

As localizações dos poços e dos carotes são representadas na Figura 3.14, sendo possível verificar uma cobertura global do pavimento a caracterizar.

Tabela 3.6 – Localização prevista para a abertura de poços e a extração de carotes

Poços		**Via**			**Carotes**		**Via**	
Ref.	**Pk**	**Esquerda (sul-norte)**	**Direita (norte-sul)**		**Ref.**	**Pk**	**Esquerda (sul-norte)**	**Direita (norte-sul)**
P1	63+680	X			C1	64+902		X
P2	67+854		X		C2	66+879	X	
P3	75+880	X			C3	69+281	X	
P4	81+851		X		C4	71+853		X
					C5	73+067	X	
					C6	75+649		X
					C7	78+767	X	
					C8	79+650		X
					C9	81+001	X	
					C10	83+150		X

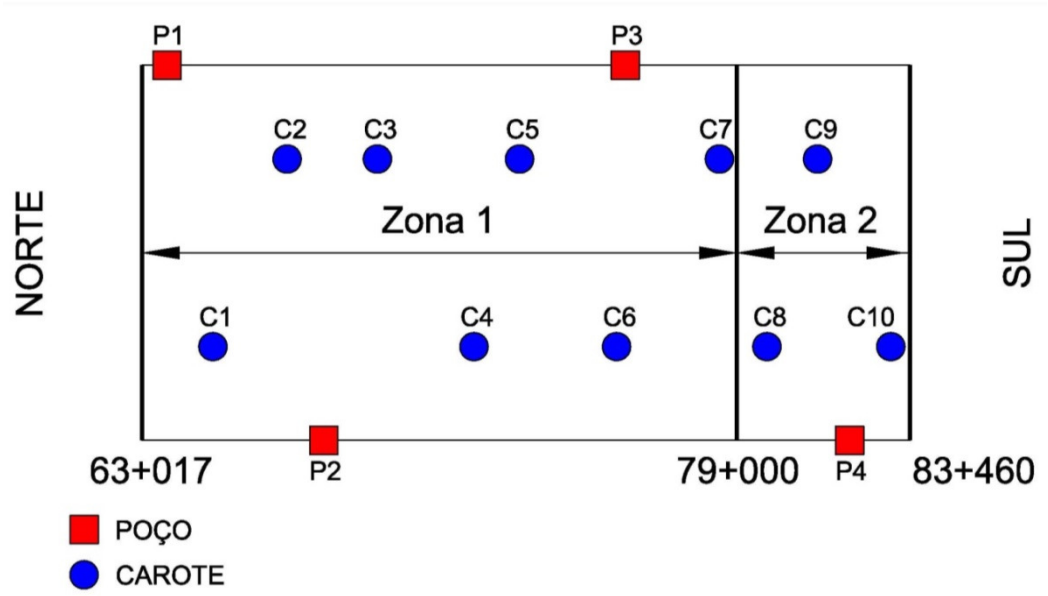


Figura 3.14 – Representação esquemática da localização prevista para a abertura de poços e a extração de carotes

Devido a dificuldades operacionais na execução dos poços e carotes, dada a via em questão se encontrar em serviço e apresentar volumes de tráfego significativos, foi necessário proceder-se a alguns ajustamentos às localizações inicialmente previstas, apresentando-se na Tabela 3.7, as localizações efetivas onde os trabalhos decorreram.

Tabela 3.7 – Localização efetiva (real) da abertura dos poços e da extração de carotes.

Poços		**Via**		**Carotes**		**Via**	
Ref.	**Pk**	**Esquerda (sul-norte)**	**Direita (norte-sul)**	**Ref.**	**Pk**	**Esquerda (sul-norte)**	**Direita (norte-sul)**
P1	63+725	X		C1	64+902		X
P2	67+750		X	C2	66+879	X	
P3	75+822	X		C3	69+281	X	
P4	81+660		X	C4	71+900		X
				C5	73+067	X	
				C6	75+672		X
				C7	78+767	X	
				C8	79+650		X
				C9	81+001	X	
				C10	83+150		X

Conforme já referido anteriormente, a prospeção incluiu, na sequência da abertura de cada um dos poços, a medição *in situ* da baridade e do teor em água das camadas não ligadas e do solo de fundação, bem como, a recolha de amostras para realização de ensaios laboratoriais. Poderá analisar-se em detalhe, na Tabela 3.8, a informação obtida com a sua execução.

Tabela 3.8 – Resumo dos poços de amostragem executados no pavimento existente

Ref.	Zona	Sentido	PK	Camada	Espessura (cm)	Descrição	Teor em água (%)	Baridade seca (g/cm³)
P1	Escav.	S-N (V.Esq.)	63+725	1	3	Camada desgaste em mistura betuminosa		
				2	4.5	Camada regularização em mist. betumin.		
				3	8.5	Macadame betuminoso		
				4	14	ABGE (tout-venant)	7.4	
				5	∞	Solo fundação (residual granítico)	16.4	1.53
P2	Aterro	N-S (V.Dir.)	67+750	1	2.5	Camada desgaste em mistura betuminosa		
				2	3.5	Camada regularização em mist. betumin.		
				3	16.5	Macadame betuminoso		
				4	12	ABGE (tout-venant)	6.9	
				5	9	Solo granítico com grossos	10.2	1.99
				6	12	Saibro granítico com grossos	9.2	2.42
				7	11.5	Saibro granítico	10.2	2.18
				8	∞	Saibro granítico com solo preto e grossos	11.9	1.5
P3	Aterro	S-N (V.Esq.)	75+822	1	4	Camada desgaste em mistura betuminosa		
				2	9	Macadame betuminoso		
				3	15	Calçada portuguesa		
				4	2	Material granular de assentamento	6.2	
				5	7	Areia fina	7.4	1.76
				6	1	Areia fina de cor escura	7.1	
				7	23.5	Saibro granítico c/ argila e matéria orgânica	9.6	1.94
				8	∞	Solo fundação cor escura e matér. orgânica	26.7	1.11
P4	Cota zero	N-S (V.Dir.)	81+660	1	6	Camada desgaste em mistura betuminosa		
				2	19	Semi-penetração betuminosa		
				3	11.5	Solo granítico com rachão à mistura	10.8	
				4	12.5	Calçada portuguesa		
				5	6	Solo heterogéneo cor castanha c/ grossos	10.3	1.27
				6	∞	Solo residual granítico	14.5	1.37

Os ensaios laboratoriais executados, cujos resultados poderão ser encontrados na Tabela 3.9, foram os seguintes:

- Ensaios Proctor;
- Ensaios CBR para as condições ótimas de humidade do solo de fundação;
- Ensaios CBR para as condições *in situ* de humidade do solo de fundação.

Tabela 3.9 – Resultados dos ensaios laboratoriais sobre os solos de fundação recolhidos

Ref.	**Condições *in situ***		**Condições Ótimas (Proctor)**		**CBR**							
					Condições Ótimas (Proctor)				Condições *in situ* (W *in situ*)			
	W (%)	bar (g/cm3)	W (%)	bar (g/cm3)	W (%)	bar (g/cm3)	2.5 mm	5 mm	W (%)	bar (g/cm3)	2.5 mm	5 mm
P1	16.4	1.53	11.4	1.87	11.61	1.917	40	56	15.65	1.793	11	14
P2	11.9	1.5	9.8	1.92	9.79	1.884	50	55	11.93	1.847	41	45
P3	9.6	1.94	13.6	1.87	13.59	1.864	21	27	9.61	1.664	18	16
P4	14.5	1.37	13.3	1.8	13.69	1.732	36	42	14.5	1.663	16	18

Tabela 3.10 – Resumo das carotes extraídas do pavimento existente

Ref.	**Localiz. Efetiva**	**Camada 1**		**Camada 2**		**Camada 3**		**Camada 4**		**Fendilham.**	
		Descrição	***Esp. (cm)***	***Descrição***	***Esp. (cm)***	***Descrição***	***Esp. (cm)***	***Descrição***	***Esp. (cm)***	***s/n***	***Profund. (cm)***
C1	64+902 (V.Dir.)	Desgaste	7.5	Regulariz.	6.5	Macadame	7	-	-	s	7.5
C2	66+879 (V.Esq.)	Micro betão Rugoso	3	Desgaste	4	Macadame	9	Cubos	19	s	total
C3	69+281 (V.Esq.)	Desgaste1	4	Desgaste2	3	Regulariz.	8	-	-	s	total
C4	71+900 (V.Dir.)	Desgaste1	3.5	Desgaste2	2.5	Regulariz.	5.5	Macadame	6	n	-
C5	73+067 (V.Esq.)	Desgaste	5	Regulariz.	12	Macadame	6	-	-	n	-
C6	75+672 (V.Dir.)	Desgaste	6	Regulariz.	10	-	-	-	-	n	-
C7	78+767 (V.Esq.)	Desgaste	5	Regulariz.	7	-	-	-	-	s	total
C8	79+650 (V.Dir.)	Desgaste	3.5	Regulariz.	8	-	-	-	-	s	total
C9	81+001 (V.Esq.)	Desgaste	2.5	Regulariz.	4	Macadame	4	-	-	s	10.5
C10	83+150 (V.Dir.)	Desgaste	6	Regulariz.	8	-	-	-	-	s	8

Apresentam-se seguidamente fotografias (Figuras 3.15 e 3.16) relativas à abertura dos 4 poços, bem como, fotografias (Figuras 3.17 a 3.20) das carotes extraídas do pavimento.

Figura 3.15 – Aspeto dos materiais encontrados nos poços de amostragem P1 e P2 (à direita e à esquerda, respetivamente)

Figura 3.16 – Aspeto dos materiais encontrados nos poços de amostragem P3 e P4 (à direita e à esquerda, respetivamente)

Figura 3.17 – Carotes C1, C2 e C3 (à direita, ao centro e à esquerda, respetivamente)

Figura 3.18 – Carotes C4, C5 e C6 (à direita, ao centro e à esquerda, respetivamente)

Figura 3.19 – Carotes C7 e C8 (à direita e à esquerda, respetivamente)

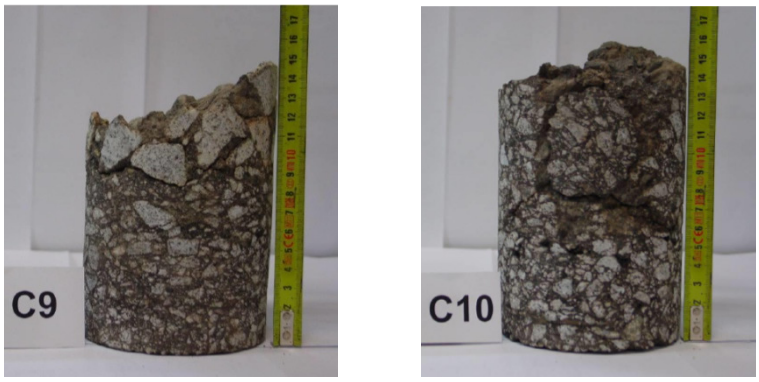


Figura 3.20 – Carotes C9 e C10 (à direita e à esquerda, respetivamente)

3.6 Tráfego

O tráfego rodoviário é um dos fatores mais preponderantes a considerar no dimensionamento de qualquer tipo de pavimento, tornando-se essencial para a avaliação do seu comportamento ao longo da sua vida útil.

Usualmente, através de contagens e de modelos previsionais de tráfego, é possível aferir o tráfego médio diário anual de veículos (TMDA), por categoria de veículo no ano de abertura da estrada, o qual no presente caso, corresponderá à entrada em serviço do pavimento existente após o reforço.

É igualmente possível determinar a respetiva taxa de crescimento do tráfego, e por sua vez, calcular o tráfego no ano horizonte, o qual, dado se estar perante o dimensionamento de um reforço, prevê-se que seja dez anos após a entrada em serviço. Em estudos relativos a reabilitação de pavimentos, é usualmente este o período de dimensionamento recomendado.

As previsões de tráfego de veículos ligeiros e pesados consideradas para a estrada em estudo, nos anos de entrada em serviço (2015) e horizonte (2025), encontram-se apresentadas nas Tabelas 3.11 e 3.12.

Tabela 3.11 – Tráfego no ano de entrada em serviço (2015)

Sub-lanço		**Extensão (km)**	**Ano de entrada em serviço - 2015**								
Origem	**Destino**		**Ligeiros**				**Pesados**				**TMDA**
			Diurno (07-20)	*Entard. (20-23)*	*Noturno (23-07)*	*Total*	*Diurno (07-20)*	*Entard. (20-23)*	*Noturno (23-07)*	*Total*	
63+017	77+917	14.900	6 484	984	740	8 208	199	17	37	253	8 461
77+917	82+360	4.443	5 356	813	612	6 781	197	22	63	282	7 063
82+360	82+960	0.600	10 446	1 586	1 191	13 223	285	32	91	408	13 631
82+960	83+460	0.500	20 633	3 134	2 351	26 118	373	42	118	533	26 651
		20.443	**6 701**	**1 017**	**765**	**8 483**	**205**	**19**	**46**	**271**	**8 754**

Tabela 3.12 – Tráfego no ano horizonte (2025)

Sub-lanço		**Extensão (km)**	**Ano horizonte - 2025**								
Origem	**Destino**		**Ligeiros**				**Pesados**				**TMDA**
			Diurno (07-20)	*Entard. (20-23)*	*Noturno (23-07)*	*Total*	*Diurno (07-20)*	*Entard. (20-23)*	*Noturno (23-07)*	*Total*	
63+017	77+917	14.900	7 147	1 084	815	9 046	215	18	40	273	9 319
77+917	82+360	4.443	5 904	896	674	7 474	213	23	68	304	7 778
82+360	82+960	0.600	11 515	1 748	1 312	14 575	308	34	98	440	15 015
82+960	83+460	0.500	22 745	3 454	2 591	28 790	403	45	127	575	29 365
		20.443	**7 387**	**1 121**	**842**	**9 350**	**222**	**20**	**50**	**292**	**9 642**

Em termos de enquadramento nacional, deve referir-se que a EP - Estradas de Portugal prevê a subdivisão dos veículos automóveis em onze categorias, seis das quais, correspondem a veículos pesados com diferente número e tipologia de eixos (Tabela 3.13). Por sua vez, a legislação nacional através do Decreto-Lei n.º 133/2010 de 22 de Dezembro, subdivide as seis categorias de veículos pesados em 15 subcategorias.

Para efeitos de dimensionamento de pavimentos rodoviários, apenas as categorias respeitantes ao tráfego de veículos pesados têm significado, considerando-se que todas as restantes solicitam as estruturas com ações que se podem desprezar.

Uma das maiores dificuldades na avaliação do tráfego advém da diversidade do tipo de veículos que circulam na rede rodoviária, pelo que, para fins de dimensionamento, é usual proceder-se à transformação dos respetivos valores, num número equivalente de eixos simples, os quais se designam de eixos padrão.

Relembrando conceitos da especialidade, entende-se por eixo padrão, um eixo do qual se conhece a carga e configuração e, inerentemente, a área e pressão de contacto no interface pneu/pavimento, permitindo assim analisar a ação por ele induzida nas estruturas a dimensionar.

Tabela 3.13 – Classificação dos veículos automóveis segundo a EP - Estradas de Portugal

CATEGORIA	DESCRIÇÃO
Velocípedes – categorias a+b	
a	Velocípedes sem motor auxiliar
b	Velocípedes com motor auxiliar
Ligeiros – categorias c+d+e	
c	Motociclos com ou sem "sidecar"
d	Automóveis com ou sem reboque incluindo, os veículos comportando o máximo de 9 lugares
e	Camionetas até 3000kg de carga com ou sem reboque
Pesados – categorias f+g+h+i+j+k	
f	Camiões com mais de 3000 kg sem reboque
g	Camiões com um ou mais reboques
h	Tratores com semirreboque Tratores com semirreboque e um ou mais reboques Tratores com um ou mais reboques
i	Autocarros e trolleybus
j	Tratores agrícolas
k	Tratores sem reboque ou semirreboque e veículos especiais (cilindros, bulldozers, etc.)

Uma das dificuldades na transformação do número de veículos pesados em número de eixos padrão, usualmente deriva da ausência de elementos relativos ao tipo de veículos pesados e às cargas por eixo respetivas, ou seja, do seu espetro de cargas.

De forma a ultrapassar esta dificuldade, a EP - Estradas de Portugal através de estudos específicos efetuados na rede rodoviária nacional, estabeleceu para determinados volumes de tráfego (classes de tráfego), uma estimativa do valor de cargas médias dos eixos solicitantes de veículos pesados, possibilitando assim a relação entre o número de veículos pesados e o número de eixos padrão. Definiu-se assim o conceito de fator de agressividade.

A EP define na sua publicação "*Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional"* (JAE, 1995), para cada classe de tráfego, o respetivo fator de agressividade, que

permite a transformação do tráfego médio diário anual de veículos pesados ($TMDA_p$) em eixos padrão de 80 kN ou de 130 kN (Tabela 3.14).

Tabela 3.14 – Fatores de agressividade para transformação em eixos padrão de 80 kN considerados pela EP – Estradas de Portugal

Classe de Tráfego	**TMDAp**	**Pavimentos Flexíveis** **Fator de Agressividade (N_{80})**
T_7	< 50	estudo específico
T_6	50 - 150	2
T_5	150 - 300	3
T_4	300 - 500	4
T_3	500 - 800	4,5
T_2	800 - 1200	5
T_1	1200 - 2000	5,5
T_0	> 2000	estudo específico
TMDAp – tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura, por sentido e na via mais solicitada;		
N_{80} – número acumulado de eixos padrão de 80 kN.		

O eixo padrão de carregamento que será considerado nas análises estruturais a efetuar no presente estudo, é o eixo padrão de 80 kN. O eixo padrão de 80 kN é composto por um eixo simples, com um par de rodados em cada extremo, transmitindo uma carga total ao pavimento de 80 kN, ou seja, uma carga por roda de valor 20 kN (Figura 3.21).

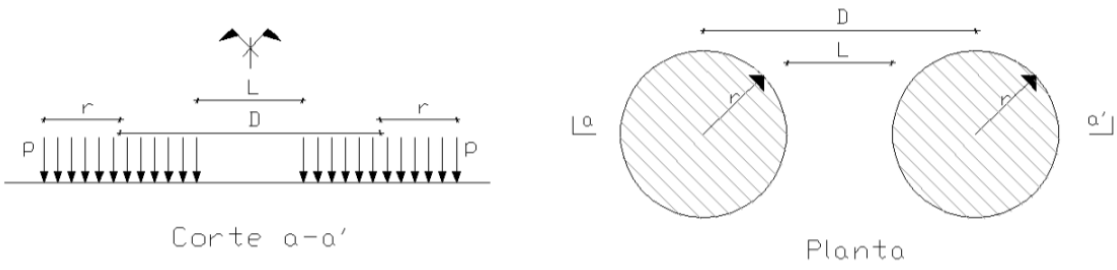


Figura 3.21 – Caracterização geométrica do eixo padrão de 80 kN

Segundo o método de cálculo empírico-mecanicista preconizado pela Shell (Claessen et al, 1977), os parâmetros conducentes a um eixo padrão de 80 kN, são os seguintes:

- r – raios das cargas ≈ 105 mm
- L – distância entre cargas = 105 mm
- p – pressão de contato (pressão de enchimento dos pneus) = 577,4 kPa
- D – comprimento do eixo, igual a duas vezes o "r" mais o "L", perfazendo o total de 315 mm.

O número acumulado de eixos padrão no ano horizonte é dado pela seguinte expressão:

$$N_{80} = 365 \times TMDAp \times C \times F \times p \quad (3.4)$$

em que,

- N_{80} – número acumulado de eixos padrão no ano horizonte;
- TMDAp - tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura;
- p – período de dimensionamento;
- F – fator de agressividade;
- C – fator de crescimento, o qual considera o período de dimensionamento (p) e uma taxa média de crescimento anual do tráfego (t).

O fator de crescimento, C, é dado pela seguinte expressão:

$$C = \frac{(1+t)^p - 1}{p * t} \quad (3.5)$$

Com base nas expressões anteriores, transformaram-se os dados relativos ao tráfego de veículos pesados, para cada sublanço, em números acumulados de eixos padrão de 80 kN no ano horizonte, considerando o período de dimensionamento (p) de 10 anos. Os dados apresentam-se na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Tráfego representado em número acumulado de eixos padrão de 80 kN

Sub-lanço	Tráfego Ano Abertura (2015) TMDAp	Tráfego Ano Horizonte (2025) TMDAp	Taxa de Crescimento (%)	Classe de Tráfego / Fator de Agressividade		Fator de Crescimento (C)	N_{80}
63+017 ao 77+917	253	273	1,680%	T5	3	1,079	2.99×10^6
77+917 ao 82+360	282	304	1,658%	T5	3	1,078	$3,33 \times 10^6$
82+360 ao 82+960	408	440	1,670%	T4	4	1,079	$6,42 \times 10^6$
82+960 ao 83+460	533	575	1,675%	T3	4.5	1,079	$9,44 \times 10^6$

3.7 Condições Climáticas

Tratando-se o presente estudo dum reforço de pavimentos flexíveis, e sendo o módulo de rigidez das misturas betuminosas fortemente dependente da temperatura a que as mesmas se encontram em serviço, torna-se fundamental para a avaliação do comportamento das estruturas efetuar uma análise das condições climatológicas da região.

Localizando-se a via em análise no distrito de Braga, recorreu-se às temperaturas do ar constantes nas normais climatológicas do IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera, considerando-se os dados disponíveis, relativos ao período 1971/2000, no cálculo das temperaturas de serviço (Figura 3.22 e Tabela 3.16).

O efeito da temperatura do ar no comportamento das misturas betuminosas passa pela determinação da temperatura de serviço das mesmas, a qual por sua vez, é calculada através da consideração de uma temperatura equivalente anual para o pavimento.

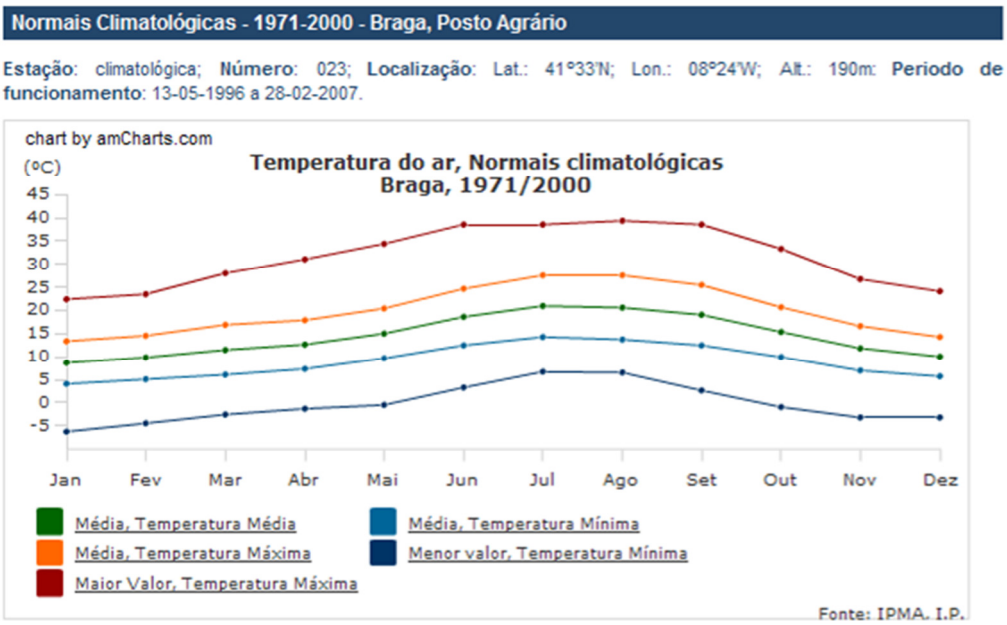


Figura 3.22 – Gráfico das Normais Climatológicas – Braga – período 1971/2000 (fonte: IPMA)

Tabela 3.16 – Normais Climatológicas – Braga – 1971/2000 (fonte: IPMA)

Mês	**Temperatura Média Mensal do ar (°C)**	**Média das Temperaturas Máximas do ar (°C)**	**Média das Temperaturas Mínimas do ar (°C)**	**Temperatura Máxima Absoluta do ar (°C)**	**Temperatura Mínima Absoluta do ar (°C)**
Janeiro	8.7	13.4	4.1	22.4	-6.3
Fevereiro	9.8	14.5	5.1	23.5	-4.5
Março	11.5	16.9	6.1	28.0	-2.6
Abril	12.6	17.9	7.3	31.0	-1.3
Maio	15.0	20.4	9.7	34.4	-0.5
Junho	18.6	24.6	12.5	38.5	3.3
Julho	20.9	27.5	14.3	38.5	6.7
Agosto	20.6	27.5	13.7	39.3	6.5
Setembro	19.0	25.4	12.5	38.5	2.6
Outubro	15.3	20.7	9.9	33.3	-1.0
Novembro	11.8	16.6	7.0	26.7	-3.2
Dezembro	10.0	14.3	5.7	24.1	-3.2
Média	14.5	20.0	9.0	31.5	-0.3

O procedimento que se irá apresentar para a obtenção das referidas temperaturas é o preconizado pela metodologia da Shell (Claessen et. al., 1977), o qual propõe o cálculo da temperatura média mensal ponderada do ar (TMMA) através da aplicação de fatores de ponderação às temperaturas médias mensais do ar.

Para tal, a Shell propõe um ábaco (Figura 3.23) que permite, através das temperaturas médias mensais do ar, obter fatores de ponderação mensais. Através da média dos fatores de ponderação mensais, designado de fator de ponderação médio anual, e recorrendo novamente ao mesmo ábaco (Figura 3.23), é possível obter a temperatura média mensal ponderada do ar (TMMA), conforme ilustrado na Tabela 3.17. Em alternativa à Figura 3.23, pode utilizar-se a expressão 3.6 proposta por Pais (2012).

$$w = 0{,}0723 \times e^{0{,}1296 \times TMMA} \tag{3.6}$$

em que,

- w – fator de ponderação;
- e – número neperiano;
- TMMA – temperatura média mensal.

Com base nas normais climatológicas relativas ao distrito de Braga obteve-se um fator de ponderação médio anual de 0,59, o qual por sua vez, corresponde à temperatura média mensal ponderada do ar de 15,5 °C.

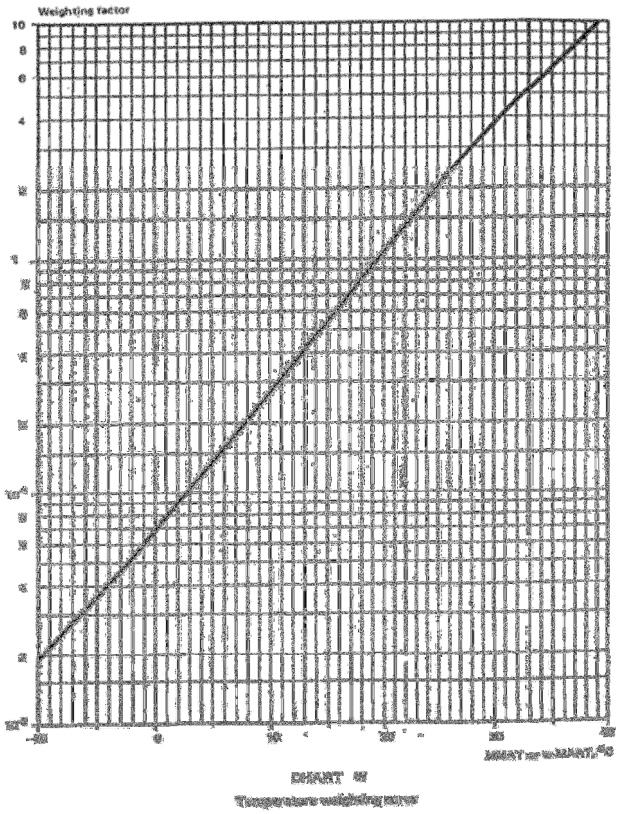


Figura 3.23 – Gráfico representativo da curva de ponderação de temperaturas (Shell)

Tabela 3.17 – Fatores de ponderação mensais e temperatura média mensal ponderada do ar (TMMA), obtidos com base nas Normais Climatológicas – Braga – 1971/2000.

Mês	**Temperatura Média Mensal do ar (°C)**	**Fator de Ponderação Mensal (W)**
Janeiro	8.7	0.24
Fevereiro	9.8	0.26
Março	11.5	0.34
Abril	12.6	0.38
Maio	15.0	0.54
Junho	18.6	0.88
Julho	20.9	1.20
Agosto	20.6	1.10
Setembro	19.0	0.94
Outubro	15.3	0.56
Novembro	11.8	0.36
Dezembro	10.0	0.27
Média	*14.5*	*0.59*

TMMA - Temperatura média mensal ponderada do ar (°C)
15.5

Utilizando o ábaco proposto pela Shell, apresentado na Figura 3.24, é possível estabelecer a relação entre a temperatura média mensal ponderada do ar, (TMMA) com a temperatura de serviço de uma mistura betuminosa, consoante a profundidade acumulada a que esta se encontra.

Em alternativa, a temperatura de serviço das misturas betuminosas poderá ser calculada de forma analítica, através de uma fórmula proposta pela Universidade do Minho (Pais, 2012), traduzida pela seguinte expressão:

$$T_{Serv.} = TMMA \times \left[1{,}127 + \frac{0{,}581}{3{,}850 \times z + 1{,}235}\right] \tag{3.7}$$

em que,

- $T_{Serv.}$ – temperatura de serviço da mistura betuminosa (°C);
- TMMA – temperatura média mensal ponderada do ar (°C);
- z – profundidade acumulada da camada, até metade da sua espessura (m).

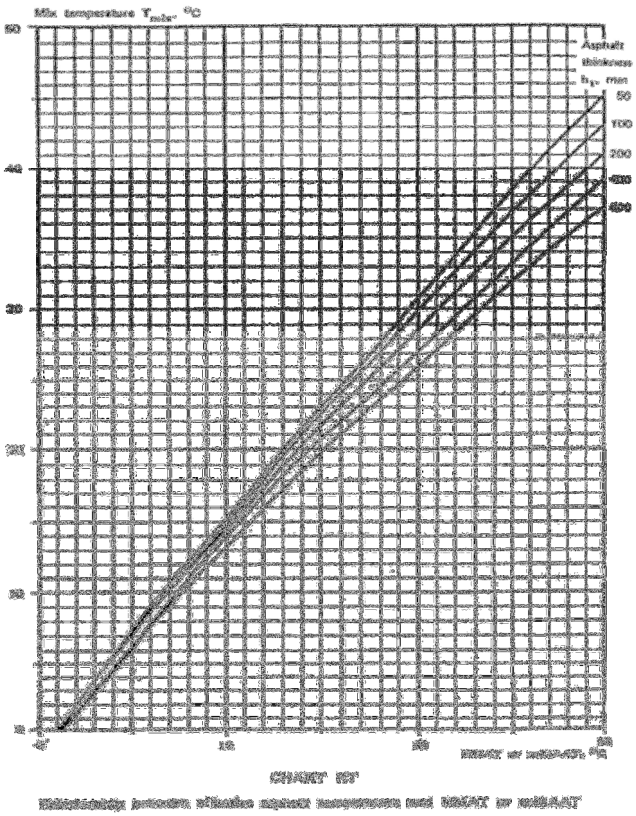


Figura 3.24 – Gráfico que relaciona a temperatura média mensal ponderada do ar (TMMA) com a temperatura de serviço de misturas betuminosas

Seguidamente, na Tabela 3.18, apresenta-se o resumo da temperatura de serviço das camadas betuminosas a utilizar nas soluções de reforço, as quais foram calculadas pelo procedimento exposto.

Tabela 3.18 – Temperaturas de Serviço das camadas betuminosas a utilizar em reforço

Camada de Reforço	TMMA (ºC)	Zacum (m)	$T_{SERV.}$ (ºC)
AC14 surf 50/70 (BB) - 5 cm	15.5	0.025	24.23
AC20 bin 50/70 (MB) - 9 cm	15.5	0.095	23.09
AC20 bin 50/70 (MB) - 11 cm	15.5	0.100	22.96

4 Caso de Estudo – Dimensionamento do Reforço de Pavimentos

4.1 Considerações Gerais

O objetivo do presente capítulo é proceder ao dimensionamento do reforço da estrutura de pavimentos presentes ao longo da via a beneficiar, entre o km 63+017 e o km 83+460.

Dos três métodos de dimensionamento explanados no Capítulo 2, adotar-se-á o Método das Deflexões Reversíveis, pois trata-se de um método em que existe larga experiência para o fim a que se destina, permitindo um elevado grau de detalhe dos diversos parâmetros intervenientes.

Conforme já referido em capítulo anterior, da definição de trechos homogéneos resultaram duas zonas de dimensionamento, nomeadamente as seguintes:

- Zona 1 – entre o km 63+017 e o km 79+000;
- Zona 2 – entre o km 79+000 e o km 83+460.

O objetivo do dimensionamento é definir uma solução de reforço para cada uma das zonas referidas, analisando-se de forma detalhada a realidade constante em cada uma delas, nomeadamente, a constituição e a condição das estruturas de pavimento existentes.

Conforme já referido anteriormente, relembra-se que da inspeção visual em contínuo efetuada no local, verificou-se uma elevada percentagem de fendilhamento (Tabela 3.1).

Deve referir-se igualmente que, aquando da extração de carotes, propositadamente efetuou-se a mesma em zonas em que o pavimento se encontrava fendilhado, de forma a identificar as profundidades de fendilhamento (Tabela 3.10). Verificou-se que na generalidade as camadas betuminosas se encontravam fendilhadas em toda a sua espessura.

O estado em que o pavimento se encontra, com um elevado grau de fendilhamento, acarreta uma preocupação acrescida no dimensionamento do reforço das estruturas existentes.

Tal situação, se não for devidamente acautelada na definição das soluções, poderá originar a ruína precoce das estruturas de reforço devido a fenómenos de reflexão de fendas. Ou seja, estando a camada de reforço perfeitamente ligada ao pavimento existente, conforme é pretendido, as fendas do pavimento existente, tendencialmente ascendem à camada de reforço.

De forma a evitar esta situação dever-se-á portanto tomar medidas para que tal não aconteça. A solução extrema seria remover a totalidade da espessura de camadas betuminosas fendilhadas, aproveitando-se apenas a restante parte da estrutura, contudo, tal solução evita-se por motivos económicos e ambientais.

Como alternativa, apresentam-se algumas das soluções que poderão ser utilizadas, em separado ou conjuntamente, para evitar ou retardar a reflexão de fendas:

- Fresagem, em determinada espessura, da camada betuminosa fendilhada;
- Selagem de fendas existentes com lama asfáltica (slurry-seal), microaglomerado a frio, revestimentos superficiais betuminosos, entre outros;
- Aplicação de membrana anti propagação de fendas do tipo SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer);
- Grelhas de reforço em fibra de vidro ou em fibra de carbono.

O propósito do presente trabalho não se centra na problemática anteriormente descrita, pelo que, não se dará um realce preponderante a esta situação. Contudo, de forma a conceder veracidade ao caso em estudo, optou-se por se considerar a fresagem das camadas betuminosas existentes, numa espessura mínima de 6 centímetros.

Por fim, resta referir que o dimensionamento desenvolver-se-á nas seguintes fases:

- Caracterização mecânica do pavimento existente e da fundação (retroanálise);
- Caracterização mecânica das camadas de reforço (Metodologia Shell);
- Critérios de dimensionamento;
- Definição das soluções de reforço.

4.2 Caracterização mecânica do pavimento existente e da fundação (retroanálise)

4.2.1 Introdução

A caracterização mecânica das estruturas de pavimento existentes e respetivas fundações será efetuada com base num procedimento de retroanálise.

Tendo o conhecimento das camadas que compõem as estruturas, através dos ensaios destrutivos (abertura de poços e extração de carotes) e, utilizando os resultados obtidos pelos ensaios de carga (FWD), é possível através de um programa de cálculo do estado de tensão-deformação, induzir uma carga igual à utilizada no ensaio (FWD) e, por aproximação, obter bacias de deflexão semelhantes às bacias de deflexão dos pontos ensaiados.

O programa utilizado para se proceder à retroanálise foi o programa "*JPavBack – Computer program for backanalysis of road pavements*" (Pais, J.C., Universidade do Minho), daqui em diante designado por JPavBack.

Uma possibilidade de se efetuar a retroanálise é identificar o defletograma característico mais desfavorável (maiores deflexões), correspondente à zona de dimensionamento e via em estudo. Entenda-se como defletograma característico o defletograma correspondente ao percentil 85.

Com base nesse defletograma e utilizando valores médios relativamente à espessura das camadas, obtém-se por retroanálise os respetivos módulos de rigidez das mesmas.

Como os resultados dos poços e carotes revelaram uma grande heterogeneidade ao nível de materiais e espessuras, entendeu-se como mais prudente e fiável, analisar-se os pontos ensaiados com defletómetro de impacto (FWD), próximos ou coincidentes com a localização dos poços e carotes, utilizando na retroanálise a espessura exata dada pelos mesmos.

Tal situação não impediu que se fizesse uma análise crítica comparativa dos defletogramas dos pontos de ensaio com os respetivos defletogramas característicos.

Passa-se em seguida a expor a retroanálise efetuada para cada uma das zonas (Zona 1 e Zona 2) e para cada via (Direita e Esquerda).

4.2.2 Retroanálise – Zona 1 – Via Direita (norte-sul)

A retroanálise da via direita da Zona 1 teve em consideração cinco pontos de ensaio, conforme seguidamente se apresenta:

a) <u>Ponto de ensaio ao Pk 64+902 (próximo do carote C1)</u>

a1) Amostragem dada pelos ensaios destrutivos realizados:

- Carote C1 – Camadas Betuminosas com espessura total de 21 cm;
- Poço P2 – Camada Granular 1 com espessura de 12 cm;
  – Camada Granular 2 com espessura de 32 cm.

a2) Deflexões medidas com defletómetro de impacto (FWD):

Medição (FWD) - Ponto de ensaio ao Pk 64+902 (Via Direita)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (μm)	1200	793	600	457	263	169	120	95	78

a3) Quadro resumo das camadas e suas características mecânicas (retroanálise):

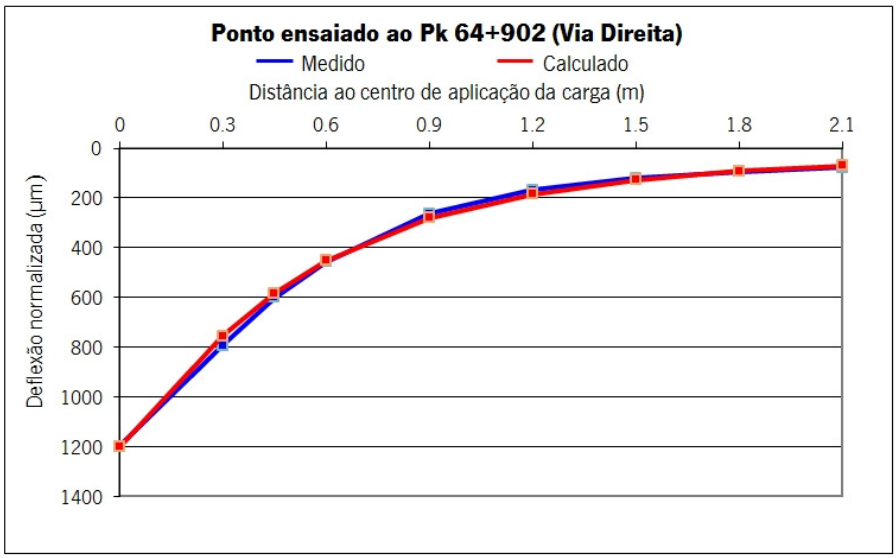
Tipo de Material	**Espessura (cm)**	**Módulo de Rigidez E_{FWD} (MPa)**	**Coef. Poisson**	**Temp. FWD (ºC)**
Betuminoso	21	750	0.35	17.4
Granular 1	12	85	0.35	-
Granular 2	32	70	0.35	-
Fundação	∞	50	0.35	-

a4) Deflexões calculadas:

Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (μm)	1201.0	755.0	583.0	452.0	281.0	184.0	127.0	92.0	70.0

a5) Bacias de deflexão – Medido (FWD) e Calculado:

Sensores Distância (m)	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
	0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
Medido (µm)	1200	793	600	457	263	169	120	95	78
Calculado (µm)	1201.0	755.0	583.0	452.0	281.0	184.0	127.0	92.0	70.0
Erro (µm)	1.0	-38.0	-17.0	-5.0	18.0	15.0	7.0	-3.0	-8.0
Erro (%)	0.1%	-4.8%	-2.8%	-1.1%	6.8%	8.9%	5.8%	-3.2%	-10.3%



b) Ponto de ensaio ao Pk 67+698 (próximo do poço P2)

b1) Amostragem dada pelos ensaios destrutivos executados:

- Poço P2 – Camadas Betuminosas com espessura total de 22 cm;
  – Camada Granular 1 com espessura de 12 cm;
  – Camada Granular 2 com espessura de 32 cm

b2) Deflexões medidas com defletómetro de impacto (FWD):

Medição (FWD) - Ponto de ensaio ao Pk 67+698 (Via Direita)									
Sensores Distância (mm)	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	474	398	354	309	230	173	129	100	79

b3) Quadro resumo das camadas e suas características mecânicas (retroanálise):

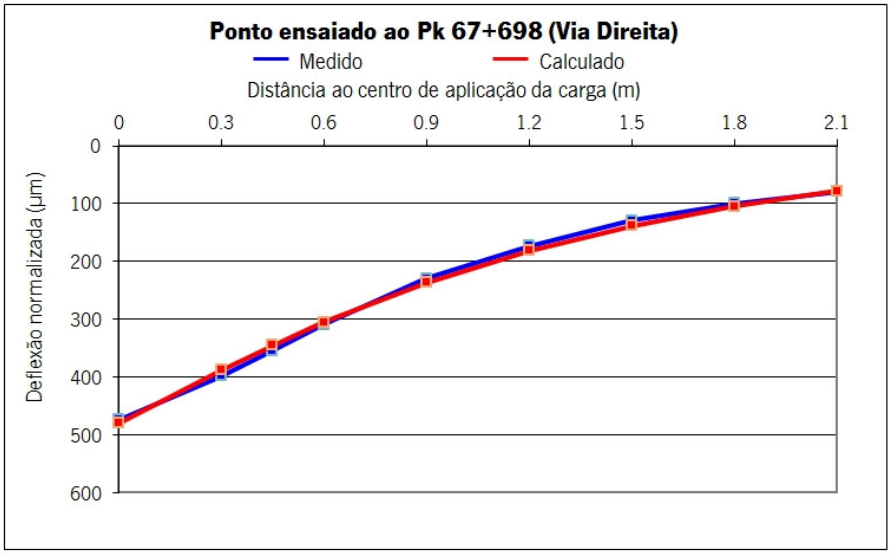
Tipo de Material	Espessura (cm)	Módulo de Rigidez E_{FWD} (MPa)	Coef. Poisson	Temp. FWD (ºC)
Betuminoso	22	3900	0.35	17.4
Granular 1	12	600	0.35	-
Granular 2	32	200	0.35	-
Fundação	∞	50	0.35	-

b4) Deflexões calculadas:

Cálculo (retroanálise) - Ponto de ensaio ao Pk 67+698 (Via Direita)									
Sensores Distância (mm)	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	480.0	388.0	345.0	305.0	237.0	182.0	139.0	105.0	78.0

b5) Bacias de deflexão – Medido (FWD) e Calculado:

Sensores Distância (m)	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
	0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
Medido (µm)	474	398	354	309	230	173	129	100	79
Calculado (µm)	480.0	388.0	345.0	305.0	237.0	182.0	139.0	105.0	78.0
Erro (µm)	6.0	-10.0	-9.0	-4.0	7.0	9.0	10.0	5.0	-1.0
Erro (%)	1.3%	-2.5%	-2.5%	-1.3%	3.0%	5.2%	7.8%	5.0%	-1.3%



c) Ponto de ensaio ao Pk 67+854 (próximo do poço P2)

c1) Amostragem dada pelos ensaios destrutivos executados:

- Poço P2 – Camadas Betuminosas com espessura total de 22 cm;
  – Camada Granular 1 com espessura de 12 cm;
  – Camada Granular 2 com espessura de 32 cm.

c2) Deflexões medidas com defletómetro de impacto (FWD):

Medição (FWD) - Ponto de ensaio ao Pk 67+854 (Via Direita)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (μm)	1210	805	592	445	255	167	119	99	81

c3) Quadro resumo das camadas e suas características mecânicas (retroanálise):

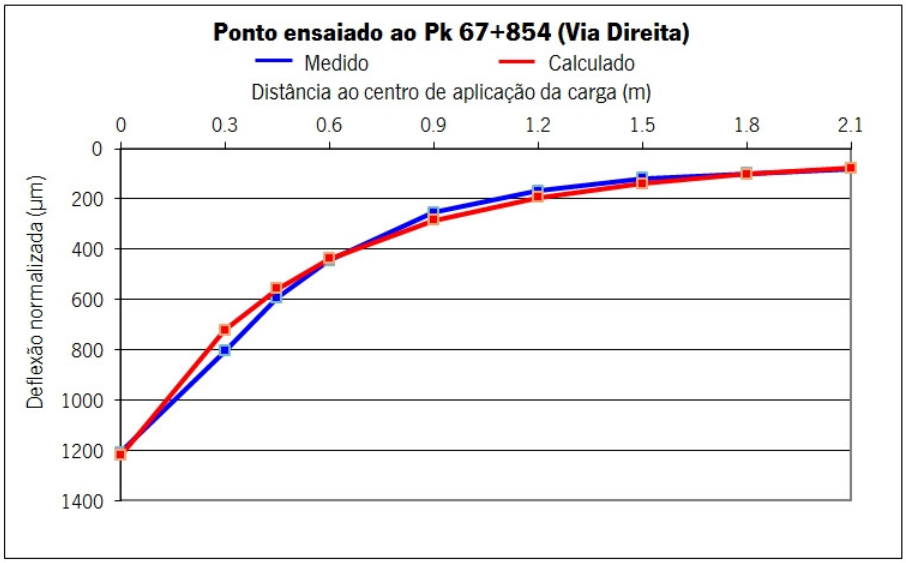
Tipo de Material	**Espessura (cm)**	**Módulo de Rigidez E_{FWD} (MPa)**	**Coef. Poisson**	**Temp. FWD (ºC)**
Betuminoso	22	570	0.35	17.4
Granular 1	12	100	0.35	-
Granular 2	32	90	0.35	-
Fundação	∞	50	0.35	-

c4) Deflexões calculadas:

Cálculo (retroanálise) - Ponto de ensaio ao Pk 67+854 (Via Direita)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (μm)	1221.0	722.0	558.0	439.0	285.0	195.0	139.0	102.0	77.0

c5) Bacias de deflexão – Medido (FWD) e Calculado:

Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (m)	0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
Medido (µm)	1210	805	592	445	255	167	119	99	81
Calculado (µm)	1221.0	722.0	558.0	439.0	285.0	195.0	139.0	102.0	77.0
Erro (µm)	11.0	-83.0	-34.0	-6.0	30.0	28.0	20.0	3.0	-4.0
Erro (%)	0.9%	-10.3%	-5.7%	-1.3%	11.8%	16.8%	16.8%	3.0%	-4.9%



d) <u>Ponto de ensaio ao Pk 71+853 (próximo do carote C4)</u>

d1) Amostragem dada pelos ensaios destrutivos executados:

- Carote C4 – Camadas Betuminosas com espessura total de 17 cm;
- Poço P2 – Camada Granular 1 com espessura de 12 cm;
  – Camada Granular 2 com espessura de 32 cm.

d2) Deflexões medidas com defletómetro de impacto (FWD):

Medição (FWD) - Ponto de ensaio ao Pk 71+853 (Via Direita)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	1091	726	541	407	239	170	127	102	84

d3) Quadro resumo das camadas e suas características mecânicas (retroanálise):

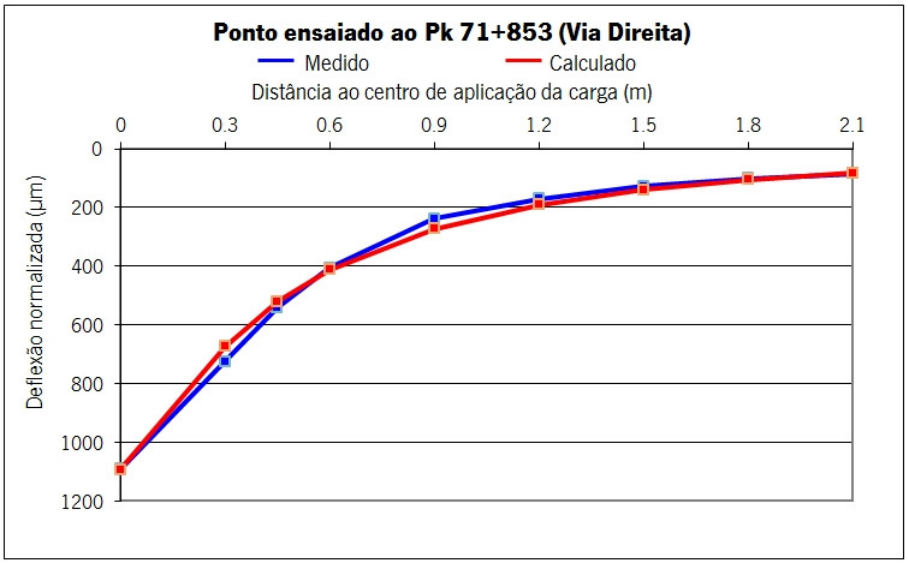
Tipo de Material	Espessura (cm)	Módulo de Rigidez E_{FWD} (MPa)	Coef. Poisson	Temp. FWD (ºC)
Betuminoso	17	900	0.35	17.4
Granular 1	12	140	0.35	-
Granular 2	32	120	0.35	-
Fundação	∞	50	0.35	-

d4) Deflexões calculadas:

Cálculo (retroanálise) - Ponto de ensaio ao Pk 71+853 (Via Direita)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	1094.0	675.0	521.0	413.0	274.0	192.0	140.0	105.0	82.0

d5) Bacias de deflexão – Medido (FWD) e Calculado:

Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (m)	0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
Medido (µm)	1091	726	541	407	239	170	127	102	84
Calculado (µm)	1094.0	675.0	521.0	413.0	274.0	192.0	140.0	105.0	82.0
Erro (µm)	3.0	-51.0	-20.0	6.0	35.0	22.0	13.0	3.0	-2.0
Erro (%)	0.3%	-7.0%	-3.7%	1.5%	14.6%	12.9%	10.2%	2.9%	-2.4%



e) Ponto de ensaio ao Pk 75+649 (próximo do carote C6)

e1) Amostragem dada pelos ensaios destrutivos executados:

- Carote C6 – Camadas Betuminosas com espessura total de 16 cm;
- Poço P2 – Camada Granular 1 com espessura de 12 cm;
  – Camada Granular 2 com espessura de 32 cm.

e2) Deflexões medidas com defletómetro de impacto (FWD):

Medição (FWD) - Ponto de ensaio ao Pk 75+649 (Via Direita)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	1315	1022	838	680	451	302	207	151	119

e3) Quadro resumo das camadas e suas características mecânicas (retroanálise):

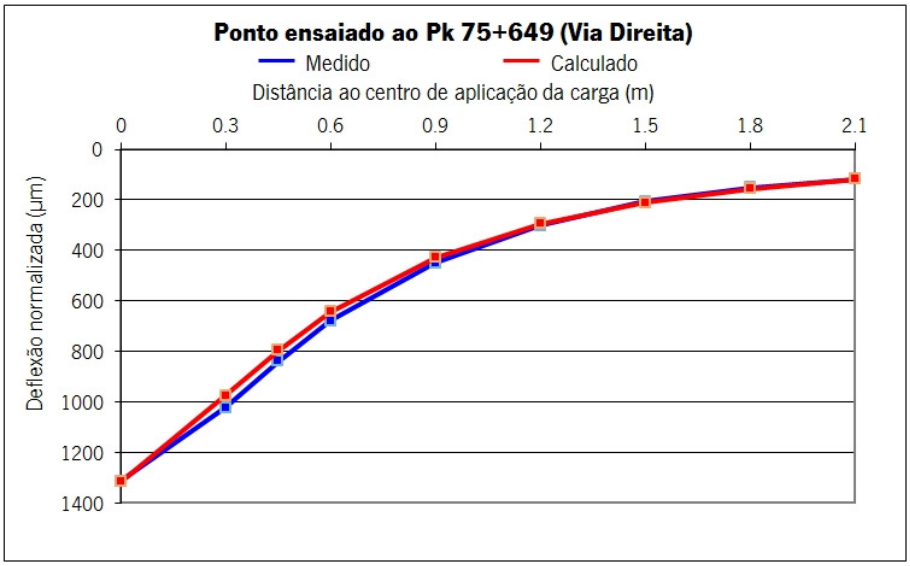
Tipo de Material	**Espessura (cm)**	**Módulo de Rigidez E_{FWD} (MPa)**	**Coef. Poisson**	**Temp. FWD (ºC)**
Betuminoso	16	1900	0.35	17.4
Granular 1	12	100	0.35	-
Granular 2	32	50	0.35	-
Fundação	∞	40	0.35	-

e4) Deflexões calculadas:

Cálculo (retroanálise) - Ponto de ensaio ao Pk 75+649 (Via Direita)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	1316.0	976.0	795.0	644.0	428.0	294.0	210.0	156.0	119.0

e5) Bacias de deflexão – Medido (FWD) e Calculado:

Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (m)	0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
Medido (µm)	1315	1022	838	680	451	302	207	151	119
Calculado (µm)	1316.0	976.0	795.0	644.0	428.0	294.0	210.0	156.0	119.0
Erro (µm)	1.0	-46.0	-43.0	-36.0	-23.0	-8.0	3.0	5.0	0.0
Erro (%)	0.1%	-4.5%	-5.1%	-5.3%	-5.1%	-2.6%	1.4%	3.3%	0.0%



4.2.3 Retroanálise – Zona 1 – Via Esquerda (sul-norte)

f) <u>Ponto de ensaio ao Pk 63+680 (próximo do poço P1)</u>

f1) Amostragem dada pelos ensaios destrutivos executados:

- Poço P1 – Camadas Betuminosas com espessura total de 16 cm;
  – Camada Granular 1 com espessura de 14 cm;
  – Camada Granular 2 com espessura de 30 cm.

f2) Deflexões medidas com defletómetro de impacto (FWD):

Medição (FWD) - Ponto de ensaio ao Pk 63+680 (Via Esquerda)									
Sensores Distância (mm)	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	1155	876	675	508	323	216	162	133	112

f3) Quadro resumo das camadas e suas características mecânicas (retroanálise):

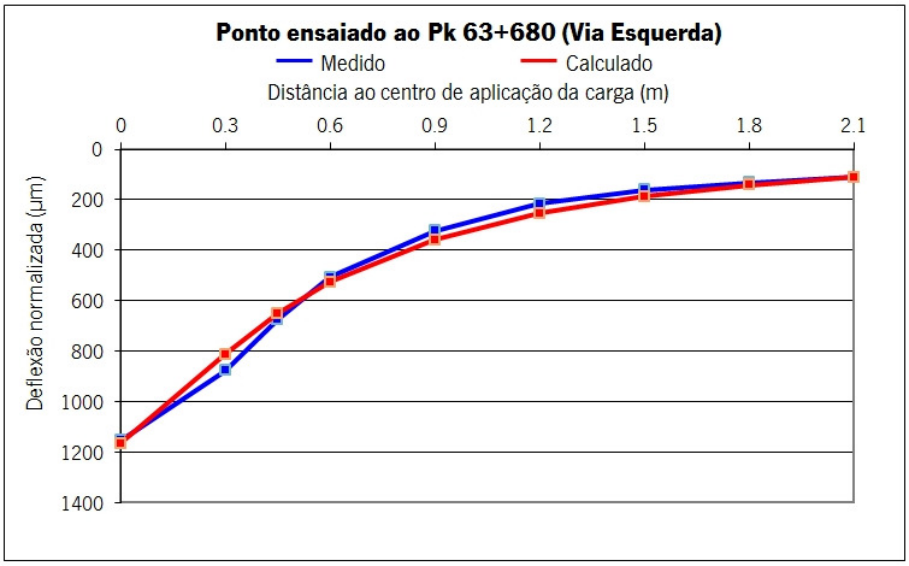
Tipo de Material	**Espessura (cm)**	**Módulo de Rigidez E_{FWD} (MPa)**	**Coef. Poisson**	**Temp. FWD (ºC)**
Betuminoso	16	1500	0.35	15.0
Granular 1	14	110	0.35	-
Granular 2	30	100	0.35	-
Fundação	∞	40	0.35	-

f4) Deflexões calculadas:

Cálculo (retroanálise) - Ponto de ensaio ao Pk 63+680 (Via Esquerda)									
Sensores Distância (mm)	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	1167.0	813.0	651.0	526.0	358.0	254.0	187.0	142.0	111.0

f5) Bacias de deflexão – Medido (FWD) e Calculado:

Sensores Distância (m)	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
	0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
Medido (µm)	1155	876	675	508	323	216	162	133	112
Calculado (µm)	1167.0	813.0	651.0	526.0	358.0	254.0	187.0	142.0	111.0
Erro (µm)	12.0	-63.0	-24.0	18.0	35.0	38.0	25.0	9.0	-1.0
Erro (%)	1.0%	-7.2%	-3.6%	3.5%	10.8%	17.6%	15.4%	6.8%	-0.9%



g) Ponto de ensaio ao Pk 66+879 (próximo do carote C2)

g1) Amostragem dada pelos ensaios destrutivos executados:

- Carote C2 – Camadas Betuminosas com espessura total de 16 cm;
- Poço P1 – Camada Granular 1 com espessura de 14 cm;
  – Camada Granular 2 com espessura de 30 cm.

g2) Deflexões medidas com defletómetro de impacto (FWD):

Medição (FWD) - Ponto de ensaio ao Pk 66+879 (Via Esquerda)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	1344	948	714	546	329	222	155	118	97

g3) Quadro resumo das camadas e suas características mecânicas (retroanálise):

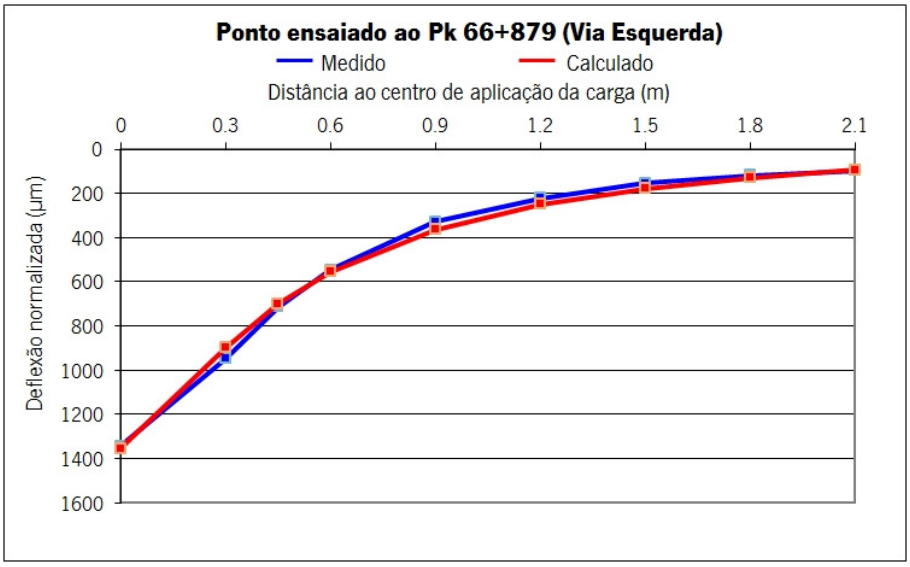
Tipo de Material	**Espessura (cm)**	**Módulo de Rigidez E_{FWD} (MPa)**	**Coef. Poisson**	**Temp. FWD (ºC)**
Betuminoso	16	1100	0.35	15.0
Granular 1	14	90	0.35	-
Granular 2	30	85	0.35	-
Fundação	∞	40	0.35	-

g4) Deflexões calculadas:

Cálculo (retroanálise) - Ponto de ensaio ao Pk 66+879 (Via Esquerda)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	1355.0	899.0	701.0	554.0	363.0	250.0	178.0	129.0	95.0

g5) Bacias de deflexão – Medido (FWD) e Calculado:

Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (m)	0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
Medido (µm)	1344	948	714	546	329	222	155	118	97
Calculado (µm)	1355.0	899.0	701.0	554.0	363.0	250.0	178.0	129.0	95.0
Erro (µm)	11.0	-49.0	-13.0	8.0	34.0	28.0	23.0	11.0	-2.0
Erro (%)	0.8%	-5.2%	-1.8%	1.5%	10.3%	12.6%	14.8%	9.3%	-2.1%



h) <u>Ponto de ensaio ao Pk 69+281 (próximo do carote C3)</u>

h1) Amostragem dada pelos ensaios destrutivos executados:

- Carote C3 – Camadas Betuminosas com espessura total de 15 cm;
- Poço P2 – Camada Granular 1 com espessura de 12 cm;
  – Camada Granular 2 com espessura de 32 cm.

h2) Deflexões medidas com defletómetro de impacto (FWD):

Medição (FWD) - Ponto de ensaio ao Pk 69+281 (Via Esquerda)									
Sensores Distância (mm)	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	1200	793	600	457	263	169	120	95	78

h3) Quadro resumo das camadas e suas características mecânicas (retroanálise):

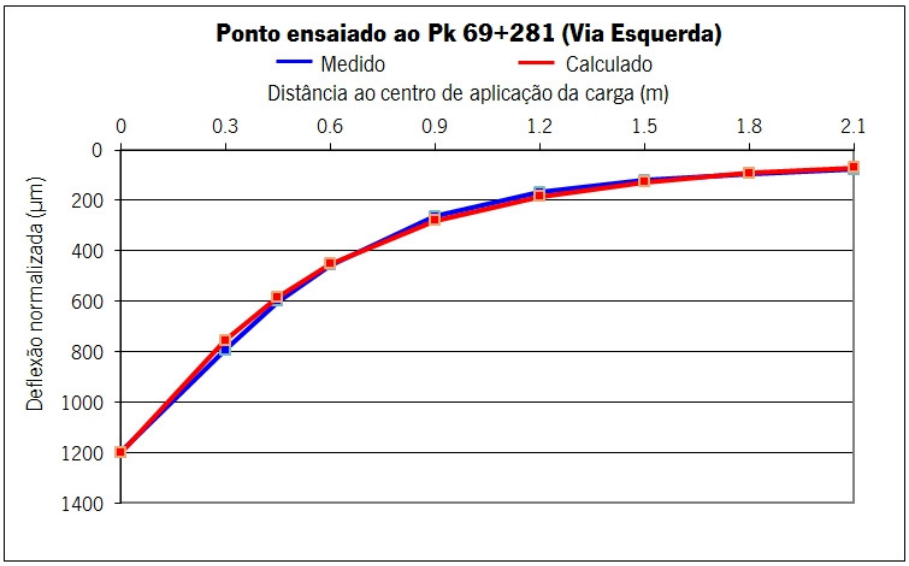
Tipo de Material	**Espessura (cm)**	**Módulo de Rigidez E_{FWD} (MPa)**	**Coef. Poisson**	**Temp. FWD (ºC)**
Betuminoso	15	1700	0.35	16.6
Granular 1	12	80	0.35	-
Granular 2	32	70	0.35	-
Fundação	∞	55	0.35	-

h4) Deflexões calculadas:

Cálculo (retroanálise) - Ponto de ensaio ao Pk 69+281 (Via Esquerda)									
Sensores Distância (mm)	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	1201.0	755.0	583.0	452.0	281.0	184.0	127.0	92.0	70.0

h5) Bacias de deflexão – Medido (FWD) e Calculado:

Sensores Distância (m)	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
	0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
Medido (µm)	1200	793	600	457	263	169	120	95	78
Calculado (µm)	1201.0	755.0	583.0	452.0	281.0	184.0	127.0	92.0	70.0
Erro (µm)	1.0	-38.0	-17.0	-5.0	18.0	15.0	7.0	-3.0	-8.0
Erro (%)	0.1%	-4.8%	-2.8%	-1.1%	6.8%	8.9%	5.8%	-3.2%	-10.3%



i) Ponto de ensaio ao Pk 73+067 (próximo do carote C5)

i1) Amostragem dada pelos ensaios destrutivos executados:

- Carote C5 – Camadas Betuminosas com espessura total de 23 cm;
- Poço P3 – Camada Granular 1 com espessura de 15 cm;
  – Camada Granular 2 com espessura de 33 cm.

i2) Deflexões medidas com defletómetro de impacto (FWD):

Medição (FWD) - Ponto de ensaio ao Pk 73+067 (Via Esquerda)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	1286	855	646	487	290	192	145	114	95

i3) Quadro resumo das camadas e suas características mecânicas (retroanálise):

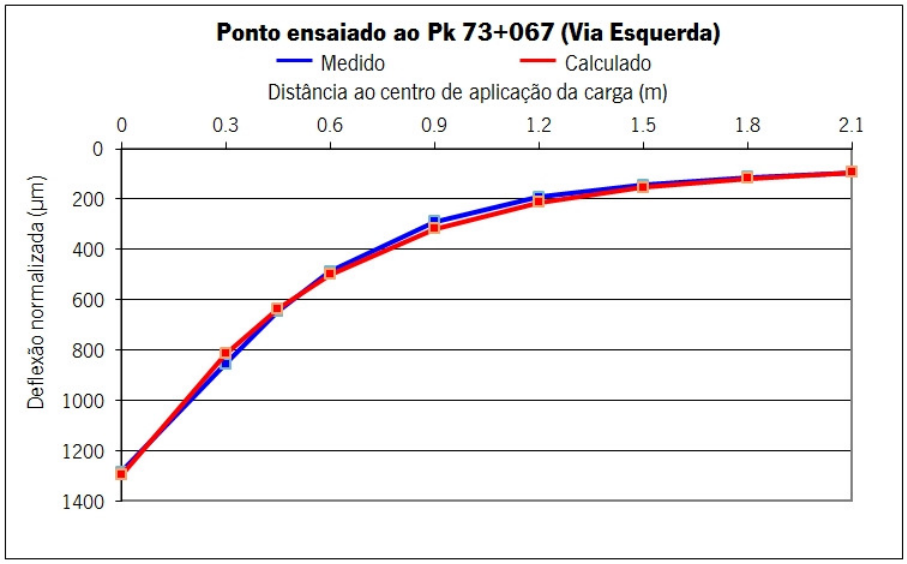
Tipo de Material	**Espessura (cm)**	**Módulo de Rigidez E_{FWD} (MPa)**	**Coef. Poisson**	**Temp. FWD (ºC)**
Betuminoso	23	625	0.35	16.6
Granular 1	15	70	0.35	-
Granular 2	33	65	0.35	-
Fundação	∞	40	0.35	-

i4) Deflexões calculadas:

Cálculo (retroanálise) - Ponto de ensaio ao Pk 73+067 (Via Esquerda)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (μm)	1298.0	814.0	636.0	500.0	318.0	214.0	153.0	117.0	94.0

i5) Bacias de deflexão – Medido (FWD) e Calculado:

Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (m)	0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
Medido (μm)	1286	855	646	487	290	192	145	114	95
Calculado (μm)	1298.0	814.0	636.0	500.0	318.0	214.0	153.0	117.0	94.0
Erro (μm)	12.0	-41.0	-10.0	13.0	28.0	22.0	8.0	3.0	-1.0
Erro (%)	0.9%	-4.8%	-1.5%	2.7%	9.7%	11.5%	5.5%	2.6%	-1.1%



j) Ponto de ensaio ao Pk 75+880 (próximo do poço P3)

j1) Amostragem dada pelos ensaios destrutivos executados:

- Poço P3 – Camadas Betuminosas com espessura total de 13 cm;
  – Camada Granular 1 com espessura de 15 cm;
  – Camada Granular 2 com espessura de 33 cm.

j2) Deflexões medidas com defletómetro de impacto (FWD):

Medição (FWD) - Ponto de ensaio ao Pk 75+880 (Via Esquerda)									
Sensores Distância (mm)	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	1237	925	759	618	406	270	184	134	101

j3) Quadro resumo das camadas e suas características mecânicas (retroanálise):

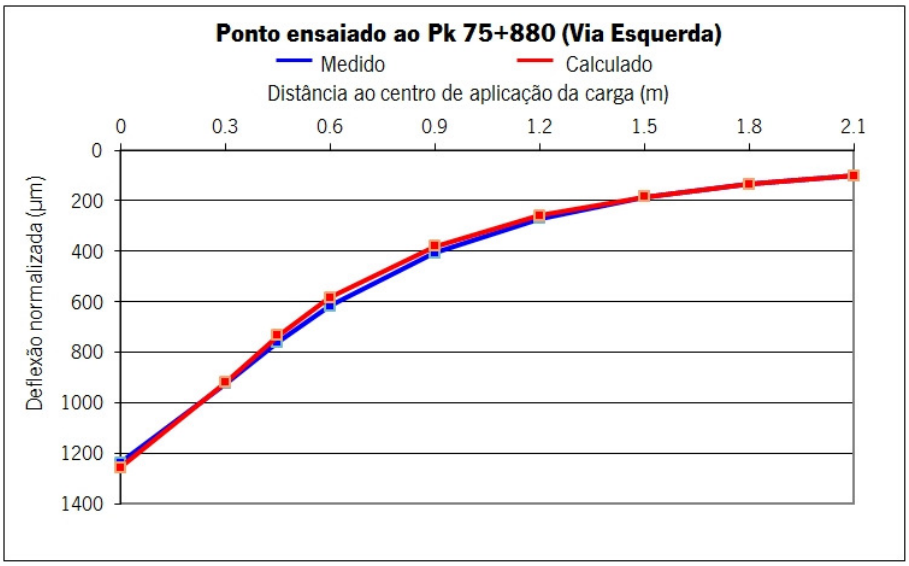
Tipo de Material	**Espessura (cm)**	**Módulo de Rigidez E_{FWD} (MPa)**	**Coef. Poisson**	**Temp. FWD (ºC)**
Betuminoso	13	3000	0.35	16.6
Granular 1	15	80	0.35	-
Granular 2	33	70	0.35	-
Fundação	∞	40	0.35	-

j4) Deflexões calculadas:

Cálculo (retroanálise) - Ponto de ensaio ao Pk 75+880 (Via Esquerda)									
Sensores Distância (mm)	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	1257.0	919.0	733.0	584.0	381.0	260.0	185.0	135.0	101.0

j5) Bacias de deflexão – Medido (FWD) e Calculado:

Sensores Distância (m)	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
	0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
Medido (µm)	1237	925	759	618	406	270	184	134	101
Calculado (µm)	1257.0	919.0	733.0	584.0	381.0	260.0	185.0	135.0	101.0
Erro (µm)	20.0	-6.0	-26.0	-34.0	-25.0	-10.0	1.0	1.0	0.0
Erro (%)	1.6%	-0.6%	-3.4%	-5.5%	-6.2%	-3.7%	0.5%	0.7%	0.0%



k) Ponto de ensaio ao Pk 78+767 (próximo do carote C7)

k1) Amostragem dada pelos ensaios destrutivos executados:

- Carote C7 – Camadas Betuminosas com espessura total de 12 cm;
- Poço P3 – Camada Granular 1 com espessura de 15 cm;
  – Camada Granular 2 com espessura de 33 cm.

k2) Deflexões medidas com defletómetro de impacto (FWD):

Medição (FWD) - Ponto de ensaio ao Pk 78+767 (Via Esquerda)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	900	729	606	493	327	221	155	117	91

k3) Quadro resumo das camadas e suas características mecânicas (retroanálise):

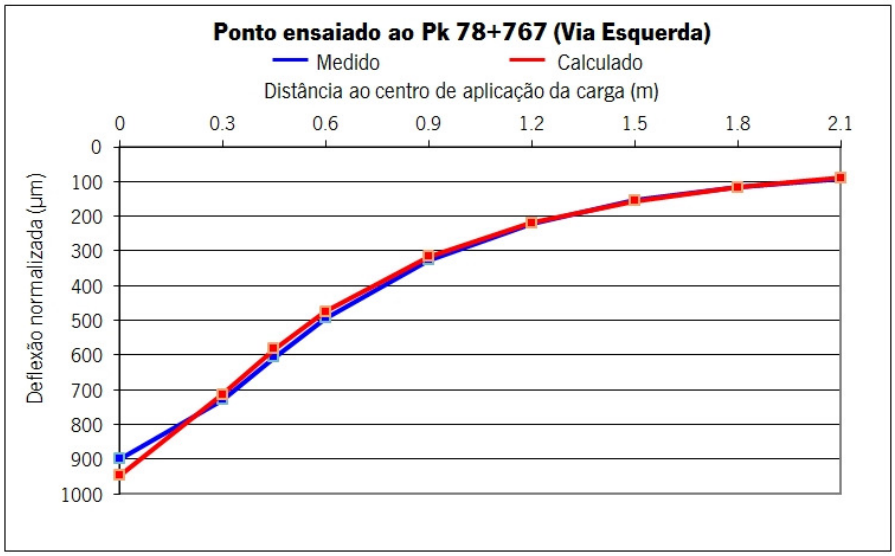
Tipo de Material	**Espessura (cm)**	**Módulo de Rigidez E_{FWD} (MPa)**	**Coef. Poisson**	**Temp. FWD (ºC)**
Betuminoso	12	5000	0.35	16.6
Granular 1	15	200	0.35	-
Granular 2	33	80	0.35	-
Fundação	∞	40	0.35	-

k4) Deflexões calculadas:

Cálculo (retroanálise) - Ponto de ensaio ao Pk 78+767 (Via Esquerda)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	947.0	714.0	583.0	474.0	317.0	219.0	156.0	116.0	90.0

k5) Bacias de deflexão – Medido (FWD) e Calculado:

Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (m)	0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
Medido (µm)	900	729	606	493	327	221	155	117	91
Calculado (µm)	947.0	714.0	583.0	474.0	317.0	219.0	156.0	116.0	90.0
Erro (µm)	47.0	-15.0	-23.0	-19.0	-10.0	-2.0	1.0	-1.0	-1.0
Erro (%)	5.2%	-2.1%	-3.8%	-3.9%	-3.1%	-0.9%	0.6%	-0.9%	-1.1%



4.2.4 Retroanálise – Zona 2 – Via Direita (norte-sul)

I) <u>Ponto de ensaio ao Pk 79+650 (próximo do carote C8)</u>

I1) Amostragem dada pelos ensaios destrutivos executados:

- Carote C8 – Camadas Betuminosas com espessura total de 11 cm;
- Poço P4 – Camada Granular 1 com espessura de 12 cm;
  – Camada Granular 2 com espessura de 18 cm.

I2) Deflexões medidas com defletómetro de impacto (FWD):

Medição (FWD) - Ponto de ensaio ao Pk 79+650 (Via Direita)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (μm)	769	559	458	359	247	182	140	102	85

I3) Quadro resumo das camadas e suas características mecânicas (retroanálise):

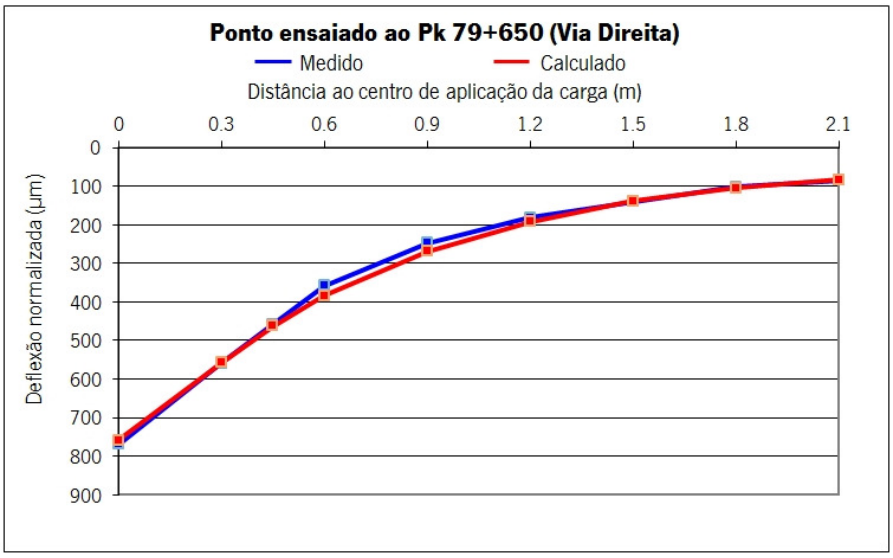
Tipo de Material	**Espessura (cm)**	**Módulo de Rigidez E_{FWD} (MPa)**	**Coef. Poisson**	**Temp. FWD (ºC)**
Betuminoso	11	3700	0.35	17.4
Granular 1	12	600	0.35	-
Granular 2	18	275	0.35	-
Fundação	∞	45	0.35	-

I4) Deflexões calculadas:

Cálculo (retroanálise) - Ponto de ensaio ao Pk 79+650 (Via Direita)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (μm)	759.0	557.0	462.0	385.0	270.0	192.0	139.0	105.0	83.0

l5) Bacias de deflexão – Medido (FWD) e Calculado:

Sensores Distância (m)	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
	0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
Medido (µm)	769	559	458	359	247	182	140	102	85
Calculado (µm)	759.0	557.0	462.0	385.0	270.0	192.0	139.0	105.0	83.0
Erro (µm)	-10.0	-2.0	4.0	26.0	23.0	10.0	-1.0	3.0	-2.0
Erro (%)	-1.3%	-0.4%	0.9%	7.2%	9.3%	5.5%	-0.7%	2.9%	-2.4%



m) <u>Ponto de ensaio ao Pk 81+650 (próximo do poço P4)</u>

m1) Amostragem dada pelos ensaios destrutivos executados:

- Poço P4 – Camada Betuminosa 1 com espessura de 6 cm;
  – Camada Betuminosa 2 com espessura de 19 cm;
  – Camada Granular 1 com espessura de 12 cm;
  – Camada Granular 2 com espessura de 18 cm.

m2) Deflexões medidas com defletómetro de impacto (FWD):

Medição (FWD) - Ponto de ensaio ao Pk 81+650 (Via Direita)									
Sensores Distância (mm)	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	840	616	501	401	273	197	153	119	98

m3) Quadro resumo das camadas e suas características mecânicas (retroanálise):

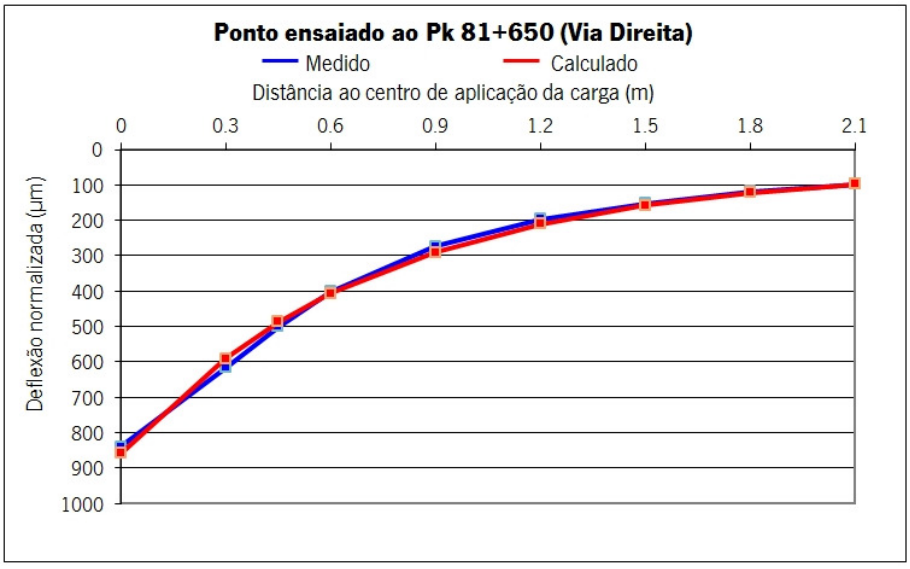
Tipo de Material	Espessura (cm)	Módulo de Rigidez E_{FWD} (MPa)	Coef. Poisson	Temp. FWD (ºC)
Betuminoso 1	6	5000	0.35	18.7
Betuminoso 2	19	675	0.35	18.7
Granular 1	12	150	0.35	-
Granular 2	18	100	0.35	-
Fundação	∞	45	0.35	-

m4) Deflexões calculadas:

Cálculo (retroanálise) - Ponto de ensaio ao Pk 81+650 (Via Direita)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	858.0	591.0	487.0	407.0	290.0	211.0	158.0	122.0	98.0

m5) Bacias de deflexão – Medido (FWD) e Calculado:

Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (m)	0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
Medido (µm)	840	616	501	401	273	197	153	119	98
Calculado (µm)	858.0	591.0	487.0	407.0	290.0	211.0	158.0	122.0	98.0
Erro (µm)	18.0	-25.0	-14.0	6.0	17.0	14.0	5.0	3.0	0.0
Erro (%)	2.1%	-4.1%	-2.8%	1.5%	6.2%	7.1%	3.3%	2.5%	0.0%



n) Ponto de ensaio ao Pk 83+150 (próximo do carote C10)

n1) Amostragem dada pelos ensaios destrutivos executados:

- Carote C10 – Camadas Betuminosas com espessura total de 14 cm;
- Poço P2 – Camada Granular 1 com espessura de 12 cm;
  – Camada Granular 2 com espessura de 18 cm.

n2) Deflexões medidas com defletómetro de impacto (FWD):

Medição (FWD) - Ponto de ensaio ao Pk 83+150 (Via Direita)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	874	683	567	472	336	244	178	141	113

n3) Quadro resumo das camadas e suas características mecânicas (retroanálise):

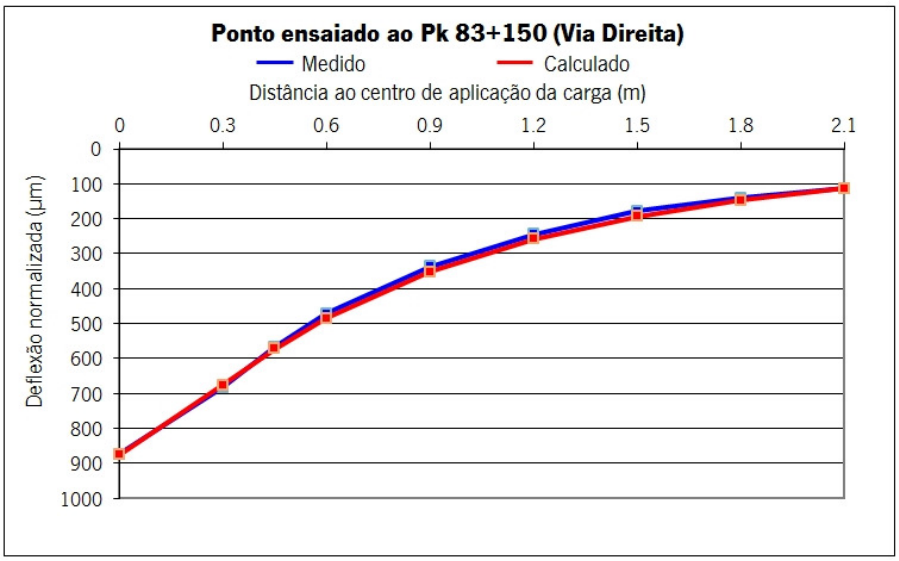
Tipo de Material	**Espessura (cm)**	**Módulo de Rigidez E_{FWD} (MPa)**	**Coef. Poisson**	**Temp. FWD (ºC)**
Betuminoso	14	3500	0.35	18.7
Granular 1	12	300	0.35	-
Granular 2	18	200	0.35	-
Fundação	∞	45	0.35	-

n4) Deflexões calculadas:

Cálculo (retroanálise) - Ponto de ensaio ao Pk 83+150 (Via Direita)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	876.0	676.0	572.0	485.0	352.0	259.0	193.0	147.0	113.0

n5) Bacias de deflexão – Medido (FWD) e Calculado:

Sensores Distância (m)	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
	0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
Medido (µm)	874	683	567	472	336	244	178	141	113
Calculado (µm)	876.0	676.0	572.0	485.0	352.0	259.0	193.0	147.0	113.0
Erro (µm)	2.0	-7.0	5.0	13.0	16.0	15.0	15.0	6.0	0.0
Erro (%)	0.2%	-1.0%	0.9%	2.8%	4.8%	6.1%	8.4%	4.3%	0.0%



4.2.5 Retroanálise – Zona 2 – Via Esquerda (sul-norte)

o) <u>Ponto de ensaio ao Pk 81+001 (próximo do carote C9)</u>

o1) Amostragem dada pelos ensaios destrutivos executados:

- Carote C9 – Camadas Betuminosas com espessura total de 10 cm;
- Poço P4 – Camada Granular 1 com espessura de 12 cm;
  – Camada Granular 2 com espessura de 18 cm.

o2) Deflexões medidas com defletómetro de impacto (FWD):

Medição (FWD) - Ponto de ensaio ao Pk 81+001 (Via Esquerda)									
Sensores Distância (mm)	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	945	713	552	433	289	210	160	132	109

o3) Quadro resumo das camadas e suas características mecânicas (retroanálise):

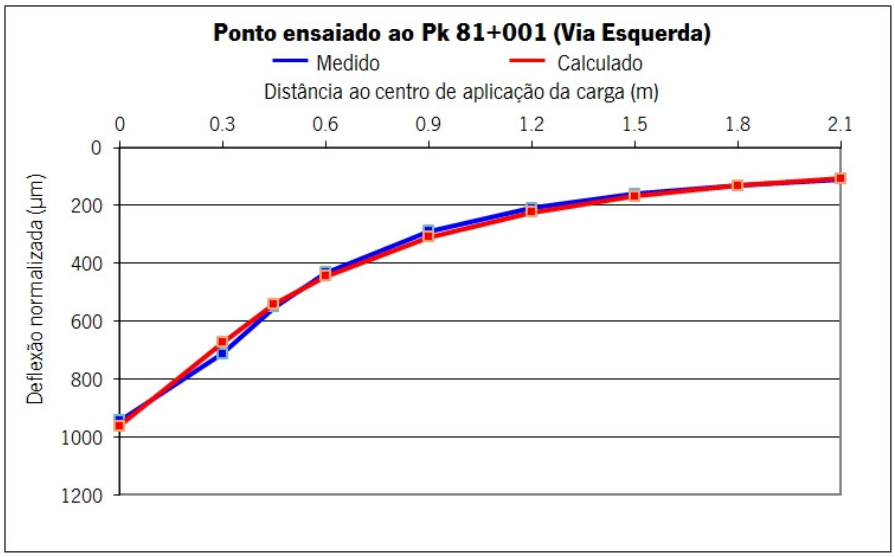
Tipo de Material	Espessura (cm)	Módulo de Rigidez E_{FWD} (MPa)	Coef. Poisson	Temp. FWD (ºC)
Betuminoso	10	3700	0.35	16.6
Granular 1	12	275	0.35	-
Granular 2	18	250	0.35	-
Fundação	∞	45	0.35	-

o4) Deflexões calculadas:

Cálculo (retroanálise) - Ponto de ensaio ao Pk 81+001 (Via Esquerda)									
Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (mm)	0	300	450	600	900	1200	1500	1800	2100
Deflexão (µm)	962.0	674.0	542.0	444.0	309.0	223.0	168.0	132.0	108.0

o5) Bacias de deflexão – Medido (FWD) e Calculado:

Sensores	*Df1*	*Df2*	*Df3*	*Df4*	*Df5*	*Df6*	*Df7*	*Df8*	*Df9*
Distância (m)	0	0.3	0.45	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
Medido (µm)	945	713	552	433	289	210	160	132	109
Calculado (µm)	962.0	674.0	542.0	444.0	309.0	223.0	168.0	132.0	108.0
Erro (µm)	17.0	-39.0	-10.0	11.0	20.0	13.0	8.0	0.0	-1.0
Erro (%)	1.8%	-5.5%	-1.8%	2.5%	6.9%	6.2%	5.0%	0.0%	-0.9%



4.3 Caracterização mecânica das camadas de reforço (Metodologia Shell)

4.3.1 Introdução

De forma a proceder-se ao dimensionamento do reforço das estruturas de pavimento existentes, á que primeiramente efetuar-se a estimativa das características mecânicas das camadas betuminosas a utilizar para o efeito, nomeadamente no que respeita à previsão dos respetivos módulos de rigidez (E).

Como é sabido, o módulo de rigidez das camadas constituídas por misturas betuminosas é influenciado por diversos fatores, entre os quais, o tipo de mistura e a profundidade a que se encontram aplicadas. A profundidade influencia diretamente a temperatura de serviço, a qual por sua vez, influencia diretamente a rigidez do betume e inerentemente o módulo de rigidez.

Durante o processo de dimensionamento de um pavimento flexível, o qual se trata de um processo iterativo, é usual considerarem-se diversos tipos de misturas, aplicadas a diversas profundidades. Não fugindo à regra, o dimensionamento desenvolvido durante o presente trabalho considerou diversos cenários, contudo, apresentar-se-á apenas o cálculo das camadas betuminosas que fazem parte das soluções de reforço que serão apresentadas em subcapítulo seguinte.

Neste sentido, será apresentado o cálculo das seguintes camadas betuminosas:

- Camada de desgaste em mistura *AC14 surf 50/70 (BB)* com 5 cm de espessura;
- Camada de ligação em mistura *AC20 bin 50/70 (MB)* com 9 cm de espessura;
- Camada de ligação em mistura *AC20 bin 50/70 (MB)* com 11 cm de espessura.

O procedimento adotado na estimativa dos módulos de rigidez das diferentes misturas utilizadas terá por base a metodologia da Shell, percorrendo a seguinte cronologia de tarefas:

- Cálculo de características volumétricas das misturas betuminosas (V_a, V_b e VMA);
- Cálculo da rigidez do betume (S_b);
- Cálculo do módulo de rigidez.

4.3.2 Cálculo das características volumétricas das misturas betuminosas

As principais características volumétricas a considerar na formulação de uma mistura betuminosa são essencialmente as seguintes:

- V_a – percentagem volumétrica de agregado no volume total (%);
- V_b – percentagem volumétrica de betume no volume total (%);
- VMA – volume de vazios no esqueleto de agregado (%).

As mesmas, por sua vez dependem dos seguintes parâmetros:

- ρ_a – massa volúmica do agregado que compõe a mistura (kN/m^3);
- ρ_b – massa volúmica do betume utilizado na mistura (kN/m^3);
- t_b – teor em betume da mistura (%);
- n – porosidade da mistura (%).

Utilizando relações volumétricas básicas e considerando os parâmetros usuais utilizados em cada tipo de mistura, é possível calcular as grandezas V_a, V_b e VMA, apresentando-se seguidamente os respetivos resultados, em forma de tabela (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Misturas betuminosas de reforço (V_a , V_b e VMA)

Camada de Reforço	ρ_b (kN/m3)	ρ_a (kN/m3)	t_b (%)	n (%)	V_b (%)	V_a (%)	VMA (%)
AC14 surf 50/70 (BB) - 5 cm	10.20	26.50	5.50	4.00	12	84	16
AC20 bin 50/70 (MB) - 9 cm	10.20	26.50	4.13	7.00	9	84	16
AC20 bin 50/70 (MB) - 11 cm	10.20	26.50	4.13	7.00	9	84	16

4.3.3 Cálculo da rigidez do betume (S_b)

O cálculo da rigidez de um betume (S_b) pode ser efetuado para determinadas condições, através da seguinte expressão:

$$S_b = 1{,}157 \times 10^{-7} \times t_c^{-0{,}368} \times 2{,}718^{-IPrec} \times (Tab_{rec} - T_{Serv})^5 \quad (4.1)$$

em que,

- S_b – rigidez do betume (MPa);
- t_c – tempo de carregamento (s);
- IPrec – índice de penetração do betume recuperado;
- Tab_{rec} – temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola do betume recuperado (°C);
- T_{Serv} – temperatura de serviço a que se encontra a mistura (°C).

O índice de penetração do betume recuperado, IPrec, pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$IPen = \frac{1951 - 20xTab_{rec} - 500x\log(pen25_{rec})}{50x\log(pen25_{rec}) - Tab_{rec} - 120{,}1} \quad (4.2)$$

em que,

- $pen25_{rec}$ – penetração do betume a 25°C do betume recuperado.

Tendo em consideração que a caracterização do betume deve corresponder à situação de serviço, ou seja, depois de ter ocorrido um certo endurecimento associado ao fabrico e colocação em obra das misturas, deverá efetuar-se a respetiva correção, para o chamado betume recuperado, utilizando as seguintes expressões:

$$pen25_{rec} = 0{,}65 \text{ x } pen25 \quad (4.3)$$

$$Tab_{rec} = 98{,}4 - 26{,}4 \text{ x } \log(pen25_{rec}) \quad (4.4)$$

em que,

- T_{ab} – temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola (°C);

- pen25 – penetração do betume a 25ºC (0,1 mm).

Relativamente ao tempo de carregamento (t_c) para determinar a rigidez do betume, o mesmo está intimamente ligado com a velocidade média da corrente de tráfego, podendo ser calculado pela seguinte expressão:

$$t_c = 1 / V_t \tag{4.5}$$

em que,

- V_t – velocidade média da corrente de tráfego de pesados (km/h).

O betume preconizado para as misturas betuminosas a utilizar nas camadas de reforço é um betume do tipo 50/70 e a velocidade média da corrente de tráfego de pesados considerada é de 40 km/h.

Apresentam-se seguidamente os resultados relativos ao cálculo da rigidez do betume (S_b), para cada uma das misturas betuminosas de reforço utilizadas (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Misturas betuminosas de reforço – cálculo da rigidez do betume (S_b)

Camada de Reforço	**Pen25 (0,1 mm)**	**Tab (ºC)**	**$Pen25_{rec}$ (0,1 mm)**	**Tab_{rec} (ºC)**	**IP_{rec}**	**V_t (km/h)**	**t_c (s)**	**S_b (MPa)**
AC14 surf 50/70 (BB) - 5 cm	60.0	50.0	39.0	56.40	-0.28	40.0	0.03	20.56
AC20 bin 50/70 (MB) - 9 cm	60.0	50.0	39.0	56.40	-0.28	40.0	0.03	24.47
AC20 bin 50/70 (MB) - 11 cm	60.0	50.0	39.0	56.40	-0.28	40.0	0.03	24.96

4.3.4 Cálculo do módulo de rigidez

Uma das metodologias que reflete o método empírico-mecanicista da Shell propõe para a previsão do módulo de rigidez da mistura, para uma rigidez do betume, S_b, superior a 5 MPa, a

seguinte expressão:

$$E_{mist} = S_b \times \left[1 + \frac{257.5 - 2.5 \times VMA}{n \times (VMA - 3)}\right]^n \quad (4.6)$$

em que,

- E_{mist} – módulo de rigidez da mistura betuminosa (MPa);
- VMA – volume de vazios no esqueleto de agregado (%).
- S_b – rigidez do betume (MPa).

e,

$$n = 0.83 \times \log\left(1 + \frac{4 \times 10^4}{S_b}\right) \quad (4.7)$$

Seguidamente, na Tabela 4.3, apresentam-se os valores dos módulos de rigidez das camadas betuminosas a utilizar como reforço, resultantes da aplicação das expressões anteriores.

Tabela 4.3 – Misturas betuminosas de reforço – Módulos de rigidez (E)

Camada de Reforço	**E (MPa)**
AC14 surf 50/70 (BB) - 5 cm	4 380
AC20 bin 50/70 (MB) - 9 cm	4 860
AC20 bin 50/70 (MB) - 11 cm	4 920

Foi assim possível efetuar a estimativa dos módulos de rigidez para as camadas betuminosas a utilizar nas soluções de reforço. Seguidamente se apresentam os valores a utilizar no dimensionamento:

- AC14 *surf* 50/70 (BB) com 5 cm de espessura - E = 4 380 MPa;
- AC20 *bin* 50/70 (MB) com 9 cm de espessura - E = 4 860 MPa;
- AC20 *bin* 50/70 (MB) com 11 cm de espessura - E = 4 920 MPa.

4.4 Critérios de ruína considerados no dimensionamento

4.4.1 Introdução

Os critérios de ruína, situações limite em relação às quais os pavimentos são analisados nos métodos empírico-mecanicistas de dimensionamento, neste caso, a metodologia da *Shell*, são os seguintes:

- Critério de fadiga por tração (fendilhamento excessivo com início nas zonas mais tracionadas das camadas ligadas), controlado pela extensão radial de tração, ε_t, na base das camadas betuminosas;

- Critério de deformação permanente (assentamento excessivo à superfície do pavimento), controlado pela extensão vertical de compressão, ε_z, no topo do solo de fundação.

4.4.2 Critério de Fadiga por Tração

Para o cálculo do dano à fadiga por tração, a metodologia da Shell propõe uma expressão que relaciona a vida útil de um pavimento, expressa no número admissível de eixos padrão de 80 kN, N_{Adm80}, com a extensão radial de tração, ε_t.

$$\varepsilon_t = (0{,}856 \times V_b + 1{,}08) \times E_{mist}^{-0{,}36} \times N_{Adm80}^{-0{,}2} \tag{4.8}$$

em que,

- ε_t – extensão radial de tração (adimensional);
- V_b – percentagem volumétrica de betume no volume total (%);
- E_{mist} – módulo de rigidez da mistura betuminosa (Pa);

- N_{Adm80} – número admissível de eixos padrão de 80kN.

Com base na expressão anteriormente apresentada e com o valor da extensão de tração máxima na base das camadas betuminosas, obtida através do programa de cálculo automático, é possível estimar o número admissível de eixos padrão de 80 kN para a estrutura em estudo.

Posteriormente, efetuando-se a comparação desse número admissível de eixos padrão de 80 kN, com o número acumulado de eixos padrão de 80 kN no ano horizonte, obtido através do tráfego solicitante, é possível calcular o valor do dano à fadiga na estrutura em causa. Dado isto, o dano à fadiga por tração nas camadas betuminosas poderá ser obtido pelo seguinte quociente:

$$D_t = \frac{N_{80}}{N_{Adm80}} \times 100 \tag{4.9}$$

em que,

- D_t – dano à fadiga por tração nas camadas betuminosas (%);
- N_{80} – número acumulado de eixos padrão de 80kN no ano horizonte;
- N_{Adm80} – número admissível de eixos padrão de 80kN.

4.4.3 Critério de Deformação Permanente

Para o cálculo do dano à deformação permanente, a metodologia da Shell propõe uma expressão que relaciona a vida útil de um pavimento, expressa no número admissível de eixos padrão de 80 kN, N_{Adm80}, com a extensão vertical de compressão, ε_z.

$$\varepsilon_z = K_S \times N_{Adm80}^{-0,25} \tag{4.10}$$

em que,

- ε_z – extensão vertical de compressão (adimensional);
- N_{Adm80} – número admissível de eixos padrão de 80kN:

- K_S – parâmetro a definir pelo utilizador, o qual depende da probabilidade de sobrevivência requerida no dimensionamento, nas seguintes percentagens:
  - 50% - K_S = 0,028;
  - 85% - K_S = 0,021;
  - 95% - K_S = 0,018.

Com base na expressão anteriormente apresentada e com o valor da extensão vertical de compressão máxima no topo do solo de fundação, obtida através do programa de cálculo automático, é possível estimar o número admissível de eixos padrão de 80 kN para a estrutura em estudo.

Posteriormente, de forma análoga ao critério anterior, efetuando-se a comparação desse número admissível de eixos padrão de 80 kN, com o número acumulado de eixos padrão de 80 kN no ano horizonte, é possível calcular o valor do dano à deformação permanente na estrutura em causa. Dado isto, o dano à deformação permanente no solo de fundação poderá ser obtido pelo seguinte quociente:

$$D_z = \frac{N_{80}}{N_{Adm80}} \times 100 \tag{4.11}$$

em que,

- D_z – dano à deformação permanente (%);
- N_{80} – número acumulado de eixos padrão de 80kN no ano horizonte;
- N_{Adm80} – número admissível de eixos padrão de 80kN.

4.5 Dimensionamento e definição das Soluções de Reforço

Para a verificação estrutural das diversas soluções de reforço analisadas, compostas pelas respetivas camadas de reforço e pelas camadas do pavimento existente, utilizou-se um programa de cálculo automático (JPav), o qual permitiu obter, nas interfaces críticas, as extensões verificadas por aplicação de uma carga padrão, neste caso, o eixo padrão de 80 kN.

Neste seguimento, procedeu-se ao estudo de várias combinações possíveis de soluções de reforço, analisando-se para cada, o seu desempenho face às solicitações previstas nos diferentes trechos da via.

Conforme já anteriormente referido, foram definidas duas zonas de dimensionamento, correspondentes a trechos de comportamento homogéneo, pelo que, o objetivo a alcançar foi a definição de duas soluções de reforço de pavimento, para cada uma das respetivas zonas.

Para tal, para cada zona e para cada via, com base nos pontos de ensaio utilizados na retroanálise, iterativamente foi-se verificando o comportamento de diferentes combinações para as soluções de reforço, fazendo-se variar a espessura e o material das camadas, bem como a espessura de fresagem ao pavimento existente. Relembrando, estabeleceu-se como premissa da solução de reforço, a necessidade de se proceder a uma fresagem prévia do pavimento existente, numa espessura mínima de 6 centímetros.

De referir igualmente que, no que respeita aos módulos de rigidez das camadas betuminosas obtidos por retroanálise, nomeadamente nas estruturas número, 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 13, os mesmos são inferiores aos valores que na prática se julga corresponderem a este tipo de camadas. Tal situação é justificável pelo facto de existir uma grande heterogeneidade nas estruturas encontradas, principalmente ao nível das camadas granulares, situação esta que poderá ter desvirtuado os valores dos módulos das camadas betuminosas.

Mesmo estando severamente fendilhadas, as camadas betuminosas usualmente apresentam módulos de rigidez entre 1 500 MPa e 2 000 MPa, entendendo-se por isso que se deverá assumir como valor mínimo para estas camadas, o valor correspondente à média deste intervalo, ou seja 1 750 MPa.

Prosseguindo, apresenta-se na Tabela 4.4, para cada zona e ponto da via analisado, as camadas que compõe as estruturas de pavimento existente, definindo-se o respetivo tipo de material, espessura e módulo de rigidez, módulos estes obtidos através de retroanálise e corrigidos com base nas temperaturas de ensaio e de serviço. Apresenta-se igualmente, na Tabela 4.5, um resumo das soluções de reforço previstas para as duas zonas de dimensionamento.

Tabela 4.4 – Constituição das estruturas de pavimento existente nos pontos analisados

Estrutura	Zona	Via	PK	Estruturas de Pavimento Existente										
				Camada Betuminosa 1			Camada Betuminosa 2			Camada Granular 1		Camada Granular 2		Fund.
				Espes. (cm)	Ecorr. (MPa)	Eadot. (MPa)	Espes. (cm)	Ecorr. (MPa)	Eadot. (MPa)	Espes. (cm)	E (MPa)	Espes. (cm)	E (MPa)	E (MPa)
1	1	Dir.	64+902	21	611	1 750	-	-		12	85	32	70	50
2	1	Dir.	67+698	22	3 193	3 193	-	-		12	600	32	200	50
3	1	Dir.	67+854	22	466	1 750	-	-		12	100	32	90	50
4	1	Dir.	71+853	17	729	1 750	-	-		12	140	32	120	50
5	1	Dir.	75+649	16	1 533	1 750	-	-		12	100	32	50	40
6	1	Esq.	63+680	16	1 102	1 750	-	-		14	110	30	100	40
7	1	Esq.	66+879	16	808	1 750	-	-		14	90	30	85	40
8	1	Esq.	69+281	15	1 326	1 750	-	-		12	80	32	70	55
9	1	Esq.	73+067	23	498	1 750	-	-		15	70	33	65	40
10	1	Esq.	75+880	13	2 332	2 332		-		15	80	33	70	40
11	1	Esq.	78+767	12	3 874	3 874	-	-		15	200	33	80	40
12	2	Dir.	79+650	11	2 945	2 945	-	-		12	600	18	275	45
13	2	Dir.	81+650	6	4 121	4 121	19	590	1 750	12	150	18	100	45
14	2	Dir.	83+150	14	2 945	2 945	-	-		12	300	18	200	45
15	2	Esq.	81+001	10	2 846	2 846	-	-		12	275	18	250	45

Tabela 4.5 – Soluções de reforço do pavimento existente nas zonas de dimensionamento

Estrutura	Zona	Via	PK	Soluções de Reforço de Pavimento				
				Fresagem do Pav. Exist.	Camada de Desgaste		Camada de Ligação	
				Espes. (cm)	Espes. (cm)	E (MPa)	Espes. (cm)	E (MPa)
1	1	Dir.	64+902	6	5	4 380	9	4 860
2	1	Dir.	67+698	6	5	4 380	9	4 860
3	1	Dir.	67+854	6	5	4 380	9	4 860
4	1	Dir.	71+853	6	5	4 380	9	4 860
5	1	Dir.	75+649	6	5	4 380	9	4 860
6	1	Esq.	63+680	6	5	4 380	9	4 860
7	1	Esq.	66+879	6	5	4 380	9	4 860
8	1	Esq.	69+281	6	5	4 380	9	4 860
9	1	Esq.	73+067	6	5	4 380	9	4 860
10	1	Esq.	75+880	6	5	4 380	9	4 860
11	1	Esq.	78+767	6	5	4 380	9	4 860
12	2	Dir.	79+650	8	5	4 380	11	4 920
13	2	Dir.	81+650	8	5	4 380	11	4 920
14	2	Dir.	83+150	8	5	4 380	11	4 920
15	2	Esq.	81+001	8	5	4 380	11	4 920

Seguidamente, nas Tabelas 4.6 e 4.7, apresentam-se os resultados obtidos da aplicação da metodologia da Shell, quanto à verificação dos dois critérios de ruína para as soluções de reforço preconizadas.

Deve-se realçar que relativamente ao critério da fadiga por tração, efetuou-se a verificação na base das camadas betuminosas de reforço, bem como nas camadas betuminosas existentes.

Analisando os resultados, a referir que a solução de reforço prevista para a Zona 1 é condicionada pelo critério da fadiga por tração, apresentando valores de dano acima dos 60% na estrutura n.º 10 (Tabela 4.6), no que respeita ao desempenho das camadas betuminosas existentes. Relativamente ao critério de deformação permanente no topo do solo de fundação, na Zona 1 os danos são relativamente baixos, contudo, a solução de reforço prevista para a Zona 2, conduz a danos elevados quanto a este critério, nomeadamente nas estruturas n.º 14 e 15.

Tabela 4.6 – Resultados - Fadiga por Tração (camadas de reforço e existentes)

Estrutura	**Zona**	**Via**	**PK**	**Tráfego (ano horiz.)**	**Critério de Ruína**					
					Fadiga por Tração (Camadas de Reforço)			Fadiga por Tração (Camadas Existentes)		
				N_{80}	Extensão ε_t (x10^{-6})	N_{Adm80}	Dano D_t (%)	Extensão ε_z (x10^{-6})	N_{Adm80}	Dano D_z (%)
1	1	Dir.	64+902	2.99E+06	60.8	2.3E+08	1.3	131.3	3.1E+07	9.7
2	1	Dir.	67+698	2.99E+06	26.3	1.5E+10	0.0 (*)	60.9	4.9E+08	0.6
3	1	Dir.	67+854	2.99E+06	57.3	3.1E+08	0.9	120.2	4.8E+07	6.2
4	1	Dir.	71+853	2.99E+06	69.3	1.2E+08	2.5	138.6	2.3E+07	12.7
5	1	Dir.	75+649	2.99E+06	81.7	5.3E+07	5.6	171.9	8.0E+06	37.3
6	1	Esq.	63+680	2.99E+06	76.7	7.2E+07	4.1	156.8	1.3E+07	23.5
7	1	Esq.	66+879	2.99E+06	79.0	6.2E+07	4.8	164.3	1.0E+07	29.9
8	1	Esq.	69+281	2.99E+06	85.6	4.2E+07	7.1	173.7	7.6E+06	39.3
9	1	Esq.	73+067	2.99E+06	56.8	3.2E+08	0.9	125.2	3.9E+07	7.6
10	1	Esq.	75+880	2.99E+06	85.4	4.2E+07	7.1	175.0	4.4E+06	**68.4**
11	1	Esq.	78+767	3.33E+06	58.1	2.9E+08	1.1	130.1	7.7E+06	43.1
12	2	Dir.	79+650	3.33E+06	70.0	1.1E+08	3.0	98.5	5.1E+07	6.5
13	2	Dir.	81+650	3.33E+06	51.7	5.1E+08	0.6	99.8	1.2E+08	2.7
14	2	Dir.	83+150	9.44E+06	61.0	2.2E+08	4.2	111.0	2.8E+07	33.8
15	2	Esq.	81+001	3.33E+06	100.2	1.9E+07	18.0	129.8	1.4E+07	24.6

(*) Valor arredondado a uma casa decimal; o valor não é rigorosamente zero.

Tabela 4.7 – Resultados - Deformação Permanente

Estrutura	Zona	Via	PK	Tráfego (ano horiz.)	Critério de Ruína		
					Deformação Permanente		
				N_{80}	Extensão ε_z ($x10^{-6}$)	N_{Adm80}	Dano D_z (%)
1	1	Dir.	64+902	2.99E+06	197.6	6.9E+07	4.3
2	1	Dir.	67+698	2.99E+06	152.2	2.0E+08	1.5
3	1	Dir.	67+854	2.99E+06	191.9	7.7E+07	3.8
4	1	Dir.	71+853	2.99E+06	233.2	3.5E+07	8.4
5	1	Dir.	75+649	2.99E+06	277.1	1.8E+07	16.7
6	1	Esq.	63+680	2.99E+06	280.3	1.7E+07	17.6
7	1	Esq.	66+879	2.99E+06	283.1	1.6E+07	18.3
8	1	Esq.	69+281	2.99E+06	242.2	3.0E+07	9.8
9	1	Esq.	73+067	2.99E+06	198.2	6.8E+07	4.4
10	1	Esq.	75+880	2.99E+06	296.6	1.4E+07	22.1
11	1	Esq.	78+767	3.33E+06	281.0	1.7E+07	19.8
12	2	Dir.	79+650	3.33E+06	320.2	1.0E+07	33.4
13	2	Dir.	81+650	3.33E+06	217.5	4.7E+07	7.1
14	2	Dir.	83+150	9.44E+06	305.4	1.2E+07	**78.6**
15	2	Esq.	81+001	3.33E+06	368.9	5.7E+06	58.8

Dado o exposto, as soluções de reforço preconizadas para as estruturas de pavimento existentes, para cada zona de dimensionamento, são as seguintes:

Zona 1 (entre o Pk 63+017 e o Pk 79+000):

- Fresagem do pavimento existente em 6 centímetros de espessura;
- Camada de desgaste em mistura betuminosa do tipo AC14 *surf* 50/70 (BB), com 5 centímetros de espessura;
- Rega de colagem com emulsão betuminosa, do tipo C60B4 (ECR-1), à taxa de 0,5kg/m^2;
- Camada de ligação em mistura betuminosa do tipo AC20 *bin* 50/70 (MB), com 9 centímetros de espessura;
- Rega de colagem com emulsão betuminosa modificada, do tipo C60BP4 (ECR-1mod), à taxa de 0,7 kg/m^2, sobre camada betuminosa existente.

Zona 2 (entre o Pk 79+000 e o Pk 83+460):

- Fresagem do pavimento existente em 8 centímetros de espessura;
- Camada de desgaste em mistura betuminosa do tipo AC14 *surf* 50/70 (BB), com 5 centímetros de espessura;
- Rega de colagem com emulsão betuminosa, do tipo C60B4 (ECR-1), à taxa de 0,5kg/m^2;
- Camada de ligação em mistura betuminosa do tipo AC20 *bin* 50/70 (MB), com 11 centímetros de espessura;
- Rega de colagem com emulsão betuminosa modificada, do tipo C60BP4 (ECR-1mod), à taxa de 0,7 kg/m^2, sobre camada betuminosa existente.

As soluções de reforço previstas originam um alteamento de 8 centímetros em ambas as zonas (Zona 1 e 2). Dado a via em questão se desenvolver maioritariamente em meio rural, sem grandes constrangimentos altimétricos, numa situação real que não o contexto deste trabalho, tal facto não acarretaria um problema de maior na sua materialização. Contudo, seria necessário efetuar-se adaptações a órgãos e equipamentos instalados, como por exemplo, no sistema de drenagem, o reperfilamento das valetas de plataforma e, nos equipamentos de segurança, o alteamento dos prumos das guardas semi-flexíveis.

Neste trabalho não se apresentou nenhuma consideração quanto ao destino a dar ao material fresado do pavimento existente, contudo essa ponderação poderia permitir uma poupança em materiais novos, tanto em betume como em agregados. Tendo em conta que atualmente já se consegue a incorporação de fresado nas misturas betuminosas numa taxa de 50%, uma parte significativa do material fresado poderia ser utilizado nas misturas a aplicar na camada de ligação. Quanto à camada de desgaste, esta utilização não é recomendada dado que o betume das misturas fresadas encontra-se envelhecido (muito duro), o qual não é aconselhado para a camada de desgaste de pavimentos, principalmente em climas não muito quentes como é o caso de estudo deste trabalho.

5 Análise do Risco no Dimensionamento através de Verificação em Contínuo

5.1 Introdução

O presente capítulo apresenta o estudo desenvolvido relativamente à análise efetuada quanto à verificação das soluções de reforço dimensionadas, face aos critérios de ruína utilizados no dimensionamento, tendo como objeto de análise todos os pontos ensaiados com defletómetro de ensaio, nomeadamente, 204 pontos, 102 em cada uma das vias de circulação. Ou seja, com a amostra de pontos ensaiados, consegue-se efetuar a verificação de secções distanciadas de 100 metros, entre dois pontos consecutivos, segundo a diretriz da via.

Para tal, procedeu-se à estimativa dos módulos de rigidez das camadas de pavimento existentes através de um procedimento de retroanálise, tendo-se o conhecimento prévio da constituição das camadas (materiais e espessuras) que compõem as estruturas interessadas, conforme já anteriormente descrito em capítulos anteriores.

Através do cálculo do dano para cada um dos critérios, é possível conhecer a percentagem de pontos, ou localizações ensaiadas, que se encontram em conformidade. Tal situação permite estabelecer uma relação entre o dimensionamento, e o risco ou grau de confiança conferido pela metodologia utilizada.

As definições de risco, dependendo do contexto e do objeto de análise, podem ser várias. Algumas definições de risco, quanto ao dimensionamento de pavimentos, já foram apresentadas em capítulo anterior.

Em termos genéricos, usualmente o risco é mensurado através do produto entre a probabilidade e a consequência.

Enquanto que, em termos de probabilidade de ocorrência, do ponto de vista do dimensionamento, poderá conseguir-se efetuar uma previsão relativamente ao dano nas estruturas, durante o seu período de vida útil, quanto à consequência essa análise poderá ser mais vasta.

A presente análise de risco, apenas explora a vertente do desempenho do pavimento no que respeita à sua capacidade estrutural, assumindo como consequência, a verificação, ou não, dessa mesma capacidade com base nos critérios de dimensionamento. Não foram abordados eventuais impactos de ordem financeira, como por exemplo devido a trabalhos de reparação ou de perdas de exploração inerentes a cortes ou constrangimentos de via, imputáveis à má prestação do pavimento, deixando-se como sugestão essa análise para trabalhos futuros.

5.2 Verificação em Contínuo das Soluções de Reforço

Com o intuito de se realizar uma análise mais alargada relativamente à aplicabilidade das soluções de reforço dimensionadas, quanto à sua capacidade estrutural face às solicitações previstas, efetuou-se uma verificação das mesmas, para todos os pontos ensaiados com defletómetro de impacto (FWD).

Daí se intitular esta análise de "verificação em contínuo", tentando assim estender a mesma, não só a localizações pontuais consideradas características, mas à totalidade da extensão de via a reabilitar.

Neste sentido, procedeu-se através de retroanálise, à previsão dos módulos de rigidez das diferentes camadas constituintes das estruturas existentes, incluindo respetivas fundações.

Relembrando o princípio da retroanálise, com base nos dados de um equipamento de avaliação de deflexão dinâmica, tendo o conhecimento da espessura e coeficiente de Poisson de cada camada, do valor da carga dinâmica e da pressão e, assumindo-se que uma estrutura de pavimento funciona como um sistema elástico multicamadas, é possível obter-se os diferentes valores referentes aos módulos de rigidez dos materiais *in situ*.

O princípio assume que uma bacia de deflexão, constituída pelas deflexões registadas a diferentes distâncias do ponto de aplicação da carga, para as mesmas condições de ensaio, corresponde a um único conjunto de valores, inerentes às propriedades dos materiais das camadas, com principal significado para o módulo de rigidez.

Aplicando ao presente caso, através dos ensaios destrutivos realizados ao longo do troço a reabilitar, obteve-se informação respeitante à constituição, materiais e espessuras, das camadas que compõem as estruturas de pavimento existentes.

Com base nessa informação e nos valores registados nos ensaios de carga, neste caso com defletómetro de impacto (FWD), foi possível efetuar para cada ponto ensaiado, por tentativas sucessivas de alteração dos diferentes módulos de rigidez, a aproximação de uma bacia de deflexão calculada, à bacia de deflexão correspondente ao defletograma medido. Para tal, utilizou-se o programa de cálculo automático JPavBack.

Após efetuada a previsão dos diferentes módulos de rigidez das camadas existentes, efetuou-se o cálculo das extensões e respetivos danos associados, para os dois critérios de ruína, contemplando as soluções de reforço anteriormente dimensionadas no Capítulo 4.

Para cada zona de dimensionamento anteriormente definida, efetuou-se a dedução de determinada espessura nas camadas betuminosas existentes, representando a concretização das fresagens previstas, e, aplicou-se as camadas betuminosas de reforço preconizadas para cada zona.

Importa referir que relativamente ao critério de ruína à tração por fadiga das camadas betuminosas, à semelhança do efetuado no dimensionamento, realizou-se a verificação nas camadas betuminosas de reforço e nas camadas betuminosas existentes. Igualmente, quanto ao módulo de rigidez destas últimas, estabeleceu-se também como valor mínimo, o valor de 1 750 MPa, em detrimento de todos os valores obtidos por retroanálise inferiores a este.

Com esta metodologia foi assim possível obter os valores dos danos para as estruturas de pavimento sem reforço, considerando que ainda seriam solicitadas pelo tráfego de projeto previsto e, para as estruturas de pavimento com reforço.

Os diferentes resultados e cálculos intermédios elaborados poderão ser analisados nas tabelas que se encontram em Anexo (Tabela 0.1 à Tabela 0.16), apresentando-se nas Figuras 5.1 a 5.4, a evolução de módulos de rigidez do pavimento existente, ao longo da extensão em estudo.

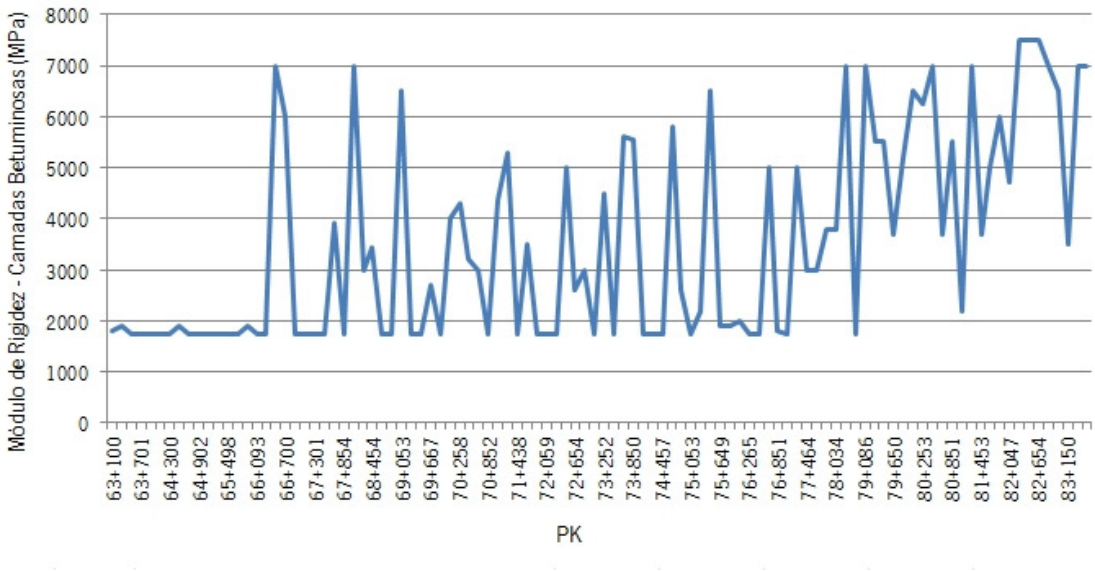


Figura 5.1 – Módulo de rigidez das camadas betuminosas existentes na via direita

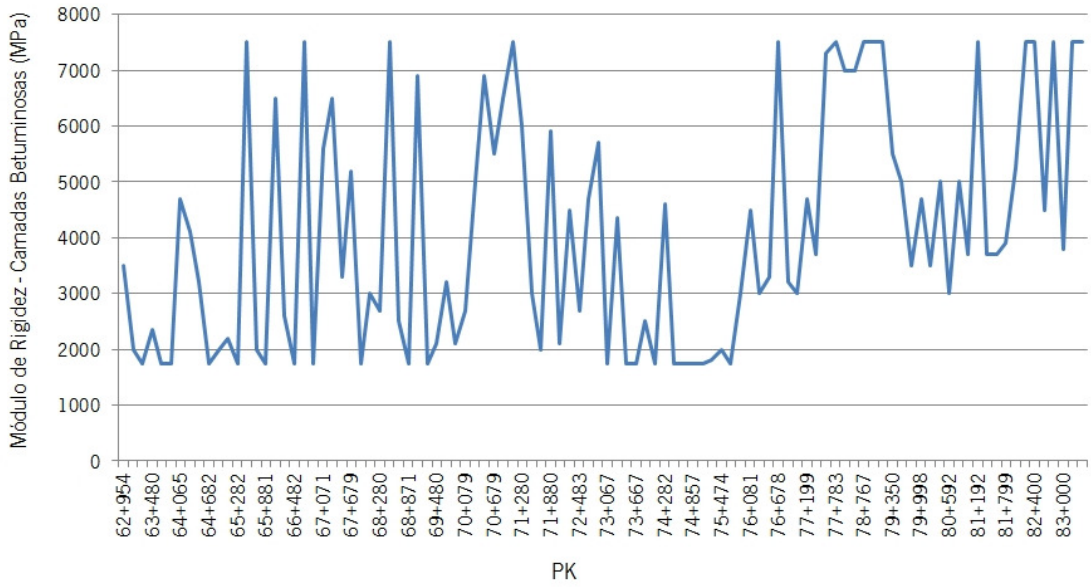


Figura 5.2 – Módulo de rigidez das camadas betuminosas existentes na via esquerda

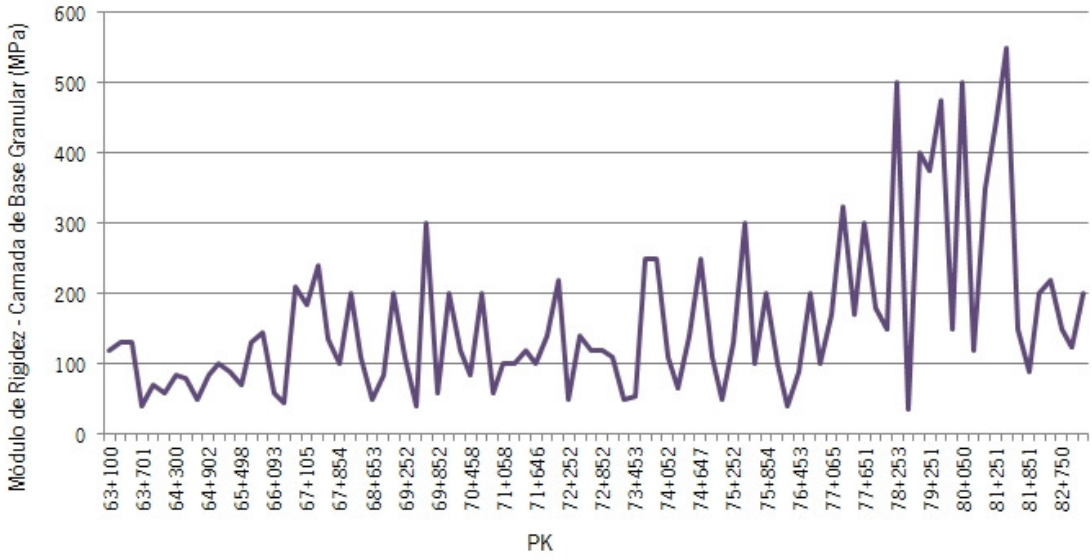


Figura 5.3 – Módulo de rigidez das camada de base granular existente na via direita

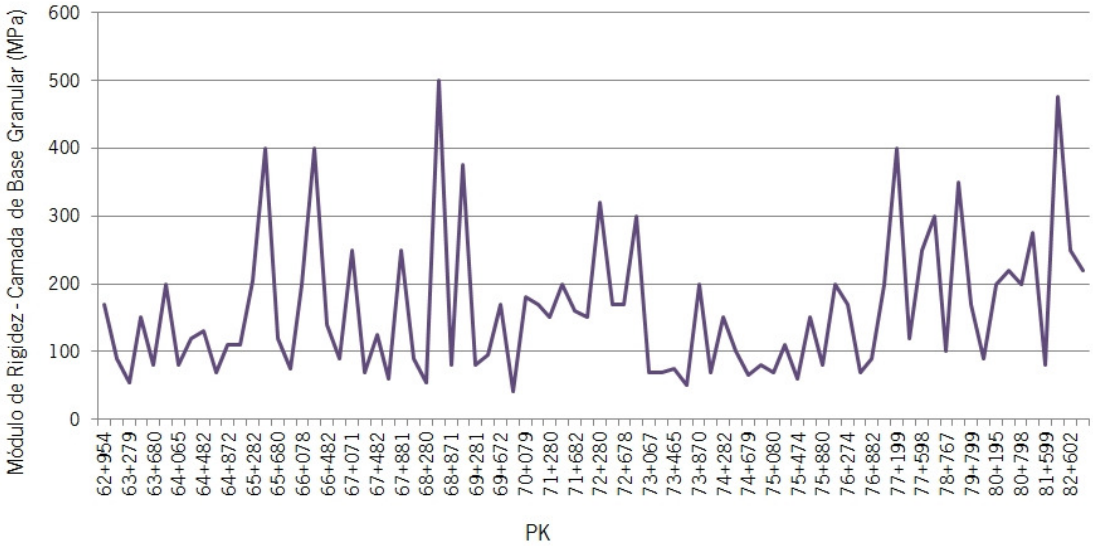


Figura 5.4 – Módulo de rigidez das camada de base granular existente na via esquerda

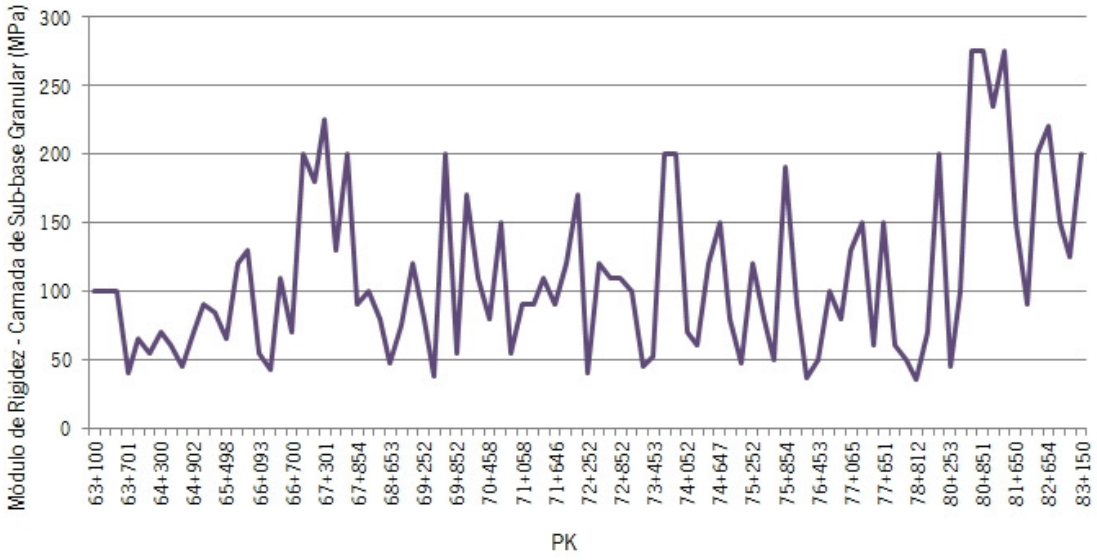


Figura 5.5 – Módulo de rigidez das camada de sub-base granular existente na via direita

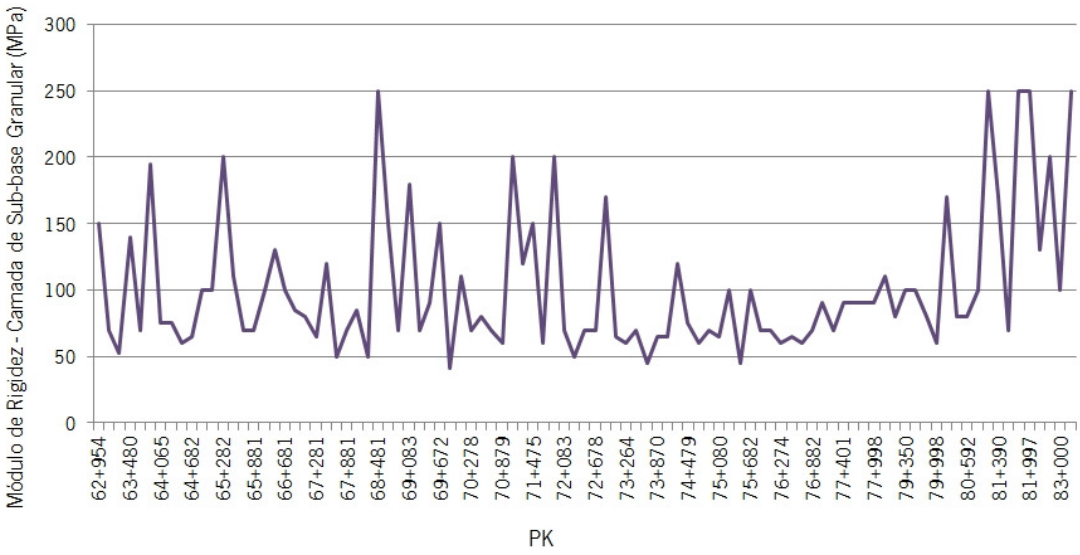


Figura 5.6 – Módulo de rigidez das camada de sub-base granular existente na via esquerda

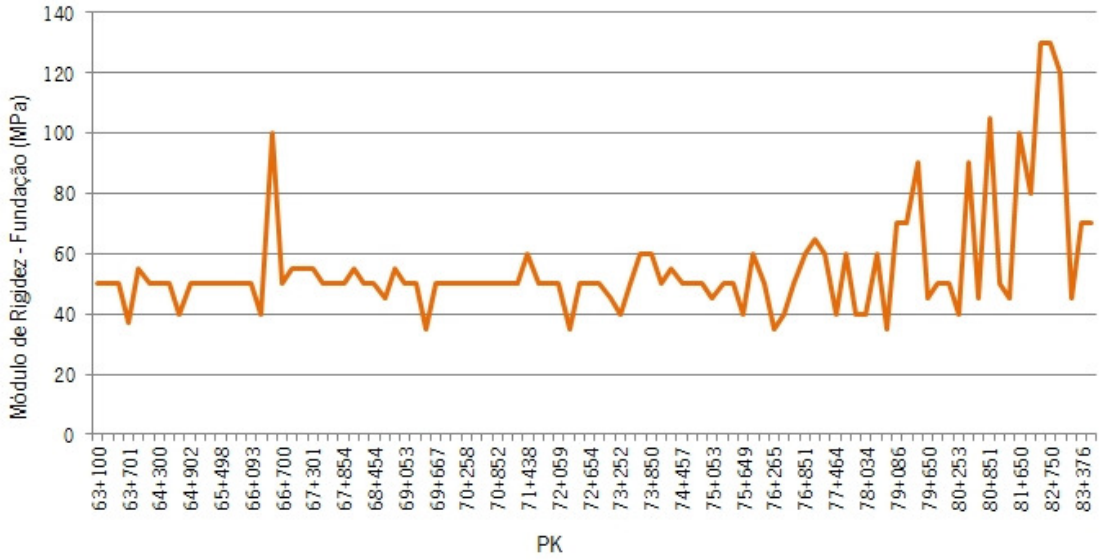


Figura 5.7 – Módulo de rigidez da fundação do pavimento existente na via direita

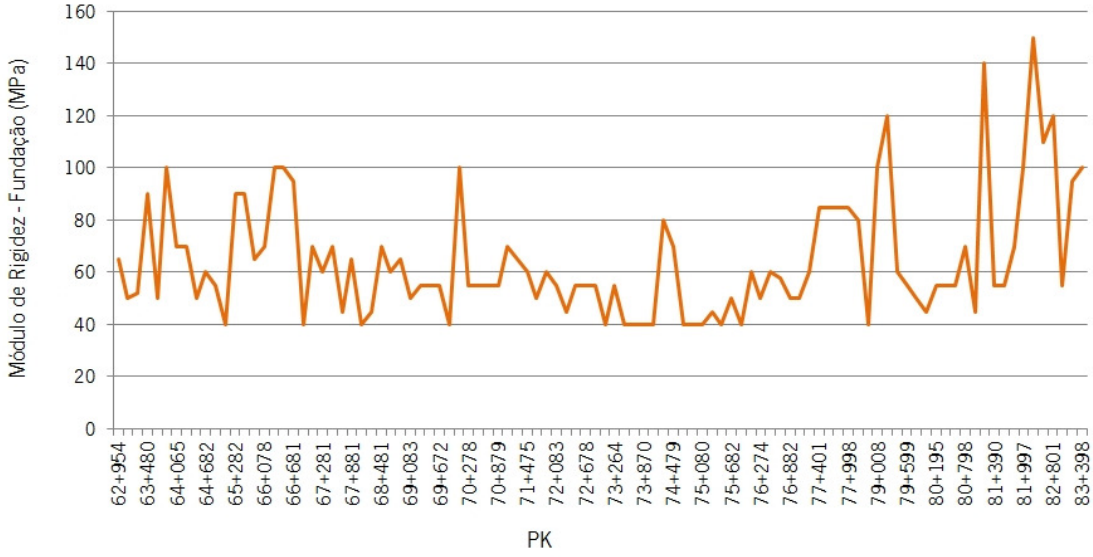


Figura 5.8 – Módulo de rigidez da fundação do pavimento existente na via esquerda

Como se pode analisar pela leitura dos gráficos anteriormente apresentados, existe uma grande variação dos módulos de rigidez ao longo do troço, isto devido à grande heterogeneidade de estruturas e estado de conservação diversos que se encontram presentes na via em estudo, não havendo grande divergência entre os valores registados entre as duas vias, direita ou esquerda.

Em termos médios verifica-se que os módulos de rigidez assumem valores, nas camadas betuminosas da ordem dos 4000 MPa, nas camadas granulares de base da ordem dos 200 MPa, nas camadas granulares de sub-base da ordem dos 100 MPa e, nos solos de fundação da ordem dos 50 MPa.

Seguidamente apresentam-se nas Tabelas 5.1 e 5.2, o dano à fadiga nas camadas betuminosas existentes, e o dano à deformação permanente no topo do solo de fundação, antes de qualquer intervenção, considerando como solicitação o tráfego e horizonte de dimensionamento utilizado para o cálculo do reforço. Nas mesmas tabelas, podem encontrar-se os danos à fadiga nas camadas betuminosas de reforço e existentes, e o dano à deformação permanente, já contemplando as estruturas reabilitadas, ou seja, já considerando as soluções de reforço anteriormente descritas.

Da análise das referidas tabelas verifica-se que na generalidade do troço a reabilitar o mesmo apresenta danos elevados segundo os dois critérios de ruína, o que reforça a necessidade de uma reabilitação estrutural.

Por outro lado, verifica-se que as soluções de reforço preconizadas, dimensionadas pela metodologia exposta, correspondem satisfatoriamente ao objetivo pretendido, cumprindo de forma eficaz as solicitações de projeto estipuladas, nomeadamente o tráfego solicitante.

Quanto ao dano à fadiga por tração na base das camadas betuminosas de reforço, em todos os pontos ensaiados e para ambas as vias, em nenhum deles se ultrapassou o valor limite dos 100%. De forma semelhante, obtiveram-se valores muito satisfatórios quanto ao dano à fadiga nas camadas betuminosas existentes, registando-se um dano superior a 100% apenas em três pontos dos 204 analisados (102 em cada uma das vias).

Relativamente ao dano à deformação permanente no topo do solo de fundação, a registar igualmente resultados muito satisfatórios, assinalando-se apenas um ponto na via da esquerda, em que o valor ultrapassa os 100%.

Tabela 5.1 – Danos à fadiga (nas camadas de reforço e existentes) e à deformação permanente, com e sem reforço, nos pontos ensaiados com FWD (pontos de ensaio de 1 a 51)

Via Direita						
N° Ensaio	Pk	Sem Reforço		Com Reforço		
		Dano εt (%)	Dano εz (%)	Dano εt C.Ref. (%)	Dano εt C.Exis.(%)	Dano εz (%)
1	63+100	166.1	60.4	1	5.6	5.7
2	63+301	145.1	50.4	0.7	5.5	4.8
3	63+525	157.3	56.9	1.1	5.6	5.3
4	63+701	830.5	130.5	1.7	18.2	8.2
5	63+902	382.3	47.9	1.3	10	3.6
6	64+101	495	60	1.4	12.2	4.3
7	64+300	320.4	59.3	1.3	9.3	4.7
8	64+504	321.5	57.5	0.9	9.3	4.6
9	64+700	681	104.5	1.6	16.1	6.9
10	64+902	320.4	59.3	1.3	9.3	4.7
11	65+099	230	60.7	1.2	7.1	5.3
12	65+300	262.2	65.8	1.2	7.6	5.7
13	65+498	396.5	60.6	1.3	10.6	4.6
14	65+706	131.1	70.5	1	4.4	7.2
15	65+895	104.5	46.8	0.7	4.3	4.8
16	66+093	484.6	64.5	1.4	11.6	4.7
17	66+302	688.9	137.1	1.6	14.3	9.3
18	66+525	0.2	0.5	0	0	0.1
19	66+700	0.5	3.3	0	0.1	0.8
20	66+900	43.4	35.4	0.7	2.1	4.2
21	67+105	57.9	40.8	0.8	2.5	4.7
22	67+301	30.6	33.6	0.7	1.6	4.1
23	67+506	121	58.3	1	4.4	5.9
24	67+698	4.4	7.7	0	0.6	1.3
25	67+854	173.8	46.5	0.9	6.1	4
26	68+064	0	1.3	0	0	0.4
27	68+243	38.8	24.5	0	2.4	3
28	68+454	59.6	22.6	0	3.2	2.7
29	68+653	454.4	68.8	1.2	10.9	5.1
30	68+855	219.8	39.2	1	6.7	3.3
31	69+053	12.3	6.9	0	1.3	1.3
32	69+252	147.2	69.8	0.9	4.6	6.3
33	69+452	647.1	115	1.3	15.7	7.4
34	69+667	16	15.3	0	1.3	2.1
35	69+852	365	46.1	1.1	10.1	3.3
36	70+069	20.6	11.8	0	1.7	1.8
37	70+258	36.1	12.9	0	2.6	1.8
38	70+458	86.9	20.6	0	4.4	2.2
39	70+650	31.4	17.9	0	2.2	2.3
40	70+852	364.1	46.6	1.1	10	3.4
41	71+058	41.5	15	0	2.6	2.1
42	71+250	29.3	10.6	0	2.2	1.7
43	71+438	111.5	35.9	0.9	3.8	3.6
44	71+646	61.5	19.5	0	3.4	2.3
45	71+853	394.4	103.1	2.5	12.4	8.8
46	72+059	133.4	77.4	1.7	5.9	8.1
47	72+252	2960.3	379.4	5.4	46.5	20.4
48	72+454	125.1	32.8	0	7.7	4.3
49	72+654	355.9	73.4	0.5	13.7	6.6
50	72+852	299	66.5	0.2	12	6.6
51	73+052	650	156.5	3	17.2	12.2

Via Esquerda						
N° Ensaio	Pk	Sem Reforço		Com Reforço		
		Dano εt (%)	Dano εz (%)	Dano εt C.Ref. (%)	Dano εt C.Exis.(%)	Dano εz (%)
1	62+954	192.9	35.3	0.1	8.7	3.8
2	63+086	1384.2	159	3	28.4	10
3	63+279	3352	179	6.3	43.2	9.1
4	63+480	327.8	23.5	0.9	10.3	2.1
5	63+680	1845.6	185.7	5.1	31.6	10.8
6	63+884	177.9	17.7	2	6.2	1.7
7	64+065	411.8	24.1	0	14.7	2.2
8	64+277	364.1	26.4	0	13.9	2.4
9	64+482	579.4	83.7	0.3	19.8	6.5
10	64+682	2198.5	123.5	5.3	31.7	7.3
11	64+872	819.1	111.1	2.4	20	8
12	65+083	801.6	216.6	1.7	22.3	15.9
13	65+282	171.8	23.9	2	6	2.4
14	65+487	34	4.7	0	3.2	0.8
15	65+680	703.5	0.1	2	13.1	0
16	65+881	1904.4	91.1	5	29.9	5.4
17	66+078	100	14.6	0	6.3	2
18	66+281	23.9	7.4	0.2	1.8	1.1
19	66+482	479.1	23.3	4	11.5	2
20	66+681	0	0.7	0	0	0.1
21	66+879	1465.6	302.9	4.9	29.9	18.6
22	67+071	109.9	14.9	0	7	1.8
23	67+281	290.2	21.5	0	13.3	2.2
24	67+482	346.4	33.8	0.2	12.6	3.1
25	67+679	527.3	56.3	0	21.5	5.1
26	67+881	228.2	53.2	2.8	10.2	4.5
27	68+081	738.2	159.8	0.4	24.3	12.6
28	68+280	1728.3	145.1	1	38.1	9.1
29	68+481	0.4	2.6	0	0.1	0.7
30	68+679	23.9	29	0.3	2.7	3.5
31	68+871	1633.8	82.5	4.9	29	5.2
32	69+083	32.7	18.1	0	3.5	3.3
33	69+281	2411.2	180.1	7.1	37.3	11.2
34	69+480	1340.8	136.5	3.1	29.3	9.7
35	69+672	287.5	64.1	0.3	12.9	6.8
36	69+877	5301.4	384.8	5.7	69.3	18.8
37	70+079	346.8	17.1	0.7	12.6	1.6
38	70+278	316.7	45.6	0	15.6	4.9
39	70+481	15.1	14.2	0	2.3	2.6
40	70+679	14	16.3	0	2.3	2.6
41	70+879	9.8	11.1	0	1.8	1.9
42	71+080	0	2.6	0	0	0.7
43	71+280	181.2	24.7	0	10.4	3.2
44	71+475	237.3	53.5	0.4	11	5.8
45	71+682	940.2	159.8	3.6	26.4	11.3
46	71+880	21.3	15.5	0	2.6	2.9
47	72+083	874.2	120	2.9	24.5	8.8
48	72+280	221.4	65.7	0	13.7	7
49	72+483	605.2	90.3	0.9	21.3	7.4
50	72+678	342.4	48.8	0	16.4	5
51	72+879	75.5	28.4	0	6	4.4

Tabela 5.2 – Danos à fadiga (nas camadas de reforço existentes) e à deformação permanente, com e sem reforço, nos pontos ensaiados com FWD (pontos de ensaio de 52 a 102)

Via Direita						
N° Ensaio	Pk	SEM REFORÇO		COM REFORÇO		
		Dano εt (%)	Dano εz (%)	Dano εt C.Ref. (%)	Dano εt C.Exis.(%)	Dano εz (%)
52	73+252	521.8	67	0	20.7	5.9
53	73+453	2047.9	154.1	4.4	32.8	9.2
54	73+653	41.4	14.1	0	3.5	2.4
55	73+850	40.2	16.5	0	3.3	2.9
56	74+052	821.4	138.4	3.3	19.2	10.3
57	74+234	1616.2	106.4	4.1	29.6	6.6
58	74+457	394.9	103.4	2.5	12.4	8.8
59	74+647	52.2	22.6	0	4.4	3.7
60	74+853	489.3	81.6	0.5	16.6	6.9
61	75+053	2491.6	186.8	4.9	40	10.3
62	75+252	360.6	83	1	13.1	7.3
63	75+465	55.5	24.1	0	4.6	3.9
64	75+649	1625	260	4.2	36.8	15.9
65	75+854	183.4	53.1	1.6	7.6	5.6
66	76+054	934.3	141	2.6	23	10.7
67	76+265	5348.8	470.8	8.6	70.1	21.6
68	76+453	1993.3	293.1	6	39.8	17.1
69	76+650	137.1	51.2	0	8.1	6.9
70	76+851	1091.2	96.4	3.9	23.7	6.9
71	77+065	337.8	71.1	2.7	10.3	6.6
72	77+250	56.6	23.1	0	4.5	3.6
73	77+464	452.3	162.5	0.4	17.7	14.5
74	77+651	87.6	43.2	0.2	5.3	5.6
75	77+850	340.9	108.3	0.1	16.2	10.6
76	78+034	513	127	0.1	21.4	11.8
77	78+253	11.8	7.6	0	1.5	1.9
78	78+812	6403.8	530.2	9.8	80.6	24.3
79	79+086	18.2	6.3	0	2.2	1.4
80	79+251	23.7	8.2	0	2.5	1.6
81	79+446	12.5	3.7	0	1.4	0.8
82	79+650	60.7	320.1	1.9	7.7	35
83	79+851	1780.7	800.4	6.3	63.4	54
84	80+050	139.9	237.8	0.8	16	30.8
85	80+253	2846.1	932.7	6.6	107	60.7
86	80+452	0	6.8	0	0	1.3
87	80+649	60.7	320.1	1.9	7.7	35
88	80+851	59.6	42.4	0.5	6.9	5.8
89	81+062	192.4	465	8.7	10	35.5
90	81+251	90.2	5.7	0.3	8.4	0.8
91	81+453	77.6	400.2	2	8.1	45.5
92	81+650	35.6	52.5	0.6	2.4	8
93	81+851	55	48.1	0.7	3.5	7.6
94	82+047	22.2	41.1	0.5	1.6	6.4
95	82+289	0.3	0.4	0	0	0.1
96	82+450	1.1	5	0	0.2	1.5
97	82+654	13.6	2	0.8	1.1	0.4
98	82+750	36	12.7	1	2.7	2.4
99	82+950	50.5	23.5	1.1	3.5	4.2
100	83+150	499.4	793.2	2.4	35.3	73.1
101	83+376	0	8.9	0	0	2.5
102	83+481	0.2	14	0	0.1	3.2

Via Esquerda						
N° Ensaio	Pk	SEM REFORÇO		COM REFORÇO		
		Dano εt (%)	Dano εz (%)	Dano εt C.Ref. (%)	Dano εt C.Exis.(%)	Dano εz (%)
52	73+067	231.7	64	0.9	6.8	5.3
53	73+264	44	7	0	2.6	0.9
54	73+465	210.5	61.7	0.9	6.5	5.2
55	73+667	361.5	66	1	9	5
56	73+870	47.6	30.4	0.1	2.8	3.4
57	74+079	235.4	60	0.9	7.2	4.9
58	74+282	17.5	2.1	0	1.4	0.3
59	74+479	132.3	12.8	0.8	4.3	1.2
60	74+679	260	62.6	0.9	7.5	5
61	74+857	196.7	62.4	0.9	6.2	5.4
62	75+080	231.7	65.7	0.9	6.7	5.5
63	75+273	107.1	39.6	0.6	4	3.9
64	75+474	255.5	52.4	0.5	7.5	4.3
65	75+682	72	29.9	0.7	3	3.1
66	75+880	2847.6	271.8	2.8	64.1	19.4
67	76+081	525.4	44.2	0.2	25.5	4.7
68	76+274	1056.5	110.7	1.8	37.8	9.4
69	76+479	2768.5	85.1	1.8	58.7	6.1
70	76+678	16.2	9.1	0	2.9	1.8
71	76+882	2182.4	137.7	1.9	53.3	10.6
72	77+000	601.6	100	1.3	26	9.9
73	77+199	146.5	28.7	0.1	12.3	3.7
74	77+401	1000	25.3	0.6	30.8	2.4
75	77+598	190.4	9.9	0	12.8	1.5
76	77+783	0	1	0	0	0.2
77	77+998	173.4	10.7	0	12.7	1.6
78	78+204	0	1.8	0	0	0.4
79	78+767	1021.4	149.3	0	45.4	17.5
80	79+008	0	0.3	0	0	0.1
81	79+207	0	0.1	0	0	0
82	79+350	220.5	40.4	0.7	17.4	5.8
83	79+599	0.4	12.7	0	0.3	2.3
84	79+799	1219.7	141.7	6.3	39.9	13
85	79+998	2541.9	194.7	4.8	70.4	16.4
86	80+195	552.2	74.8	3.5	21.9	8.8
87	80+403	31.4	29.2	0.3	5.2	4.6
88	80+592	836.6	108.8	7.1	28.9	10.1
89	80+798	581.1	39.8	1.6	28.7	4.7
90	81+001	595.7	736.7	12.5	29.9	60.4
91	81+192	0	1.9	0	0	0.5
92	81+390	34.3	305.5	3.1	6.8	29.9
93	81+599	8903.7	1295.7	50.8	122.4	50.3
94	81+799	146.6	208.1	4.9	12.9	20.8
95	81+997	53.1	60.1	1.4	7.6	7.7
96	82+200	0	0	0	0	0
97	82+400	0	0.8	0	0	0.2
98	82+602	1625.3	208.4	19	69.4	16.2
99	82+801	129.4	61.1	1.5	19.2	9.1
100	83+000	4743.7	2426.7	63.7	161	144.1
101	83+185	3.1	57.2	0.1	1.6	11
102	83+398	0	3.8	0	0	1.1

5.3 Análise do Risco no Dimensionamento das Soluções de Reforço

O principal objetivo da presente Dissertação fica assim concluído com a análise do comportamento estrutural dos pavimentos em estudo, e soluções de reforço anteriormente dimensionadas.

Efetuou-se para tal, o cálculo do dano à fadiga por tração na base das camadas betuminosas, de reforço e existentes e, o dano à deformação permanente no topo dos solos de fundação. Esse cálculo foi efetuado antes e após a aplicação das soluções de reforço dimensionadas.

Em termos de tráfego, considerou-se o tráfego de projeto utilizado no dimensionamento, o qual varia ao longo do troço a reabilitar, conforme definido no Capítulo 3.

De referir que efetuou-se a verificação dos danos nas estruturas existentes, antes do reforço para fins comparativos.

A análise dos valores dos danos, e inerentemente o risco associado ao dimensionamento, mensurou-se através do cálculo da percentagem dos pontos, cujos danos, à fadiga ou à deformação permanente, se encontravam entre os seguintes três intervalos:

- >0% e <80%
- ≥80% e <100%
- ≥100%

Com base na verificação dos valores encontrados, principalmente no que respeita ao intervalo para um dano superior a 100%, é possível verificar a adequabilidade das soluções de reforço previstas e, por sua vez, o risco ou grau de confiança conferido pela metodologia de dimensionamento utilizada. Apresentam-se seguidamente três tabelas (Tabelas 5.3 a 5.5), em que se efetua um resumo da análise de resultados, o qual permite tirar algumas conclusões.

Tabela 5.3 – Resultados da análise dos danos à fadiga nas Camadas Betuminosas de Reforço

	Dano à Fadiga (εt) - Na base das Camadas Betuminosas de Reforço				
	Média Dano εt (%)	Desvio Padrão Dano εt (%)	% Pontos Dano εt >0% e <80%	% Pontos Dano εt ≥80% e <100%	% Pontos Dano εt ≥100%
Via Dir. (Sem Reforço)	-	-	-	-	-
Via Dir. (Com Reforço)	1.40	1.99	100.0	0.0	0.0
Via Esq. (Sem Reforço)	-	-	-	-	-
Via Esq. (Com Reforço)	2.75	8.28	100.0	0.0	0.0
Média Global (Sem Reforço)	-	-	-	-	-
Média Global (Com Reforço)	2.07	5.13	100.0	0.0	0.0

Tabela 5.4 – Resultados da análise dos danos à fadiga nas Camadas Betuminosas Existentes

	Dano à Fadiga (εt) - Na base das Camadas Betuminosas Existentes				
	Média Dano εt (%)	Desvio Padrão Dano εt (%)	% Pontos Dano εt >0% e <80%	% Pontos Dano εt ≥80% e <100%	% Pontos Dano εt ≥100%
Via Dir. (Sem Reforço)	477.81	972.18	40.2	2.9	56.9
Via Dir. (Com Reforço)	12.17	17.15	98.0	1.0	1.0
Via Esq. (Sem Reforço)	722.46	1262.54	29.4	0.0	70.6
Via Esq. (Com Reforço)	18.94	24.28	98.0	0.0	2.0
Média Global (Sem Reforço)	600.13	1117.36	34.8	1.5	63.7
Média Global (Com Reforço)	15.55	20.72	98.0	0.5	1.5

Tabela 5.5 – Resultados da análise dos danos à deformação permanente

	Dano à Deformação Permanente (εz)				
	Média Dano εz (%)	Desvio Padrão Dano εz (%)	% Pontos Dano εz >0% e <80%	% Pontos Dano εz ≥80% e <100%	% Pontos Dano εz ≥100%
Via Dir. (Sem Reforço)	106.82	167.38	69.6	2.9	27.5
Via Dir. (Com Reforço)	8.84	12.44	100.0	0.0	0.0
Via Esq. (Sem Reforço)	111.38	279.75	67.6	4.9	27.5
Via Esq. (Com Reforço)	8.23	16.19	99.0	0.0	1.0
Média Global (Sem Reforço)	109.10	223.57	68.6	3.9	27.5
Média Global (Com Reforço)	8.54	14.31	99.5	0.0	0.5

Verifica-se que, ao nível do dano à fadiga por tração das camadas betuminosas de reforço, a percentagem de sucesso das soluções dimensionadas foi de 100%, não se registando nenhum ponto com um dano acima do admissível. Já no que respeita ao dano à fadiga nas camadas betuminosas existentes, após reforço, em média, em apenas 1,5% dos pontos analisados, é que não é cumprido o objetivo previsto. De igual forma, relativamente ao dano à deformação permanente no topo dos solos de fundação, em média, em apenas 0,5% dos pontos analisados, é que não se verifica a adequabilidade das soluções.

Estes resultados são de todo bastante satisfatórios, pois dada a heterogeneidade da constituição e estado das estruturas de pavimento existentes, é perfeitamente aceitável, na globalidade da amostra analisada, uma taxa de insucesso de 1,5%, quanto ao dano à fadiga, e de 0,5%, quanto ao dano à deformação permanente.

A acrescentar que os valores onde se verificam danos elevados correspondem a localizações pontuais, as quais se encontram identificadas, e que teriam de ser objeto de outro tipo de intervenção mais alargada.

É de referir igualmente, que não seria economicamente viável efetuar-se o dimensionamento de

um reforço de forma a fazer face a localizações em que as estruturas de pavimento se encontram em estado de ruína. Para a reabilitação dessas estruturas, intervenções de carácter mais abrangente poderão ser equacionadas, como sendo a remoção integral da estrutura e sua reposição por uma nova.

Dado o exposto, e face aos valores dos danos decorrentes da verificação em contínuo das soluções de reforço, tidos como aferidores e indicadores do risco associado ao dimensionamento efetuado, poderá concluir-se que o grau de confiança da metodologia utilizada é elevado, encontrando-se na ordem dos 98,5% de sucesso.

6 Considerações Finais

6.1 Introdução

Finda a apresentação das atividades desenvolvidas, pretende-se com o presente capítulo elencar as deduções possíveis retirar, a título de conclusão do estudo.

De referir que, o programa de trabalhos e objetivos propostos foram alcançados, tendo-se conseguido mensurar o risco, ou grau de confiança, obtido através da aplicação da metodologia de dimensionamento de uma solução de reforço, baseada num procedimento de deflexões reversíveis.

Por fim, indicam-se como sugestão, potenciais perspetivas e abordagens para investigação futura, relativas aos temas abordados nesta Dissertação.

6.2 Conclusões

Como objetivo principal do presente estudo, pretendeu-se efetuar uma análise do risco associado a um dimensionamento empírico-mecanicista, apoiado numa caracterização das estruturas existentes através de um procedimento de deflexões reversíveis.

Considera-se que tal objetivo foi satisfatoriamente atingido, tendo-se para tal considerado como aferidor do risco associado, o valor dos danos à fadiga por tração na base das camadas betuminosas (de reforço e existentes) e à deformação permanente no topo do solo de fundação.

Recorrendo-se a uma verificação em contínuo das soluções de reforço dimensionadas, entenda-se em contínuo, pois utiliza todos os pontos de ensaio executados com defletómetro de impacto ao longo de uma determinada extensão de via a reabilitar, foi possível averiguar a validade e aplicabilidade, bem como o grau de confiança conferido, da metodologia de dimensionamento utilizada.

Dado isto, através da análise dos resultados obtidos, conclui-se que, efetuando-se um dimensionamento através da metodologia referida, o qual considerou valores de dano no

intervalo dito economicamente viável, ou seja, entre os 80 a 100%, obtém-se uma percentagem de sucesso ao nível da verificação estrutural dos dois critérios da ordem dos 98,5%.

Pode então dizer-se que o grau de confiança conferido pela metodologia é de cerca de 98,5% e, analisado de outro ponto de vista, que o mesmo acarreta um risco de não conformidade, segundo os mesmos critérios, de aproximadamente 1,5%, relativamente à extensão total em estudo.

Tal conclusão julga-se que permitirá contribuir de forma válida no auxílio à decisão no decurso de dimensionamentos futuros, permitindo aos utilizadores das metodologias obterem um conhecimento mais alargado das mesmos e, inerentemente, atingirem soluções mais eficazes e equilibradas.

6.3 Desenvolvimento em trabalhos futuros

Na análise de risco desenvolvida na presente Dissertação não foram abordadas questões relativamente a impactos de ordem financeira, como sendo do custo de operações de manutenção não programada, de perdas de exploração, entre outras, deixando-se como sugestão essa análise para trabalhos futuros.

A título de sugestão, refere-se igualmente como possibilidade, efetuar-se um estudo semelhante ao apresentado nesta Dissertação, o qual tenha prosseguimento na aplicação prática das soluções e posterior monitorização das mesmas ao longo do período de dimensionamento.

Deverá para tal efetuar-se o registo das solicitações de tráfego e das condições climáticas, durante o período de projeto, ou um outro que seja estipulado, e efetuar-se nova campanha de inspeção visual e de auscultação com ensaios de carga, pretendendo-se assim chegar a conclusões mais aprimoradas quanto ao grau de confiança de determinada metodologia, desta vez, confirmadas através de uma monitorização do desempenho das soluções de reforço em serviço.

Referências bibliográficas

AASHTO, 1986. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C..

APORBET, 1998, Misturas Betuminosas, Contribuição para a Normalização do Fabrico e da Aplicação, Lisboa.

Branco, F., Pereira, P. e Picado Santos, L., 2005. Pavimentos Rodoviários, Coimbra.

Brown, S.F., 1980, An Introduction to the Analytical Design of Bituminous Pavements, University of Nottingham, United Kingdom.

Burmister, D.M., 1943, The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways. Proceedings, Highway Research Board, Vol. 23, pág. 126-144.

EP, 2014, Caderno de Encargos Tipo Obras (CETO) – Volume 03 – Pavimentação, Estradas de Portugal, S.A., Lisboa.

JAE, 1995, Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional, Junta Autónoma de Estradas, Lisboa.

Pais, J.C., 1999, Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis. Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Minho.

Pais, J.C., P.A.A. Pereira, M.C. Azevedo & J.B. Sousa, 1998 c), The Reflective Cracking in Thin Surfacings. Proceedings of the 1st World Conference on Highway Surfacings, Budapest.

Pereira, P., Miranda, V., 1999. Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários, Universidade do Minho, Braga.

Powell, W.D., J.F. Potter, H.C. Mayhew & M.E. Nunn, 1984, The Structural Design of Bituminous Roads, TRRL Laboratory Report 1132.

Shell, 1978. Shell Pavement Design Manual - Asphalt Pavements and Overlays of road Traffic. Shell International Petroleum, London.

Ullidtz, P., 1987, Pavement Analysis, Amsterdam, Netherlands.

Ullidtz, P. and Peattie K.R., 1982, Programmable Calculators in the Assessment of Overlays and Maintenance Strategies, Proceeding of the 5th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements – Volume I, pp. 671-681, Delft, Netherlands.

Anexo

Tabela 0.1 – Características das camadas, via direita sem reforço (pontos de 1 a 51)

Via Direita - Sem Reforço											
N° Ensaio	Pk	Espessuras (m)				Módulos de Rigidez (MPa)					
		Betum. (1)	Betum. (2)	Granul. (1)	Granul. (2)	Betum. (1)	Betum. (2)	Granul. (1)	Granul. (2)	Fund.
1	63+100	0.21	0	0.12	0.32	1800	0	120	50	210
2	63+301	0.21	0	0.12	0.32	1900	0	130	50	160
3	63+525	0.21	0	0.12	0.32	1750	0	130	50	160
4	63+701	0.21	0	0.12	0.32	1750	0	41	37	66
5	63+902	0.21	0	0.12	0.32	1750	0	70	55	95
6	64+101	0.21	0	0.12	0.32	1750	0	60	50	130
7	64+300	0.21	0	0.12	0.32	1750	0	85	50	150
8	64+504	0.21	0	0.12	0.32	1900	0	80	50	100
9	64+700	0.21	0	0.12	0.32	1750	0	50	40	120
10	64+902	0.21	0	0.12	0.32	1750	0	85	50	150
11	65+099	0.21	0	0.12	0.32	1750	0	100	50	190
12	65+300	0.21	0	0.12	0.32	1750	0	90	50	210
13	65+498	0.21	0	0.12	0.32	1750	0	70	50	100
14	65+706	0.21	0	0.12	0.32	1750	0	130	50	230
15	65+895	0.21	0	0.12	0.32	1900	0	145	50	150
16	66+093	0.21	0	0.12	0.32	1750	0	60	50	110
17	66+302	0.21	0	0.12	0.32	1750	0	44	40	125
18	66+525	0.21	0	0.12	0.32	7000	0	2300	100	205
19	66+700	0.21	0	0.12	0.32	6000	0	2000	50	160
20	66+900	0.21	0	0.12	0.32	1750	0	210	55	130
21	67+105	0.21	0	0.12	0.32	1750	0	185	55	145
22	67+301	0.21	0	0.12	0.32	1750	0	240	55	125
23	67+506	0.21	0	0.12	0.32	1750	0	135	50	150
24	67+698	0.22	0	0.12	0.32	3900	0	600	50	600
25	67+854	0.22	0	0.12	0.32	1750	0	100	50	170
26	68+064	0.22	0	0.12	0.32	7000	0	3000	55	100
27	68+243	0.22	0	0.12	0.32	3000	0	200	50	140
28	68+454	0.22	0	0.12	0.32	3450	0	110	50	140
29	68+653	0.22	0	0.12	0.32	1750	0	50	45	215
30	68+855	0.22	0	0.12	0.32	1750	0	85	55	130
31	69+053	0.22	0	0.12	0.32	6500	0	200	50	100
32	69+252	0.22	0	0.12	0.32	1750	0	110	50	175
33	69+452	0.22	0	0.12	0.32	1750	0	40	35	70
34	69+667	0.22	0	0.12	0.32	2700	0	300	50	160
35	69+852	0.22	0	0.12	0.32	1750	0	60	50	95
36	70+069	0.22	0	0.12	0.32	4000	0	200	50	150
37	70+258	0.22	0	0.12	0.32	4300	0	120	50	135
38	70+458	0.22	0	0.12	0.32	3200	0	85	50	115
39	70+650	0.22	0	0.12	0.32	3000	0	200	50	170
40	70+852	0.22	0	0.12	0.32	1750	0	60	50	90
41	71+058	0.22	0	0.12	0.32	4350	0	100	50	400
42	71+250	0.22	0	0.12	0.32	5300	0	100	50	215
43	71+438	0.22	0	0.12	0.32	1750	0	120	60	180
44	71+646	0.22	0	0.12	0.32	3500	0	100	50	155
45	71+853	0.17	0	0.12	0.32	1750	0	140	50	130
46	72+059	0.17	0	0.12	0.32	1750	0	220	50	110
47	72+252	0.17	0	0.12	0.32	1750	0	50	35	115
48	72+454	0.17	0	0.12	0.32	5000	0	140	50	120
49	72+654	0.17	0	0.12	0.32	2600	0	120	50	130
50	72+852	0.17	0	0.12	0.32	3000	0	120	50	120
51	73+052	0.17	0	0.12	0.32	1750	0	110	45	90

Tabela 0.2 – Características das camadas, via direita sem reforço (pontos de 52 a 102)

Via Direita - Sem Reforço										
N° Ensaio	Pk	Espessuras (m)				Módulos de Rigidez (MPa)				
		Betum. (1)	Betum. (2)	Granul. (1)	Granul. (2)	Betum. (1)	Betum. (2)	Granul. (1)	Granul. (2)	Fund.
52	73+252	0.17	0	0.12	0.32	4500	0	50	40	90
53	73+453	0.17	0	0.12	0.32	1750	0	55	50	85
54	73+653	0.17	0	0.12	0.32	5600	0	250	60	130
55	73+850	0.17	0	0.12	0.32	5550	0	250	60	150
56	74+052	0.17	0	0.12	0.32	1750	0	110	50	130
57	74+234	0.17	0	0.12	0.32	1750	0	65	55	175
58	74+457	0.17	0	0.12	0.32	1750	0	140	50	142
59	74+647	0.17	0	0.12	0.32	5800	0	250	50	100
60	74+853	0.17	0	0.12	0.32	2600	0	110	50	190
61	75+053	0.17	0	0.12	0.32	1750	0	50	45	90
62	75+252	0.17	0	0.12	0.32	2200	0	130	50	130
63	75+465	0.17	0	0.12	0.32	6500	0	300	50	130
64	75+649	0.16	0	0.12	0.32	1900	0	100	40	270
65	75+854	0.16	0	0.12	0.32	1900	0	200	60	120
66	76+054	0.16	0	0.12	0.32	2000	0	100	50	115
67	76+265	0.16	0	0.12	0.32	1750	0	40	35	200
68	76+453	0.16	0	0.12	0.32	1750	0	90	40	250
69	76+650	0.16	0	0.12	0.32	5000	0	200	50	190
70	76+851	0.16	0	0.12	0.32	1800	0	100	60	100
71	77+065	0.16	0	0.12	0.32	1750	0	170	65	145
72	77+250	0.16	0	0.12	0.32	5000	0	325	60	130
73	77+464	0.16	0	0.12	0.32	3000	0	170	40	105
74	77+651	0.16	0	0.12	0.32	3000	0	300	60	250
75	77+850	0.16	0	0.12	0.32	3800	0	180	40	85
76	78+034	0.16	0	0.12	0.32	3800	0	150	40	100
77	78+253	0.16	0	0.12	0.32	7000	0	500	60	100
78	78+812	0.16	0	0.12	0.32	1750	0	37	35	200
79	79+086	0.16	0	0.12	0.32	7000	0	400	70	450
80	79+251	0.16	0	0.12	0.32	5500	0	375	70	350
81	79+446	0.16	0	0.12	0.32	5500	0	475	90	450
82	79+650	0.11	0	0.12	0.18	3700	0	600	45	108
83	79+851	0.11	0	0.12	0.18	5200	0	150	50	100
84	80+050	0.11	0	0.12	0.18	6500	0	500	50	105
85	80+253	0.11	0	0.12	0.18	6250	0	120	40	80
86	80+452	0.11	0	0.12	0.18	7000	0	4500	90	120
87	80+649	0.11	0	0.12	0.18	3700	0	600	45	108
88	80+851	0.11	0	0.12	0.18	5500	0	600	105	121
89	81+062	0.11	0	0.12	0.18	2200	0	350	50	86
90	81+251	0.11	0	0.12	0.18	7000	0	450	225	170
91	81+453	0.11	0	0.12	0.18	3700	0	550	45	135
92	81+650	0.06	0.19	0.12	0.18	5000	1750	150	45	93
93	81+851	0.06	0.19	0.12	0.18	6000	1750	90	45	93
94	82+047	0.06	0.19	0.12	0.18	4700	1750	200	50	120
95	82+289	0.06	0.19	0.12	0.18	7500	6500	1000	150	140
96	82+450	0.06	0.19	0.12	0.18	7500	7000	1000	70	195
97	82+654	0.06	0.19	0.12	0.18	7500	1750	220	200	250
98	82+750	0.06	0.19	0.12	0.18	7000	1750	150	100	175
99	82+950	0.06	0.19	0.12	0.18	6500	1750	125	80	170
100	83+150	0.14	0	0.12	0.18	3500	0	300	45	130
101	83+376	0.14	0	0.12	0.18	7000	0	5000	70	160
102	83+481	0.14	0	0.12	0.18	7000	0	3000	70	160

Tabela 0.3 – Defletogramas calculados, via direita sem reforço (pontos de 1 a 51)

Via Direita - Sem Reforço										
N° Ensaio	Pk	Defletograma calculado - Deflexões em µm								
		Df1 (0 mm)	*Df2 (300 mm)*	*Df3 (450 mm)*	*Df4 (600 mm)*	*Df5 (900 mm)*	*Df6 (1200 mm)*	*Df7 (1500 mm)*	*Df8 (1800 mm)*	*Df9 (2100 mm)*
1	63+100	707	491	393	311	194	123	80	55	41
2	63+301	743	536	440	359	239	161	112	81	61
3	63+525	749	530	431	348	228	152	105	75	58
4	63+701	1200	932	787	658	453	315	226	170	135
5	63+902	902	660	542	441	293	200	145	111	90
6	64+101	956	706	580	470	306	201	137	98	74
7	64+300	890	652	536	437	289	194	134	97	73
8	64+504	870	643	530	433	286	194	138	104	84
9	64+700	1122	861	722	599	406	276	192	138	103
10	64+902	890	652	536	437	289	194	134	97	73
11	65+099	784	556	450	361	231	150	100	69	51
12	65+300	771	540	432	341	210	131	84	57	41
13	65+498	939	695	575	472	317	218	156	117	93
14	65+706	628	416	325	252	151	93	61	44	34
15	65+895	689	490	402	329	222	153	109	80	62
16	66+093	928	679	554	446	287	188	129	95	76
17	66+302	965	706	571	454	279	171	111	78	62
18	66+525	275	224	198	174	133	100	76	58	46
19	66+700	395	332	299	268	209	160	122	93	72
20	66+900	581	391	318	260	181	132	101	80	67
21	67+105	585	390	313	253	170	121	90	71	59
22	67+301	553	369	301	248	176	131	102	83	69
23	67+506	678	467	376	302	197	134	95	71	57
24	67+698	480	388	345	305	237	182	139	105	78
25	67+854	825	608	507	421	290	203	145	106	80
26	68+064	313	268	247	227	191	160	134	113	96
27	68+243	557	425	360	302	211	148	107	80	63
28	68+454	573	447	380	320	222	153	108	80	62
29	68+653	912	672	549	440	274	166	101	63	43
30	68+855	806	585	480	391	259	174	122	90	70
31	69+053	478	406	364	324	254	197	154	122	99
32	69+252	651	441	348	271	165	104	71	54	45
33	69+452	1226	972	835	710	506	362	264	198	154
34	69+667	573	443	385	335	255	195	150	116	90
35	69+852	995	759	641	537	375	267	197	150	119
36	70+069	547	444	391	343	263	201	155	120	93
37	70+258	595	491	433	379	287	216	164	125	97
38	70+458	714	576	501	432	317	233	174	132	102
39	70+650	601	472	409	354	263	197	148	112	86
40	70+852	981	745	627	523	363	256	187	142	113
41	71+058	500	395	337	283	192	126	81	51	33
42	71+250	492	403	351	302	218	153	107	76	54
43	71+438	627	423	335	264	165	107	74	56	45
44	71+646	601	476	408	347	245	172	122	88	66
45	71+853	907	632	507	409	276	194	141	106	83
46	72+059	754	513	413	337	233	169	127	99	81
47	72+252	1414	1048	845	672	421	268	177	124	92
48	72+454	678	543	465	395	284	206	153	116	91
49	72+654	896	677	564	470	333	245	185	144	114
50	72+852	781	583	479	391	264	183	132	99	78
51	73+052	1008	714	575	464	313	221	163	126	102

Tabela 0.4 – Defletogramas calculados, via direita sem reforço (pontos de 52 a 102)

Via Direita - Sem Reforço										
N° Ensaio	Pk	Defletograma calculado - Deflexões em µm								
		Df1 (0 mm)	*Df2 (300 mm)*	*Df3 (450 mm)*	*Df4 (600 mm)*	*Df5 (900 mm)*	*Df6 (1200 mm)*	*Df7 (1500 mm)*	*Df8 (1800 mm)*	*Df9 (2100 mm)*
52	73+252	1031	854	741	634	457	329	241	181	141
53	73+453	1169	827	649	504	309	202	145	114	95
54	73+653	514	406	346	295	215	160	121	94	75
55	73+850	466	359	301	251	177	127	95	73	59
56	74+052	974	670	522	404	245	156	107	79	63
57	74+234	1125	794	624	488	302	197	136	99	76
58	74+457	900	625	500	402	269	188	135	101	77
59	74+647	593	482	418	361	269	202	155	121	98
60	74+853	882	653	530	428	278	185	126	89	66
61	75+053	1322	968	777	618	395	264	187	141	112
62	75+252	910	670	553	458	324	238	180	140	110
63	75+465	554	447	383	324	227	159	114	85	67
64	75+649	1316	976	795	644	428	294	210	156	119
65	75+854	745	501	399	324	225	164	124	97	78
66	76+054	986	688	542	426	272	183	130	98	78
67	76+265	1652	1235	1000	801	516	345	243	179	137
68	76+453	1349	985	793	636	414	280	197	144	108
69	76+650	582	440	359	288	184	118	78	56	43
70	76+851	1015	694	540	421	267	182	134	105	86
71	77+065	755	479	362	277	173	117	86	68	57
72	77+250	535	409	341	284	198	142	105	82	67
73	77+464	899	675	550	443	286	189	131	98	78
74	77+651	548	373	291	226	138	87	58	42	32
75	77+850	908	716	603	503	348	243	175	132	104
76	78+034	926	727	607	501	334	224	155	113	87
77	78+253	423	340	297	261	205	164	133	110	92
78	78+812	1624	1203	965	763	475	303	202	141	102
79	79+086	429	341	295	255	194	149	115	89	68
80	79+251	468	365	313	271	206	160	125	99	78
81	79+446	386	291	248	213	161	125	97	77	61
82	79+650	759	557	462	385	270	192	139	105	83
83	79+851	931	653	499	380	229	154	116	95	81
84	80+050	725	552	458	380	264	187	136	104	83
85	80+253	1194	910	732	581	364	237	165	124	101
86	80+452	430	353	309	268	200	150	114	90	73
87	80+649	759	557	462	385	270	192	139	105	83
88	80+851	538	381	308	253	178	132	103	84	70
89	81+062	931	641	524	438	313	230	174	135	109
90	81+251	413	270	206	161	110	83	68	57	49
91	81+453	671	467	375	303	201	137	99	75	61
92	81+650	662	514	446	387	289	217	164	128	102
93	81+851	684	534	463	400	297	220	166	127	101
94	82+047	587	443	381	327	240	177	132	101	80
95	82+289	244	198	178	161	131	107	89	74	63
96	82+450	258	211	189	169	132	102	79	62	50
97	82+654	341	222	178	145	99	72	55	44	37
98	82+750	451	320	264	220	153	108	80	62	50
99	82+950	492	355	296	247	171	121	87	66	52
100	83+150	876	676	572	485	352	259	193	147	113
101	83+376	350	298	274	250	206	168	136	110	89
102	83+481	375	315	286	259	210	170	136	109	88

Tabela 0.5 – Características das camadas, via esquerda sem reforço (pontos de 1 a 51)

Via Esquerda - Sem Reforço								
Nº Ensaio	Pk	Espessuras (m)			Módulos de Rigidez (MPa)			
		Betum. (1)	Granul. (1)	Granul. (2)	Betum. (1)	Granul. (1)	Granul. (2)	Fund.
1	62+954	0.16	0.14	0.3	3500	170	150	65
2	63+086	0.16	0.14	0.3	2000	90	70	50
3	63+279	0.16	0.14	0.3	1750	55	53	52
4	63+480	0.16	0.14	0.3	2350	150	140	90
5	63+680	0.16	0.14	0.3	1750	80	70	50
6	63+884	0.16	0.14	0.3	1750	200	195	100
7	64+065	0.16	0.14	0.3	4700	80	75	70
8	64+277	0.16	0.14	0.3	4100	120	75	70
9	64+482	0.16	0.14	0.3	3200	130	60	50
10	64+682	0.16	0.14	0.3	1750	70	65	60
11	64+872	0.16	0.14	0.3	2000	110	100	55
12	65+083	0.16	0.14	0.3	2200	110	100	40
13	65+282	0.16	0.14	0.3	1750	205	200	90
14	65+487	0.16	0.14	0.3	7500	400	110	90
15	65+680	0.16	0.14	0.3	2000	120	70	400
16	65+881	0.16	0.14	0.3	1750	75	70	65
17	66+078	0.16	0.14	0.3	6500	200	100	70
18	66+281	0.16	0.14	0.3	2600	400	350	100
19	66+482	0.16	0.14	0.3	1750	140	130	100
20	66+681	0.16	0.14	0.3	7500	3500	100	95
21	66+879	0.16	0.14	0.3	1750	90	85	40
22	67+071	0.16	0.14	0.3	5600	250	80	70
23	67+281	0.16	0.14	0.3	6500	70	65	60
24	67+482	0.16	0.14	0.3	3300	125	120	70
25	67+679	0.16	0.14	0.3	5200	60	50	45
26	67+881	0.16	0.14	0.3	1750	250	70	65
27	68+081	0.16	0.14	0.3	3000	90	85	40
28	68+280	0.16	0.14	0.3	2700	55	50	45
29	68+481	0.16	0.14	0.3	7500	2000	250	70
30	68+679	0.16	0.14	0.3	2500	500	150	60
31	68+871	0.16	0.14	0.3	1750	80	70	65
32	69+083	0.16	0.14	0.3	6900	375	180	50
33	69+281	0.15	0.12	0.32	1750	80	70	55
34	69+480	0.15	0.12	0.32	2100	95	90	55
35	69+672	0.15	0.12	0.32	3200	170	150	55
36	69+877	0.15	0.12	0.32	2100	42	41	40
37	70+079	0.15	0.12	0.32	2700	180	110	100
38	70+278	0.15	0.12	0.32	5000	170	70	55
39	70+481	0.15	0.12	0.32	6900	975	80	55
40	70+679	0.15	0.12	0.32	5500	1000	70	55
41	70+879	0.15	0.12	0.32	6500	1200	60	55
42	71+080	0.15	0.12	0.32	7500	3500	200	70
43	71+280	0.15	0.12	0.32	6000	150	120	65
44	71+475	0.15	0.12	0.32	3000	200	150	60
45	71+682	0.15	0.12	0.32	2000	160	60	50
46	71+880	0.15	0.12	0.32	5900	600	200	60
47	72+083	0.15	0.12	0.32	2100	150	70	55
48	72+280	0.15	0.12	0.32	4500	320	50	45
49	72+483	0.15	0.12	0.32	2700	170	70	55
50	72+678	0.15	0.12	0.32	4700	170	70	55
51	72+879	0.15	0.12	0.32	5700	300	170	55

Tabela 0.6 – Características das camadas, via esquerda sem reforço (pontos 52 a 102)

Via Esquerda - Sem Reforço								
Nº Ensaio	Pk	Espessuras (m)			Módulos de Rigidez (MPa)			
		Betum. (1)	Granul. (1)	Granul. (2)	Betum. (1)	Granul. (1)	Granul. (2)	Fund.
52	73+067	0.23	0.15	0.33	1750	70	65	40
53	73+264	0.23	0.15	0.33	4350	70	60	55
54	73+465	0.23	0.15	0.33	1750	75	70	40
55	73+667	0.23	0.15	0.33	1750	50	45	40
56	73+870	0.23	0.15	0.33	2500	200	65	40
57	74+079	0.23	0.15	0.33	1750	70	65	40
58	74+282	0.23	0.15	0.33	4600	150	120	80
59	74+479	0.23	0.15	0.33	1750	100	75	70
60	74+679	0.23	0.15	0.33	1750	65	60	40
61	74+857	0.23	0.15	0.33	1750	80	70	40
62	75+080	0.23	0.15	0.33	1750	70	65	40
63	75+273	0.23	0.15	0.33	1800	110	100	45
64	75+474	0.23	0.15	0.33	2000	60	45	40
65	75+682	0.23	0.15	0.33	1750	150	100	50
66	75+880	0.13	0.15	0.33	3000	80	70	40
67	76+081	0.13	0.15	0.33	4500	200	70	60
68	76+274	0.13	0.15	0.33	3000	170	60	50
69	76+479	0.13	0.15	0.33	3300	70	65	60
70	76+678	0.13	0.15	0.33	7500	1000	60	58
71	76+882	0.13	0.15	0.33	3200	90	70	50
72	77+000	0.13	0.15	0.33	3000	200	90	50
73	77+199	0.13	0.15	0.33	4700	400	70	60
74	77+401	0.13	0.15	0.33	3700	120	90	85
75	77+598	0.13	0.15	0.33	7300	250	90	85
76	77+783	0.13	0.15	0.33	7500	3750	90	85
77	77+998	0.13	0.15	0.33	7000	300	90	85
78	78+204	0.13	0.15	0.33	7000	3200	110	80
79	78+767	0.12	0.15	0.33	7500	100	80	40
80	79+008	0.12	0.15	0.33	7500	5200	1100	100
81	79+207	0.12	0.15	0.33	7500	7200	1500	120
82	79+350	0.12	0.15	0.33	5500	350	100	60
83	79+599	0.12	0.15	0.33	5000	2000	100	55
84	79+799	0.12	0.15	0.33	3500	170	80	50
85	79+998	0.12	0.15	0.33	4700	90	60	45
86	80+195	0.12	0.15	0.33	3500	200	170	55
87	80+403	0.12	0.15	0.33	5000	800	80	55
88	80+592	0.12	0.15	0.33	3000	220	80	55
89	80+798	0.12	0.15	0.33	5000	200	100	70
90	81+001	0.1	0.12	0.18	3700	275	250	45
91	81+192	0.1	0.12	0.18	7500	5500	1200	140
92	81+390	0.1	0.12	0.18	3700	800	170	55
93	81+599	0.1	0.12	0.18	3700	80	70	55
94	81+799	0.1	0.12	0.18	3900	475	250	70
95	81+997	0.1	0.12	0.18	5250	700	250	100
96	82+200	0.1	0.12	0.18	7500	7275	7000	500
97	82+400	0.1	0.12	0.18	7500	7275	3450	150
98	82+602	0.1	0.12	0.18	4500	250	130	110
99	82+801	0.1	0.12	0.18	7500	700	200	120
100	83+000	0.1	0.12	0.18	3800	220	100	55
101	83+185	0.1	0.12	0.18	7500	2200	250	95
102	83+398	0.1	0.12	0.18	7500	7275	2250	100

Tabela 0.7 – Defletogramas calculados, via esquerda sem reforço (pontos de 1 a 51)

Via Esquerda - Sem Reforço									
Nº Ensaio	Defletograma calculado - Deflexões em µm								
	Df1 (0 mm)	*Df2 (300 mm)*	*Df3 (450 mm)*	*Df4 (600 mm)*	*Df5 (900 mm)*	*Df6 (1200 mm)*	*Df7 (1500 mm)*	*Df8 (1800 mm)*	*Df9 (2100 mm)*
1	628	453	365	293	194	134	97	74	59
2	1068	756	597	470	296	195	135	98	75
3	1240	864	668	512	305	193	132	97	76
4	667	438	334	257	160	108	78	60	49
5	1178	831	658	522	340	237	176	138	112
6	667	418	322	255	173	127	97	77	63
7	684	517	418	332	205	126	79	52	37
8	738	560	459	373	246	167	119	90	72
9	928	709	585	479	319	218	154	113	88
10	1040	689	515	380	209	122	77	54	42
11	941	653	514	406	262	178	126	93	72
12	1039	763	622	509	347	245	178	133	102
13	616	369	274	208	128	84	58	42	33
14	472	377	322	273	196	142	107	83	66
15	618	345	224	140	52	22	14	11	9
16	1061	716	547	417	251	164	116	88	70
17	541	424	355	293	198	135	95	70	54
18	394	238	180	138	84	51	30	16	8
19	701	419	301	217	119	69	41	25	15
20	327	272	243	216	167	128	97	74	56
21	1189	851	683	550	366	253	180	130	95
22	595	465	389	322	216	146	100	69	50
23	726	591	503	422	291	200	139	99	72
24	725	530	429	346	231	161	118	90	71
25	955	785	674	572	405	287	207	153	117
26	863	586	459	359	222	141	93	64	46
27	1027	792	660	547	378	266	192	141	105
28	1138	858	696	556	351	224	147	100	70
29	367	304	272	243	192	150	117	91	71
30	675	500	421	358	262	196	148	114	89
31	1086	744	577	448	282	192	141	109	88
32	571	472	414	361	276	211	162	124	96
33	1107	730	545	406	233	144	98	72	58
34	1021	705	549	430	275	189	140	110	90
35	754	549	446	364	251	181	136	107	86
36	1472	1078	856	673	421	280	204	162	136
37	682	453	345	264	162	109	80	63	53
38	787	617	515	426	291	203	148	113	92
39	573	471	410	354	260	191	142	108	86
40	645	529	461	399	296	220	167	130	105
41	633	530	469	410	311	235	181	142	115
42	391	331	299	269	216	173	140	114	95
43	643	502	420	349	243	175	131	103	84
44	696	489	389	311	205	142	102	77	61
45	1074	753	591	463	289	190	134	101	81
46	492	384	326	277	201	148	111	85	67
47	1015	709	556	437	277	187	135	105	85
48	869	691	585	489	338	235	168	125	99
49	925	670	535	426	274	184	132	101	82
50	810	632	527	436	298	209	153	119	96
51	584	456	385	324	232	170	128	99	79

Tabela 0.8 – Defletogramas calculados, via esquerda sem reforço (pontos de 52 a 102)

Via Esquerda - Sem Reforço									
Nº Ensaio	Defletograma calculado - Deflexões em µm								
	Df1 (0 mm)	*Df2 (300 mm)*	*Df3 (450 mm)*	*Df4 (600 mm)*	*Df5 (900 mm)*	*Df6 (1200 mm)*	*Df7 (1500 mm)*	*Df8 (1800 mm)*	*Df9 (2100 mm)*
52	886	668	563	470	326	228	165	124	98
53	570	468	410	355	261	190	139	104	81
54	894	679	575	485	343	246	182	140	113
55	926	698	583	480	317	208	139	97	73
56	724	574	501	433	322	239	181	139	111
57	961	743	637	543	394	291	222	175	143
58	605	516	469	425	349	291	246	212	185
59	727	523	432	354	239	167	122	95	78
60	934	714	606	510	359	256	189	145	116
61	865	651	549	459	320	226	164	124	99
62	859	641	537	445	302	206	145	106	82
63	762	565	476	400	284	206	154	120	96
64	890	688	583	489	336	230	161	117	90
65	697	503	419	349	243	172	126	96	76
66	1257	919	733	584	381	260	185	135	101
67	857	638	516	415	271	182	127	92	69
68	1094	797	639	512	336	231	166	124	96
69	1079	761	585	445	263	165	110	77	55
70	638	526	460	399	297	221	165	125	96
71	1115	802	631	495	314	210	148	109	83
72	940	671	535	429	284	195	139	102	77
73	761	579	478	393	266	184	131	96	73
74	817	563	430	328	200	133	96	74	59
75	629	482	396	324	219	154	114	89	72
76	384	322	288	257	201	156	121	95	76
77	608	462	378	308	205	142	103	78	62
78	417	349	313	280	221	174	138	111	91
79	921	721	595	486	324	221	156	115	90
80	227	185	168	154	128	107	89	74	61
81	194	159	146	134	113	96	81	68	58
82	739	555	455	375	260	187	140	110	89
83	520	415	362	313	231	170	126	95	73
84	1026	735	583	466	309	218	162	127	104
85	1079	794	627	489	299	191	130	94	73
86	831	583	467	383	274	206	161	130	107
87	686	530	448	377	267	191	140	107	85
88	968	672	526	415	269	185	135	104	84
89	776	559	443	352	232	163	122	96	79
90	962	674	542	444	309	223	168	132	108
91	250	198	174	152	117	90	70	56	46
92	781	566	464	381	262	185	137	107	87
93	1318	869	638	471	278	187	140	113	96
94	724	494	394	319	218	155	115	89	73
95	581	408	329	270	190	140	109	88	74
96	120	90	82	75	63	53	46	41	37
97	221	182	167	153	127	106	88	74	63
98	747	474	349	263	165	116	89	71	59
99	553	400	325	268	192	146	117	97	84
100	1089	745	575	450	292	205	154	124	104
101	480	378	326	280	210	160	126	103	86
102	305	262	242	223	188	158	133	112	96

Tabela 0.9 – Características das camadas, via direita com reforço (pontos de 1 a 51)

Via Direita - Com Reforço													
Nº Ensaio	Espessuras (m)						Módulos de Rigidez (MPa)						
	Bet. Ref. (1)	Bet. Ref. (2)	Bet. (1)	Bet. (2)	Gran. (1)	Gran. (2)	Bet. Ref. (1)	Bet. Ref. (2)	Bet. (1)	Bet. (2)	Gran. (1)	Gran. (2)	Fund.
1	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1800	0	120	50	210
2	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1900	0	130	50	160
3	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	130	50	160
4	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	41	37	66
5	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	70	55	95
6	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	60	50	130
7	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	85	50	150
8	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1900	0	80	50	100
9	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	50	40	120
10	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	85	50	150
11	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	100	50	190
12	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	90	50	210
13	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	70	50	100
14	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	130	50	230
15	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1900	0	145	50	150
16	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	60	50	110
17	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	44	40	125
18	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	7000	0	2300	100	205
19	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	6000	0	2000	50	160
20	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	210	55	130
21	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	185	55	145
22	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	240	55	125
23	0.05	0.09	0.15	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	135	50	150
24	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	3900	0	600	50	600
25	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	100	50	170
26	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	7000	0	3000	55	100
27	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	3000	0	200	50	140
28	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	3450	0	110	50	140
29	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	50	45	215
30	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	85	55	130
31	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	6500	0	200	50	100
32	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	110	50	175
33	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	40	35	70
34	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	2700	0	300	50	160
35	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	60	50	95
36	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	4000	0	200	50	150
37	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	4300	0	120	50	135
38	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	3200	0	85	50	115
39	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	3000	0	200	50	170
40	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	60	50	90
41	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	4350	0	100	50	400
42	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	5300	0	100	50	215
43	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	120	60	180
44	0.05	0.09	0.16	0	0.12	0.32	4380	4860	3500	0	100	50	155
45	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	140	50	130
46	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	220	50	110
47	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	50	35	115
48	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	5000	0	140	50	120
49	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	2600	0	120	50	130
50	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	3000	0	120	50	120
51	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	110	45	90

Tabela 0.10 – Características das camadas, via direita com reforço (pontos de 52 a 102)

Via Direita - Com Reforço													
Nº Ensaio	Espessuras (m)						Módulos de Rigidez (MPa)						
	Bet. Ref. (1)	Bet. Ref. (2)	Bet. (1)	Bet. (2)	Gran. (1)	Gran. (2)	Bet. Ref. (1)	Bet. Ref. (2)	Bet. (1)	Bet. (2)	Gran. (1)	Gran. (2)	Fund.
52	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	4500	0	50	40	90
53	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	1600	0	55	50	85
54	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	5600	0	250	60	130
55	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	5550	0	250	60	150
56	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	110	50	130
57	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	65	55	175
58	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	140	50	142
59	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	5800	0	250	50	100
60	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	2600	0	110	50	190
61	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	50	45	90
62	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	2200	0	130	50	130
63	0.05	0.09	0.11	0	0.12	0.32	4380	4860	6500	0	300	50	130
64	0.05	0.09	0.1	0	0.12	0.32	4380	4860	1900	0	100	40	270
65	0.05	0.09	0.1	0	0.12	0.32	4380	4860	1900	0	200	60	120
66	0.05	0.09	0.1	0	0.12	0.32	4380	4860	2000	0	100	50	115
67	0.05	0.09	0.1	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	40	35	200
68	0.05	0.09	0.1	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	90	40	250
69	0.05	0.09	0.1	0	0.12	0.32	4380	4860	5000	0	200	50	190
70	0.05	0.09	0.1	0	0.12	0.32	4380	4860	1800	0	100	60	100
71	0.05	0.09	0.1	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	170	65	145
72	0.05	0.09	0.1	0	0.12	0.32	4380	4860	5000	0	325	60	130
73	0.05	0.09	0.1	0	0.12	0.32	4380	4860	3000	0	170	40	105
74	0.05	0.09	0.1	0	0.12	0.32	4380	4860	3000	0	300	60	250
75	0.05	0.09	0.1	0	0.12	0.32	4380	4860	3800	0	180	40	85
76	0.05	0.09	0.1	0	0.12	0.32	4380	4860	3800	0	150	40	100
77	0.05	0.09	0.1	0	0.12	0.32	4380	4860	7000	0	500	60	100
78	0.05	0.09	0.1	0	0.12	0.32	4380	4860	1750	0	37	35	200
79	0.05	0.11	0.08	0	0.12	0.32	4380	4920	7000	0	400	70	450
80	0.05	0.11	0.08	0	0.12	0.32	4380	4920	5500	0	375	70	350
81	0.05	0.11	0.08	0	0.12	0.32	4380	4920	5500	0	475	90	450
82	0.05	0.11	0.03	0	0.12	0.18	4380	4920	3700	0	600	45	108
83	0.05	0.11	0.03	0	0.12	0.18	4380	4920	5200	0	150	50	100
84	0.05	0.11	0.03	0	0.12	0.18	4380	4920	6500	0	500	50	105
85	0.05	0.11	0.03	0	0.12	0.18	4380	4920	6250	0	120	40	80
86	0.05	0.11	0.03	0	0.12	0.18	4380	4920	7000	0	4500	90	120
87	0.05	0.11	0.03	0	0.12	0.18	4380	4920	3700	0	600	45	108
88	0.05	0.11	0.03	0	0.12	0.18	4380	4920	5500	0	600	105	121
89	0.05	0.11	0.03	0	0.12	0.18	4380	4920	2200	0	350	50	86
90	0.05	0.11	0.03	0	0.12	0.18	4380	4920	7000	0	450	225	170
91	0.05	0.11	0.03	0	0.12	0.18	4380	4920	3700	0	550	45	135
92	0.05	0.11	0	0.17	0.12	0.18	4380	4920	-	1750	150	45	93
93	0.05	0.11	0	0.17	0.12	0.18	4380	4920	-	1750	90	45	93
94	0.05	0.11	0	0.17	0.12	0.18	4380	4920	-	1750	200	50	120
95	0.05	0.11	0	0.17	0.12	0.18	4380	4920	-	6500	1000	150	140
96	0.05	0.11	0	0.17	0.12	0.18	4380	4920	-	7000	1000	70	195
97	0.05	0.11	0	0.17	0.12	0.18	4380	4920	-	1750	220	200	250
98	0.05	0.11	0	0.17	0.12	0.18	4380	4920	-	1750	150	100	175
99	0.05	0.11	0	0.17	0.12	0.18	4380	4920	-	1750	125	80	170
100	0.05	0.11	0.06	0	0.12	0.18	4380	4920	3500	0	300	45	130
101	0.05	0.11	0.06	0	0.12	0.18	4380	4920	7000	0	5000	70	160
102	0.05	0.11	0.06	0	0.12	0.18	4380	4920	7000	0	3000	70	160

Tabela 0.11 – Defletogramas calculados, via direita com reforço (pontos de 1 a 51)

Via Direita - Com Reforço										
N° Ensaio	Pk	Defletograma calculado - Deflexões em µm								
		Df1 (0 mm)	*Df2 (300 mm)*	*Df3 (450 mm)*	*Df4 (600 mm)*	*Df5 (900 mm)*	*Df6 (1200 mm)*	*Df7 (1500 mm)*	*Df8 (1800 mm)*	*Df9 (2100 mm)*
1	63+100	446	349	301	258	186	133	94	68	51
2	63+301	482	387	340	296	223	166	124	94	72
3	63+525	480	382	333	289	215	159	118	88	68
4	63+701	746	636	574	514	407	318	249	196	157
5	63+902	570	467	412	362	276	210	161	126	101
6	64+101	591	486	429	376	284	211	157	118	90
7	64+300	561	458	404	354	268	201	150	113	86
8	64+504	554	454	401	353	269	203	155	120	96
9	64+700	694	585	525	467	363	278	212	161	123
10	64+902	561	458	404	354	268	201	150	113	86
11	65+099	493	393	342	296	218	158	115	84	63
12	65+300	477	377	326	279	201	143	101	72	53
13	65+498	594	490	435	383	294	225	172	133	106
14	65+706	396	300	255	215	150	104	73	53	40
15	65+895	454	361	316	276	208	156	118	91	71
16	66+093	573	468	412	360	271	201	150	114	89
17	66+302	578	471	413	358	264	191	138	102	77
18	66+525	237	189	172	155	124	98	77	61	49
19	66+700	324	271	250	229	188	152	121	97	77
20	66+900	393	303	263	228	173	134	105	85	70
21	67+105	389	298	257	221	165	125	96	76	62
22	67+301	378	290	252	219	168	132	105	86	72
23	67+506	439	344	297	257	190	140	105	81	64
24	67+698	371	307	280	255	208	168	133	104	80
25	67+854	536	438	388	343	264	202	154	118	90
26	68+064	280	235	220	206	178	153	131	112	96
27	68+243	395	320	284	252	195	150	115	90	71
28	68+454	406	332	297	263	203	155	119	92	72
29	68+653	550	447	392	340	250	179	126	88	63
30	68+855	514	416	366	320	242	181	137	104	81
31	69+053	389	332	306	280	232	190	155	127	104
32	69+252	411	316	270	230	164	117	85	64	50
33	69+452	774	666	606	548	442	352	279	221	177
34	69+667	420	345	312	282	228	184	148	118	94
35	69+852	639	537	482	431	340	267	209	165	132
36	70+069	416	349	318	289	236	191	153	123	98
37	70+258	448	379	347	315	256	206	164	131	104
38	70+458	507	428	389	352	283	225	178	141	113
39	70+650	437	362	327	294	236	188	149	117	92
40	70+852	628	526	471	420	330	257	201	158	126
41	71+058	359	291	259	228	172	126	90	63	44
42	71+250	372	308	279	250	195	150	113	85	64
43	71+438	401	308	264	225	162	117	85	64	51
44	71+646	427	353	317	283	221	170	130	100	77
45	71+853	575	464	405	352	264	199	151	116	91
46	72+059	494	391	340	295	223	171	133	106	86
47	72+252	814	683	605	529	396	291	212	155	115
48	72+454	497	417	376	335	263	205	160	125	99
49	72+654	604	503	449	399	312	244	191	152	121
50	72+852	523	429	378	331	251	189	144	111	87
51	73+052	632	517	454	396	300	228	176	138	111

Tabela 0.12 – Defletogramas calculados, via direita com reforço (pontos de 52 a 102)

Via Direita - Com Reforço										
N° Ensaio	Pk	Defletograma calculado - Deflexões em µm								
		Df1 (0 mm)	*Df2 (300 mm)*	*Df3 (450 mm)*	*Df4 (600 mm)*	*Df5 (900 mm)*	*Df6 (1200 mm)*	*Df7 (1500 mm)*	*Df8 (1800 mm)*	*Df9 (2100 mm)*
52	73+252	708	617	563	509	408	323	254	200	158
53	73+453	684	561	489	422	310	227	170	131	105
54	73+653	396	325	291	259	203	159	125	100	80
55	73+850	356	286	253	222	169	129	100	79	63
56	74+052	582	466	401	342	245	175	126	94	72
57	74+234	664	542	472	407	297	215	156	115	86
58	74+457	569	457	398	345	258	193	145	111	86
59	74+647	457	384	348	313	250	199	159	128	104
60	74+853	566	463	407	354	264	193	141	104	77
61	75+053	779	651	576	504	380	284	214	163	127
62	75+252	603	498	442	391	304	236	185	146	117
63	75+465	419	348	311	276	213	162	123	95	75
64	75+649	799	672	597	526	402	303	229	174	133
65	75+854	489	385	333	288	217	166	129	102	83
66	76+054	606	489	425	366	268	197	146	111	87
67	76+265	947	808	721	636	485	365	274	207	157
68	76+453	801	671	593	520	392	292	217	162	121
69	76+650	409	328	285	246	178	127	91	66	50
70	76+851	614	494	427	367	268	197	149	115	93
71	77+065	466	356	300	252	177	127	95	74	60
72	77+250	398	322	284	249	190	145	112	88	72
73	77+464	580	478	422	368	274	203	151	115	90
74	77+651	368	280	237	199	138	96	67	49	37
75	77+850	616	521	467	415	323	248	191	149	119
76	78+034	613	516	461	407	311	234	175	133	103
77	78+253	353	291	263	238	195	161	133	111	94
78	78+812	911	771	684	599	448	328	238	172	125
79	79+086	351	286	256	229	182	144	114	90	70
80	79+251	371	302	270	242	193	155	124	99	80
81	79+446	310	245	217	193	152	121	97	77	62
82	79+650	532	433	382	335	255	194	148	115	91
83	79+851	594	475	406	343	243	174	130	102	84
84	80+050	533	436	384	336	254	191	146	113	90
85	80+253	768	643	564	489	360	262	193	146	115
86	80+452	351	290	262	236	188	149	118	95	78
87	80+649	532	433	382	335	255	194	148	115	91
88	80+851	401	313	271	234	176	135	106	86	72
89	81+062	606	495	435	382	295	229	180	143	116
90	81+251	311	227	188	157	113	86	69	57	49
91	81+453	461	364	313	269	197	144	108	83	66
92	81+650	495	411	371	333	266	212	168	135	110
93	81+851	515	429	386	346	275	217	171	136	110
94	82+047	436	355	317	283	223	174	136	108	86
95	82+289	222	176	162	148	124	104	88	75	64
96	82+450	229	183	167	152	123	99	80	64	52
97	82+654	264	190	160	136	99	74	57	45	37
98	82+750	344	265	230	199	148	111	84	66	53
99	82+950	371	290	253	220	165	123	93	71	57
100	83+150	611	515	462	412	324	254	198	155	122
101	83+376	306	257	239	222	189	158	131	108	89
102	83+481	324	271	250	231	194	161	133	109	89

Tabela 0.13 – Características das camadas, via esquerda com reforço (pontos de 1 a 51)

Via Esquerda - Com Reforço													
N° Ensaio	Pk	Espessuras (m)					Módulos de Rigidez (MPa)						
		Bet. Ref. (1)	Bet. Ref. (2)	Bet. (1)	Gran. (1)	Gran. (2)	Bet. Ref. (1)	Bet. Ref. (2)	Bet. (1)	Gran. (1)	Gran. (2)	Fund.
1	62+954	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	3500	170	150	65
2	63+086	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	2000	90	70	50
3	63+279	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	1750	55	53	52
4	63+480	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	2350	150	140	90
5	63+680	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	1750	80	70	50
6	63+884	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	1750	200	195	100
7	64+065	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	4700	80	75	70
8	64+277	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	4100	120	75	70
9	64+482	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	3200	130	60	50
10	64+682	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	1750	70	65	60
11	64+872	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	2000	110	100	55
12	65+083	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	2200	110	100	40
13	65+282	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	1750	205	200	90
14	65+487	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	7500	400	110	90
15	65+680	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	2000	120	70	400
16	65+881	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	1750	75	70	65
17	66+078	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	6500	200	100	70
18	66+281	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	2600	400	350	100
19	66+482	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	1750	140	130	100
20	66+681	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	7500	3500	100	95
21	66+879	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	1750	90	85	40
22	67+071	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	5600	250	80	70
23	67+281	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	6500	70	65	60
24	67+482	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	3300	125	120	70
25	67+679	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	5200	60	50	45
26	67+881	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	1750	250	70	65
27	68+081	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	3000	90	85	40
28	68+280	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	2700	55	50	45
29	68+481	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	7500	2000	250	70
30	68+679	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	2500	500	150	60
31	68+871	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	1750	80	70	65
32	69+083	0.05	0.09	0.1	0.14	0.3	4380	4860	6900	375	180	50
33	69+281	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	1750	80	70	55
34	69+480	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	2100	95	90	55
35	69+672	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	3200	170	150	55
36	69+877	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	2100	42	41	40
37	70+079	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	2700	180	110	100
38	70+278	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	5000	170	70	55
39	70+481	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	6900	975	80	55
40	70+679	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	5500	1000	70	55
41	70+879	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	6500	1200	60	55
42	71+080	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	7500	3500	200	70
43	71+280	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	6000	150	120	65
44	71+475	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	3000	200	150	60
45	71+682	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	2000	160	60	50
46	71+880	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	5900	600	200	60
47	72+083	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	2100	150	70	55
48	72+280	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	4500	320	50	45
49	72+483	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	2700	170	70	55
50	72+678	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	4700	170	70	55
51	72+879	0.05	0.09	0.09	0.12	0.32	4380	4860	5700	300	170	55

Tabela 0.14 – Características das camadas, via esquerda com reforço (pontos 52 a 102)

Via Esquerda - Com Reforço													
N° Ensaio	Pk	Espessuras (m)					Módulos de Rigidez (MPa)						
		Bet. Ref. (1)	Bet. Ref. (2)	Bet. (1)	Gran. (1)	Gran. (2)	Bet. Ref. (1)	Bet. Ref. (2)	Bet. (1)	Gran. (1)	Gran. (2)	Fund.
52	73+067	0.05	0.09	0.17	0.15	0.33	4380	4860	1750	70	65	40
53	73+264	0.05	0.09	0.17	0.15	0.33	4380	4860	4350	70	60	55
54	73+465	0.05	0.09	0.17	0.15	0.33	4380	4860	1750	75	70	40
55	73+667	0.05	0.09	0.17	0.15	0.33	4380	4860	1750	50	45	40
56	73+870	0.05	0.09	0.17	0.15	0.33	4380	4860	2500	200	65	40
57	74+079	0.05	0.09	0.17	0.15	0.33	4380	4860	1750	70	65	40
58	74+282	0.05	0.09	0.17	0.15	0.33	4380	4860	4600	150	120	80
59	74+479	0.05	0.09	0.17	0.15	0.33	4380	4860	1550	100	75	70
60	74+679	0.05	0.09	0.17	0.15	0.33	4380	4860	1750	65	60	40
61	74+857	0.05	0.09	0.17	0.15	0.33	4380	4860	1750	80	70	40
62	75+080	0.05	0.09	0.17	0.15	0.33	4380	4860	1750	70	65	40
63	75+273	0.05	0.09	0.17	0.15	0.33	4380	4860	1800	110	100	45
64	75+474	0.05	0.09	0.17	0.15	0.33	4380	4860	2000	60	45	40
65	75+682	0.05	0.09	0.17	0.15	0.33	4380	4860	1750	150	100	50
66	75+880	0.05	0.09	0.07	0.15	0.33	4380	4860	3000	80	70	40
67	76+081	0.05	0.09	0.07	0.15	0.33	4380	4860	4500	200	70	60
68	76+274	0.05	0.09	0.07	0.15	0.33	4380	4860	3000	170	60	50
69	76+479	0.05	0.09	0.07	0.15	0.33	4380	4860	3300	70	65	60
70	76+678	0.05	0.09	0.07	0.15	0.33	4380	4860	7500	1000	60	58
71	76+882	0.05	0.09	0.07	0.15	0.33	4380	4860	3200	90	70	50
72	77+000	0.05	0.09	0.07	0.15	0.33	4380	4860	3000	200	90	50
73	77+199	0.05	0.09	0.07	0.15	0.33	4380	4860	4700	400	70	60
74	77+401	0.05	0.09	0.07	0.15	0.33	4380	4860	3700	120	90	85
75	77+598	0.05	0.09	0.07	0.15	0.33	4380	4860	7300	250	90	85
76	77+783	0.05	0.09	0.07	0.15	0.33	4380	4860	7500	3750	90	85
77	77+998	0.05	0.09	0.07	0.15	0.33	4380	4860	7000	300	90	85
78	78+204	0.05	0.09	0.07	0.15	0.33	4380	4860	7000	3200	110	80
79	78+767	0.05	0.09	0.06	0.15	0.33	4380	4860	7500	100	80	40
80	79+008	0.05	0.11	0.04	0.15	0.33	4380	4920	7500	5200	1100	100
81	79+207	0.05	0.11	0.04	0.15	0.33	4380	4920	7500	7200	1500	120
82	79+350	0.05	0.11	0.04	0.15	0.33	4380	4920	5500	350	100	60
83	79+599	0.05	0.11	0.04	0.15	0.33	4380	4920	5000	2000	100	55
84	79+799	0.05	0.11	0.04	0.15	0.33	4380	4920	3500	170	80	50
85	79+998	0.05	0.11	0.04	0.15	0.33	4380	4920	4700	90	60	45
86	80+195	0.05	0.11	0.04	0.15	0.33	4380	4920	3500	200	170	55
87	80+403	0.05	0.11	0.04	0.15	0.33	4380	4920	5000	800	80	55
88	80+592	0.05	0.11	0.04	0.15	0.33	4380	4920	3000	220	80	55
89	80+798	0.05	0.11	0.04	0.15	0.33	4380	4920	5000	200	100	70
90	81+001	0.05	0.11	0.02	0.12	0.18	4380	4920	3700	275	250	45
91	81+192	0.05	0.11	0.02	0.12	0.18	4380	4920	7500	5500	1200	140
92	81+390	0.05	0.11	0.02	0.12	0.18	4380	4920	3700	800	170	55
93	81+599	0.05	0.11	0.02	0.12	0.18	4380	4920	3700	80	70	55
94	81+799	0.05	0.11	0.02	0.12	0.18	4380	4920	3900	475	250	70
95	81+997	0.05	0.11	0.02	0.12	0.18	4380	4920	5250	700	250	100
96	82+200	0.05	0.11	0.02	0.12	0.18	4380	4920	7500	7275	7000	500
97	82+400	0.05	0.11	0.02	0.12	0.18	4380	4920	7500	7275	3450	150
98	82+602	0.05	0.11	0.02	0.12	0.18	4380	4920	4500	250	130	110
99	82+801	0.05	0.11	0.02	0.12	0.18	4380	4920	7500	700	200	120
100	83+000	0.05	0.11	0.02	0.12	0.18	4380	4920	3800	220	100	55
101	83+185	0.05	0.11	0.02	0.12	0.18	4380	4920	7500	2200	250	95
102	83+398	0.05	0.11	0.02	0.12	0.18	4380	4920	7500	7275	2250	100

Tabela 0.15 – Defletogramas calculados, via esquerda com reforço (pontos de 1 a 51)

Via Esquerda - Com Reforço									
Nº Ensaio	Defletograma calculado - Deflexões em µm								
	Df1 (0 mm)	*Df2 (300 mm)*	*Df3 (450 mm)*	*Df4 (600 mm)*	*Df5 (900 mm)*	*Df6 (1200 mm)*	*Df7 (1500 mm)*	*Df8 (1800 mm)*	*Df9 (2100 mm)*
1	432	343	298	257	190	141	106	81	64
2	646	527	459	396	290	210	153	113	86
3	707	577	500	429	308	219	157	115	87
4	427	327	276	232	163	117	86	65	52
5	711	585	513	446	335	252	192	150	121
6	429	326	276	234	171	129	100	79	65
7	458	370	322	276	197	138	95	66	46
8	503	412	363	317	237	176	132	101	80
9	609	508	451	396	301	226	170	129	100
10	586	461	391	326	221	148	99	68	49
11	584	470	407	350	257	188	139	104	80
12	664	551	487	428	327	249	190	146	113
13	385	282	232	191	130	90	64	47	36
14	374	306	273	242	187	144	112	88	71
15	344	237	183	138	74	38	20	11	8
16	620	496	426	362	258	184	133	99	76
17	403	328	290	253	189	140	104	78	61
18	268	187	153	124	82	54	34	21	12
19	419	306	249	200	127	79	49	30	18
20	280	230	210	190	154	123	97	76	59
21	723	598	526	459	345	257	192	142	106
22	431	353	312	273	204	149	109	79	58
23	523	441	396	350	268	202	150	111	82
24	490	396	347	301	225	168	127	98	77
25	663	572	518	465	367	285	220	170	131
26	531	419	359	305	217	153	107	76	54
27	674	569	508	451	348	266	202	153	116
28	693	578	511	445	330	239	171	122	86
29	314	260	238	216	177	144	115	92	72
30	477	388	345	307	241	189	149	118	93
31	647	523	453	389	284	208	155	119	93
32	454	384	349	315	254	203	161	127	99
33	627	497	422	355	245	169	118	85	65
34	625	505	438	376	276	204	154	120	96
35	515	418	367	320	243	186	144	114	92
36	852	717	634	554	417	312	237	185	150
37	438	337	285	239	168	120	88	68	55
38	551	461	410	362	277	211	162	126	101
39	447	377	341	306	242	189	148	117	93
40	492	417	379	341	273	217	173	139	113
41	496	425	389	353	286	230	185	150	123
42	337	284	262	241	202	167	139	116	97
43	473	390	346	305	234	180	139	111	90
44	467	370	319	274	201	148	111	85	67
45	649	527	458	394	287	208	153	116	91
46	383	311	277	245	190	147	115	90	72
47	623	505	438	377	276	203	152	117	93
48	601	508	456	405	313	240	184	142	113
49	590	481	420	364	269	198	148	114	90
50	563	471	419	370	284	217	167	131	106
51	440	362	322	285	221	171	133	105	85

Tabela 0.16 – Defletogramas calculados, via esquerda com reforço (pontos de 52 a 102)

Via Esquerda - Com Reforço									
N° Ensaio	Defletograma calculado - Deflexões em µm								
	Df1 (0 mm)	*Df2 (300 mm)*	*Df3 (450 mm)*	*Df4 (600 mm)*	*Df5 (900 mm)*	*Df6 (1200 mm)*	*Df7 (1500 mm)*	*Df8 (1800 mm)*	*Df9 (2100 mm)*
52	572	474	424	378	296	230	179	140	112
53	422	355	323	292	234	185	145	115	92
54	585	488	438	392	310	245	194	155	126
55	576	475	423	373	285	215	160	121	92
56	510	429	390	353	287	231	186	150	122
57	636	538	487	439	355	285	231	188	156
58	491	428	400	372	322	278	242	211	186
59	476	382	336	295	226	172	133	105	85
60	607	508	457	409	324	255	202	161	131
61	563	465	416	371	291	227	177	140	112
62	549	451	402	355	274	210	160	124	97
63	510	417	372	331	261	205	162	130	105
64	573	479	430	383	300	231	178	138	108
65	464	372	329	290	224	173	134	106	85
66	773	645	567	494	368	272	201	149	111
67	574	470	412	356	262	191	140	103	76
68	694	574	504	438	327	243	181	137	105
69	647	523	450	382	268	186	128	89	63
70	500	424	384	346	275	216	168	132	103
71	689	566	494	425	311	226	165	122	92
72	609	495	431	373	275	203	150	112	85
73	533	438	387	338	254	189	141	106	82
74	520	411	350	295	208	147	107	80	63
75	464	377	331	288	215	161	123	96	77
76	326	272	249	227	186	150	121	98	79
77	446	361	315	273	201	149	111	85	66
78	351	295	271	248	205	168	138	114	94
79	640	536	474	415	311	231	173	131	101
80	210	166	153	142	121	102	86	73	61
81	184	144	134	124	107	92	79	67	57
82	530	434	381	333	252	192	149	117	95
83	401	331	299	268	212	166	130	102	80
84	657	540	472	410	306	230	176	138	111
85	674	555	483	415	299	213	152	112	85
86	563	456	399	348	267	208	165	134	111
87	503	415	369	326	252	193	149	116	92
88	608	492	427	367	269	198	148	114	91
89	529	426	369	317	233	173	131	103	83
90	641	522	456	397	300	229	177	141	115
91	222	172	155	139	111	89	71	58	48
92	541	439	384	335	253	191	147	116	94
93	745	600	512	431	303	215	159	123	100
94	497	391	337	289	214	159	122	95	77
95	428	335	289	249	187	143	113	91	76
96	120	84	77	71	61	53	46	41	37
97	205	163	152	141	120	102	87	74	63
98	481	366	305	252	175	125	94	74	61
99	426	335	290	251	191	149	120	100	85
100	681	551	476	407	297	220	168	132	109
101	392	319	285	254	201	160	129	106	89
102	278	232	218	203	176	151	130	112	96