



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Metodologias para dimensionamento do reforço de pavimentos rodoviários flexíveis

(Versão final após defesa pública)

Ana Sofia Coito Almeida

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof. Doutora Bertha Maria Batista dos Santos

Covilhã, Outubro de 2016

Agradecimentos

A execução deste trabalho só foi possível com o apoio e colaboração de várias pessoas às quais gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar agradeço à minha orientadora, Professora Doutora Bertha Maria Batista dos Santos, pelo apoio, dedicação, disponibilidade, conhecimento transmitido e orientação prestada durante o desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus pais, agradeço do fundo do coração, por me terem acompanhado e incentivado ao longo de toda a minha vida, em especial nesta etapa.

Ao meu irmão Nuno, por ser das pessoas mais carinhosas que tenho na vida. Ao Pedro, pelo amor de irmão e por me ter ajudado numa altura difícil desta dissertação.

Aos meus amigos de curso, Carolina, Tatiana, Carqueijó, Tiago, Micael e Tomé pela amizade tantas vezes demonstrada e em especial ao Rafael pela ajuda prestada. Um enorme obrigada ao Mário Esteves pela pura amizade e preocupação demonstrada durante a realização desta dissertação.

Às minhas amigas arquitetas, Filipa, Marilisa, Cátia, Joana e Catarina por todo o carinho e por terem sido a minha segunda família.

Ao Fábio Romão por me alegrar os dias e pelo amor incondicional. O seu apoio foi dos mais importantes para mim durante esta etapa.

Resumo

Quando os pavimentos rodoviários apresentam sinais de degradação que apontam para o início dum estado de ruína, é essencial intervir ao nível da reabilitação estrutural, nomeadamente através da aplicação de camadas de reforço.

Neste contexto, o objetivo do trabalho apresentado centra-se no estudo dos métodos e metodologias que permitem dimensionar, no âmbito de uma ação de reabilitação a nível estrutural, a espessura de camadas betuminosas de reforço para pavimentos flexíveis.

Para o efeito descrevem-se dois procedimentos expeditos de dimensionamento de reforço baseados na determinação da espessura efetiva do pavimento, um com recurso aos ábacos do Asphalt Institute e outro ao manual português MADIPAV; e duas abordagens empírico-mecanicistas baseadas nas deflexões reversíveis, uma com aplicação das formulações de dimensionamento da Shell e outra com a determinação dos fatores de carga.

A análise e a aplicação das abordagens a dois casos de estudo permitiu concluir que os métodos expeditos baseiam-se num processo de cálculo mais simples, em que não são explicitamente consideradas as características mecânicas das camadas do pavimento existente, fornecendo soluções sobredimensionadas. Por outro lado, os métodos empírico-mecanicistas são os que estruturalmente melhor avaliam os pavimentos, uma vez que são exigidos ensaios de carga para caracterizar o comportamento estrutural do pavimento, sendo assim possível determinar as características mecânicas para os materiais granulares e misturas betuminosas através de retro análise, dando origem a soluções mais sustentadas.

As espessuras de reforço obtidas para os casos de estudo diferem significativamente, verificando-se que a aplicação das abordagens empírico-mecanicistas deram origem a valores que correspondem aproximadamente a metade dos obtidos na aplicação dos métodos expeditos.

Palavras-chave

Pavimentos rodoviários flexíveis; Reabilitação estrutural; Reforço; Métodos de dimensionamento de camadas de reforço.

Abstract

When road pavement shows signs of degradation which point to the beginning of a ruin state, it is fundamental to step in terms of structural rehabilitation, namely by applying overlay layers.

Therefore, the purpose of the presented study focuses on studying the methods and methodologies of thickness design of bituminous concrete overlays for flexible pavements, as part of a rehabilitation action at a structural level.

For this purpose, two expedite procedures for overlay thickness design based on the calculation of the effective thickness of the pavement are described. One of the procedures requires the use of abacuses from the Asphalt Institute and the other uses the Portuguese manual MADIPAV. Two mechanistic-empirical approaches based on the reversible deflections are also described, one of them with the application of Shell pavement design formulas and the other one through calculation of load factors.

The analysis and the use of those two approaches (expedite and mechanistic-empirical) to two case studies led to the conclusion that the expedite methods are based on a simpler calculation process, in which the mechanical properties of the existing pavement layers are not explicitly taken into account, which lead to oversized solutions. On the other hand, the empirical-mechanistic methods are the ones that best evaluate the pavement in a structural point of view, since load tests are required to characterize its structural behavior. Thus, it's possible to determine the mechanical properties for the granular materials and bituminous mixtures through backcalculation, which leads to more sustainable solutions.

The overlay thicknesses obtained for the case studies differ significantly so that it appears that the application of mechanistic-empirical approaches led to values that are approximately half of those obtained by applying expedite methods.

Keywords

Flexible road pavement; Structural rehabilitation; Overlay; Methods for overlay thickness design.

Índice

CAPÍTULO 1- Introdução	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Estrutura da dissertação	2
CAPÍTULO 2- Reabilitação de pavimentos rodoviários.....	3
2.1 Considerações iniciais	3
2.2 Degradações dos pavimentos rodoviários flexíveis	5
2.2.1 Famílias e tipos de degradações dos pavimentos flexíveis	6
2.2.2 Considerações finais	12
2.2.3 Relações entre as degradações e os fatores de degradação	13
2.3 Avaliação do estado de degradação do pavimento	13
2.3.1 Técnicas de observação do estado superficial	14
2.3.2 Técnicas de observação da capacidade estrutural	17
2.4 Técnicas de reabilitação estrutural	24
2.4.1 Reforço de pavimentos rodoviários flexíveis.....	24
2.4.2 Reciclagem de pavimento	34
2.4.3 Reconstrução	34
CAPÍTULO 3- Metodologias utilizadas no dimensionamento do reforço de pavimentos flexíveis	35
3.1 Considerações iniciais	35
3.2 Procedimento baseado nas espessuras efetivas	35
3.3 Procedimento baseado nas deflexões reversíveis	44
3.4 Procedimento baseado na determinação dos fatores de carga	64
CAPÍTULO 4- Casos de estudo	67
4.1 Procedimento baseado nas espessuras efetivas	67
4.1.1 Caso de estudo 1	67
4.1.2 Caso de estudo 2	72
4.1.3 Síntese	76
4.2 Procedimento baseado nas deflexões reversíveis	78
4.2.1 Caso de estudo 1	78
4.2.2 Caso de estudo 2	89
4.2.3 Síntese	99
4.3 Procedimento baseado nas deflexões reversíveis	100

4.3.1 Caso de estudo 1	100
4.3.2 Caso de estudo 2	104
4.3.3 Síntese	108
4.4 Comparação dos resultados obtidos pelas diferentes metodologias	109
CAPÍTULO 5- Conclusões e desenvolvimentos futuros	111
Referências Bibliográficas	117
Anexos	121
I. Tráfego no ano 0 e tráfego futuro.	122
II. Determinação da espessura requerida T_n para 10 e 15 anos com recurso aos ábacos A1	124
III. Deflexões normalizadas	127
IV. Divisão do troço em secções de comportamento estrutural homogéneo	140
V. Aproximação entre o defletograma real e o defletograma correspondente ao percentil 85 para cada secção homogénea	158
VI. Retro análise	162
VII. Cálculo do módulo de deformabilidade da Mistura Betuminosa de Alto Módulo com ligante 10/20	185

Índice de Figuras

Figura 2.1- Evolução do estado de um pavimento (Batista, F., 2004)	4
Figura 2.2- Fatores ativos (ações do tráfego e dos agentes climáticos)	5
Figura 2.3- Sequência e interação das degradações (Pereira, P. et al., 1999)	6
Figura 2.4- Deformação localizada (Santos, B., 2002.).....	8
Figura 2.5- Rodeira (Tavares, M., 2013).....	8
Figura 2.6- Fenda por fadiga (Santos, B., 2002)	10
Figura 2.7- Fenda longitudinal (Tavares, M., 2013)	10
Figura 2.8- Pele de crocodilo (Santos, B., 2002)	10
Figura 2.9- Desagregação superficial (Tavares, M. 2013)	11
Figura 2.10- Pelada (Santos, B., 2002)	11
Figura 2.11- Ninhos ou covas (Tavares, M., 2013)	11
Figura 2.12- Subida de finos (Santos, B., 2002).....	12
Figura 2.13- Exsudação (Tavares, M., 2013).....	12
Figura 2.14- Juntas mal elaboradas (Santos, B., 2002).....	12
Figura 2.15- Equipamento VIZIROAD (Santos, B., 2002)	15
Figura 2.16- GERPHO (Picado-Santos, L. et al., 2008)	16
Figura 2.17- Esquema da montagem do Perfilómetro Laser no veículo (LNEC, 2011 citado por Nogueira, A., 2015)	16
Figura 2.18- Medição da irregularidade transversal através do Perfilómetro Laser (Pavetesting. (2012). PAVEPROF Laser Profilometer PaveTesting Web)	17
Figura 2.19- Esquema de constituição da viga de Benkelman e respetiva linha de influência (Pereira, P. et al., 1999)	19
Figura 2.20- Ensaio da viga de Benkelman (Trujilloinforma, 2014)	19
Figura 2.21- Defletógrafo Lacroix (Vialidad)	20
Figura 2.22- Constituição do Defletógrafo Lacroix (Picado-Santos, L. et al., 2008).	20
Figura 2.23- Defletómetro de Impacto (Tecnilab).....	21
Figura 2.24- Esquema de um ensaio de carga com defletómetro de impacto e respetivo defletograma (Antunes, L., 2008)	22

Figura 2.25- Influência das camadas de um pavimento flexível na obtenção da bacia de deflexões (Fontul, S., 2004 citado por Santos, M., 2009)	23
Figura 2.26- Centrais Betuminosas Contínuas (EAPA, 1998)	27
Figura 2.27- Centrais Betuminosas Descontínuas (EAPA, 1998)	28
Figura 2.28- Esquema de aplicação do SAMI entre a camada antiga e a camada de reforço (ARTS citado por Santos, M., 2009)	31
Figura 2.29- Rega para aplicação de geotêxtil (Tensor).....	31
Figura 2.30- Aplicação de Geotêxteis (Tensor)	31
Figura 2.31- Aplicação de Geogrelha (Eco engenharia)	32
Figura 2.32- Aplicação de Grelhas Metálicas (engenhariacivil, 2011)	32
Figura 2.33- Esquema de produção de uma mistura reciclada in situ com emulsão betuminosa (Costa, B., 2006, citado por Cunha, C., 2010)	34
Figura 3.1- Execução de sondagens à rotação (Antunes, L. et al., 2005 citado por Santos, M., 2009).....	37
Figura 3.2- Carote retirado por sondagem (Antunes, L. et al., 2005 citado por Santos, M., 2009).....	37
Figura 3.3- Abertura de poços (Alves, A., 2007 citado por Santos, M., 2009)	37
Figura 3.4- Repartição da percentagem de veículos pesados pelas vias de uma estrada .	38
Figura 3.5- Ábaco “Full-Depth Asphalt Concrete - MAAT 15,5°C) do Manual “Thickness Design” do Asphalt Institute (2008)	42
Figura 3.6- Estrutura tipo para pavimento flexível proposta pelo MADIPAV para o pré-dimensionamento da espessura das misturas betuminosas e dos materiais granulares (EP-JAE, 1995)	43
Figura 3.7- Modelo de Burmister (Neves, J., 2007 citado por Santos, M., 2009)	45
Figura 3.8- Método das diferenças acumuladas (Correia, J., 2014)	48
Figura 3.9- Alguns dos fatores a considerar na divisão do troço em secções de comportamento estrutural homogéneo	50
Figura 3.10- Exemplo da semelhança entre o defletograma característico e o defletograma obtido pelo programa Bisar.	53
Figura 3.11- Função seno representativa do ciclo de 18 horas de variação de temperatura da camada betuminosa (Capitão, S., 2012)	55
Figura 3.12- Esquemática geralmente adotada para a ação de um eixo-padrão sobre o pavimento (Picado-Santos, L. et al, 2008)	57

Figura 4.1- Espessura e composição de cada camada constituinte do pavimento (CE1) .	67
Figura 4.2- Espessura e composição de cada camada constituinte do pavimento (CE2) .	72
Figura 4.3- Espessura da camada de reforço (cm) determinada pelos métodos expeditos (CE1)	76
Figura 4.4- Período de vida útil (anos) do pavimento determinado pelos métodos expeditos (CE1)	76
Figura 4.5- Espessura da camada de reforço (cm) determinada pelos métodos expeditos (CE2)	77
Figura 4.6- Período de vida útil (anos) do pavimento determinado pelos métodos expeditos (CE2)	77
Figura 4.7- Divisão do troço em secções de comportamento homogéneo para o sentido 1 (CE1).....	79
Figura 4.8- Divisão do troço em secções de comportamento homogéneo para o sentido 2 (CE1).....	79
Figura 4.9- Introdução dos dados referentes ao separador Loads no Bisar	82
Figura 4.10- Introdução dos dados referentes ao separador Layers no Bisar.	82
Figura 4.11- Introdução dos dados referentes ao separador Positions no Bisar	82
Figura 4.12- Exemplo de um defletograma obtido para o S2SH1	83
Figura 4.13- Introdução dos dados referentes ao separador Loads no Bisar para realização da análise estrutural	87
Figura 4.14- Introdução dos dados referentes ao separador Positions no Bisar para cálculo automático das extensões	88
Figura 4.15- Divisão do troço em secções de comportamento homogéneo para o sentido 1 (CE2)	89
Figura 4.16- Divisão do troço em secções de comportamento homogéneo para o sentido 2 (CE2)	90
Figura 4.17- Espessura da cama de reforço (cm) determinada pelo método das deflexões reversíveis, sentido 1 (CE2)	99
Figura 4.18- Espessura da cama de reforço (cm) determinada pelo método das deflexões reversíveis, sentido 2 (CE2)	100
Figura 4.19- Espessura da camada de reforço (cm) determinada pelo método dos fatores de carga (CE2)	108
Figura 4.20- Espessura da camada de reforço obtida pelas diferentes metodologias (CE1)	109

Figura 4.21 - Espessura da camada de reforço obtida pelas diferentes metodologias,
sentido 1 (CE2)..... 110

Índice de Tabelas

Tabela 2.1- Famílias e tipos de degradações (Pereira, P. et al., 1999 citado por Picado-Santos, L. et al., 2008)	7
Tabela 2.2- Classificação das relações entre degradações e os fatores de degradação (Pereira, P. et al., 1999 citado por Picado-Santos, L. et al., 2008)	13
Tabela 2.3- Trabalhos necessários antes da colocação da camada de reforço (Batista, F., 2004)	25
Tabela 2.4- Materiais usados na camada de reforço	26
Tabela 2.5- Classes e técnicas agrupadas de tratamento de reforço estrutural para pavimentos flexíveis (citado por (Tavares, M., 2013) como adaptação de (EP,2013))....	33
Tabela 3.1- Classificação dos veículos automóveis (IP, citado por Picado-Santos, L. et al., 2002)	37
Tabela 3.2- Taxa média de crescimento anual (EP-JAE, 1995)	39
Tabela 3.3- Fatores de agressividade do tráfego, (EP-JAE, 1995).....	39
Tabela 3.4- Elementos relativos ao tráfego (EP-JAE, 1995)	40
Tabela 3.5- Fatores de conversão C (Picado-Santos, L. et al., 2002)	41
Tabela 3.6-Classe de fundação (EP-JAE, 1995)	44
Tabela 3.7- Avaliação do grau de homogeneidade de uma secção através do coeficiente de variação das deflexões (COV)	49
Tabela 3.8- Módulos de deformabilidade usuais para camadas do pavimento (EP-JAE, 1995 ^a , citado por Francisco, A., 2012)	51
Tabela 3.9- Coeficientes de correção da deflexão devido à humidade (Carretas, 2002)	56
Tabela 3.10- Parâmetros a adotar para o método de dimensionamento empírico mecanicista da Shell e de Nottingham	57
Tabela 3.11- Limites para verificação do dano	60
Tabela 3.12- Tipos de betume de pavimentação, propriedades e exigências de conformidade (LNEC, 1997 citado por Picado-Santos, L. et al., 2002)	62
Tabela 4.1- Taxa média de crescimento anual do tráfego pesado para um período de dimensionamento de 10 e 15 anos (CE1)	68
Tabela 4.2- Número de eixos-padrão de 80 kN para dimensionamento (N_{80}) - 10 e 15 anos (CE1)	68

Tabela 4.3- Número de eixos-padrão de 80 kN para dimensionamento - mínimos e máximos para cada classe de tráfego (20 anos) (CE1)	69
Tabela 4.4- Verificação da correspondência entre a classe de tráfego e o número de eixos-padra de 80 kN (CE1)	69
Tabela 4.5- Acerto da classe de tráfego (CE1)	69
Tabela 4.6- Espessura requerida para o pavimento (T_n) segundo os abacos: Asphalt Institute 1983, A-7 2008 e A-12 2008 (CE1).....	70
Tabela 4.7- Espessura requerida de material betuminoso (T_n) segundo o MADIPAV (CE1)	70
Tabela 4.8- Espessura da camada de reforço segundo os métodos expeditos AI (1983), AI (2008) e MADIPAV (CE1)	71
Tabela 4.9- Número de eixos-padrão de 80 kN admissíveis segundo os ábacos do Asphalt Institute (CE1)	71
Tabela 4.10- Período de vida útil restante do pavimento em anos segundo os ábacos do Asphalt Institute (CE1)	71
Tabela 4.11- Número de eixos-padrão de 80 kN admissíveis segundo o MADIPAV (CE1)..	72
Tabela 4.12- Período de vida útil restante do pavimento em anos segundo o MADIPAV (CE1)	72
Tabela 4.13- Taxa média de crescimento anual do tráfego pesado para o período de dimensionamento 10 e 15 anos (CE2)	73
Tabela 4.14- Somatório dos veículos pesados (N_{pes}) e número de eixos-padrão de 80 kN de dimensionamento (N_{80}) para 10 e 15 (CE2)	73
Tabela 4.15- Verificação da correspondência entre a classe de tráfego e o número de eixos-padra de dimensionamento 80 kN (CE2)	73
Tabela 4.16- Acerto da classe de tráfego (CE2)	73
Tabela 4.17- Fatores de conversão (CE2)	74
Tabela 4.18- Espessura requerida para o pavimento (T_n) segundo o Ábaco Asphalt Institute 1983, 2008 A-7 e 2008 A-12 (CE2)	74
Tabela 4.19- Espessura requerida para o pavimento (T_n) segundo o MADIPAV (CE2)	74
Tabela 4.20- Espessura da camada do reforço segundo os métodos expeditos já com 1 cm adicional para prever a necessidade de incorreções na colocação em obra (CE2)....	75
Tabela 4.21- Número de eixos-padrão de 80 kN admissível segundo os ábacos da Asphalt Institute (CE2)	75

Tabela 4.22- Período de vida útil do pavimento em anos segundo os ábacos da Asphalt Institute (CE2)	75
Tabela 4.23- Número de eixos-padrão de 80 kN admissível segundo o MADIPAV (CE2) ..	75
Tabela 4.24- Período de vida útil do pavimento em anos segundo o MADIPAV (CE2)	75
Tabela 4.25- Características do defletómetro de impacto usadas no ensaio	78
Tabela 4.26- Coeficiente de variação das deflexões para o sentido 1 (CE1)	80
Tabela 4.27- Coeficiente de variação das deflexões para o sentido 2 (CE1)	80
Tabela 4.28- Deflexões correspondentes ao percentil 85 para o sentido 1 (CE1)	80
Tabela 4.29- Deflexões correspondentes ao percentil 85 para o sentido 2 (CE1)	81
Tabela 4.30- Deflexões características para o sentido 1 (CE1)	81
Tabela 4.31- Deflexões características para o sentido 2 (CE1)	81
Tabela 4.32- Módulos de deformabilidade obtidos com recurso ao Bisar para o sentido 1 (CE1)	84
Tabela 4.33- Módulos de deformabilidade obtidos com recurso ao Bisar para o sentido 2 (CE1)	84
Tabela 4.34- Temperaturas do ar, da superfície do pavimento e hora a que as medições foram realizadas durante o ensaio FWD, sentido 1 (CE1)	85
Tabela 4.35- Profundidade à qual se pretende determinar a temperatura (cm), sentido 1 (CE1)	85
Tabela 4.36- Horário em que a temperatura da superfície do pavimento foi medida (dias), sentido 1 (CE1)	85
Tabela 4.37- Temperatura das camadas betuminosas, sentido 1 (CE1)	85
Tabela 4.38- Módulos de deformabilidade à temperatura de referência de 20°C à temperatura de serviço de 21,3°C, sentido 1 (CE1)	86
Tabela 4.39- Temperaturas do ar, da superfície do pavimento e hora a que as medições foram realizadas durante o ensaio FWD, para o sentido 2 (CE1)	86
Tabela 4.40- Profundidade à qual se pretende determinar a temperatura (cm), sentido 2 (CE1).....	86
Tabela 4.41- Horário em qua a temperatura da superfície foi medida (dias), sentido 2 (CE1)	86
Tabela 4.42- Temperatura das camadas betuminosas, sentido 2 (CE1)	86

Tabela 4.43- Módulos de deformabilidade à temperatura de referência de 20°C e módulos de deformabilidade corrigidos para a temperatura de serviço, sentido 2 (CE1)	87
Tabela 4.44- Extensão de tração (strain XX) e extensão de compressão (strain ZZ) obtidos pelo BISAR para o S2SH1	88
Tabela 4.45- Verificação à fadiga, sentido 1 e 2 (CE1)	88
Tabela 4.46- Verificação à deformação permanente, sentido 1 e 2 (CE1).....	89
Tabela 4.47- Coeficiente de variação das deflexões (CE2)	90
Tabela 4.48- Deflexões correspondentes ao percentil 85 para o sentido 1 (CE2)	91
Tabela 4.49- Deflexões correspondentes ao percentil 85 para o sentido 2 (CE2)	91
Tabela 4.50- Deflexões características para o sentido 1 (CE2)	91
Tabela 4.51- Deflexões características para o sentido 2 (CE2)	91
Tabela 4.52- Módulos de deformabilidade obtidos com recurso ao Bisar para o sentido 1 (CE2)	92
Tabela 4.53- Módulos de deformabilidade obtidos com recurso ao Bisar para o sentido 2 (CE2)	92
Tabela 4.54- Temperaturas do ar, da superfície do pavimento e hora a que as medições foram realizadas durante o ensaio FWD para o sentido 1 (CE2)	93
Tabela 4.55- Temperatura das camadas betuminosas, sentido 1 (CE2)	93
Tabela 4.56- Módulos de deformabilidade à temperatura de referência de 20°C e módulos de deformabilidade corrigidos para a temperatura de serviço, sentido 1 (CE2)	93
Tabela 4.57- Temperaturas do ar, da superfície do pavimento e hora a que as medições foram realizadas durante o ensaio FWD para o sentido 2 (CE2)	94
Tabela 4.58- Temperatura das camadas betuminosas, sentido 2 (CE2)	94
Tabela 4.59- Módulos de deformabilidade à temperatura de referência de 20°C e módulos de deformabilidade corrigidos para a temperatura de serviço, sentido 2 (CE2)	94
Tabela 4.60- Verificação à fadiga, sentido 1 e 2 (CE2)	94
Tabela 4.61- Verificação à deformação permanente, sentido 1 e 2 (CE2)	95
Tabela 4.62- Cálculo da rigidez do betume para a camada de reforço de BB, sentido 1 e 2 (CE2)	96
Tabela 4.63- Cálculo do módulo de deformabilidade da camada de reforço em BB 50/70, sentido 1 e 2 (CE2)	96

Tabela 4.64- Estrutura do pavimento com camada de reforço em BB, sentido 1 (CE2) .	96
Tabela 4.65- Verificação à fadiga pelo método da Shell com a nova camada de reforço em BB 50/70, sentido 1 (CE2)	97
Tabela 4.66- Verificação à deformação permanente pelo método da Shell com a nova camada de reforço em BB 50/70, sentido 1 (CE2)	97
Tabela 4.67- Espessura da camada de reforço em BB 50/70 necessária para as secções menos críticas, sentido 1 (CE2)	97
Tabela 4.68- Estrutura do pavimento com camada de reforço de BB, sentido 2 (CE2) ..	97
Tabela 4.69- Verificação à fadiga pelo método da Shell com a nova camada de reforço em BB 50/70, sentido 2 (CE2)	98
Tabela 4.70- Verificação à deformação permanente pelo método da Shell com a nova camada de reforço em BB 50/70, sentido 2 (CE2)	98
Tabela 4.71- Verificação à fadiga pelo método da Shell com a nova camada de reforço em MBAM 10/20, sentido 1 (CE2)	98
Tabela 4.72- Verificação à deformação permanente pelo método da Shell com a nova camada de reforço em MBAM 10/20, sentido 1 (CE2)	98
Tabela 4.73- Verificação à fadiga pelo método da Shell com a nova camada de reforço em MBAM 10/20, sentido 2 (CE2)	99
Tabela 4.74- Verificação à deformação permanente pelo método da Shell com a nova camada de reforço em MBAM, sentido 2 (CE2)	99
Tabela 4.75- Deflexão máxima e deflexão a 90 cm do centro da placa, sentido 1 e 2 (CE1)	100
Tabela 4.76- Módulos de deformabilidade dos materiais não ligados, sentido 1 e 2 (CE1)	101
Tabela 4.77- Cálculo da rigidez do betume 50/70, sentido 1 e 2 (CE1)	102
Tabela 4.78- Cálculo dos módulos de deformabilidade de cada camada betuminosa constituinte do pavimento, sentido 1 e 2 (CE1)	102
Tabela 4.79- Verificação à fadiga pelo método da Shell, sentido 1 (CE1)	103
Tabela 4.80- Verificação à deformação permanente pelo método da Shell, sentido 1 (CE1)	103
Tabela 4.81- Verificação à fadiga pelo método da Shell, sentido 2 (CE1)	103
Tabela 4.82- Verificação à deformação permanente pelo método da Shell, sentido 2 (CE1)	103

Tabela 4.83- Deflexão máxima e deflexão a 90 cm do centro da placa do pavimento novo, sentido 1 e 2 (CE1)	103
Tabela 4.84- Fatores de carga e f^* , sentido 1 e 2 (CE1)	104
Tabela 4.85- Deflexão máxima e deflexão a 90 cm do centro da placa, sentido 1 e 2 (CE2).....	104
Tabela 4.86- Módulos de deformabilidade dos materiais não ligados, sentido 1 e 2 (CE2)	104
Tabela 4.87- Cálculo da rigidez do betume 50/70, sentido 1 e 2 (CE2)	105
Tabela 4.88- Cálculo dos módulos de deformabilidade de cada camada betuminosa constituinte do pavimento, sentido 1 e 2 (CE2)	106
Tabela 4.89- Verificação à fadiga pelo método da Shell, sentido 1 (CE2)	106
Tabela 4.90- Verificação à deformação permanente pelo método da Shell, sentido 1 (CE2).....	107
Tabela 4.91- Verificação à fadiga pelo método da Shell, sentido 2 (CE2)	107
Tabela 4.92- Verificação à deformação permanente pelo método da Shell, sentido 2 ..	107
Tabela 4.93- Deflexão máxima e deflexão a 90 cm do centro da placa do pavimento novo, sentido 1 e 2 (CE2)	107
Tabela 4.94- Fatores de carga e f^* , sentido 1 e 2 (CE2)	108

Lista de Acrónimos

AASHTO	American Association of State Highways and Transportation Officials
ABGE	Agregado Britado de Granulometria Extensa
BB	Betão Betuminoso
BBD	Betão Betuminoso Drenante
BBR	Betão Betuminoso Rugoso
BD	Betão Betuminoso em camada de Desgaste
BISAR	<i>Bitumen Stress Analysis in Roads</i>
BMB	Betume Modificado com Borracha
EP	Estradas de Portugal
FWD	Falling Weight Deflectometer
GERPHO	Ground Penetrating Radar
InIR	Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias
JAE	Junta Autónoma de Estradas
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MACOPAV/MADIPAV	Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional
MB	Macadame Betuminoso
MBA	Mistura Betuminosa Aberta
MBAM	Mistura Betuminosa de Alto Módulo
MBBR	Micro-Betão Betuminoso Rugoso
MBD	Mistura Betuminosa Densa
MBR	Mistura Betuminosa Rugosa
PE	Polietileno
PET	Poliéster de alta Tenacidade
PMB	Betume Modificado com Polímero
PP	Polipropileno
SAMI	Stress Absorbing Membrane Interlayer
TMDAp	Tráfego Médio Diário Anual de veículos pesados

CAPÍTULO 1- Introdução

1.1. Enquadramento do tema

A rede rodoviária tem, indiscutivelmente, uma enorme importância no crescimento global de Portugal, visto que, ao possibilitar a fácil acessibilidade de pessoas e mercadorias, permite desenvolver economicamente e socialmente diversas regiões do país.

Atualmente, Portugal dispõe de uma rede rodoviária bem consolidada com uma extensão bastante significativa. Contudo, uma parte significativa dos pavimentos da rede existente está na fase final do período de vida de projeto, apresentando degradações que não permitem a circulação dos veículos com comodidade e em segurança. Assim, torna-se fundamental devolver ao pavimento existente um nível de qualidade estrutural e funcional aceitável, prolongando consequentemente a sua vida útil.

Por outro lado, uma vez que a rede prevista no PRN 2000 se encontra praticamente concluída, verifica-se um abrandamento na construção de novas estradas, sendo que, atualmente, esta vertente da engenharia civil se encontra essencialmente direcionada para as obras de conservação e de reabilitação das vias já existentes, procurando soluções sustentadas que conciliem custos baixos de execução, preocupações ambientais e a qualidade do serviço.

Perante isto, fica evidente que, na atualidade, o estudo da reabilitação de pavimentos rodoviários assume um papel fundamental na área das vias de comunicação.

Tendo em conta o exposto, a medida de reabilitação estrutural abordada nesta dissertação é o reforço de pavimentos, uma vez que é uma das estratégias mais utilizadas para melhorar o estado global do pavimento. Esta abordagem é efetuada através do estudo e da aplicação de vários métodos expeditos e empírico-mecanicistas utilizados no dimensionamento de camadas de reforço para pavimentos flexíveis.

1.2. Objetivos

A recolha periódica de informação sobre o estado de conservação dos pavimentos rodoviários de uma rede através de reconhecimentos visuais sistematizados e de ensaios de avaliação da capacidade resistente, com tratamento desta informação, resulta na decisão de intervir ou não no pavimento. Quando o pavimento não oferece a qualidade de serviço esperada, com início de um estado de ruína, é necessário proceder à reabilitação do mesmo, nomeadamente através da aplicação de camadas de reforço.

O objetivo desta dissertação centra-se no estudo comparativo dos métodos e metodologias que permitem dimensionar, no âmbito de uma ação de reabilitação a nível estrutural, a espessura de camadas betuminosas de reforço de um pavimento flexível, com vista a garantir o aumento da capacidade resistente do pavimento para que continue assegurada a qualidade do serviço.

Tem-se ainda como objetivo a aplicação das metodologias estudadas a dois casos de estudo com análise dos resultados obtidos.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos, cuja organização e breve descrição do conteúdo se apresentam nos seguintes parágrafos.

Neste primeiro capítulo introdutório, apresenta-se o enquadramento do tema e a importância que este estudo tem na atualidade, definem-se os objetivos a atingir e descreve-se a organização e o teor do trabalho desenvolvido.

No segundo capítulo, “Reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis”, faz-se inicialmente uma breve descrição da diferença entre medidas de conservação e reabilitação. Este capítulo está também direcionado para o tema das degradações, apresentam-se as famílias e tipos de degradações existentes nos pavimentos rodoviários flexíveis e abordam-se as técnicas de observação do estado superficial e da capacidade estrutural com vista a obter uma correta avaliação do estado de degradação do pavimento. Posteriormente é tratado o tema das técnicas de reabilitação, nomeadamente a colocação de camadas de reforço e os materiais mais usados para esse fim, assim como aspetos da reciclagem de pavimentos e a reconstrução.

No capítulo 3, “Metodologias utilizadas no dimensionamento do reforço de pavimentos flexíveis”, é feita uma abordagem de alguns dos procedimentos existentes para o dimensionamento de camadas de reforço. Primeiramente são descritos os procedimentos baseados em métodos expeditos, sendo aprofundado o “procedimento baseado nas espessuras efetivas”. Seguidamente são descritos os procedimentos baseados em métodos empírico-mecanicistas, destacando-se o “procedimento baseado nas deflexões reversíveis” com recurso à verificação dos critérios de ruína pelo método da Shell e ao cálculo dos fatores de carga.

No capítulo 4 são apresentados dois casos de estudo correspondentes à análise de dois troços com perfil de autoestrada. São apresentados os cálculos efetuados com recurso aos procedimentos apresentados no capítulo anterior, assim como uma análise e a comparação das soluções obtidas no dimensionamento da espessura das camadas de reforço necessárias.

No capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões resultantes do trabalho desenvolvido e são sugeridos trabalhos futuros relativos a este tema.

CAPÍTULO 2- Reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis

2.1 Considerações iniciais

Segundo Picado-Santos, L. et al. (2008), “Os pavimentos rodoviários, logo após a sua construção, começam a ser submetidos a ações diversas, que, continuamente, contribuem para a sua degradação, ou seja, para a redução progressiva da sua qualidade inicial.”

Um pavimento rodoviário possui, no seu início de vida, ótimas características funcionais e estruturais proporcionando ao utente elevados níveis de segurança, conforto e economia. Entrando em serviço, o ideal era um pavimento rodoviário manter essas características dentro dos limites exigidos ao longo da sua vida. Contudo, devido às ações da passagem do tráfego, dos agentes atmosféricos, das características das camadas granulares e do solo fundação e de possíveis deficiências no processo construtivo, o aparecimento de degradações e consequente diminuição da qualidade do pavimento é inevitável.

A perda de qualidade devida à existência de degradações pode ser avaliada segundo a capacidade que o pavimento possui para suportar as cargas dos veículos sob determinadas condições atmosféricas (qualidade estrutural) e através da qualidade de circulação, que é avaliada tendo em conta as condições exigidas pelos utentes em relação ao conforto, segurança de circulação e economia (qualidade funcional).

Como se irá aprofundar mais à frente neste capítulo, a qualidade funcional poderá ser avaliada essencialmente por dois métodos: observação visual e observação através de equipamento de registo de imagem (do tipo vídeo ou fotográfico). A qualidade estrutural, que estuda a capacidade resistente do pavimento, poderá ser avaliada através das deflexões dos pavimentos conhecidas a partir da realização de ensaios com equipamentos como a viga de Benkelman, o defletógrafo FLASH e o defletómetro de impacto (FWD).

Segundo Pereira, P. et al. (1999) “Uma vez construído um pavimento, é fundamental estabelecer um programa de acompanhamento da sua evolução, para apoiar a decisão de intervir, em determinadas datas de modo a repor a sua qualidade”.

Quando surge a necessidade de intervir no pavimento, a seleção da solução deverá responder aos seguintes critérios (Batista, F., 2004):

- Económicos - minimização dos custos da obra e dos custos suportados pelos utentes durante a execução da obra e após a entrada em funcionamento;
- Técnicos - eficácia na resolução dos problemas existentes e qualidade de desempenho no futuro;

- Ambientais - minimização dos impactos ambientais.

Em síntese, e com o apoio da figura 2.1, constata-se que, numa primeira fase, existe uma evolução do estado de degradação do pavimento. Com o objetivo de avaliar a sua qualidade e intervir de forma correta no pavimento é necessário proceder a uma cuidada recolha de informação sobre o estado de conservação da rede (através de reconhecimentos visuais sistemáticos e ensaios de avaliação da capacidade resistente). Do tratamento da informação recolhida, a reposição da qualidade pode ser efetuada através de um dos seguintes modos de intervenção: através de medidas de conservação (ato de manutenção) ou de reabilitação.

Quando o pavimento apresenta apenas sinais de mau comportamento futuro, não existindo ainda previsão de começo de ruína a curto prazo, torna-se fundamental intervir sobre este com medidas de conservação. A execução de uma reabilitação é necessária quando o pavimento deixa de oferecer a qualidade de serviço esperada e se encontra a desenvolver um estado de ruína. Por exemplo, as medidas de reabilitação tornam-se benéficas quando existem degradações graves que tornem a capacidade de carga do pavimento insuficiente e/ou o nível de segurança e comodidade insatisfatórios ou quando as medidas de conservação não se apresentem viáveis economicamente.

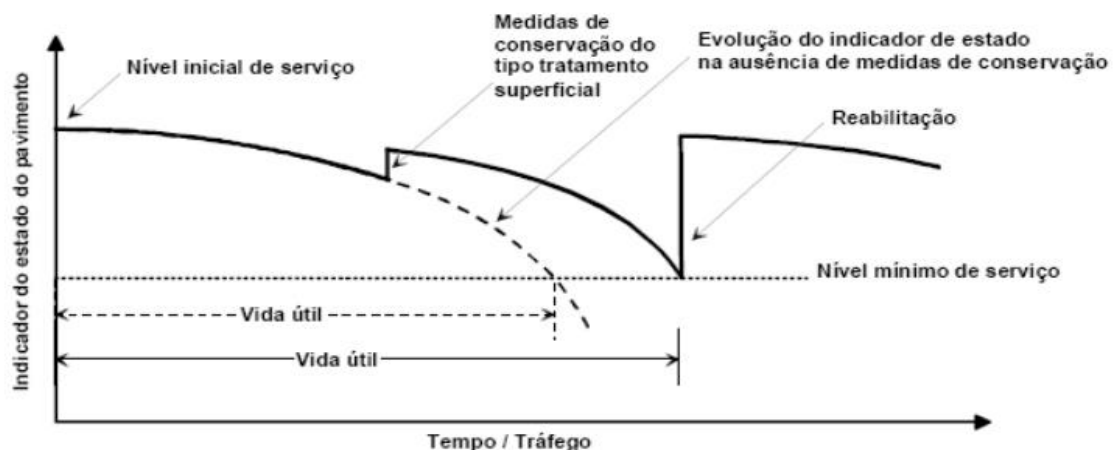


Figura 2.1- Evolução do estado de um pavimento (Batista, F., 2004)

As técnicas de reabilitação dividem-se em técnicas de reabilitação das características superficiais e em técnicas de reabilitação das características estruturais dos pavimentos. Estas últimas contemplam a colocação de uma ou mais camadas de reforço, a reciclagem do pavimento existente e a reconstrução.

No âmbito desta dissertação, o reforço de pavimentos flexíveis será a técnica de recuperação das características estruturais mais aprofundada. O reforço consiste na colocação de uma espessura de materiais betuminosos no pavimento antigo, aumentando a capacidade estrutural e o prolongando a sua vida útil.

No que respeita aos materiais betuminosos utilizados na execução das camadas de reforço, as misturas tradicionais contemplam as misturas betuminosas fabricadas a quente e as misturas betuminosas fabricadas a frio. Contudo, devido aos apelos de redução de níveis de emissão de

CO₂ e da utilização de combustíveis fósseis, a indústria viária tem vindo a desenvolver novos materiais com o intuito de minimizar o impacto ambiental, nomeadamente recorrendo a temperaturas de fabrico mais baixas.

Perlongar a vida útil do pavimento usando materiais mais económicos é outra das motivações para a investigação e criação de novos materiais.

2.2 Degradações dos pavimentos rodoviários flexíveis

Um pavimento rodoviário flexível, logo após a sua construção e entrada em serviço, vai apresentando gradualmente uma vasta diversidade de degradações. Tais degradações contribuem para uma deterioração das características iniciais do pavimento, influenciando a sua qualidade funcional e estrutural.

O processo de evolução das degradações, aparentes ou não, de um pavimento, apoia-se no “princípio da cadeia de acontecimentos”, segundo o qual uma degradação não evolui isoladamente no tempo, antes dá origem a novos tipos de degradações, as quais, por sua vez, interferem com as características das primeiras. Gera-se deste modo uma atividade em ciclo, onde as diferentes degradações interferem mutuamente (Picado-Santos, L. et al., 2008).

O processo de aparecimento de degradações nos pavimentos varia sobretudo em função de dois grupos de fatores: os fatores ativos que englobam as ações do tráfego e dos agentes climáticos, e os fatores passivos que se debruçam nas características do pavimento construído (qualidade dos materiais utilizados e da construção, espessura das camadas) etc. Os fatores ativos são por norma os principais responsáveis pela degradação do pavimento (ver Figura 2.2).

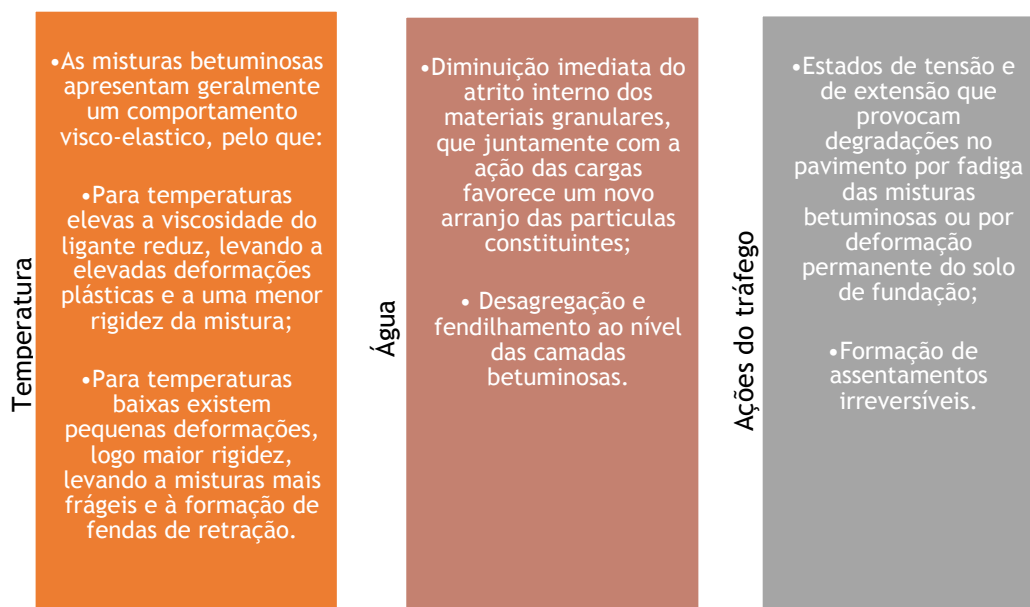


Figura 2.2- Fatores ativos (ações do tráfego e dos agentes climáticos)

Segundo Picado-Santos, L. et al. (2008), “Há ainda a considerar a fiabilidade da modelação dos pavimentos nos métodos de dimensionamento, a qual constitui mais um fator adicional de incerteza no comportamento do pavimento.”

2.2.1 Famílias e tipos de degradações dos pavimentos flexíveis

Nos pavimentos rodoviários flexíveis as degradações podem ser agrupadas nas seguintes famílias:

- a) Deformações
- b) Fendilhamento
- c) Desagregação da camada de desgaste
- d) Movimento de materiais

Contudo, as degradações que, de forma mais significativa, contribuem para a perda de qualidade do pavimento são o aparecimento de deformações permanentes e o desenvolvimento de fendilhamento nas camadas betuminosas.

Estas famílias de degradações têm uma localização no pavimento, uma sequência e interação mútua, seguidamente esquematizada na figura 2.3.

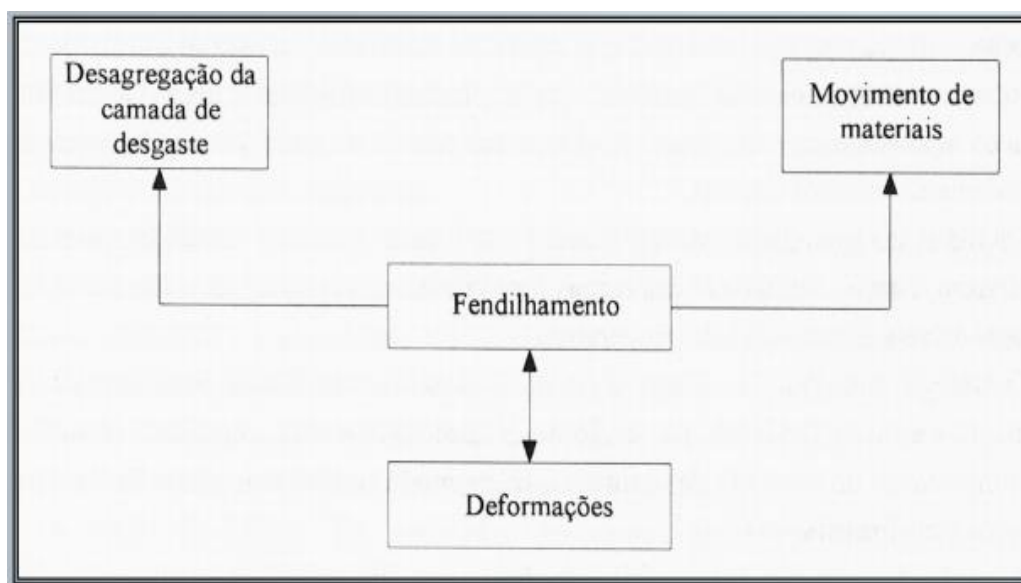


Figura 2.3- Sequência e interação das degradações (Pereira, P. et al., 1999)

Na tabela 2.1 podem ser identificadas 4 famílias de degradações que englobam vários tipos de degradações.

Tabela 2.1- Famílias e tipos de degradações (Pereira, P. et al., 1999 citado por Picado-Santos, L. et al., 2008)

Famílias de degradações	Tipos de degradações		
Deformações	Abatimento	Longitudinal	Berma
			Eixo
		Transversal	
	Deformações localizada		
	Ondulação		
	Rodeiras	Grande raio (camadas inferiores)	
Pequeno raio (camadas superiores)			
Fendilhamento	Fendas	Fadiga	
		Longitudinais	Eixo
			Berma
		Transversais	
	Parabólicas		
	Pele de crocodilo	Malha fina (≤ 40 cm)	
Malha larga (> 40 cm)			
Desagregação da camada de desgaste	Desagregação		
	Cabeça de gato		
	Pelada		
	Ninhos (covas)		
Movimento de materiais	Exsudação		
	Subida de finos		

a) *Deformações.*

Podem ser causadas, por exemplo, devido a uma deficiente capacidade de suporte do solo de fundação, a um subdimensionamento das camadas granulares, a uma compactação insuficiente das camadas estruturais do pavimento, a más condições de drenagem (inclusive as resultantes de um pavimento fendilhado) e à ação do ciclo gelo-degelo. Seguidamente serão descritos os tipos de degradações que pertencem à família das deformações, tais como o abatimento longitudinal e transversal, as deformações localizadas e as ondulações.

O abatimento é uma deformação com uma extensão significativa, podendo localizar-se longitudinalmente junto à berma ou no eixo da estrada, ou transversalmente à faixa de rodagem. O abatimento longitudinal junto à berma tem origem numa redução da capacidade de suporte das camadas granulares e do solo de fundação relacionada com a entrada de água através da berma ou na interface berma-pavimento. O abatimento longitudinal junto do eixo

ocorre quando existe fendilhamento ao longo do eixo da estrada, verificando-se uma redução da capacidade de suporte por infiltração de água até às camadas inferiores granulares e até ao solo de fundação. Quanto ao abatimento transversal, a sua localização depende de patologias nas camadas inferiores (solo de fundação e camadas granulares) como por exemplo deficiente compactação das camadas granulares, infiltração de água por fendas transversais, subdimensionamento das camadas inferiores e colapso de cavidades subterrâneas (Picado-Santos, L. et al., 2002).

As deformações localizadas verificam-se numa pequena área, geralmente acompanhadas de rotura do pavimento e são causadas devido à deficiente capacidade das camadas granulares em zonas pontuais ou devido à falta de capacidade do solo de fundação. Estas deformações provocam alterações do nível do pavimento, originando assim depressões ou alteamentos que surgem isoladamente em pontos localizados do pavimento (ver Figura 2.4).

A ondulação é uma deformação transversal que se repete com uma certa frequência ao longo do pavimento. Estas ocorrem nas camadas de desgaste constituídas por revestimentos superficiais, tendo como possíveis causas a deficiente distribuição do ligante. Nas camadas constituídas por betão betuminoso podem ocorrer devido ao arrastamento da mistura por excessiva deformação plástica causada pela ação do tráfego ou devido à deformação da fundação (Picado-Santos, L. et al., 2002).

As rodeiras são o tipo de degradações mais frequentes na família das deformações. São deformações longitudinais e podem ser classificadas como rodeiras de pequeno ou grande raio. Estas desenvolvem-se ao longo da zona de passagem dos pneus dos veículos (ver Figura 2.5). As rodeiras de pequeno raio formam-se em pavimentos com camada de desgaste pouco resistente à deformação permanente. O ligante muito mole, a má qualidade dos agregados, a composição inadequada da mistura juntamente com tráfego intenso facilitam a formação desta degradação. As rodeiras de grande raio ocorrem devido à deformação das camadas inferiores do pavimento e do solo de fundação provocadas pela drenagem deficiente que leva à presença de água no solo de fundação e/ou camadas granulares causando alteração no equilíbrio interno.



Figura 2.4-Deformação localizada (Santos, B., 2002)



Figura 2.5- Rodeira (Tavares, M., 2013)

b) Fendilhamento.

Segundo Picado-Santos, L. et al. (2008), “O fendilhamento é a família de degradações mais frequente nos pavimentos flexíveis, resultando, na maioria dos casos, da fadiga dos materiais das camadas betuminosas, causado por solicitação repetida dos esforços de tração por flexão destas camadas. Constitui em geral um dos primeiros sinais aparentes da redução da qualidade estrutural de um pavimento.

Quanto às causas do aparecimento e evolução do fendilhamento, além do fenómeno de fadiga, é de salientar a ação das condições climáticas muito severas (temperaturas muito reduzidas), a deficiente qualidade das misturas betuminosas e o solo de fundação com capacidade de suporte reduzida (estado hídrico desfavorável), as quais contribuem para que a última camada betuminosa assuma parte importante da distribuição da carga (Picado-Santos, L. et al., 2002). Este tipo de degradação tem como consequência o enfraquecimento das camadas granulares do pavimento e do solo de fundação, uma vez que permitem a entrada de água.

Os tipos de degradações que pertencem à família do fendilhamento são as fendas de fadiga, fendas longitudinais e transversais, fendas parabólicas e pele de crocodilo.

Fendas de fadiga: são as mais comuns, são fendas irregulares que se localizam na zona de passagem dos rodados dos veículos (ver Figura 2.6). Aparecem devido à evolução normal do processo de fadiga dos pavimentos, em particular das camadas betuminosas. Podem ser classificadas quanto ao seu desenvolvimento como isoladas ou ramificadas. Podem ainda ser classificadas quanto ao afastamento dos seus bordos em fechadas e abertas.

Fendas longitudinais e transversais: têm como principal causa a deficiência dos materiais de pavimentação ou do processo de construção, correspondendo a uma evolução anormal do pavimento (ver Figura 2.7).

Fendas parabólicas: ocorrem na zona de passagem dos pneus, com a forma parabólica orientada no sentido longitudinal. Têm como principais causas problemas de estabilidade da camada de desgaste e da sua ligação às camadas betuminosas inferiores.

Pele de crocodilo: é considerado o grupo mais importante do fendilhamento e surge devido à evolução das fendas ramificadas, que passam a formar uma malha ou grelha, com fendas mais ou menos abertas (ver Figura 2.8). A existência de pele de crocodilo demonstra já uma fase avançada e rápida de evolução do estado de degradação do pavimento. É de salientar que a entrada de água pelas fissuras acelera a evolução da degradação. Pode classificar-se segundo a abertura da malha, podendo ser malha estreita (com lado da malha $\leq 40\text{cm}$) ou malha larga (com lado da malha $\geq 40\text{cm}$). Pode ainda ser classificada segundo a abertura dos bordos das fendas, em aberta e fechada.”



Figura 2.6- Fenda por fadiga
(Santos, B., 2002)



Figura 2.7- Fenda longitudinal
(Tavares, M., 2013)



Figura 2.8- Pele de crocodilo (Santos,
B., 2002)

c) *Desagregação da camada de desgaste.*

Segundo Picado-Santos, L. et al. (2002), “A desagregação da camada de desgaste traduz-se na perda de qualidade superficial da mesma, isto acontece devido à falta de estabilidade da ligação entre os materiais constituintes da mistura ao longo do tempo.”

Os tipos de degradações que pertencem à família da desagregação da camada de desgaste dividem-se em cabeça de gato, desagregação superficial, pelada e ninhos.

Cabeça de gato: perda da componente mais fina da mistura betuminosa à superfície da camada de desgaste, ficando os agregados grossos mais salientes.

Desagregação superficial: é uma das degradações mais relevantes desta família e é originada devido ao arranque dos agregados grossos, em parte resultante da evolução das “cabeças de gato” (ver Figura 2.9).

Pelada: desprendimento de pequenas placas da camada de desgaste relativamente à camada inferior (ver Figura 2.10). Ocorrem devido ao subdimensionamento da camada de desgaste, à falta de qualidade dos materiais dessa mesma camada, da deficiente ligação da camada de desgaste à camada betuminosa subjacente e/ou à reduzida compacidade da camada. Neste tipo de degradação é comum a acumulação de água, o que ajuda à evolução desta degradação e a novas degradações resultantes da presença de água nas camadas inferiores.

“Ninhos” ou covas: formação de cavidade na superfície do pavimento, de forma irregular, com profundidade e largura variável (ver Figura 2.11). Surgem principalmente em zonas que apresentam patologias como a pele de crocodilo, deformações localizadas ou perda do agregado da camada de desgaste, resultando da evolução destas degradações para as camadas inferiores do pavimento.

Os ninhos ou covas são dos estados últimos no processo de degradação de um pavimento, com efeitos severos sobre os veículos, sofrendo ao mesmo tempo a ação acrescida destes, acelerando assim a evolução da degradação do pavimento (Picado-Santos, L. et al., 2008).



Figura 2.9- Desagregação superficial (Tavares, M., 2013)



Figura 2.10- Pelada (Santos, B., 2002)



Figura 2.11- Ninhos ou covas (Tavares, M., 2013)

d) Movimento de materiais.

Esta família de degradações refere-se às patologias resultantes da movimentação de materiais constituintes das camadas betuminosas ou granulares, ou da fundação, através das camadas do pavimento. O movimento de materiais pode desenvolver-se apenas nas camadas betuminosas, como no caso da exsudação, ou abranger todas as camadas e o solo de fundação, quando se trata da subida de finos (Picado-Santos, L. et al., 2002).

O movimento de materiais divide-se em dois tipos de degradações, a subida de finos e a exsudação.

Subida de finos: esta patologia ocorre sobretudo devido a deficiências de drenagem associado a camadas betuminosas fendilhadas, favorecendo a expulsão de finos através das fendas devido à água presa no interior do pavimento e/ou fundação, emergindo à superfície quando da passagem dos veículos. A subida de finos pode ser identificada através da observação de manchas de cor esbranquiçada no pavimento (ver Figura 2.12).

Exsudação: nesta degradação ocorre uma alteração da composição da camada de desgaste uma vez que o excesso de ligante sobe até à superfície, com o consequente envolvimento dos agregados grossos e redução da macrotextura (ver Figura 2.13). Segundo Picado-Santos, L. et al. (2002), “A exsudação resulta da deficiente formulação da camada de desgaste que pode ter como principais causas o excesso de ligante, a utilização de ligante de reduzida viscosidade e/ou o excesso de fração fina dos agregados. Ocorre sobretudo em condições de temperatura elevada e perante ações severas do tráfego pesado e lento”.



Figura 2.12- Subida de finos (Santos, B., 2002)



Figura 2.13- Exsudação (Tavares, M., 2013)

e) Reparações.

No catálogo de Degradações de Pavimentos Rodoviários Flexíveis (EP-JAE, 2008) as reparações são consideradas uma família de degradações. Se a reparação corrigiu a degradação mas não eliminou a causa, fazendo com que a degradação regresse, a reparação é quantificada no cálculo da qualidade do pavimento.

A má qualidade de execução de reparações poderá ser avaliada tendo como base a elaboração das juntas (ver Figura 2.14).



Figura 2.14- Juntas mal elaboradas (Santos, B., 2002)

2.2.2 Considerações finais

Perante um estado de degradação, a interferência deste com a qualidade do pavimento poderá ser avaliada através das degradações que ocorrem à superfície e na estrutura no pavimento.

As degradações que se sucedem à superfície do pavimento estão diretamente relacionadas com a camada de desgaste. As degradações que podem ocorrer à superfície são o fendilhamento da camada de desgaste, a desagregação dessa mesma camada, a exsudação e subida de finos que contribuem para uma circulação pouco segura e pouco confortável.

Quanto às degradações na estrutura do pavimento, estas estão relacionadas com fenómenos de colapso ao nível da estrutura ou com fenómenos de fadiga. São materializados na forma de deformações e aparecimento de covas que contribuem para a incapacidade do pavimento suportar as cargas aplicadas.

2.2.3 Relações entre as degradações e os fatores de degradação

De seguida apresenta-se um quadro resumo, relacionando os vários tipos de degradações com os diversos fatores de degradações (ver Tabela 2.2).

Tabela 2.2- Classificação das relações entre degradações e os fatores de degradação (Pereira, P. et al., 1999 citado por Picado-Santos, L. et al., 2008)

Degradações	Fatores de Degradação									
	Condições de drenagem	Sub-dimensões da camada de desgaste	Sub-dimensões das camadas inferiores	Capacidade de suporte da fundação	Qualidade dos materiais	Deficiências de fabrico e execução	Ligação entre camadas de base e desgaste	Agressividade do Tráfego	Ações climáticas	Camadas estruturais de reduzida compacidade
Deformações	***	*	**	***	*	**		*	*	***
Rodeiras	***	*	**	***	**	*		**	**	***
Fendas	**	**	**	**	***	**	**	***	***	***
Fendas parabólicas	*	**			**	**	***	***	***	**
Pele de crocodilo	**	**	**	**	***	**	**	***	***	***
Pelada		***	*		**	**	***	***	**	**
Ninhos		**	*		***	***	**	**	**	***
Cabeça de gato			*		***	**		***	*	**
Desagregação superficial					***	***		**	***	**
Exsudação					***	**		***	***	

Nota: *** Muito importante, ** Importante, * Pouco importante

Da análise da tabela 2.2, constata-se que os fatores com maior contribuição para o aparecimento/evolução no que respeita às degradações na estrutura do pavimento (deformações e rodeiras) são a compacidade reduzida das camadas estruturais, deficientes condições de drenagem e deficiente capacidade de suporte da fundação.

Quanto ao aparecimento/evolução das degradações superficiais, os fatores que mais se destacam são a falta de qualidade dos materiais, a agressividade do tráfego e as ações climáticas severas.

2.3 Avaliação do estado de degradação do pavimento

Segundo Bernucci, L. et al. (2008), “Os pavimentos são estruturas que geralmente não apresentam rotura súbita, mas sim deterioração funcional e estrutural que se inicia a partir da abertura ao tráfego”.

Como se consegue entender do apresentado anteriormente a evolução das degradações leva os pavimentos rodoviários a atingirem níveis de qualidade reduzidos, sendo indispensável intervir rapidamente sob estas de forma a devolver ao pavimento um nível de qualidade aceitável. Com o objetivo de intervir no pavimento de forma correta e adequada é necessário conhecer o estado atual deste. Para isso, deverá ser realizada uma avaliação rigorosa do pavimento através de determinados parâmetros fundamentais para caracterizar o seu estado estrutural e funcional.

Em geral, os parâmetros usados na avaliação do estado de degradação dos pavimentos, quer ao nível da receção de pavimentos novos quer em reabilitações, são:

- Estado superficial;
- Capacidade estrutural;
- Regularidade longitudinal e transversal;
- Atrito transversal.

Segundo Picado-Santos, L. et al. (2002) “O estado superficial e a capacidade estrutural são os que melhor avaliam a qualidade dos pavimentos num determinado instante do tempo.” Por conseguinte apenas se irá descrever as principais técnicas de observação do estado superficial e de capacidade estrutural.

2.3.1 Técnicas de observação do estado superficial

Para a avaliação da qualidade superficial é preponderante a observação visual da superfície do pavimento rodoviário. Por norma é esta observação que permite conhecer o nível de degradação do pavimento, caracterizando cada tipo de degradação quanto à sua extensão e nível de gravidade. No entanto esta observação tem como desvantagens a pouca fiabilidade dos resultados e o tempo de observação.

As degradações podem ser observadas essencialmente por dois métodos: observação visual, com registo do estado observado em diferentes suportes (formulários específicos ou suporte informático) para posterior tratamento; e observação através da utilização de equipamento de registo de imagem (do tipo vídeo ou fotográfico). Também têm sido desenvolvidas algumas soluções com base na utilização de raios laser para deteção de degradações, em particular do fendilhamento (Picado-Santos, L. et al., 2002), e de protótipos equipados com dispositivos de varrimento laser e de captação e registo de dados de imagem e de georreferenciação (Nogueira, A., 2015; Maganinho, L., 2013).

A observação visual, apoiado no catálogo de degradações, é realizada por um operador que se desloca ao longo da estrada, a pé ou a bordo de um veículo, registando os diferentes tipos de degradações, segundo a respetiva gravidade, em formulários específicos, ou introduzindo num suporte informático o que vai observando, através de uma codificação previamente estabelecida (Pereira, P. et al., 1999).

Um dos equipamentos associados por computador mais conhecido na utilização a bordo de um veículo é o VIZIROAD. Trata-se de um computador portátil munido de um software de aquisição e requisição de informação com dois teclados, um alusivo ao tipo de degradação e outro à gravidade, ao qual é também ligado um medidor de distâncias (ver Figura 2.15).

A observação visual das degradações tem como grande inconveniente a subjetividade e heterogeneidade que lhe pode estar associada, uma vez que as mesmas degradações podem ser observadas com resultados diferentes por operadores diferentes.

Para colmatar este problema é fundamental que os operadores tenham uma formação adequada e experiência, por forma a adquirir as habilitações necessárias para conhecer corretamente os diferentes tipos de degradações e respetivos níveis de gravidade.

Para dar apoio aos operadores, diminuindo a subjetividade e aumentando a rapidez de observação, foram criados catálogos de degradações. Nestes documentos, para cada tipo de pavimento, são apresentados e descritos os diferentes tipos de degradações, os respetivos níveis de gravidade, fotografias exemplificativas e a forma de efetuar a sua medição.

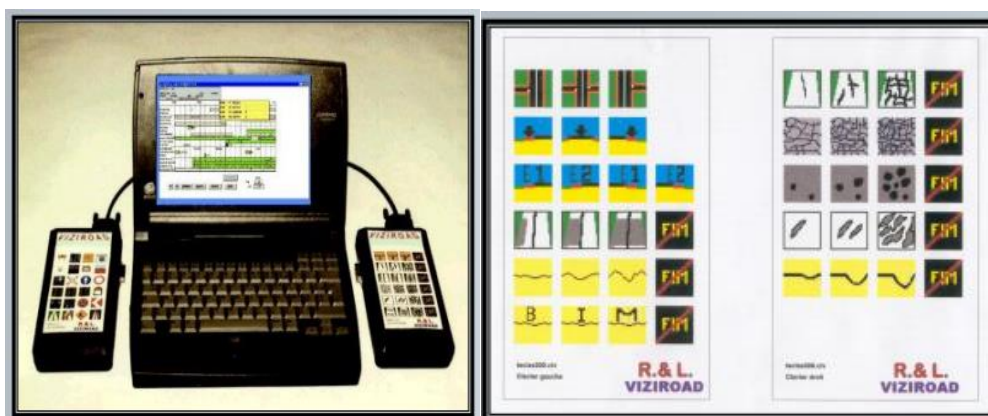


Figura 2.15- Equipamento VIZIROAD (Santos, B., 2002)

Para melhorar a rapidez de levantamento e a fiabilidade dos dados, têm-se desenvolvido equipamentos de registo automático de imagem do pavimento que permite uma análise posterior em gabinete. Estes equipamentos permitem velocidades mais elevadas de levantamento e a identificação em gabinete das degradações com possibilidade de repetição da observação das imagens para confirmação dos dados.

O objetivo de se realizar uma observação das degradações o mais objetiva e precisa possível e com elevado rendimento, conduziu o *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) a desenvolver o sistema GERPHO. O GERPHO (*Group d'Examen Routier par Photographie*) é um equipamento constituído por um veículo munido de uma câmara fotográfica, de saída contínua, que pode efetuar levantamentos a uma velocidade de 60 km/h. Os levantamentos devem ser realizado durante a noite, com recurso a projetores, de modo a obter-se uma luminosidade constante do pavimento (ver Figura 2.16).

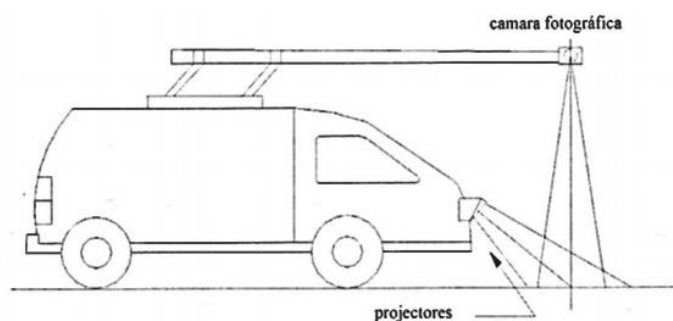


Figura 2.16- GERPHO (Picado-Santos, L. et al., 2008)

Com o intuito de eliminar as desvantagens anteriormente apresentadas, a IP,SA adquiriu um perfilómetro laser que permite a recolha automática de parâmetros para caracterização do estado do pavimento. O perfilómetro permite medir, analisar e traçar o perfil transversal e longitudinal do pavimento rodoviário em estudo, calcular a profundidade das rodeiras, obter a macrotextura superficial e definir parâmetros geométricos da via com velocidades de levantamento que podem ir até 90 km/h.

Este equipamento é constituído pelos seguintes elementos (ver Figura 2.17):

- Barra de alumínio que tem incorporada 14 lasers. Esta barra é instalada num veículo automóvel. Os 14 lasers estão colocados com diferentes inclinações com o objetivo de fornecer uma leitura mais completa do pavimento.
- Transdutor posicionado no pneu do veículo medindo a distância percorrida e a velocidade a que circula o veículo.
- Acelerómetro que mede a aceleração vertical.
- Recetor GPS.

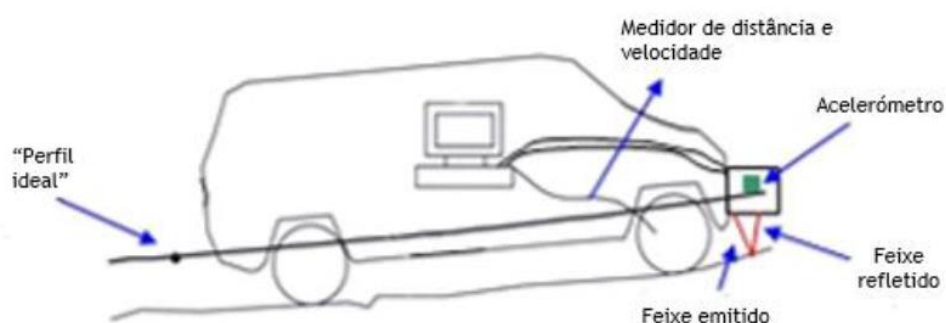


Figura 2.17- Esquema da montagem do Perfilómetro Laser no veículo (LNEC, 2011 citado por Nogueira, A., 2015)

Como se pode ver na figura 2.18, o perfilómetro laser permite, com recurso a sensores laser, realizar medições da irregularidade transversal.

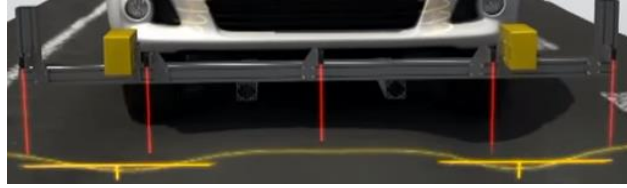


Figura 2.18- Medição da irregularidade transversal através do Perfilômetro Laser (Pavetesting. (2012). PAVEPROF Laser Profilometer Pavetesting Web. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=rcDFVxcb__Q)

2.3.2 Técnicas de observação da capacidade estrutural

A avaliação deste parâmetro envolve o estudo da qualidade estrutural de todo o pavimento, com particular atenção às camadas granulares e betuminosas com função estrutural e à caracterização da capacidade de carga do solo de fundação. Estas técnicas permitem conhecer o comportamento mecânico dos materiais das várias camadas, sendo este comportamento caracterizado por dois parâmetros: o módulo de deformabilidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν) para cada camada.

A caracterização da capacidade estrutural do conjunto “pavimento-solo de fundação” baseia-se em geral na observação da deformação vertical da superfície do pavimento, designada de deflexão, considerada como a resposta do pavimento quando este é submetido à aplicação de uma carga em determinadas condições (Picado-Santos, L. et al., 2002).

Com a observação da capacidade estrutural é então possível saber se um determinado pavimento tem condições para receber as cargas dos veículos sem sofrer deflexões ou assentamentos significativos.

Segundo Picado-Santos, L. et al. (2002), “A medição da deflexão de um pavimento pode ser utilizada com diversos objetivos:

- Como valor caracterizador da deformabilidade global de um pavimento, uma vez conhecida a composição da estrutura do pavimento, pode ser utilizado para avaliar a capacidade estrutural (qualidade residual), no momento da observação;
- Como dado para a calibração dos modelos analíticos, com o objetivo de determinar as tensões e deformações produzidas por uma determinada carga;
- Para dimensionar as camadas de reforço, cuja eficácia quanto à capacidade de aumentar a rigidez do pavimento pode ser avaliada através da redução do valor da deflexão medida, após a realização desse reforço;
- Para definir a qualidade estrutural de diferentes trechos de pavimento, de modo a determinar classes de deflexão para posterior utilização em sistemas de gestão.

Os ensaios utilizados para caracterizar o comportamento estrutural de um pavimento rodoviário flexível são divididos em ensaios destrutivos e ensaios não destrutivos.

Um método destrutivo é aquele que avalia a condição estrutural de cada camada constituinte do pavimento, por exemplo, através da abertura de poços de inspeção, sondagens à rotação ou cone de penetração dinâmico. Devido aos inconvenientes deste método, nomeadamente à

destruição das misturas betuminosas e à perturbação da circulação do tráfego, estes métodos são menos utilizados. Os equipamentos mais utilizados na medição da capacidade estrutural através de método não destrutivo são: a viga de Benkelman, o defletógrafo FLASH e o defletómetro de impacto destrutivo (FWD). Os dois primeiros equipamentos utilizam uma carga rolante enquanto que o último utiliza uma carga pontual.

Estes equipamentos apresentam velocidades de observação muito reduzidas, da ordem dos 3 a 18 km/h. Por este motivo tem-se vindo a desenvolver equipamentos de observação da deflexão que permitem velocidades mais elevadas, da ordem dos 90 km/h, destacando-se dois equipamentos ainda em fase de protótipo, o High Speed Deflectograph (HSD- Dinamarca) e o Road Deflection Tester (RDT- Suécia).

A nível das camadas não ligadas, a avaliação da capacidade estrutural deve ser realizada no período mais húmido, uma vez que a água tem uma influência significativa no comportamento mecânico dos solos e dos materiais granulares. Esta alteração contribui significativamente para a redução dos módulos de deformabilidade e da resistência potenciando as deformações permanentes, destes materiais (Antunes, M.L., 1993). A nível das camadas betuminosas, esta avaliação deverá ser realizada no verão, uma vez que os módulos de deformabilidade destas são potencialmente afetados pelas temperaturas elevadas.

De seguida descreve-se alguns dos equipamentos mais usados, nomeadamente a viga de Benkelman, o defletógrafo FLASH e o defletómetro de impacto (FWD).

Viga de Benkelman

Segundo Picado-Santos, L. et al. (2008) “A viga Benkelman (desenvolvida em 1953 por A.C. Benkelman) é um equipamento destinado a medir a deflexão de um pavimento, quando sobre este se aplica uma carga quase estática através de um pneu”.

Este equipamento é composto por uma “base” metálica rígida que assenta no pavimento através de dois pés, mantendo-se fixa durante o ensaio, e por uma viga que roda em torno de um ponto de fixação e que se apoia no pavimento por uma das extremidades designada de “ponta apalpadora”. Na outra extremidade da viga situa-se um defletómetro que mede o deslocamento provocado pela passagem do pneu de um veículo (ver Figuras 2.19 e 2.20).

Existem dois procedimentos para este ensaio: o “ensaio de carga e descarga” e o “ensaio de descarga”, sendo este último o mais usado, pelo que se descreve a seguir.

Ensaio de descarga:

1. O rodeiro traseiro do veículo deverá inicialmente ficar afastado 1 metro em relação à ponta apalpadora, ponta esta que deve coincidir exatamente com o ponto onde se tenciona medir a deflexão. A ponta apalpadora é colocada entre os pneus do rodado.
2. O veículo desloca-se no sentido oposto à localização da viga, passando pela vertical no ponto a medir, onde se regista a deflexão máxima. O veículo continua a deslocar-se até a deflexão estabilizar.

3. A deflexão elástica é determinada pela diferença entre o valor de deflexão máxima e o valor final, sendo esta deflexão normalmente usada como o parâmetro a “nível da rede” (ver Figura 2.19).
4. Através da “linha de influência” ou “bacia de deflexão” é possível determinar para além da deflexão máxima reversível (deflexão elástica) outros parâmetros da curva que podem ser utilizados para determinar a contribuição de cada camada e da fundação na deflexão obtida, permitindo qualifica-las em relação à resistência mecânica. Estes parâmetros são utilizados a nível de projeto.

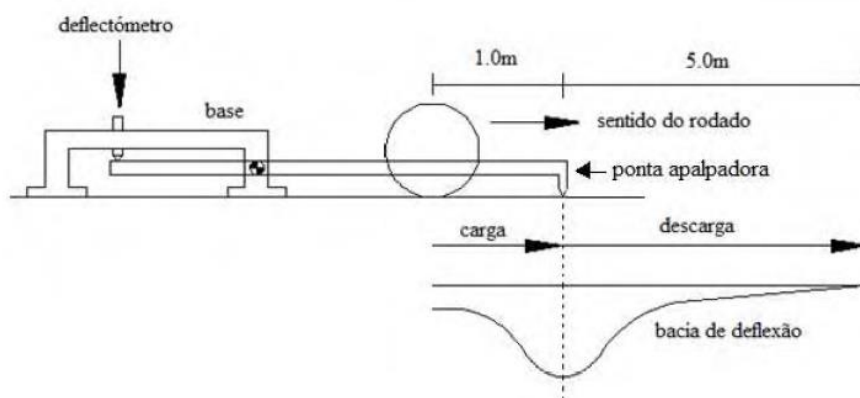


Figura 2.19- Esquema de constituição da viga de Benkelman e respetiva linha de influência (Pereira, P. et al., 1999)



Figura 2.20- Ensaio da viga de Benkelman (Trujilloinforma, 2014. Disponível em: <http://trujilloinforma.com/trujillo/aplican-pruebas-de-resistencia-a-superficie-vial-de-av-villareal/>)

Este ensaio é rentável apenas para medições de pequenos trechos, uma vez que as velocidades de execução rondam os 2-3 km/h.

Defletógrafo FLASH

Este equipamento resultou da evolução do defletógrafo Lacroix e foi criado com o propósito de colmatar as limitações da viga Benkelman, sendo os ensaios destes similares. O defletógrafo FLASH possibilita a medição das deflexões à superfície do pavimento, quase em contínuo. A distância entre pontos de medição é geralmente de 5 a 10 metros e a velocidade de ensaio ronda os 3 A 8 km/h.

Este equipamento é constituído pelos seguintes elementos (Picado-Santos, L. et al., 2008) (ver Figuras 2.21 e 2.22):

- Um camião de chassis de dois eixos, com um afastamento da ordem do 5 m, descarregando o eixo traseiro de rodas duplas, quando carregado, uma carga até 130 kN;
- Uma viga metálica, situado por baixo do camião, constituindo um plano de referência com três pontos de apoio sobre o pavimento, fora da área de influência da carga, dois braços captadores que podem rodar, segundo um plano vertical, em torno do plano de referência; uma caixa junto à articulação de cada braço contendo o equipamento eletrónico de registo, que transforma em sinal elétrico o deslocamento devido à rotação dos braços;
- Um sistema de tração e de guiamento da viga de referência, comandado eletronicamente pelo sistema de controlo do ensaio;
- Dois inclinómetros montados sobre cada braço captador, para medir o raio de curvatura da linha de influência.
- Um termómetro de infravermelhos para medir a temperatura à superfície do pavimento.
- Um sistema eletrónico-informático de aquisição e tratamento de dados.



Figura 2.21- Defletógrafo Lacroix (Vialidad)

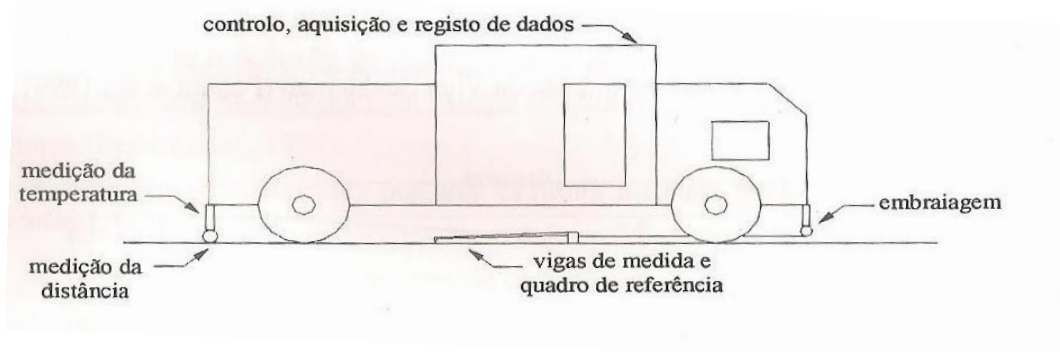


Figura 2.22- Constituição do Defletógrafo FLASH (Picado-Santos, L. et al., 2008).

A deflexão é medida no espaço entre as rodas duplas através dos braços captadores, quando os pneus do eixo traseiro estão na vertical da ponta apalpadora, obtendo-se assim a deflexão do

lado da “berma” num rodado e a deflexão do lado do “eixo” no outro (Picado-Santos, L. et al., 2008).

Assim, as deflexões são conseguidas durante a carga, contrariamente ao ensaio da viga Benkelman. A deflexão medida é determinada com a soma da deflexão elástica com a deflexão permanente. Este ensaio fornece informações como a deflexão máxima, o raio de curvatura da linha de influência, a temperatura da superfície do pavimento e a área sobre a linha de influência.

Segundo Picado-Santos, L. et al. (2008), “Uma vez que, este equipamento mede a deflexão máxima a sua utilização poderá não ser a mais adequada para a obtenção a “nível de projeto”, onde se requer uma elevada precisão na avaliação da capacidade estrutural e porque se pretende conhecer a deflexão elástica do pavimento e da forma da deformada. Face ao seu rendimento e a uma observação pormenorizada dos pavimentos (intervalos de 5 a 10 metros), é um equipamento aconselhável a “nível de rede”.”

Defletómetro de impacto (FWD)

“O Defletómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer - FWD) é um equipamento destinado a avaliar a capacidade estrutural de um pavimento através da medição da sua resposta a uma carga vertical de impacto” (Picado-Santos, L. et al., 2002).

O sistema que integra o defletómetro de impacto é instalado num reboque (ver Figura 2.23). Este reboque é atrelado a um veículo ligeiro, o qual incorpora equipamento informático de controlo de ensaio, assim como de aquisição, tratamento e restituição da informação obtida.



Figura 2.23- Defletómetro de Impacto (Tecnilab)

Os principais elementos deste equipamento são os seguintes:

- Placas que são responsáveis pela transmissão de uma força de impacto ao pavimento. A aplicação desta carga simula a passagem de veículos a 60-80 km/h. Estas placas podem ser largadas a quatro alturas de queda distintas, podendo a força de impacto atingir entre os 30 a 240 kN.
- Vários acelerómetros (geralmente entre 6 a 9) que medem a resposta da superfície do pavimento. Estes acelerómetros são distribuídos alinhadamente à direção do eixo da aplicação da carga.

- Placa rígida central com diâmetro de 300 ou 400 mm que recebe a carga transmitida da queda das placas circulares.

A dimensão das placas e as distâncias entre os acelerómetros podem ser definidas em função da rigidez do pavimento.

A observação é feita por amostragem com um espaçamento entre os pontos observados de 50 a 100m.

“O ensaio realiza-se quando a massa cadente cai de uma determinada altura sobre os amortecedores, transmitindo uma força ao pavimento através da placa rígida, simultaneamente são medidos os deslocamentos verticais da superfície nos pontos de apoio dos acelerómetros” (Picado-Santos, L. et al., 2008) (ver Figura 2.24).

Neste ensaio também é medida a temperatura da superfície do pavimento, informação essencial usada na correção posterior dos resultados, nomeadamente na correção dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas para a temperatura de serviço.

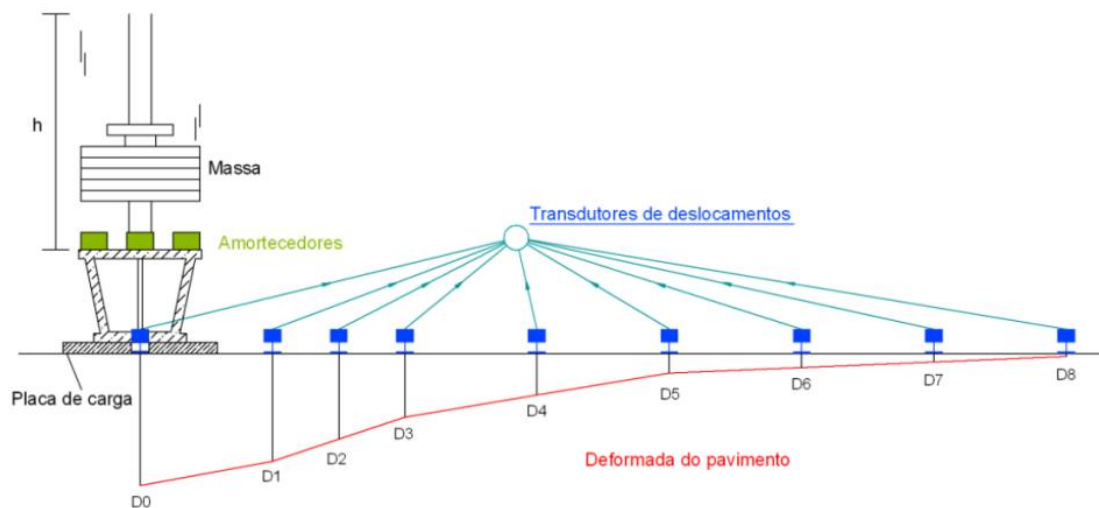


Figura 2.24- Esquema de um ensaio de carga com defletómetro de impacto e respetivo defletograma (Antunes, L., 2008)

Da análise da bacia de deflexão é possível conhecer o comportamento estrutural do pavimento. Os acelerómetros mais próximos do ponto de aplicação da carga dão informações sobre o comportamento estrutural total (pavimento-fundação), os mais afastados dão informações sobre o comportamento das camadas mais inferiores do pavimento e da camada de fundação.

Como pode ser observado na figura 2.25, as deflexões dos sensores mais próximos da placa são influenciados essencialmente pelas camadas superficiais enquanto que, a camada do solo de fundação influencia todas as deflexões da bacia.

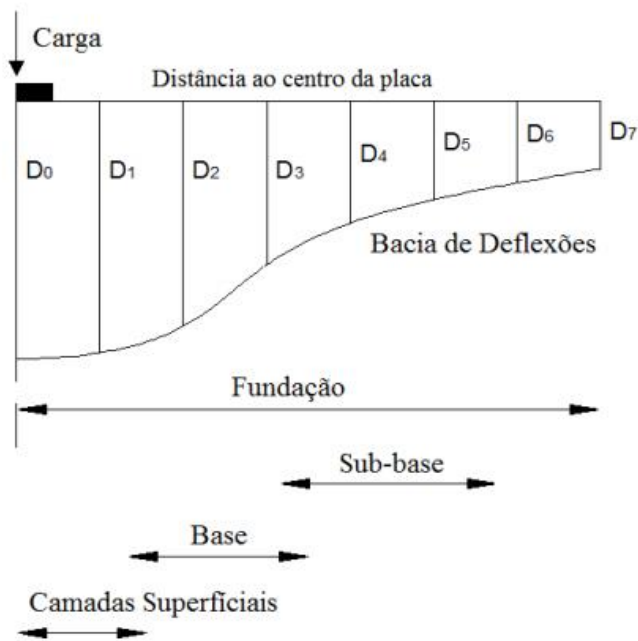


Figura 2.25- Influência das camadas de um pavimento flexível na obtenção da bacia de deflexões (Fontul, S., 2004 citado por Santos, M., 2009)

O defletómetro de impacto é o equipamento mais adequado para a observação da capacidade de suporte ao nível de projeto. Este equipamento permite-nos, a partir da deformada do pavimento em relação à sua resposta elástica, estabelecer um modelo de comportamento estrutural de um pavimento, caracterizar a capacidade resistente dos materiais das diferentes camadas ligadas e por fim atribuir os correspondentes módulos de deformabilidade médios aparentes.

Contudo, esta análise só é válida se o pavimento não apresentar degradações superficiais, sendo dentro das famílias de degradações o fendilhamento que mais influencia o valor da deflexão máxima e a forma da bacia de deflexão. As fendas existentes num pavimento funcionam como um elemento de descontinuidade, verificando-se por isso, nas proximidades destas, uma redução elevada de rigidez dependente da atividade das fendas, que por sua vez é influenciada pelo seu tipo. Reduz ainda a área de distribuição de cargas, que se traduz num aumento das tensões e, conseqüente, de deformação em todas as camadas do pavimento (Picado-Santos, L. et, 2002).

2.4 Técnicas de reabilitação estrutural

Num projeto de reabilitação é necessário primeiramente apurar, através do tratamento da informação recolhida a partir das técnicas de observação do estado superficial e das técnicas de observação da capacidade estrutural, se o pavimento oferece a qualidade de serviço prevista. Caso se conclua que o pavimento não apresenta as condições de segurança e qualidade adequadas e que está a desenvolver um estado de ruína, é vital recuperar as características que possuía antes da entrada em serviço, sendo este o principal objetivo da reabilitação de pavimentos rodoviários.

Existem duas técnicas de reabilitação do pavimento, as técnicas de Reabilitação das Características Superficiais (focam-se nas características funcionais do pavimento, intervindo na camada de desgaste do pavimento) e as técnicas de Reabilitação das Características Estruturais (focam-se no comportamental estrutural do pavimento, intervindo na camada de desgaste, na camada de regularização e na camada de base).

Este subcapítulo irá apresentar as técnicas de reabilitação apenas ao nível estrutural, uma vez que o tema desta dissertação, reforço de pavimentos rodoviários flexíveis, constitui a estratégia de reabilitação estrutural mais utilizada na maioria dos países.

2.4.1 Reforço de pavimentos rodoviários flexíveis

Segundo Pereira, P. et al (1999), no domínio reabilitação estrutural dos pavimentos, o termo “reforço de pavimentos”, refere-se em geral a ação, ou conjunto de ações, capazes de aumentar a capacidade estrutural do pavimento existente (pavimento degradado) para suportar, em conjunto com a fundação mobilizável, as cargas geradas pelos veículos em determinadas condições.

Este aumento da capacidade estrutural do pavimento existente recorrendo ao reforço é conseguido com a colocação de uma espessura de materiais betuminosos sobre o pavimento.

Antes da aplicação da camada de reforço é fundamental conhecer o nível de degradação superficial do pavimento e executar as operações de regularização do estado superficial do pavimento necessárias para não refletir e/ou retardar o efeito das degradações para a nova camada (ver Tabela 2.3).

Por exemplo, se a camada de reforço for aplicada sobre um pavimento fendilhado, a ocorrência do fenómeno de reflexão de fendas é inevitável uma vez que nada impede que as fendas do pavimento degradado se propaguem através da camada de reforço até à sua superfície.

Pavimentos pouco degradados requerem pequenos trabalhos de reabilitação tais como; reparação com selagem de fendas, tapagem de covas e melhoramento do sistema de drenagem, entre outros. Para o caso de pavimentos em mau estado, recorre-se à fresagem das camadas mais degradadas e reparação posterior das camadas remanescentes antes da aplicação da camada de reforço.

A aplicação do reforço envolve a execução de uma ou mais camadas, focando-se geralmente na camada de desgaste e na camada de regularização.

Tabela 2.3- Trabalhos necessários antes da colocação da camada de reforço (Batista, F., 2004)

Trabalhos prévios	Anomalias que justificam os trabalhos
Saneamentos Consiste na remoção de materiais deficientes ou em mau estado para reconstituição de uma estrutura sã.	Assentamentos acentuados em zonas pontuais; Degradação das camadas inferiores, por insuficiente capacidade de carga da fundação ou drenagem insuficiente; Levantamento localizado do pavimento devido ao crescimento das raízes das árvores.
Fresagens Corte ou desgaste de uma ou mais camadas do pavimento.	Camadas betuminosas com fendilhamento excessivo; Camadas betuminosas desligadas.
Preenchimento de covas	Covas e depressões presentes nos pavimentos.
Selagem de Fendas	Para retardar ou eliminar o efeito da reflexão de fendas para as camadas de reforço.
Reperfilamentos	Regularizar a superfície do pavimento devido sobretudo à presença de rodeiras e depressões de grande dimensão.

No entanto, caso o pavimento rodoviário degradado apresentar graves problemas estruturais, necessitando de uma espessura considerável de reforço, poderá deixar de ser viável em termos económicos, tendo como alternativa, por exemplo, a reconstrução, apresentado mais à frente. Outro inconveniente deste tipo de técnica é que, ao adicionar uma camada ao pavimento existente, sobretudo em zonas urbanas, as cotas da estrada são alteradas, podendo interferir com passeios, garagens, entradas/saídas etc.

No que diz respeito aos materiais aplicados nas camadas de reforço, tradicionalmente são utilizados betões betuminosos em camadas de desgaste (AC 14 surf ligante (BB)) e macadame betuminoso em camadas de regularização (AC 20 reg ligante (MB)). Contudo, várias soluções que recorrem a novos materiais têm sido desenvolvidas com os objetivos de melhorar o desempenho do pavimento a longo prazo, diminuindo os custos e os impactes ambientais associados, e aumentando a vida útil do pavimento.

Na Tabela 2.4 são apresentados os materiais mais comuns usados na camada de reforço.

Tabela 2.4- Materiais usados na camada de reforço

Materiais usados na camada de reforço		
Misturas tradicionais de Reforço	Misturas Betuminosas Fabricadas a Quente	Macadame Betuminoso (MB)
		Misturas Betuminosas Densas (MBD)
		Betão Betuminoso (BB)
	Misturas Betuminosas de Alto Módulo (MBAM)	
	Misturas Betuminosas Fabricadas a Frio	
Novos materiais	Misturas Betuminosas com Betumes Modificados	Misturas Betuminosas com Betumes Modificados com Borracha (BMB)
		Misturas Betuminosas com Betumes Modificados com Polímeros (PMB)
	Malhas metálicas	
	Técnicas Anti-Reflexão de Fendas	SAMI's
		Geotêxteis
		Geogrelhas
Grelhas metálicas		

Legenda: MB- AC 20 reg ligante; MBD- AC 20 reg ligante; BB- AC 14 surf ligante; MBAM- AC 16 bin ligante.

Seguidamente irão ser descritos, sumariamente, cada um dos materiais apresentados na Tabela 2.4.

Misturas Betuminosas Fabricadas a Quente

Grande parte das misturas betuminosas utilizadas em camada de reforço são misturas betuminosas a quente, abrangendo o macadame betuminoso AC 20 reg ligante (MB), misturas betuminosas densas AC 20 reg ligante (MBD) e o betão betuminoso AC 14 surf ligante (BB), sendo as duas últimas usualmente utilizadas em camada de desgaste e o MB em camada de regularização.

O betume asfáltico é o ligante usado no fabrico destas misturas, sendo necessário aquecê-lo a temperaturas entre os 150 e os 160°C para se conseguir a consistência adequada para o fabrico da mistura. A classe de penetração nominal dos betumes utilizados nestas misturas é geralmente 35/50 e 50/70.

As misturas são preparadas em centrais betuminosas fixas. A sua produção pode ser feita recorrendo a dois processos, em central contínua ou em central descontínua.

Segundo Picado-Santos, L. et al. (2008), “ Nas centrais descontínuas faz-se a mistura das quantidades corretas de agregados e betume por “fornada”, sendo posteriormente toda a mistura colocada em camiões. Só depois de uma “fornada” pronta se dá início a outra. Nas centrais contínuas os agregados são misturados com o betume e posteriormente armazenados em silos, sendo que na altura em que a mistura já feita sai do misturador em direção ao silo entra nova dosagem de materiais no mesmo misturador, funcionando assim em contínuo.

Nas centrais de produção contínua as operações de mistura entre os agregados, filler, betume e possíveis aditivos realizam-se no mesmo tambor em que é efetuada a secagem e aquecimento dos agregados. Devido a isto, estas centrais são designadas frequentemente de centrais tambor-secador-misturador (ver Figura 2.26).

Nas centrais de produção descontínuas, a mistura entre os agregados, filler, betume e possíveis aditivos é realizada num misturador destinado unicamente para esta operação, sendo o local da mistura a única diferença entre centrais contínuas e descontínuas (ver Figura 2.27).

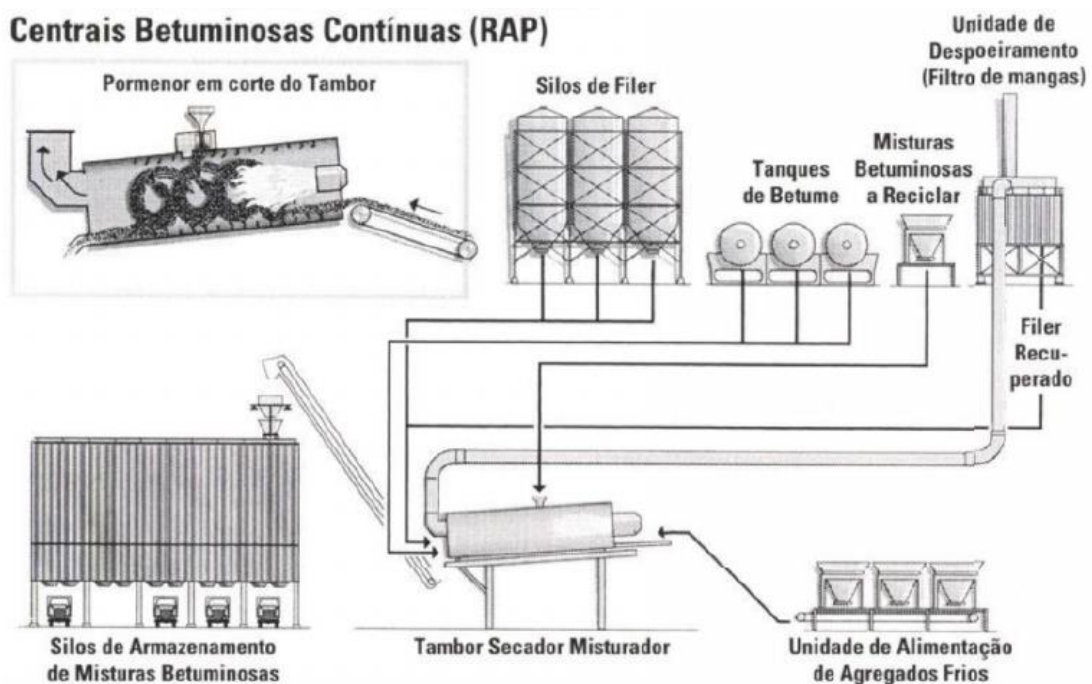


Figura 2.26- Centrais Betuminosas Contínuas (EAPA, 1998)

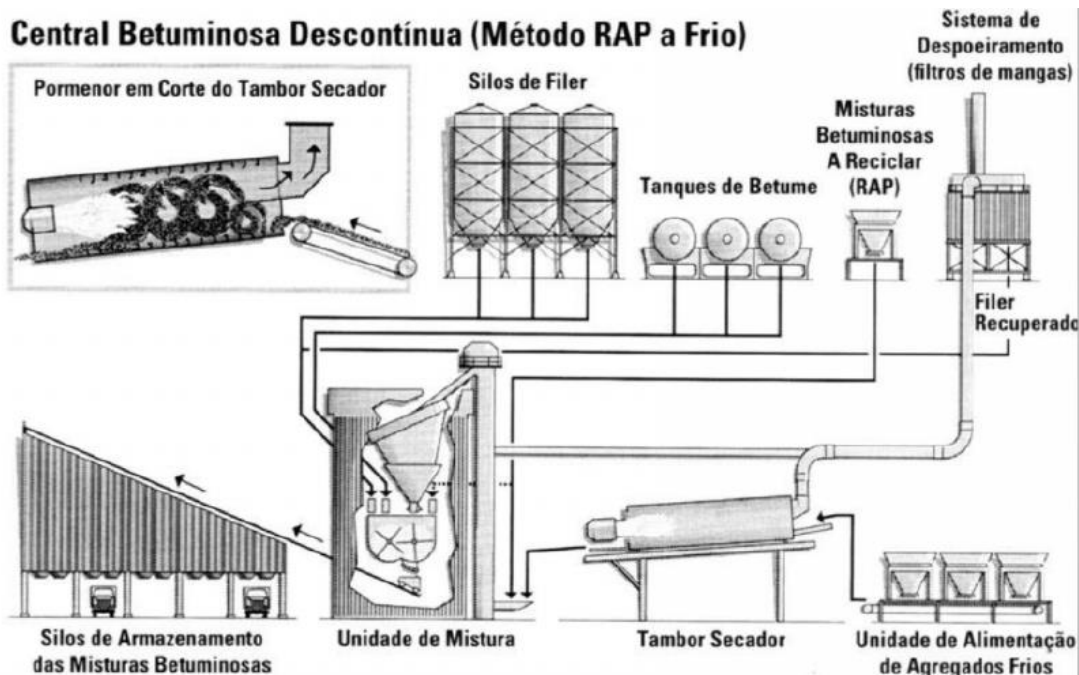


Figura 2.27- Centrais Betuminosas Descontínuas (EAPA, 1998)

A compactação destas misturas deverá realizar-se a temperaturas na ordem dos 130 a 150°C. Contudo, se o pavimento apresentar graves problemas estruturais a utilização deste tipo de misturas poderá requerer a aplicação de elevadas espessuras de reforço, tornando-se consequentemente pouco vantajoso em termos económicos.

Misturas Betuminosas de Alto Módulo

As misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade AC 16 bin ligante (MBAM) são misturas que, comparativamente às misturas betuminosas a quente, apresentam maior quantidade de finos e a utilização de betumes especiais mais duros (10/20, por exemplo). Desta forma, a mistura apresenta maior rigidez, resistência à fadiga e módulos de deformabilidade superiores em comparação com as misturas tradicionais.

Estas misturas são produzidas em centrais betuminosas do mesmo tipo das apresentadas nas misturas betuminosas a quente, fabricadas a temperaturas entre os 170 e 190°C e compactadas a temperaturas entre 145 e 175°C.

Como grande desvantagem deste tipo de misturas destacam-se os maiores gastos energéticos advindos das elevadas temperaturas quer na altura de fabrico como da sua aplicação em obra.

Misturas Betuminosas Fabricadas a Frio

Estas misturas utilizam como ligante uma emulsão betuminosa que se mistura aos agregados a temperatura ambiente sendo produzidas em central. São normalmente aplicadas em camadas de base ou na execução de reperfilamentos como operação prévia à colocação de uma camada

reforço. A compactação da mistura também é efetuada a temperatura ambiente, o que permite uma redução dos gastos energéticos e da emissão dos poluentes.

Este tipo de misturas são aconselháveis para um pavimento com tráfego pouco significativo.

Misturas Betuminosas com Betumes Modificados

Os betumes asfálticos podem ser modificados através da adição de polímeros, borracha, asfaltos naturais, ou outros tipos de compostos. Estes aditivos têm como finalidade diminuir a suscetibilidade térmica dos betumes, aumentar a sua viscosidade a altas temperaturas para evitar problemas com deformações plásticas, diminuir a sua fragilidade a baixas temperaturas, aumentar a sua coesão e flexibilidade e, em suma, permitir a sua aplicação com êxito numa gama de temperaturas maior que a correspondentes aos betumes tradicionais (CEPSA Portuguesa Petróleos, S.A., 2010).

→ Misturas Betuminosas com Betumes Modificados com Borracha

Estas misturas consistem na adição de borracha moída obtida da trituração de pneus já utilizados com o betume, originando um fluido mais viscoso.

Podem ser fabricadas segundo dois processos: via seca ou via húmida. Na via seca a borracha triturada é adicionada juntamente com os agregados, enquanto que na via húmida o betume é antecipadamente modificado com a borracha antes de se misturar com os agregados.

A modificação do betume através da introdução de borracha de pneus possui as seguintes vantagens:

- Uma vez que o ligante é mais elástico e viscoso a temperaturas de serviço altas, a resistência à formação de rodeiras aumenta;
- Diminuição da suscetibilidade térmica;
- Elevada resistência ao fendilhamento (melhor resistência à fadiga e à propagação de fendas);
- Aumento da resistência ao envelhecimento;
- Aumento do atrito no contacto pneu/pavimento;
- Redução do ruído causado pela interface pneu/pavimento;
- Redução do resíduo pneu.

Existem 3 tipos de betumes modificados com borracha: betumes de alta percentagem de granulado de borracha (BBA) que contêm elevadas percentagens de borracha, entre 18 a 22% da massa total do ligante, betumes de média percentagem granulado de borracha (BBM), com 8 a 15% da massa total do ligante e betumes de baixa percentagem granulado de borracha (BBB) com percentagens inferiores a 8%.

A temperatura de fabrico é mais elevada que nas misturas betuminosas tradicionais, sendo geralmente de 175 a 190°C. A temperatura de compactação ronda os 150-170°C.

→ Misturas Betuminosas com Betumes Modificados com Polímeros (PMB)

Esta mistura é a mais utilizada no que respeita a betumes modificados. Os polímeros usados podem classificar-se em 3 grandes grupos: Termoplásticos (mais utilizados em Portugal), Termoendurecíveis e elastómeros.

“A obtenção destes produtos pode realizar-se por mistura física, mediante a simples dispersão do polímero no ligante, ou através de reação química do polímero com os componentes do betume, obtendo-se, nesse caso, ligantes mais estáveis e com propriedades melhoradas” (CEPSA Portuguesa Petróleos, S.A., 2010).

Quanto ao processo de fabrico, estas misturas são efetuadas tal como as misturas betuminosas tradicionais, necessitando de uma cisterna de armazenamento do ligante equipada com um sistema de agitação adequado. A temperatura de fabrico situa-se na ordem dos 160-180°C.

As misturas betuminosas com betumes modificados com polímeros apresentam maior resistência às ações do tráfego, maior elasticidade, menor sensibilidade à temperatura, melhor comportamento à fadiga e às deformações permanentes e ainda redução da propagação de fendas.

Estas misturas devem ser compactadas a temperaturas entre os 140 e os 160°C.

Os módulos de deformabilidade apresenta, valores compreendidos entre os 4000 e 9000 MPa.

Malhas metálicas

As malhas metálicas surgem como um elemento adicional ao reforço tradicional, ajudando a melhorar a capacidade de carga do pavimento. Estas são colocadas entre a camada de regularização e a camada de reforço, sendo a camada de reforço composta por uma mistura betuminosa a quente de espessura reduzida quando comparada com as camadas de reforço tradicionais.

A colocação desta malha reduz principalmente o aparecimento de fendilhamento e a formação de rodeiras.

Técnicas anti-reflexão de fendas

Como já referido, a colocação da camada de reforço sobre um pavimento fendilhado provocará a ocorrência do fenómeno de reflexão de fendas. Este processo ocorre devido às tensões elevadas que se instalam na zona inferior da camada betuminosa de reforço que são induzidas pelo tráfego e pela temperatura, nomeadamente nas zonas onde se encontram as fendas do pavimento antigo. Assim, as fendas existentes nas camadas antigas propagam-se para a superfície da camada de reforço, dando início a uma ruína prematura do pavimento.

No domínio do reforço de pavimentos, as técnicas de anti-reflexão de fendas surgem com o propósito de reforçar o pavimento antigo fendilhado, reduzindo a velocidade de propagação de fendas e utilizando camadas de espessura reduzida que têm como principal função absorver a concentração de tensões produzidas na interface entre o pavimento antigo e a camada de

reforço. Existem diversas técnicas utilizadas nesta interface, salientando-se os geotêxteis impregnados com ligante betuminoso, as geogrelhas, as malhas metálicas, as SAMI's (Stress Absorbing Membrane Interlayer) e as argamassas com betumes modificados.

Os SAMI's são constituídas por betume modificado e agregados de pequena dimensão e aplicadas sobre a superfície do pavimento fendilhado para posteriormente se colocar a camada de reforço. Têm como função aumentar a resistência à propagação de fendas reduzindo a penetração de água nas camadas contíguas (ver imagem 2.28).

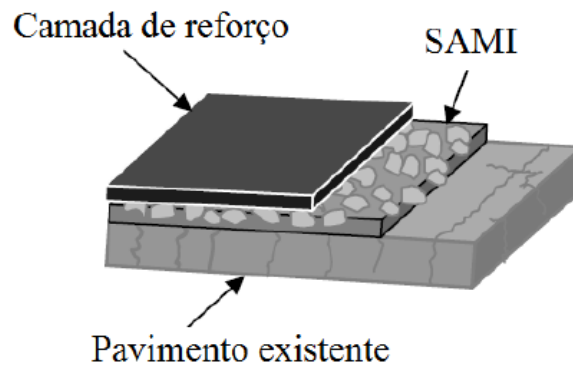


Figura 2.28- Esquema de aplicação do SAMI entre a camada antiga e a camada de reforço (ARTS citado por Santos, M., 2009)

Quanto aos geotêxteis, a sua colocação consiste primeiramente numa rega betuminosa abundante sobre o pavimento, usualmente betume modificado com polímeros. Seguidamente aplica-se o geotêxtil ficando este impregnado no betume.

Para além de minimizar a propagação de fendas para a camada de reforço, esta técnica também possui a vantagem de ser impermeabilizante, dificultando a percolação de água para as camadas inferiores (ver Figuras 2.29 e 2.30).



Figura 2.29- Rega para aplicação de geotêxtil (Tensor. Disponível em: <http://www.tensor.pt/Aplicações/Estradas-Áreas-Pavimentadas/Asphalt-Reinforcement>)



Figura 2.30- Aplicação de Geotêxteis (Tensor. Disponível em: <http://www.tensor.pt/Aplicações/Estradas-Áreas-Pavimentadas/Asphalt-Reinforcement>)

Contudo, esta técnica poderá provocar falta de aderência entre a camada de reforço e a camada inferior.

No que respeita às geogrelhas, estas são formadas por materiais ou combinações de materiais sintéticos com aberturas na sua malha e que possuem elevada resistência à tração. São materiais constituídos por polipropileno (PP), polietileno (PE), porpolipropileno (PP), polietileno (PE), poliéster de alta tenacidade (PET) ou por fibras de vidro (ver Figura 2.31).



Figura 2.31- Aplicação de Geogrelha (Eco engenharia. Disponível em: <http://ecoengenharia.com.br/produtos/geogrelhas-e-tecidos/geogrelha-hatelit/>)

A aplicação de geogrelhas apresenta as seguintes vantagens:

- Elevado Módulo de Deformabilidade geogrelha/pavimento;
- Minimização da propagação de fendas;
- Aumento significativo da capacidade de carga do pavimento.

As grelhas metálicas colocam-se entre a superfície do pavimento antigo e a camada de reforço. Esta técnica é usualmente utilizada em pavimentos com fendilhamento severo (ver Figura 2.32).



Figura 2.32- Aplicação de Grelhas Metálicas (engenhariacivil, 2011. Disponível em: <http://www.engenhariacivil.com/reforco-pavimentos-flexiveis>)

A aplicação de grelhas metálicas permite ter uma espessura mais reduzida da camada de reforço uma vez que absorve grande parte das cargas provocadas pelo tráfego.

Na tabela 2.5 são apresentados alguns agrupamentos de técnicas que podem ser utilizadas no reforço de pavimentos flexíveis.

Tabela 2.5- Classes e técnicas agrupadas de tratamento de reforço estrutural para pavimentos flexíveis (EP, 2013, citado por Tavares, M., 2013).

Classes de tratamento	Técnicas agrupadas de tratamento
Camada betuminosa (> 50mm) com mistura a quente sem fresagem	AC 14 surf ligante (BB) - 0.06m
	AC 14 reg ligante (BB) - 0.04m + Microaglomerado betuminoso a frio duplo/revestimento superficial/slurry seal
	AC 20 reg ligante (MBD) - 0.05m + Microaglomerado betuminoso a frio duplo/revestimento superficial/slurry seal
	AC 20 reg ligante (MBD) - 0.05m + AC 14 surf ligante (BB) - 0.04m
	AC 14 reg ligante (MBD) - 0.05m + AC 10 surf ligante (mBBr) - 0.03m
Camada betuminosa (> 50mm) com mistura a quente com fresagem de 0.04m a 0.06 m Camada betuminosa (> 50mm) com mistura a quente com fresagem de 0.06m a 0.12 m	Fresagem pontual ou total + AC 14 surf ligante (BB) - 0.06m
	Fresagem pontual ou total + AC 10 surf ligante (mBBr) - 0.03m
	Fresagem pontual ou total + AC 4 surf ligante (AB) - 0.04m
	Fresagem pontual ou total + AC 14 surf ligante (BB) - 0.04m + Microaglomerado betuminoso a frio duplo/revestimento superficial/slurry seal
Camada betuminosa (> 50mm) com mistura a frio com e sem fresagem	Mistura betuminosa aberta a frio - 0.05m + Microaglomerado betuminoso a frio duplo
	0,08m ABGE tratado com emulsão + Microaglomerado betuminoso a frio duplo

2.4.2 Reciclagem de pavimento

“A reciclagem de pavimentos rodoviários flexíveis consiste em obter novas misturas betuminosas com a utilização de material fresado dos pavimentos antigos a reabilitar, adicionando novos materiais (novo ligante, novos agregados ou nova mistura betuminosa)” (Pereira, P. et al., 1999).

O material fresado dos pavimentos antigos é então reutilizado, tendo por isso vantagem ao nível ambiental, uma vez que não é necessário colocar as misturas em vazadouros (reduzindo a produção de resíduos) e permite ainda volta a usar este material nas novas camadas (reduzindo a utilização de novos materiais, agregados e ligantes betuminosos). Outro benefício desta técnica é a de eliminar por absoluto o fendilhamento do pavimento existente, protegendo a nova camada do fenómeno de reflexão de fendas, constituindo uma das vantagens principais da utilização da reciclagem na reabilitação de pavimentos muito degradados.

Existem diversas técnicas para a reciclagem de pavimentos flexíveis: “in situ”, podendo ser a frio ou a quente; e em central podendo ser a frio, a quente o semi-quente.

Como exemplo de uma aplicação desta técnica, apresenta-se de seguida o procedimento utilizado na reciclagem “in situ” a frio. Neste processo de reciclagem, a máquina de fresagem avança sobre o pavimento ao mesmo tempo que é injetado ao tambor de fresagem, através de aspersores, emulsão betuminosa (ver Figura 2.33). Para além da emulsão betuminosa é possível também considerar a adição de cimento, espuma de betume e cal.

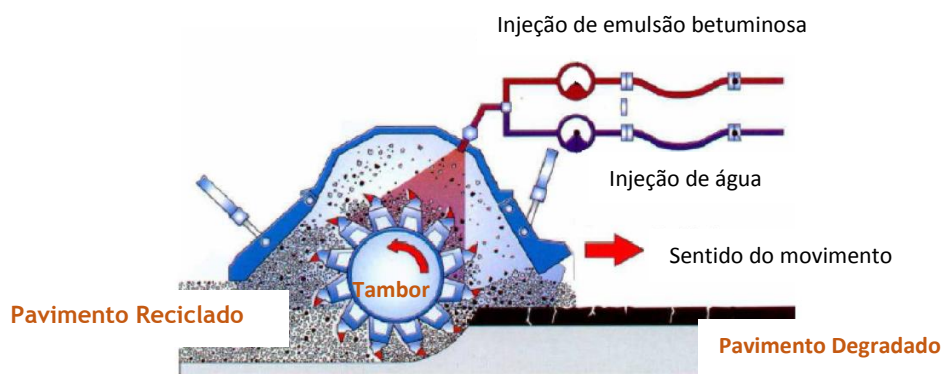


Figura 2.33- Esquema de produção de uma mistura reciclada in situ com emulsão betuminosa (Costa, B., 2006, citado por Cunha, C., 2010)

2.4.3 Reconstrução

Esta técnica de reabilitação é a menos utilizada, uma vez que é necessário construir o pavimento de raiz, no entanto, torna-se vantajosa e necessária em algumas situações, como por exemplo no caso das características da fundação do pavimento não serem adequadas, levando a um comportamento insatisfatório do pavimento, ou pelo pavimento se encontrar num estado de ruína com degradações bastante severas.

CAPÍTULO 3- Metodologias utilizadas no dimensionamento do reforço de pavimentos flexíveis

3.1 Considerações iniciais

Este capítulo destina-se à descrição de dois procedimentos que têm como finalidade o dimensionamento da espessura de camadas betuminosas de reforço para pavimentos rodoviários flexíveis. Os procedimentos apresentados baseiam-se em métodos expeditos e métodos empírico-mecanicistas de dimensionamento.

Os procedimentos baseados em métodos expeditos devem ser considerados apenas para estudos prévios ou para vias com tráfego reduzido, uma vez que, para o estudo da capacidade estrutural do pavimento não são consideradas as propriedades dos materiais constituintes do pavimento, constituindo assim métodos mais simples e menos rigorosos. No âmbito do trabalho aqui apresentado irá ser descrito o “procedimento baseado nas espessuras efetivas” desenvolvido pelo Asphalt Institute (Asphalt Institute, 1983), tendo-se incorporado aspetos dos manuais de dimensionamento de pavimentos do Asphalt Institute (Asphalt Institute, 2008) e da Junta Autónoma de Estradas (actual IP,SA) (EP-JAE, 1995).

Os procedimentos baseados em métodos empírico-mecanicistas são usados com mais frequência, são métodos mais trabalhosos mas permitem obter soluções mais fidedignas quando comparadas com as dos métodos expeditos. A realização de ensaios para caracterizar o comportamento estrutural do pavimento, como por exemplo do ensaio de carga com defletómetro de impacto - FWD, é necessária, sendo assim possível admitir certas características mecânicas para os materiais granulares e misturas betuminosas, fatores relevantes para a aplicação destes procedimentos. Neste documento será descrito o “procedimento baseado nas deflexões reversíveis”, desenvolvido pelo LNEC no final dos anos 60 (Pereira, P., 1971), mas tendo entretanto incorporado várias atualizações (Picado-Santos, L. et al., 2008). Para determinação da espessura da camada de reforço consideram-se duas abordagens: com recurso à verificação dos critérios de ruína do Método Shell (Claessen, A. et al., 1977) (processo semelhante ao dimensionamento de um pavimento flexível) e através do cálculo dos fatores de carga para o pavimento novo e existente (Dias, J., 2009).

3.2 Procedimento baseado nas espessuras efetivas

O dimensionamento da camada de reforço aplicando este procedimento consiste em admitir que, devido à sucessiva passagem das rodas dos veículos no pavimento, este diminui de espessura. Desta forma, a espessura utilizada para o dimensionamento, espessura efetiva, será menor do que a espessura que o pavimento tem na realidade. Esta diferença reflete a redução da capacidade resistente do pavimento ao longo da sua vida.

A espessura da camada de reforço é calculada segundo as seguintes etapas:

a) Determinação das características de resistência do solo de fundação.

A resistência do solo de fundação é caracterizada pelo seu módulo de deformabilidade. O módulo de deformabilidade pode ser estimado com recurso a várias expressões expeditas, como as apresentadas em (3.1) e (3.2), sendo que a expressão (3.2) só deverá ser utilizada quando os valores de CBR se encontram compreendidos entre 2% e 12% (Benta, A., 2008; Picado-Santos, L. et al., 2006b citado por Santos, M., 2009).

$$\text{Esf (MPa)} = 10,3 \times \text{CBR (\%)} \quad (3.1)$$

$$\text{Esf (MPa)} = 17,6 \times \text{CBR}^{0,64} (\%) \quad (3.2)$$

em que:

Esf - módulo de deformabilidade do solo de fundação, em MPa;

CBR - *California Bearing Ratio* (índice californiano de capacidade de carga do solo), em %.

Caso não esteja disponível informação sobre o índice CBR, um valor de CBR típico para determinado tipo de solo, classificado com recurso à Classificação de Solos para Fins Rodoviários (E240 LNEC, 1970) poderá ser admitido tendo em consideração as seguintes indicações:

Solos pobres: com quantidade apreciável de finos (solos A4). $\text{CBR}_{\text{típico}}=3\%$.

Solos médios: com alguma resistência sob condições severas de teor em água (solos A-2-6 e A-2-7). $\text{CBR}_{\text{típico}}=8\%$.

Solos bons: com bom comportamento sob condições severas de teor em água, excluindo a hipótese de saturação (solos A1, A3, A-2-4, A-2-5, bem graduados). $\text{CBR}_{\text{típico}}=17\%$.

b) Determinação da espessura e composição de cada camada do pavimento.

A espessura e composição das diferentes camadas que integram o pavimento podem ser conseguidas através de sondagens apropriadas, nomeadamente por carotagem das misturas betuminosas, como se pode observar nas figuras 3.1 e 3.2. Outra alternativa passa pela abertura de poços no bordo do pavimento (ver figura 3.3), tendo como vantagem uma informação mais completa acerca do conjunto pavimento-fundação, uma vez que permite visualizar as diferentes camadas da estrutura, a fundação, verificar as condições de compactação e de teor em água e colher amostras para ensaios de caracterização dos materiais de cada camada.



Figura 3.1- Execução de sondagens à rotação (Antunes, M. et al., 2005 citado por Santos, M., 2009)



Figura 3.2- Carote retirado por sondagem (Antunes, M. et al., 2005 citado por Santos, M., 2009)



Figura 3.3- Abertura de poços (Alves, T., 2007 citado por Santos, M., 2009)

As sondagens deverão ser realizadas nas zonas que representem as condições médias do pavimento a reforçar. Estas zonas deverão ser definidas recorrendo pelo menos a um reconhecimento visual, efetuado, tal como as sondagens, na época do ano mais desfavorável para o pavimento, do ponto de vista da capacidade de carga (Picado-Santos, L. et al, 2002).

c) Cálculo do tráfego solicitante.

No dimensionamento de pavimentos rodoviários é apenas considerado o tráfego dos veículos pesados, que se caracterizam por apresentarem um peso bruto igual ou superior a 3 toneladas (30 kN). Segundo a classificação dos veículos automóveis da IP, SA (Tabela 3.1), os veículos a considerar no dimensionamento correspondem às classes f, g, h, i, j e k.

Tabela 3.1- Classificação dos veículos automóveis (IP, citado por Picado-Santos, L. et al., 2002)

Categoria	Descrição
a	Velocípedes sem motor auxiliar
b	Velocípedes com motor auxiliar
Velocípedes	Categorias a+b
c	Motociclos com ou sem “side car”
d	Automóveis com ou sem reboque, incluindo os veículos comportando o máximo de 9 lugares
e	Camionetas até 3000 kg de carga com ou sem reboque
Ligeiros	Categorias c+d+e
f	Camiões de mais de 3000 kg de carga sem reboque
g	Camiões com um ou mais reboques
h	Tratores com semi-reboque Tratores com semi-reboque e um ou mais reboques Tratores com um ou mais reboques
i	Autocarros e trolleybus
j	Tratores agrícolas
k	Tratores sem reboque ou semi-reboque e veículos especiais (cilindros, bulldozers,...)
Pesados	Categorias f+g+h+i+j+k
Motorizados	Ligeiros + pesados
Total geral	Velocípedes + ligeiros + pesados
Mercadorias	Categorias e + f + g + h

O somatório dos veículos pesados, N_{pes} , que solicitam o pavimento durante n anos, pode ser calculado através da expressão (3.3), que corresponde à expressão adotada pelo manual de dimensionamento de pavimentos rodoviários português - MADIPAV (EP-JAE, 1995).

$$N_{pes} = (TMDA)_p \times \frac{(1+t)^n - 1}{n} \times 365 \quad (3.3)$$

em que:

$(TMDA)_p$ - tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura, por sentido de circulação, na via mais solicitada;

t - taxa de crescimento;

n - período de dimensionamento, em anos.

O tráfego médio diário anual de veículos pesados corresponde ao tráfego de pesados que passa, em média, diariamente, numa secção da estrada, ao longo de um ano. Este valor é obtido através da realização de estudos de tráfegos. No caso da reabilitação de estradas existentes, segundo Picado-Santos, L. et al. (2008) “em geral, é possível prever o tráfego que já a utiliza e aquele que será atraído pelo facto de passar a haver uma melhoria das condições de circulação.”

Este tráfego, como já referido, deverá ser calculado na via mais solicitada. A percentagem de pesados a considerar em cada via depende do número de vias por sentido, sendo a via da direita aquela em que os veículos pesados circulam predominantemente. Portanto, a via da direita é considerada a mais solicitada, considerando-se a repartição apresentada na figura 3.4 (recomendada pelo MADIPAV (EP-JAE, 1995)).

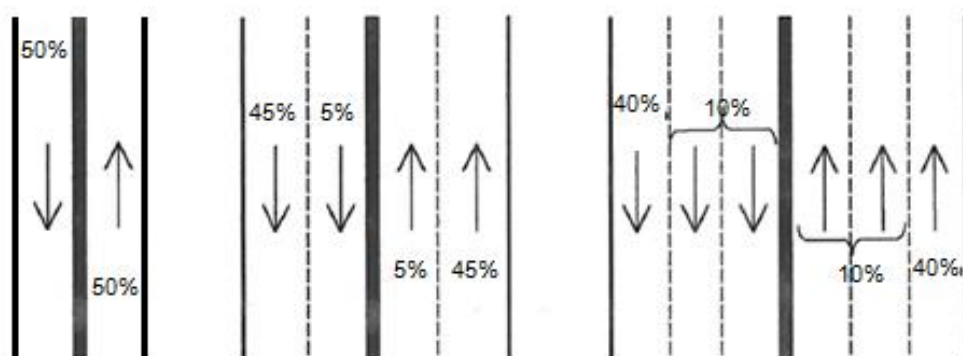


Figura 3.4- Repartição da percentagem de veículos pesados pelas vias de uma estrada

O cálculo da taxa média de crescimento anual do tráfego de pesados (t), a partir da informação proveniente de um estudo do tráfego futuro, para o período de dimensionamento considerado, poderá ser efetuado, para um determinado intervalo de anos, com recurso à expressão (3.4).

$$TMDA_p(\text{ano } n) = TMDA_p(\text{ano } 0) \times (1 + t)^n \quad (3.4)$$

Na impossibilidade de se realizar um estudo do tráfego futuro podem considerar-se as taxas médias de crescimento anual propostas pelo MADIPAV para cada classe de tráfego (ver Tabela 3.2) ou por outras publicações da especialidade mais atualizadas, como as disponibilizadas pela IP,SA, por exemplo, para a rede de autoestradas (EP, 2013).

Tabela 3.2- Taxa média de crescimento anual (EP-JAE, 1995)

Classe de tráfego	(TMDA) _p	Taxa média de crescimento anual (%)
T ₅ , T ₆	<300	3
T ₃ , T ₄	300-800	4
T ₁ , T ₂	800-2000	5

Devido à grande variedade das cargas por eixo transmitidas pelos veículos pesados existentes, é corrente caracterizar o tráfego solicitante, para efeitos de dimensionamento de pavimentos rodoviários, transformando-o num número equivalente de eixos simples, os quais se designam por eixos-padrão (Picado-Santos, L. et al., 2002). Em Portugal é adotado regularmente o eixo-padrão de 80 kN no dimensionamento dos pavimentos rodoviários flexíveis.

Tendo em conta o exposto, o número de passagens de veículos pesados é transformado em passagens equivalentes de eixos-padrão de 80 kN através da aplicação de um fator de agressividade (α). Este fator é definido no manual de dimensionamento português (MADIPAV) em função do (TMDA)_p (ver expressão (3.5) e Tabela 3.3).

$$N_{80} = N_{pes} \times \alpha \quad (3.5)$$

em que:

N₈₀ - número de eixos-padrão de 80 kN para dimensionamento;

α -fator de agressividade.

Tabela 3.3- Fatores de agressividade do tráfego, (EP-JAE, 1995)

Classe de Tráfego	TMDA _p	Taxa de crescimento anual (t)	Fator de agressividade	
			Eixo-padrão de 80 kN	Eixo-padrão de 130 kN
T ₆	50-150	3	2	0,5
T ₅	150-300		3	0,6
T ₄	300-500	4	4	0,7
T ₃	500-800		4,5	0,8
T ₂	800-1200	5	5	0,9
T ₁	1200-2000		5,5	1,0

Atendendo a que o período de dimensionamento normalmente adotado para o cálculo do reforço é de 10/15 anos e a que o manual MADIPAV, cujo âmbito de aplicação é o dimensionamento de pavimentos flexíveis novos, considera para este tipo de pavimentos um período de dimensionamento de 20 anos, deve ter-se especial cuidado no acerto da classe de tráfego a adotar, definindo-a a partir do N_{80} , uma vez que pode não coincidir com a inicialmente definida a partir do $TMDA_p$. Quando esta situação se verifica deve proceder-se a um novo cálculo de N_{80} considerando os novos valores de α e t .

As classes de tráfego e os valores correspondentes de $TMDA_p$, N_{80} , t e α adotados no MADIPAV são os apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4- Elementos relativos ao tráfego (EP-JAE, 1995)

Classe	(TMDA) _p	Taxa de crescimento médio (t)	Pavimentos flexíveis		
			Fator de agressividade	N_{80}^{dim} (20 anos) valor mínimo	N_{80}^{dim} (20 anos) valor máximo
T7	< 50		Estudo específico		
T6	50 - 150	3	2	9,81E+05	2,94E+06
T5	150 - 300		3	4,41E+06	8,83E+06
T4	300 - 500	4	4	1,30E+07	2,17E+07
T3	500 - 800		4,5	2,45E+07	3,91E+07
T2	800 - 1200	5	5	4,83E+07	7,24E+07
T1	1200 - 2000		5,5	7,17E+07	1,33E+08
T0	>2000		Estudo específico		

d) *Cálculo da espessura efetiva do pavimento.*

A espessura efetiva de cada camada i (T_{ei}) é igual ao produto entre um fator de conversão C e a espessura real da camada.

As espessuras reais das camadas do pavimento são determinadas, como referido anteriormente, por sondagens apropriadas.

A espessura efetiva total para o pavimento, T_e , é obtida pela soma das espessuras efetivas parciais de cada camada. Esta espessura efetiva total equivale a uma espessura de betão betuminoso considerando que o pavimento a reforçar é constituído apenas por uma camada deste material.

O fator C depende da composição das camadas e da degradação visível do pavimento, sendo obtido por consulta da Tabela 3.5.

Tabela 3.5- Fatores de conversão C (Picado-Santos, L. et al., 2002)

Tipo	Descrição do Material	C
I	Leito do pavimento, qualquer que seja.	0,0
II	Bases ou sub-bases granulares britadas de granulometria extensa e CBR>20. (C=0,1 se IP>6)	0,1-0,2
III	Bases ou sub-bases 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 (incluindo os que apresentam camada de desgaste em mistura betuminosa), com fendilhamento em blocos com pedaços de 0,5m ou menos antes do reforço. Usar C=0,3 quando a laje tiver sido diretamente aplicada sobre o solo de fundação.	
	c) Bases ou sub-bases granulares britadas estabilizadas com cimento que se apresentem com fendilhamento de contração extensa. Usar C=0,3 quando as fissuras tiverem 1cm de abertura 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 rodeiras de pequena extensão.	
	c) Pavimento rígido com fendilhamento apreciável em blocos de 1 a 4m ² antes do reforço.	
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, com fendilhamento e com rodeiras de muito pequena expressão.	
	c) Pavimento rígido com fendilhamento pequeno, em que os pedaços formados não são de dimensão inferior a 1m ² .	
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	

e) *Cálculo da espessura da camada de reforço ou da vida útil restante do pavimento com recurso aos ábacos do AI.*

A espessura da camada de reforço (T_0) é obtida pela aplicação da expressão (3.6).

$$T_0 = T_n - T_e \quad (3.6)$$

em que:

T_n - espessura requerida para o pavimento, constituído só por betão betuminoso, capaz de suportar o tráfego considerado;

T_e - espessura efetiva do pavimento.

A espessura de betão betuminoso requerida para o pavimento (T_n) pode ser determinada com recurso aos ábacos “Full-Depth Asphalt Concrete” do Manual “Thickness Design” do Asphalt Institute (Asphalt Institute, 2008) (ver Figura 3.5). Nestes ábacos, a espessura a determinar depende do tráfego solicitante, em eixos padrão de 80 kN, do módulo de deformabilidade do solo de fundação e da temperatura média anual do ar da zona em estudo (tendo sido adotado para o cenário Português, com base nos dados disponibilizados pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P. (IPMA, I.P.), os ábacos relativos a uma temperatura média anual do ar de 15,5°C).

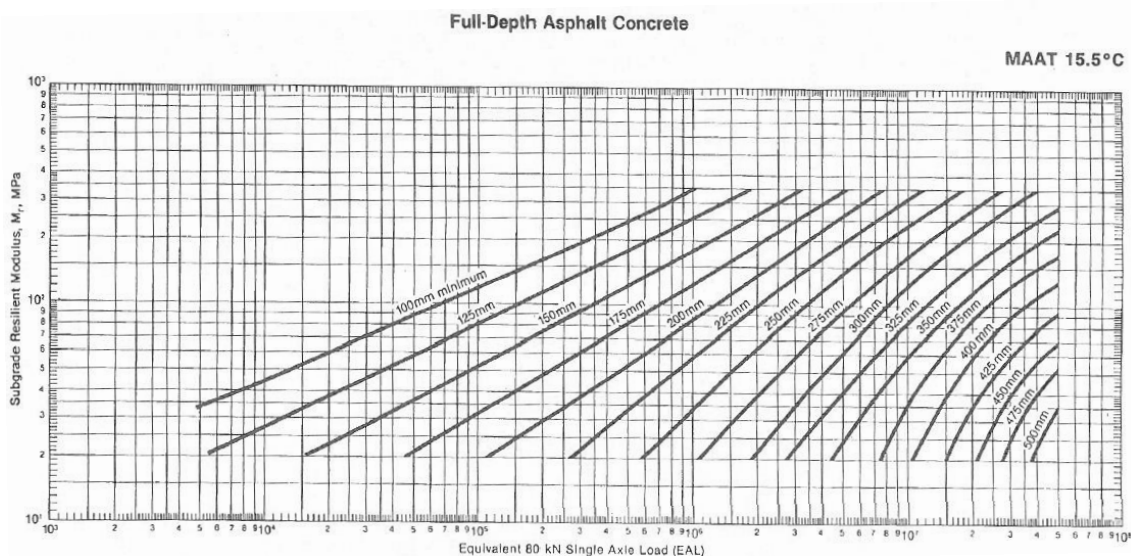


Figura 3.5- Ábaco “Full-Depth Asphalt Concrete – MAAT 15,5°C” do Manual “Thickness Design” do Asphalt Institute (2008)

Para finalizar é recomendável adicionar-se 1 cm à espessura de reforço T_0 calculada para prever a necessidade de incorreções na colocação em obra.

Com recurso ao ábaco “Full-Depth Asphalt Concrete” é ainda possível calcular a vida útil que resta ao pavimento utilizando como dados de entrada o valor da espessura efetiva e o módulo de deformabilidade do solo de fundação. Assim, retira-se o N_{80} admissível, que em conjunto com o $TMDA_p$ atual e a taxa média de crescimento anual prevista, permite determinar, por

aplicação da expressão (3.3), uma estimativa do n.º de anos (n) correspondente ao período de vida útil que resta ao pavimento.

f) *Cálculo da espessura da camada de reforço ou da vida útil restante do pavimento com recurso ao MADIPAV.*

O cálculo da espessura requerida T_n também pode ser efetuada com recurso ao manual de pré-dimensionamento MADIPAV.

Para isso é necessário escolher, de entre as estruturas de pavimento “tipo” disponíveis no manual, a estrutura equivalente à estrutura do pavimento em estudo, e em função dos dados disponíveis, escolher também a classe da plataforma de fundação e a classe de tráfego. Este procedimento tem como objetivo o pré-dimensionamento das espessuras necessárias das camadas betuminosas e granulares do pavimento como se este fosse novo, para comparação com as espessuras reais do pavimento em estudo.

A Figura 3.6 apresenta um exemplo de uma estrutura “tipo” para pavimentos flexíveis proposta pelo MADIPAV.

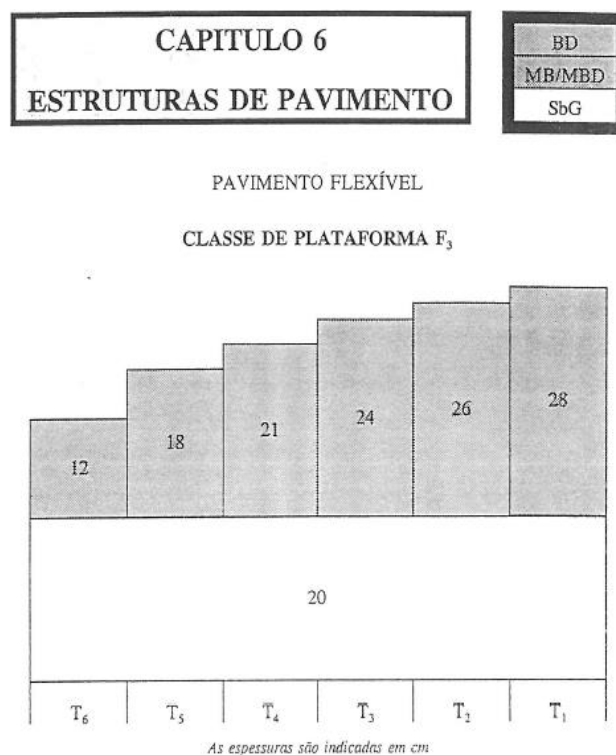


Figura 3.6- Estrutura tipo para pavimento flexível proposta pelo MADIPAV para o pré-dimensionamento da espessura das misturas betuminosas e dos materiais granulares (EP-JAE, 1995)

A classe da plataforma de fundação pode ser escolhida em função do módulo de deformabilidade do solo de fundação, como se pode observar na tabela 3.6.

Tabela 3.6-Classe de fundação (EP-JAE, 1995)

Classe de fundação	Módulo de deformabilidade da fundação (MPa)		Classe de tráfego
	Gama	Valor de cálculo	
F1	>30 a ≤ 50	30	T5, T6
F2	> 50 a ≤ 80	60	T3, T4, T5, T6
F3	> 80 a ≤ 150	100	T1, T2, T3, T4, T5, T6
F4	> 150	150	T1, T2, T3, T4, T5, T6

Para determinação da espessura da camada de reforço por comparação da solução obtida pelo MADIPAV com a espessura efetiva do pavimento (em material betuminoso), é necessário converter a espessura de material granular em espessura equivalente de material betuminoso, por exemplo, através da aplicação do fator C.

Tendo a espessura requerida T_n , já é possível calcular a espessura da camada de reforço T_0 através da fórmula (3.6). Por fim, adiciona-se 1 cm à espessura de reforço calculada.

Para determinar o número de eixos-padrão admissíveis pelo MADIPAV é necessário consultar o esquema da estrutura “tipo” escolhida para o caso em estudo e comparar a espessura efetiva (T_e) com as soluções possíveis do MADIPAV (definidas em função da classe de tráfego), convertendo estas soluções em espessuras equivalentes de misturas betuminosas. Uma estimativa do N_{80} admissível pode ser obtida por interpolação dos valores de N_{80} apresentados para cada classe de tráfego na Tabela 3.4. Tendo o N_{80} admissível calcula-se a vida útil que resta ao pavimento tal como descrito no passo g.

3.3 Procedimento baseado nas deflexões reversíveis

O procedimento baseado nas deflexões reversíveis apoia-se no modelo de cálculo de tensões e extensões e possibilita fazer a análise de pavimentos considerando um comportamento linear dos materiais que constituem as camadas do pavimento. Segundo Picado-Santos, L. et al. (2008), “Embora estes apresentem muitas vezes comportamento não linear isto é sobretudo verdade quando se utilizam métodos empírico-mecanicistas de dimensionamento de pavimentos”.

O modelo de cálculo mais utilizado na análise estrutural é o desenvolvido por Burmister (Picado-Santos, L. et al., 2008). Este modelo possibilita a determinação das tensões, deformações e deslocamentos em qualquer ponto da estrutura do pavimento e da fundação, resultantes da atuação de uma carga uniformemente distribuída numa área circular de raio r aplicada na superfície e assumindo que as camadas dispostas horizontalmente, sobrepostas e contínuas, estão assentes num meio semi-infinito, tal como a figura 3.7 demonstra.

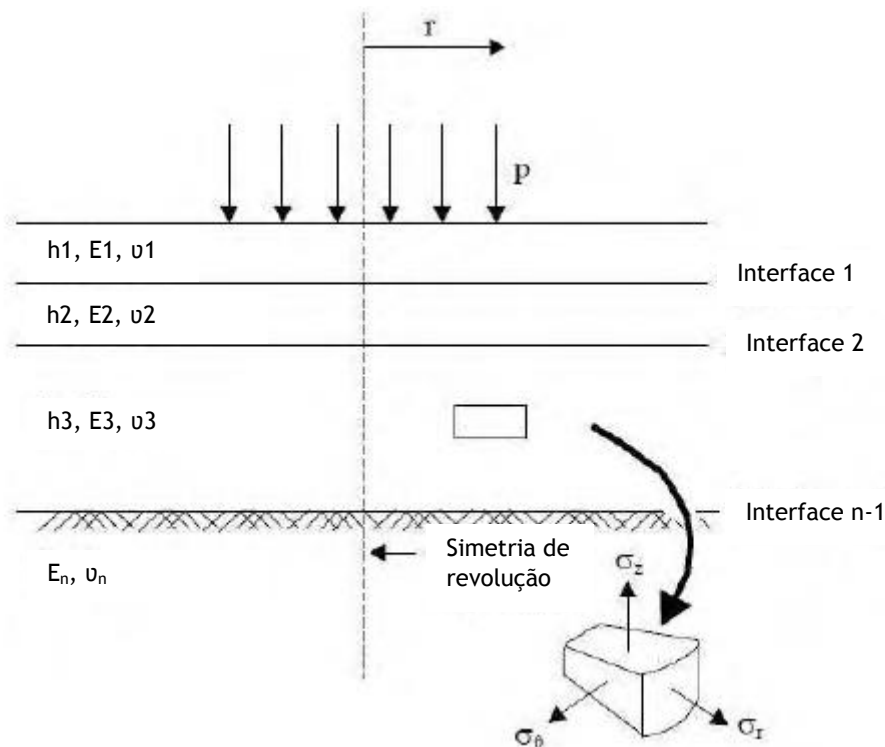


Figura 3.7- Modelo de Burmister (Neves, J., 2007 citado por Santos, M., 2009)

Segundo Picado-Santos, L. et al. 2002, este modelo considera as seguintes hipóteses:

- As propriedades dos materiais de cada camada são homogêneas e isotrópicas;
- As camadas têm espessura finita, contrariamente à última (camada de fundação) que possui espessura infinita;
- As camadas são consideradas infinitas na direção lateral;
- As superfícies que separam duas camadas, designadas de interface, podem ser consideradas com aderência (camadas ligadas), existindo transmissão de tensões e deslocamentos, ou sem aderência (deslizamento, camadas não ligadas), em que tal transmissão não acontece;
- A relação entre tensão-extensão, e portanto o comportamento mecânico dos materiais das camadas, é caracterizado por duas componentes: o módulo de deformabilidade (E_i , da camada i) e o coeficiente de Poisson (ν_i , da camada i).

Os programas de cálculo automático mais utilizados que se baseiam no modelo de Burmister, permitindo assim o cálculo do estado de tensão-extensão num pavimento, são o ELSYM5 com origem na Universidade da Califórnia (Kopperman et al., 1986 citado por Picado-Santos, L. et al., 2002), o BISAR desenvolvido pela Shell (Shell@, 2014, citado por Correia, J., 2014), o ELMOD (Dynatest@, 2014, citado por Correia, J., 2014) e o Modulus (txdot@, 2014, citado por Correia, J., 2014). Este cálculo das tensões e extensões, nos pontos críticos do pavimento, é essencial para sustentar o dimensionamento do reforço.

A determinação da espessura necessária para a camada de reforço é calculada tendo em conta as seguintes etapas:

✓ *Campanha de ensaios.*

A campanha de ensaios deve iniciar-se com a realização de uma avaliação da qualidade superficial dos pavimentos, de maneira a conhecer o nível de degradação dos mesmos. Esta primeira avaliação permite estabelecer quais troços do pavimento devem ser submetidos a ensaios de carga para posterior avaliação da capacidade de carga. Estes ensaios são realizados com os equipamentos descritos no Capítulo 2, sendo correntemente utilizado o defletómetro de impacto (FWD).

Os ensaios devem ser conduzidos durante a época do ano considerada mais desfavorável no que respeita à capacidade de carga, o que significa geralmente o verão para pavimentos flexíveis com uma forte espessura (mais de 15 cm) de mistura betuminosa e o inverno ou primavera, logo após a época das chuvas, para pavimentos com pequena espessura de misturas betuminosas, em que a resistência é sobretudo devido às camadas não tratadas (Picado-Santos, L. et al., 2008).

O resultado destes ensaios são representados em gráficos denominados defletogramas, que representam a deformada do pavimento devido à queda de uma massa proveniente do FWD.

Ao preparar e consultar defletograma de impacto é necessário ter em atenção a existência de uma possível diferença entre a força de impacto prevista e a força de impacto real medida durante o ensaio. Esta diferença poderá ocorrer, por exemplo, devido à existência de atrito de guiamento da massa cadente, sendo importante proceder à normalização das deflexões obtidas através da aplicação da expressão (3.7).

$$D_n = F_n \times \frac{D_m}{F_m} \quad (3.7)$$

em que:

D_n - deflexão normalizada, em μm ;

D_m - deflexão medida, em μm ;

F_n - força de impacto nominal, em kN;

F_m - força de impacto medida, em kN.

✓ *Divisão do troço em secções de comportamento estrutural homogéneo.*

Após a realização dos ensaios de carga sucede-se um tratamento estatístico da informação adquirida, por exemplo, com recurso ao defletómetro de impacto, em particular das deflexões obtidas. Este tratamento estatístico é sobretudo vantajoso em troços onde a avaliação estrutural tenha sido realizada numa grande extensão de pavimento. Assim, é recomendável a divisão do troço em secções homogéneas, ou seja, em zonas que apresentem características estruturais semelhantes. Assim, para cada secção é possível determinar soluções diferentes de conservação ou reabilitação, sustentando e permitindo uma minimização dos custos das intervenções necessárias no pavimento.

Esta divisão pode ser efetuada de acordo com os métodos propostos pela AASHTO: o método das somas acumuladas (AASHTO, 1986 - Appendix J) e o método das diferenças acumuladas (AASHTO, 1993 - Appendix J). As soluções encontradas pelos dois métodos podem ser semelhantes, contudo, os procedimentos de cálculo são diferentes, sendo o método das somas acumuladas o de aplicação mais simples. Para aplicação destes métodos são usadas as deflexões máximas medidas no centro da placa de carga, uma vez que fornecem informação sobre o comportamento do conjunto pavimento-fundação.

O método das somas acumuladas, segundo a AASHTO (1986) deve ser aplicado quando os dados obtidos pelo ensaio foram recolhidos continuamente em intervalos regulares ao longo do comprimento do pavimento ensaiado. Este método consiste no seguinte procedimento:

- Cálculo do valor médio da deflexão máxima de todo o troço em estudo (d_m).
- Cálculo da diferença entre cada valor da deflexão máxima individual e o valor médio da deflexão máxima ($d_i - d_m$).
- Cálculo da soma dos desvios acumulados (Z_i) (ver expressão (3.8)).

$$Z_i = d_i - d_m + Z_{i-1} \quad (3.8)$$

em que

Z_i - soma acumulada dos desvios da média ao ponto de ensaio i ;

d_i - deflexão média do ponto de ensaio i ;

d_m - média da deflexão máxima para todo o troço ensaiado.

- Preparação de um gráfico em que nas abcissas se representa a localização dos pontos de ensaio (distância) e nas ordenadas os valores dos desvios acumulados (Z_i). Este gráfico representa a evolução dos valores dos desvios acumulados ao longo do troço. Mudanças do declive do gráfico de Z_i em função da distância representam uma mudança de comportamento do pavimento, delimitando zonas homogéneas (seções) no troço do pavimento em análise.

Em relação ao método das diferenças acumuladas (AASHTO, 1996), o procedimento necessário para a sua aplicação pode ser representado segundo o apresentado na Figura 3.8.

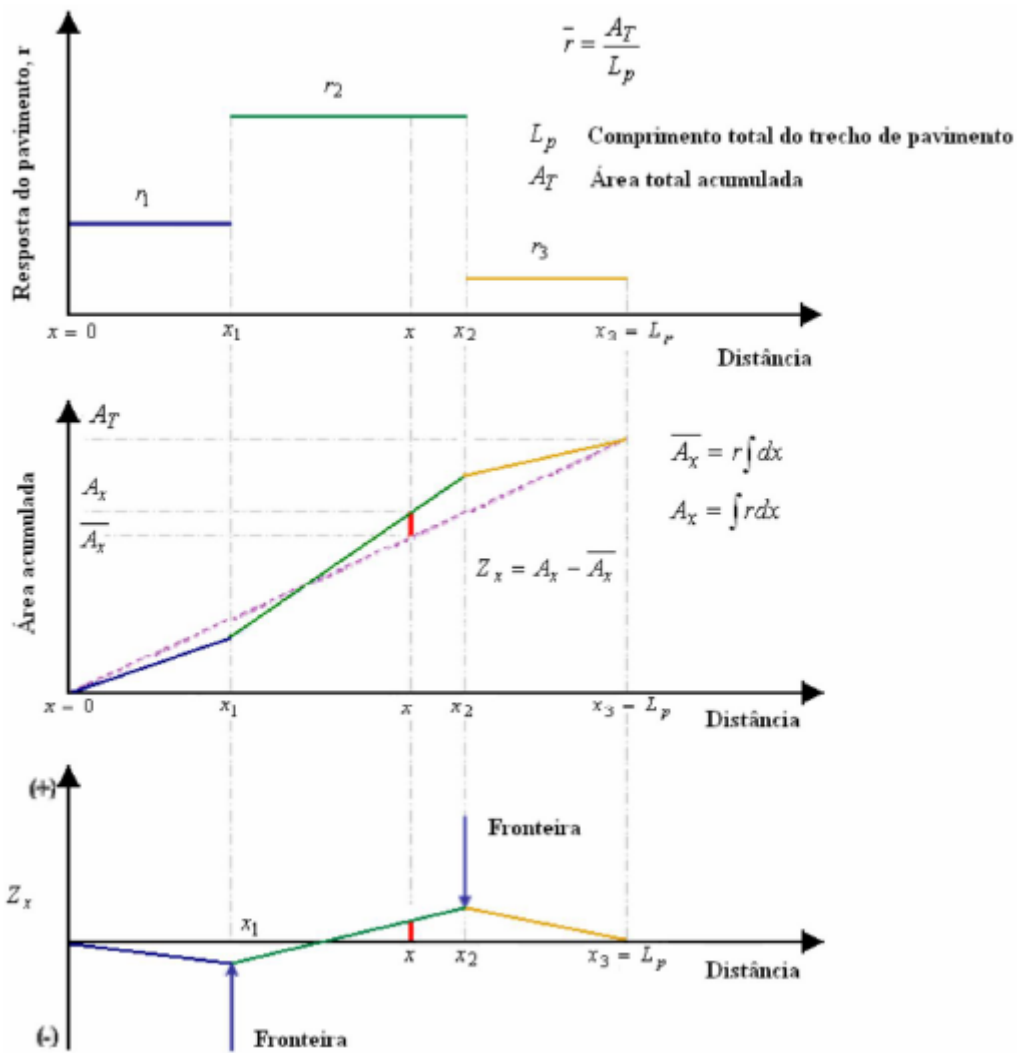


Figura 3.8- Método das diferenças acumuladas (Correia, J., 2014)

O procedimento inclui as seguintes etapas:

- Cálculo da deflexão média entre estações:

$$\bar{D}_i = \frac{D(i-1) + D_i}{2} \quad (3.9)$$

- Cálculo da área entre estações e curva:

$$A_i = \bar{D}_i \times \Delta l_i \quad (3.10)$$

- Cálculo da área acumulada:

$$A_c = \sum_{i=1}^n A_i \quad (3.11)$$

- Cálculo da distância acumulada:

$$L_c = \sum_{i=1}^n \Delta l_i \quad (3.12)$$

- Cálculo da diferença acumulada:

$$Z_i = \sum A_i - tg\alpha \sum \Delta l_i \quad (3.13)$$

em que:

\bar{D}_i - Deflexão na estação i;

Δl_i - Distância entre estações.

$$tg\alpha = \frac{Ac}{Lc}$$

- Preparação do gráfico em que nas abcissas se representa a localização dos pontos de ensaio (distâncias) e nas ordenadas os valores dos desvios acumulados (Z_i), tal como no método das somas acumuladas.

Segundo *Vrncianu, I. e Freitas, E. (2007)*, é possível avaliar o grau de homogeneidade de cada secção através da determinação do coeficiente de variação das deflexões (COV). Este coeficiente é resultado da divisão do desvio padrão pelo valor médio das deflexões máximas da secção em estudo. O valor obtido dá uma indicação da homogeneidade da subsecção considerada segundo a escala apresentada na Tabela 3.7.

Tabela 3.7- Avaliação do grau de homogeneidade de uma secção através do coeficiente de variação das deflexões (COV)

	Coeficiente de variação das deflexões (COV)
Boa homogeneidade	< 20%
Homogeneidade moderada	20% < COV < 30%
Homogeneidade fraca	30% < COV < 40%
Não homogéneo	COV > 40%

Depois da divisão do troço em análise em função das deflexões obtidas, deve-se ainda avaliar a homogeneidade das subsecções definidas em relação ao tipo de pavimento, história construtiva, estado da superfície, tráfego e locais de aterro e escavação, sendo este último pouco determinante. A combinação destes fatores determina o número de secções homogéneas do troço.

Na Figura 3.9 é apresentado um exemplo da análise da divisão de um troço de um pavimento segundo alguns dos fatores referidos.

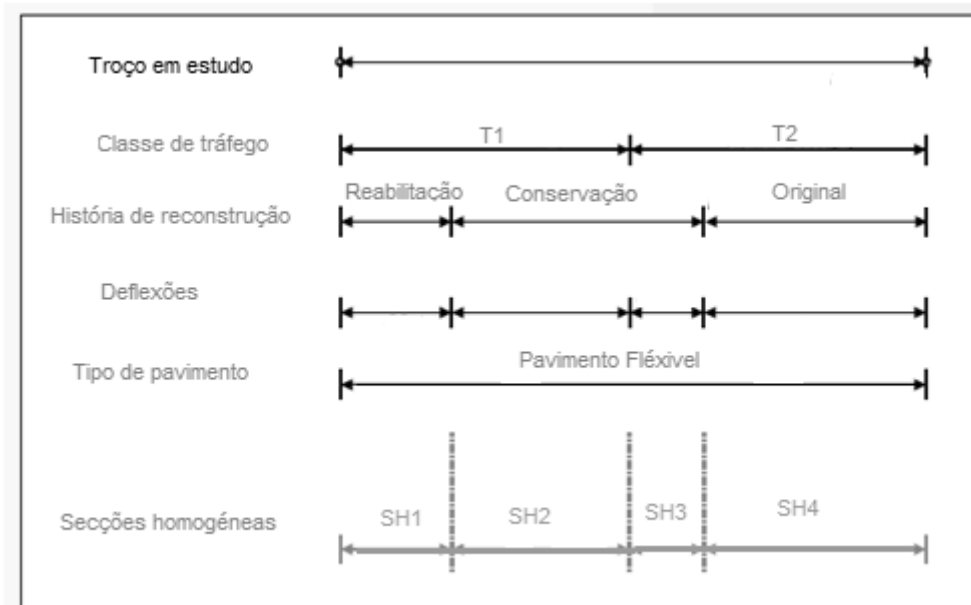


Figura 3.9- Alguns dos fatores a considerar na divisão do trecho em seções de comportamento estrutural homogêneo

✓ *Defletograma característico.*

Após a definição das seções homogêneas do trecho do pavimento em análise é necessário obter um defletograma característico que permita estabelecer o local representativo para cada seção. Para tal é necessário determinar o defletograma correspondente ao percentil 85, isto é, a obtenção das deflexões cuja probabilidade de serem ultrapassadas é inferior a 15%. O percentil 85 é habitualmente calculado através da seguinte expressão (3.14).

$$P85 = D + 1.04 \times \sigma D \quad (3.14)$$

em que:

D - Deflexão média em cada seção;

σD - Desvio padrão em cada seção.

Segundo Picado-Santos, L. et al. (2002) “Com um “defletograma” resultante dos valores correspondentes ao percentil 85% para cada deflexão, escolhe-se dentro dos que estão considerados no trecho uniforme o defletograma real que mais se aproxima daquele, ficando assim definido o local mais representativo do trecho uniforme em análise”.

✓ *Cálculo inverso do módulo de deformabilidade (retro-análise).*

O cálculo inverso ou retro-análise permite, através de um processo iterativo, determinar as características mecânicas de cada camada do pavimento e do solo de fundação com recurso a programas de cálculo do estado de tensão-deformação, como é o caso dos programas Bisar e ELSYM5.

Estes programas têm a capacidade de calcular deslocamentos, tensões e extensões que resultaram da simulação do ensaio FWD concretizado na campanha de ensaios. Para utilização destes programas de cálculo é imprescindível conhecer o raio da placa de carga, a magnitude da carga e a distância dos geofones ao centro da placa. É ainda necessário conhecer o número de camadas do pavimento e a espessura de cada uma, assim como estimar os valores dos módulos de deformabilidade e dos coeficientes de Poisson das mesmas.

É necessário ter em atenção que, a consideração de camadas com espessura inferior a 5 cm pode levar a um cálculo inadequado dos módulos de deformabilidade nestes programas. Assim, é aconselhável juntar numa só camada esta e as restantes camadas de betão betuminoso. Segundo Correia, J. (2014) “isto acontece porque a rigidez da camada, traduzida pela sua espessura e módulo, não tem um valor significativo comparado com as outras camadas do pavimento, logo a sua contribuição para as deflexões não é significativa.”

Para se fazer uma primeira estimativa dos módulos de deformabilidade é possível consultar a tabela 3.8 que apresenta valores frequentes propostos pela JAE (atual IP, S.A.).

Tabela 3.8- Módulos de deformabilidade usuais para camadas do pavimento (EP-JAE, 1995ª citado por Francisco, A., 2012)

Camada	Módulo de deformabilidade (MPa)
Betão betuminoso	7000 a 9000 (T=15°C) 5000 a 6000 (T=20°C) 3000 a 4000 (T=25°C)
Betão betuminoso fendilhado	500 a 1000
Penetração betuminosa	500 a 1000
Agregado tratado com cimento	10000 a 20000
Solo-cimento	1000 a 5000
Base granular britada	150 a 300
Base granular britada	100 a 200
Solos seleccionados	60 a 100

Os módulos de deformabilidade das camadas granulares, E_g , são determinados em função do módulo de deformabilidade do solo de fundação, E_f , segundo a expressão (3.15) proposta por Claessen, A., et al. (1977).

$$E_g = 0.2 \times h_g^{0.45} \times E_f \quad (3.15)$$

em que,

$$k = 0,2 \times h_g^{0,45}.$$

hg- espessura da camada granular sobre o solo de fundação (mm).

Segundo Picado-Santos, L. et al. (2008), “Quanto mais rígido for o suporte numa camada não aglutinada melhor é a sua resposta em termos de capacidade resistente (maior o seu módulo de deformabilidade), já que não resistem à flexão”.

Claessen, A. et al. (1977) refere que o valor de k a adotar não deverá ser inferior a 1,5 uma vez que, valores desta ordem correspondem a camadas que não são suficientemente mais resistentes que a camada inferior, não se justificando a realização da camada superior. Também não é aconselhável adotar um valor superior a 4, pois só em condições de execução muito controladas se poderá admitir uma resistência muito superior à camada inferior.

“Quanto aos valores usuais a adotar para os coeficientes de Poisson, em geral, toma-se como boa a indicação de Quaresma (Quaresma, 1985) para análises efetuadas com materiais portugueses, o que se traduz por $\nu=0,35$ para camadas betuminosas, $\nu= 0,30$ para camadas granulares e $\nu= 0,35$ para materiais com coesão, como é geralmente o caso dos solos de fundação” (Picado-Santos, L. et al., 2002). Segundo o MADIPAV, os coeficientes de Poisson das camadas betuminosas e dos materiais granulares tomam o valor de 0,35, enquanto que para solos o valor utilizado é de 0,4.

Com os dados indicados anteriormente, os programas de cálculo disponíveis efetuam a análise estrutural do pavimento, obtendo-se assim os deslocamentos U_z que possibilitam a construção de um defletograma. De seguida compara-se o defletograma obtido pela consideração dos valores conseguidos com o programa de cálculo (por exemplo o Bisar ou o ELSYM5) com o defletograma característico de cada secção homogénea. Pode-se concluir, caso os defletogramas sejam semelhantes, que os módulos de deformabilidade estimados estão próximos dos valores reais, tal como acontece na figura 3.10.

Para defletogramas não semelhantes é necessário repetir o processo com a atribuição de novos valores para os módulos de deformabilidade das diversas camadas do pavimento.

Como referido anteriormente com auxílio da Figura 3.10, caso não se tenha um defletograma de cálculo semelhante ao característico, a sua aproximação deverá ser feita segundo as seguintes diretrizes: a alteração dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas (camadas superficiais) modifica, especialmente, as deflexões dos primeiros geofones e a alteração dos módulos de deformabilidade do solo de fundação modifica todas as deflexões.

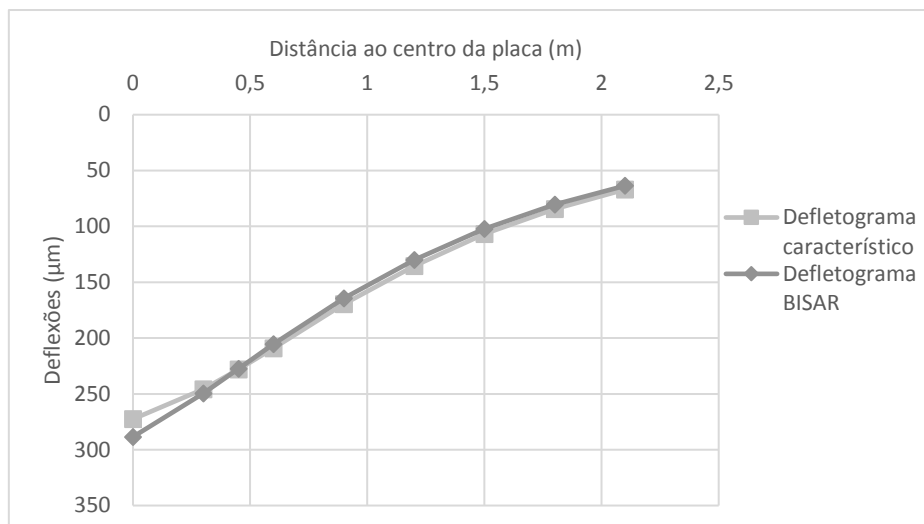


Figura 3.10- Exemplo da semelhança entre o defletograma característico e o defletograma obtido pelo programa Bisar.

A avaliação do grau de aproximação entre o defletograma de cálculo e o defletograma característico pode ser efetuada com recurso ao cálculo do *Root Mean Square* - RMS, expresso pela seguinte fórmula:

$$RMS (\%) = \left(\sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{dci - dmi}{dmi} \right)^2} \right) \times 100 \quad (3.16)$$

em que:

n - número total de pontos de registo da deflexão para o ponto de ensaio i;

dci - deflexão calculada para o ponto de ensaio i;

dmi - deflexão medida no ponto de ensaio i.

Segundo a *Federal Highway Administration (FHWA, 2002)*, a solução obtida é aceitável para valores de RMS inferiores a 3%, Correia, J., (2014) aponta para valores de RMS inferiores a 4%, enquanto que para Alves, T., (2007), o defletograma calculado aproxima-se de forma satisfatória do defletograma real para valores de RMS inferiores a 10%.

No programa ELSYM5 é ainda admitida coincidência das deflexões se se verificar um afastamento máximo de 0,02 mm, ou seja, se a diferença entre a deflexão calculada e a medida for, em módulo, inferior a 0,02 mm. Caso não se verifique esta condição, os módulos de deformabilidade ainda não estão suficientemente próximos dos valores reais, sendo necessário proceder a mais iterações.

- ✓ Correção do módulo de deformabilidade.

Para o cálculo da espessura da camada de reforço, os módulos de deformabilidade calculados com recurso à retro análise devem ser corrigidos de forma a considerarem o efeito da temperatura, principalmente para as misturas betuminosas. Isto sucede uma vez que os módulos de deformabilidade são calculados em função das deflexões registadas no ensaio FWD, ensaio que em geral é realizado a uma temperatura das misturas betuminosas diferente da temperatura de serviço. Caso a temperatura de serviço seja mais elevada que as temperaturas verificadas durante o ensaio, como normalmente acontece, a rigidez das camadas betuminosas é menor e conseqüentemente o módulo de deformabilidade atinge valores mais baixos que os obtidos por retro análise. Esta correção apenas se justifica para as camadas betuminosas, visto que para estas os módulos de deformabilidade dependem muito do efeito da temperatura.

Para ser posteriormente considerada na correção dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas, os defletómetros de impacto mais recentes possuem termómetros que, em contacto com a superfície do pavimento, registam a temperatura a que esta se encontra.

Existem várias fórmulas que podem ser usadas na correção do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas. A fórmula (3.17), desenvolvida pelo LNEC (Alves, A., 2007 citado por Correia, J., 2014), permite, em função da temperatura em profundidade das misturas betuminosas obtida para o ensaio realizado e dos módulos de deformabilidade obtidos por retro-análise, calcular o módulo de deformabilidade à temperatura de referência de 20°C. Desta forma é possível determinar o módulo de deformabilidade de projeto, que depende do módulo de referência calculado anteriormente e da temperatura de serviço. A temperatura de serviço pode ser obtida por consulta das tabelas propostas por Baptista, A., (1999) ou através da metodologia proposta no manual da Shell (Picado-Santos, L. et al, 2008).

$$\frac{ET}{E_{20^{\circ}C}} = 1.635 - 0.0317 \times T \quad (3.17)$$

em que:

ET - módulo de deformabilidade à temperatura T, em °C;

E20°C - módulo de deformabilidade à temperatura de referência de 20°C, em °C;

T - temperatura a que foram realizados os ensaios não destrutivos (°C). A temperatura de ensaio necessária para este cálculo deverá ser determinada em profundidade e não à superfície do pavimento.

De entre as expressões disponíveis que permitem estimar a temperatura no momento dos ensaios em profundidade, é apresentada a proposta no método de BELLS3 (Baltzer, Ertman-Larsen, Lukanen and Stubstad) (FHWA, 2000 citado por Capitão, S., 2012) (ver expressão (3.18)).

$$T_d = 0.95 + 0.892 \times IR + (\log(d) - 1.25) \times (-0.448 \times IR + 0.621 \times 1 - day) + 1.83 \times \text{sen}(hr_{18} - 15.5) + 0.042 \times IR \times \text{sen}(hr_{18} - 13.5) \quad (3.18)$$

em que:

T_d - Temperatura à profundidade d , em °C;

IR - temperatura registada à superfície medida por infra-vermelhos, em °C;

d - profundidade à qual se pretende determinar a temperatura, em mm, normalmente a meia espessura da camada;

1-day - média da temperatura do ar registada no dia anterior ao ensaio;

sen - função seno para um período de 18 horas, em que um ciclo de 18 horas corresponde a 2π radianos;

hr18 - hora decimal da realização do ensaio para um ciclo de 18h.

Os valores das funções $\text{sen}(hr_{18} - 15,5)$ e $\text{sen}(hr_{18} - 13,5)$ são definidos em função da hora a que se realizou o ensaio (ver Figura 3.11).

Segundo Capitão, S., (2012, Apontamentos de Conservação de Vias de Comunicação), os valores a adotar devem ser escolhidos tendo em conta as considerações seguintes:

$\text{sen}(hr_{18} - 13,5) = -1$ para $[3 \text{ a.m.} \leq hr_{18} \leq 9 \text{ a.m.}]$

$\text{sen}(hr_{18} - 15,5) = -1$ para $[5 \text{ a.m.} \leq hr_{18} \leq 11 \text{ a.m.}]$

$\text{sen}(hr_{18} - 13,5) = \text{sen}(2\pi \times (hr_{18} - 13,5)/18)$ para $hr_{18} < 3 \text{ a.m.}$ ou $hr_{18} > 9 \text{ a.m.}]$

$\text{sen}(hr_{18} - 15,5) = \text{sen}(2\pi \times (hr_{18} - 15,5)/18)$ para $hr_{18} < 5 \text{ a.m.}$ ou $hr_{18} > 11 \text{ a.m.}]$

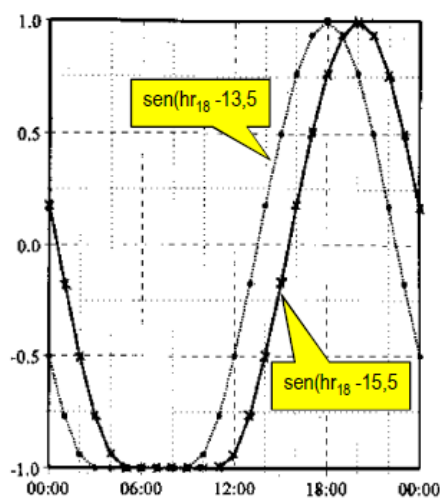


Figura 3.11- Função seno representativa do ciclo de 18 horas de variação de temperatura da camada betuminosa (Capitão, S., 2012)

Segundo Domingos, P. (2007), também Park (2001) propõe uma expressão que permite determinar a temperatura das misturas betuminosas em profundidade (ver expressão (3.19)).

$$T_d = T_{sup} + (-0.3451 \times d - 0.0432 \times d^2 + 0.00196 \times d^3) \times \text{sen}(-6.3252 \times t_d + 5.0967) \quad (3.19)$$

em que:

Td - temperatura à profundidade d (°C);

Tsup - temperatura da superfície do pavimento (°C);

d - profundidade à qual se pretende determinar a temperatura (cm), normalmente a meia espessura da camada;

sen - função seno (rad);

td - horário em que a temperatura da superfície do pavimento foi medida (dias), que corresponde à conversão da hora decimal para dias, sendo um dia (24 horas) corresponde a 1.

O módulo de deformabilidade do solo de fundação pode também ser corrigido quando não é possível realizar os ensaios de carga na época em que se verifica maior humidade na fundação. A consideração do efeito da humidade na obtenção do módulo de deformabilidade pode ser conseguida aplicando coeficientes de correção às deflexões características (ver Tabela 3.9).

Tabela 3.9- Coeficientes de correção da deflexão devido à humidade (Carretas, 2002)

Tipo de Fundação	Coeficiente de Correção		
	Período Seco (Medições realizadas num mês seguido de dois meses secos)	Período Intermédio (Medições realizadas num mês seguido de um mês seco)	Período Húmido (Medições realizadas num mês seguido de um mês húmido)
A1	1,30	1,15	1,00
A2, B1	1,45(*)	1,25	1,00
B2	1,60(*)	1,30 (*)	1,00

(*) valores de referência a adotar se não se dispuser de informação.

A - Solos seleccionados e adequados; B - Solos admissíveis e inadequados; 1 - Boas condições de drenagem; 2 - Más condições de drenagem.

✓ *Análise estrutural.*

De acordo com a experiência existente, os pontos críticos dos pavimentos flexíveis são, por um lado, a parte inferior das camadas betuminosas (onde se instalam as maiores extensões de tração, as quais determinam a fadiga à tração dessa camada); e por outro lado, o solo de fundação, material mais fraco quanto a deformabilidade, e portanto geralmente o responsável pela ocorrência de deformações permanentes na superfície do pavimento (Picado-Santos, L. et al., 2002).

Nesta etapa procede-se ao cálculo da extensão radial de tração na base das camadas betuminosas e da extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação.

Estas extensões podem ser determinadas recorrendo-se ao programa de cálculo BISAR, ELSYM5 ou outro. Para o cálculo é necessária a informação referente aos valores corrigidos dos módulos de deformabilidade, aos coeficientes de Poisson e as espessuras de cada camada do pavimento considerando, incluindo o solo de fundação como uma só camada semi-infinita. É ainda

necessário considerar informação respeitante às cargas a que o pavimento está sujeito: distância entre rodas, raio e pressão do enchimento dos pneus (ver Figura 3.12).

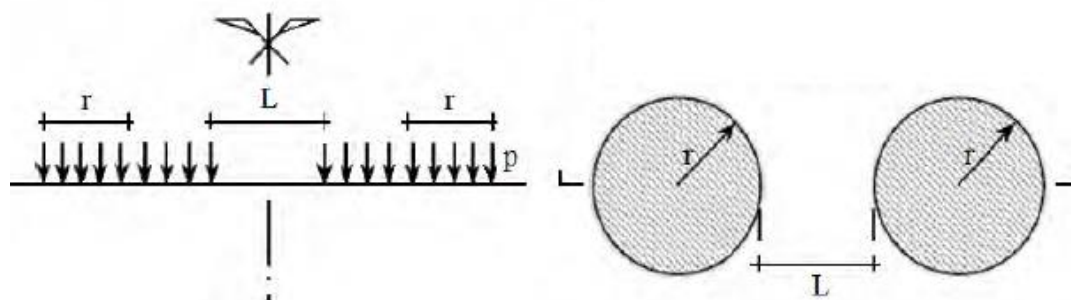


Figura 3.12- Esquematização geralmente adotada para a ação de um eixo-padrão sobre o pavimento (Picado-Santos, L. et al., 2008)

L- Distância entre rodas mm;

r- Raio mm;

p- Pressão do enchimento dos pneus MPa.

Os valores a adotar para estes parâmetros dependem do método de dimensionamento empírico-mecanicistas adotado, sendo os mais comuns o Método da Shell (mais usado) e o método de Nottingham (ver Tabela 3.10). Ambos consideram eixos-padrão de 80 kN.

Tabela 3.10- Parâmetros a adotar para o método de dimensionamento empírico mecanicista da Shell e de Nottingham

Método da Shell	L= 105mm
	p= 0,6 MPa
	r ≈ 105mm
Método de Nottingham	L= 150mm
	p= 0,5 MPa
	r= 113mm

Calculada a extensão radial de tração na base das camadas betuminosas e a extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação, é possível avaliar os critérios de ruína e determinar a vida útil restante do pavimento.

✓ *Verificação da vida útil do pavimento.*

Os critérios de ruína baseiam-se, segundo Picado-Santos, L. et al. (2002), no seguinte acontecimento: “Quando uma roda se afasta dum ponto de aplicação de carga, as tensões, e respetivas extensões, diminuem e anulam-se e o pavimento recupera praticamente a sua forma inicial. Na realidade, fica em geral uma pequena extensão irrecuperável visto os materiais que constituem o pavimento não serem perfeitamente elásticos. A sucessiva passagem das rodas

dos veículos vai repetindo os efeitos descritos e, assim, em cada ponto do pavimento, vão-se repetindo as tensões e extensões”.

O critério da fadiga está associado ao fendilhamento excessivo da superfície do pavimento nas zonas mais tracionadas das camadas ligadas. A extensão radial de tração, provocada pelas ações na base das camadas betuminosas pode ser calculada com recurso às expressões usadas nos métodos da Shell (expressão (3.20)) e de Nottingham (expressões (3.21)).

Expressão do método da Shell:

$$\varepsilon_t = (0.856 \times V_b + 1.08) \times E_m^{-0.36} \times N_{80}^{-0.2} \quad (3.20)$$

em que:

ε_t - extensão de tração (adimensional);

N80 - número de eixos-padrão de 80 kN;

V_b - percentagem volumétrica de betume no volume total;

E_m - módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (Pa).

Expressão do método de Nottingham:

$$\log \varepsilon_t = \frac{14.38 \times \log V_b + 24.2 \times \log TAB - c - \log N_{80}}{5.13 \times \log V_b + 8.63 \times \log TAB - 15.8} \quad (3.21)$$

em que:

ε_t - extensão de tração (em micro unidades- $\times 10^{-6}$);

N80 - número de eixos-padrão de 80 kN (em milhões- $\times 10^6$);

V_b - percentagem volumétrica de betume no volume total;

TAB - temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola (°C);

$c = 46,82$ para N provocando estado crítico ou $c = 46,06$ para N provocando estado de ruína.

O critério da deformação permanente está associado ao assentamento excessivo visível à superfície do pavimento. A extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação permite avaliar este critério, podendo ser calculada com recurso às expressões usadas nos métodos da Shell (expressão (3.22)) e de Nottingham (expressões (3.23)).

Expressão do método da Shell

$$\varepsilon_{dp} = K_s \times N_{80}^{-0.25} \quad (3.22)$$

em que:

ε_c - extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação (adimensional);

N80 - número de eixos-padrão de 80 kN;

Ks - parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento do pavimento. Toma o valor de $2,8 \times 10^{-2}$ para 50% de probabilidade de sobrevivência, $2,1 \times 10^{-2}$ para 85% e $1,8 \times 10^{-2}$ para 95%.

Expressão do método de Nottingham:

$$\varepsilon_{dp} = \frac{A}{\left(\frac{N_{80}}{fr}\right)^{cl}} \quad (3.23)$$

em que:

ε_c - extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação (em micro unidades ($\times 10^{-6}$));

N80 - número de eixos-padrão de 80 kN (em milhões ($\times 10^6$));

fr - fator de indução de assentamento dependendo do tipo de mistura betuminosa: 1,5 para macadame betuminoso, 1,3 para mistura betuminosa densa para camada de regularização e 1,0 para betão betuminoso em camada de desgaste;

A - constante igual a 250 para N₈₀ provocando estado crítico e igual a 451,29 para N₈₀ provocando estado de ruína;

cl - constante igual a 0,27 para N₈₀ provocando estado crítico e igual a 0,28 para N₈₀ provocando estado de ruína.

Tendo em conta o descrito, a decisão de reforçar um determinado pavimento baseia-se na avaliação destes dois critérios de ruína: o critério da fadiga e o da deformação permanente. Estes critérios permitem calcular o número máximo de passagens em eixo-padrão que são suportadas por determinada estrutura de pavimento, o que permite, junto com o número de eixos padrão de dimensionamento obter a percentagem de resistência gasta, denominada de dano (ver expressão (3.24)).

$$D = \frac{Np}{Na} \times 100 \quad (3.24)$$

em que:

D - dano em percentagem;

Np - número de eixos-padrão de 80 kN de dimensionamento (número de eixos-padrão que se prevê que solicitem o pavimento durante a vida útil);

Na - número de eixos-padrão admissíveis determinados de acordo com os critérios de ruína.

Para que o pavimento resista em boas condições às solicitações previstas deverá apresentar no dimensionamento um valor do dano, em percentagem, compreendido entre 80 e 100% (ver Tabela 3.11).

Tabela 3.11- Limites para verificação do dano

Dano	Verificação
D<80%	Sobredimensionamento
80%<D<100%	Bom dimensionamento
D>100%	Subdimensionado

A estimação do número de eixos-padrão admissíveis pode ser efetuada com recurso à consideração das extensões máximas de tração radial e vertical de compressão obtidas nos programas de cálculo do estado de tensão-extensão do pavimento, e às expressões desenvolvidas pelos métodos Shell ou Nottingham apresentadas.

✓ *Cálculo da espessura do reforço*

Caso se verifique a necessidade de intervir estruturalmente no pavimento com a aplicação de uma camada de reforço é preciso antes de mais, determinar o módulo de deformabilidade da mistura a utilizar para o efeito.

Esta determinação passa pela obtenção da rigidez do betume (S_b), parâmetro crucial no que diz respeito ao cálculo do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas. Van der Poel em 1954 (Claessen, A. et al, 1977) define este parâmetro como a relação entre a tensão e a extensão, sob determinadas condições de temperatura e de tempo de carregamento. As fórmulas de previsão da rigidez do betume apresentadas baseiam-se neste conceito.

Segundo Picado-Santos, L. et al. (2002) a expressão (3.25), obtida por Ullidtz e Peattie, determina a rigidez do betume, embora esta só possa ser usada em determinadas condições.

$$S_b = 1.157 \times 10^{-7} \times t_c^{-0.368} \times 2.718^{-IPen} \times (T_{ab} - T)^5 \quad (3.25)$$

em que:

S_b - rigidez do betume (MPa);

t_c - tempo de carregamento (s);

$IPen$ - índice de penetração do betume;

T_{ab} - temperatura de amolecimento do betume obtida pelo método de anel e bola (°C), que é uma medida empírica, indireta, da viscosidade do betume;

T - temperatura a que se encontra o material (°C).

O cálculo do $IPen$ pode ser efetuado através da expressão (3.26), desenvolvida por Pfeiffer e Van Dormal (citado por Picado-Santos, L. et al., 2002).

$$IPen = \frac{20 \times T_{ab} + 500 \times \log(\text{pen}25) - 1955.55}{T_{ab} - 50 \times \log(\text{pen}25) + 120.15} \quad (3.26)$$

em que,

$\text{pen}25$ - penetração do betume a 25°C (10^{-1} mm), medida empírica da viscosidade do betume.

A expressão (3.26) é válida para:

$$20^{\circ}\text{C} \leq (\text{Tab}-T) \leq 60^{\circ}\text{C}$$

$$0,01 \text{ s} \leq t_c \leq 0,1 \text{ s}$$

$$-1 \leq \text{IPen} \leq 1$$

Contudo, a expressão (3.25) não considera o endurecimento do betume associado ao fabrico e colocação em obra das misturas. Este aspeto é importante no dimensionamento empírico-mecanicista de pavimentos rodoviários flexíveis, uma vez que, a caracterização do betume deve corresponder à situação de serviço. A correção da expressão (3.25) para consideração deste aspeto é efetuada através da utilização das expressões (3.27) e (3.28) (Kennedy, 1985).

$$\text{pen}25_r = 0,65 \times \text{pen} 25 \quad (3.27)$$

$$\text{Tab}_r = 99,13 - 26,35 \times \log(\text{pen}25_r) \quad (3.28)$$

O índice r indica que já ocorreu o envelhecimento do betume correspondente ao fabrico e colocação em obra.

O tempo de carregamento é determinado pela expressão (3.29).

$$t_c = \frac{1}{vt} \quad (3.29)$$

em que,

vt - velocidade média da corrente do tráfego de pesados (km/h). O valor de vt normalmente adotado é de 50 km/h.

O parâmetro de penetração do betume ($\text{pen}25$) e a temperatura de amolecimento do betume obtida pelo método anel e bola (Tab) dependem do tipo de betume, como se pode observar na Tabela 3.12, a qual apresenta as principais propriedades e exigências de conformidade para os diferentes tipos de betume usados na pavimentação.

Tabela 3.12- Tipos de betume de pavimentação, propriedades e exigências de conformidade (LNEC, 1997 citado por Picado-Santos, L. et al., 2002)

Propriedades (condições de ensaio)		Tipos de betumes e exigências de conformidade								
		Tipos	10/ 20	20/ 30	35/ 50	50/ 70	70/ 100	100/ 150	160/ 220	250/ 330
Penetração (0,1 mm) [25°C, 100 g, 5s]		Mín	10	20	35	50	70	100	160	250
		Máx	20	30	50	70	100	150	220	330
Temperatura de amolecimento Método anel e bola		Mín	63	55	50	46	43	39	35	30
		Máx	76	63	58	54	51	47	43	38
Viscosidade cinemática (mm ² /s)[135°C]		Mín	1000	530	370	295	230	175	135	100
Solubilidade em tolueno ou xileno (%)		Mín	99	99	99	99	99	99	99	99
Temperatura de inflamação (°C)		Mín	250	240	240	230	230	230	220	220
Resistência ao endurecimento	Varição de massa (%, ±)	Máx	0.5	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	1.0	1.0
	Penetração (%p.o.) [25°C, 100 g, 5s]	Mín	60	55	53	50	46	43	37	35
	Temp. amolecimento	Mín	65	57	52	48	45	41	37	32
	Aumento da temp. de amolecimento (°C)	Máx	8	10	11	11	11	12	12	12

O cálculo dos módulos de deformabilidade proposto pelo método empírico-mecanicista da Shell depende do valor de rigidez do betume obtido. Para valores da rigidez do betume entre 5 e 1000 MPa, o módulo de deformabilidade é determinado pela expressão (3.30).

$$E_m = 10^A \quad (3.30)$$

$$A = \frac{S89 + S68}{2} \times (\log Sb - 8) + \frac{S89 - S68}{2} \times |\log Sb - 8| + Sm108 \quad (3.31)$$

Para valores da rigidez do betume a variar entre 1000 e 3000 MPa deve ser adotada a expressão (3.32).

$$E_m = 10^B \quad (3.32)$$

$$B = (Sm3109 - Sm108 - S89) \times \frac{\log Sb - 9}{\log 3} + Sm108 + S89 \quad (3.33)$$

As variáveis necessárias para aplicação das expressões (3.31) e (3.33) são determinadas segundo as seguintes expressões:

$$S_{89} = 1.12 \times \frac{(S_{m3109} - S_{m108})}{\log 30} \quad (3.34)$$

$$S_{68} = 0.6 \times \log \frac{1.37 \times V_b^2 - 1}{1.33 \times V_b - 1} \quad (3.35)$$

$$S_{m3109} = 10.82 - \frac{1.342 \times (100 - V_a)}{V_a + V_b} \quad (3.36)$$

$$S_{m108} = 8 + 5.68 \times 10^{-3} \times V_a + 2.135 \times 10^{-4} \times V_a^2 \quad (3.37)$$

em que,

E_m - módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (Pa);

V_a - percentagem volumétrica de agregado;

V_b - percentagem volumétrica de betume.

A percentagem volumétrica de agregado (V_a) e a percentagem volumétrica de betume (V_b) são calculadas pelas expressões (3.38) e (3.39), respetivamente.

$$V_a = \left(1 - \frac{n}{100} - V_b\right) \quad (3.38)$$

$$V_b = \frac{\left(1 - \frac{n}{100}\right) \times \left(\gamma_a \times \frac{t_b}{100}\right)}{\left(\gamma_a \times \frac{t_b}{100} + \gamma_b\right)} \quad (3.39)$$

em que:

t_b - percentagem de betume;

γ_b - peso específico do betume (kN/m³);

γ_a - peso específico do agregado (kN/m³);

n - porosidade.

O módulo de deformabilidade das misturas betuminosas também pode ser calculado segundo o método de Nottingham. Contudo, a expressão (3.40) proposta por este método só é válida para valores de rigidez de betume superiores a 5 MPa.

$$E_m = S_b \times \left[1 + \frac{257.5 + 2.5 \times VMA}{n \times (VMA - 3)}\right] \quad (3.40)$$

em que:

$$n = 0.83 \times \log \frac{4 \times 10^4}{S_b} \quad (3.41)$$

$$VMA = Vb + \frac{n}{100} \quad (3.42)$$

em que:

Em - módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (MPa);

Sb - rigidez do betume (MPa);

VMA - Volume de vazios no esqueleto de agregados da mistura (%).

Após a determinação do módulo de deformabilidade da mistura betuminosa a utilizar na camada de reforço prossegue-se para o cálculo da espessura desta. Para o efeito, e com recurso à utilização de um dos programas de cálculo, como o Bisar, faz-se variar a espessura desta camada até se obter uma percentagem de dano compreendida entre 80 e 100%.

3.4 Procedimento baseado na determinação dos fatores de carga

O método baseado na determinação dos fatores de carga pode ser resumido nos seguintes passos:

a) *Caracterização do pavimento existente.*

Esta parte do procedimento recorre ao método das deflexões reversíveis, explicado em pormenor na secção 3.3 para a determinação dos módulos de deformabilidade das várias camadas do pavimento, nomeadamente das camadas granulares e do solo de fundação. Resumidamente, em função dos valores das deflexões obtidas na campanha de ensaios, são definidas as secções homogéneas do troço em análise e escolhido o defletograma característico de cada secção em função do defletograma correspondente ao percentil 85. Utilizando um programa de cálculo automático determina-se, através de várias iterações, os módulos de deformabilidade de cada camada constituinte do pavimento, de maneira a que as deflexões calculadas pelo programa sejam semelhante às deflexões características.

b) *Dimensionamento do pavimento como se fosse novo.*

O dimensionamento do pavimento como novo é efetuado tendo em consideração as seguintes etapas:

- Cálculo do tráfego solicitante para o período de dimensionamento do reforço (10 a 15 anos) e determinação da temperatura de serviço.
- Pré-dimensionamento do pavimento como se fosse novo com recurso ao manual MADIPAV, o que permite obter uma estimativa da espessura total das camadas betuminosas a usar no dimensionamento. As espessuras e as características mecânicas dos materiais não ligados deverão ser mantidas iguais às do pavimento existente (definidas em a)).

- Cálculo dos módulos de deformabilidade dos materiais betuminosos como se estes fossem novos. Para isso, usa-se a fórmula (28) para determinar a rigidez do betume, que depende da temperatura a que se encontra o material e do tempo de carregamento. A temperatura a que se encontra o material pode ser definida com recurso à temperatura de serviço, considerando sempre esta temperatura para o cálculo dos módulos de deformabilidade das diferentes camadas betuminosas, independentemente da profundidade a que esta se encontra. Segundo Picado-Santos, L. et al. (2002), “O procedimento mais usual para considerar o efeito da temperatura e portanto estabelecer a “temperatura de serviço” representativa, é a consideração de uma “temperatura equivalente anual” para o pavimento, como por exemplo no caso do Método da Shell (Claessen, A. et al., 1977) (...) A “temperatura equivalente anual” pretende, por ser uma temperatura única nas camadas betuminosas, representar a influência que tem no comportamento global dum pavimento as diferentes temperaturas que ocorrem na realidade a diferentes profundidades nessas camadas”. Os módulos de deformabilidade também podem ser determinados a partir da temperatura em profundidade com recurso às temperaturas médias/ponderados do ar, assim, irão existir diferentes temperaturas e conseqüentemente diferentes módulos de deformabilidade para cada camada betuminosa constituinte do pavimento.

- Tendo as características mecânicas do pavimento e recorrendo a um programa de cálculo do estado de tensão-deformação, determina-se a espessura de misturas betuminosas necessária para que o valor do dano se encontre compreendido entre 80 a 100%, como se explicou no ponto 3.3.

- Para as espessuras e características mecânicas determinadas anteriormente no dimensionamento do pavimento novo, simular num programa de cálculo o ensaio FWD usado na campanha de ensaios no pavimento novo, para obtenção dos valores das deflexões a 0m e 0,9m do ponto de aplicação da carga.

c) Cálculo dos fatores de carga.

Tendo os defletogramas característicos do pavimento existente e do pavimento novo, calculam-se os respetivos fatores de carga através das expressões (3.43) e (3.44).

$$F_{cp} = \frac{D_{máx} + D_{90}}{2} \quad (3.43)$$

$$F_{novo} = \frac{D_{máx} + D_{90}}{2} \quad (3.44)$$

em que:

F_{cp} - Fator de carga do pavimento existente;

F_{novo} - Fator de carga do pavimento novo;

D_{máx} - deflexão máxima (μm);

D₉₀ - deflexão a 90 cm do centro da placa (μm).

Segundo Picado-Santos, L. et al (2006) citado por Dias, J. (2009), o cálculo seguinte depende do valor do fator f^* calculado como a seguir se indica.

$$f^* = \frac{F_{\text{novo}}}{F_{\text{cp}}} \begin{cases} \text{se } f^* \geq 1 \text{ dimensiona – se o pavimento betuminoso como novo,} \\ \text{considerando que as camadas do pavimento existente} \\ \text{têm características novas} \\ \text{se } f^* < 1 \text{ – dimensiona – se o pavimento como novo, afetando a espessura} \\ \text{existente de } f^* \text{ e usando as características obtidas} \\ \text{na reto – análise para as camadas não ligadas} \end{cases}$$

O cálculo da espessura do reforço é então determinada quando $f^* < 1$, como se indica na expressão (45).

$$\text{Espessura do reforço} = \text{Espessura calculada} - f^* \times \text{Espessura existente} \quad (3.45)$$

CAPÍTULO 4 - Casos de estudo

De acordo com os objetivos definidos neste trabalho, este capítulo, de vertente prática, destina-se à análise de dois casos de estudo (CE1 e CE2) para os quais se irão determinar soluções de reforço pelos métodos expeditos e empírico-mecanicistas referidos anteriormente.

Para esse efeito foram fornecidos os seguintes dados: espessura e composição de cada camada do pavimento, características do tráfego e resultados do ensaio FWD.

4.1 Procedimento baseado nas espessuras efetivas

4.1.1 Caso de estudo 1

a) *Determinação das características de resistência do solo de fundação.*

O módulo de deformabilidade do solo de fundação foi fornecido, tendo este o valor de 100 MPa.

b) *Espessura e composição de cada camada do pavimento.*

A espessura e a composição de cada camada constituinte do pavimento existente foram fornecidas e encontram-se ilustradas na Figura 4.1.

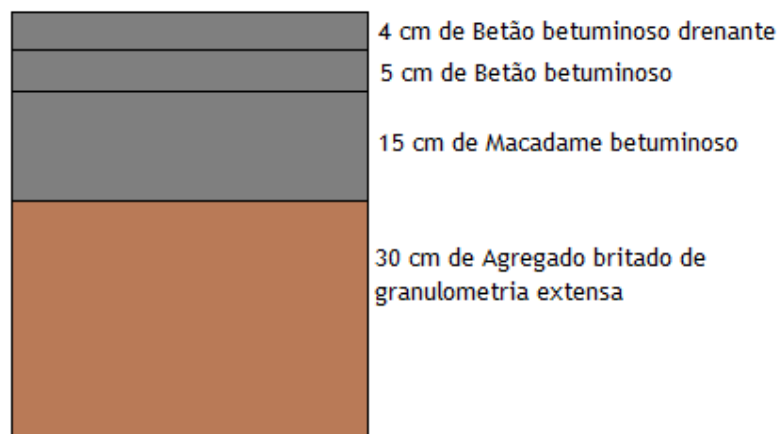


Figura 4.1- Espessura e composição de cada camada constituinte do pavimento (CE1)

Para efeitos de cálculo considerou-se que a espessura da camada de desgaste em betão betuminoso drenante é equivalente a 2 cm de uma mistura betuminosa densa convencional, uma vez que, segundo Picado-Santos, L. et al. (2008) "A contribuição estrutural do betão betuminoso drenante é pouco significativa. A título ilustrativo, refere-se que 4 cm de mistura drenante correspondem, sensivelmente, a metade da mistura densa convencional, em termos de capacidade resistente".

c) *Cálculo do tráfego solicitante.*

O tráfego médio diário anual de pesados na via mais solicitada para o ano 0 foi calculado com base na seguinte informação: o trecho em estudo apresenta um perfil transversal 2x2 e o tráfego médio diário anual total de pesados no ano 0 (2015) é de 1688,3 veículos (nos dois sentidos de circulação). Assim,

$$(TMDA)_p^0 \text{ na via mais solicitada} = \frac{0,9 \times 1688,3}{2} = 759,76 \cong 760 \text{ veículos}$$

Os dados sobre o tráfego no ano 0 e sobre o tráfego futuro podem ser consultados no anexo I.

Uma vez que estava disponível a informação sobre o tráfego futuro, a taxa média de crescimento anual foi calculada através da expressão (3.4) para dois períodos de dimensionamento, 10 e 15 anos (ver Tabela 4.1).

Tabela 4.1- Taxa média de crescimento anual do tráfego pesado para um período de dimensionamento de 10 e 15 anos (CE1)

	Taxa média de crescimento anual do tráfego pesado	
	10 anos	15 anos
Média da taxa de variação anual para cada ano (%)	1,98	2,05
$(TMDA)_p(\text{ano } n) = (TMDA)_p(\text{ano } 0) \times (1+t)^n$ (%)	1,98	2,05

Segundo o MADIPAV, para uma $(TMDA)_p^0$ de 760 veículos a classe de tráfego correspondente é T3, com um fator de agressividade de 4,5.

Na Tabela 4.2 encontra-se o número de veículos pesados (N_{pes}) na via mais solicitada para 10 e 15 anos tendo sido utilizada para tal a fórmula (3.3). Posteriormente, com recurso à fórmula (3.5), foi calculado o número de eixos-padrão de 80 kN de dimensionamento.

Tabela 4.2- Número de eixos-padrão de 80 kN para dimensionamento (N_{80}) - 10 e 15 anos (CE1)

$N_{pesados}$		N_{80dim}	
10 anos	15 anos	10 anos	15 anos
3 033 022,92	4 812 982,62	1,36E+07	2,17E+07

Como explicado anteriormente, é necessário ter-se especial atenção à possível necessidade de efetuar um ou mais acertos da classe de tráfego a adotar quando se utiliza o MADIPAV na determinação da espessura de reforço.

Na tabela 4.3 são apresentados os números de eixo-padrão de 80 kN de dimensionamento para cada classe de tráfego e para um período de dimensionamento de 20 anos.

Tabela 4.3- Número de eixos-padrão de 80 kN para dimensionamento - mínimos e máximos para cada classe de tráfego (20 anos) (CE1)

	N ₈₀ dim. pavimento flexível (20 anos)	
	Mínimo	Máximo
T6	9,81E+05	2,94E+06
T5	4,41E+06	8,83E+06
T4	1,30E+07	2,17E+07
T3	2,45E+07	3,91E+07
T2	4,83E+07	7,24E+07
T1	7,17E+07	1,33E+08

Foi necessário proceder a um acerto uma vez que, os números acumulados de eixos padrão de 80 kN não coincidiram com a classe de tráfego T3 inicialmente definida a partir do $TMDA_p^0$ (ver Tabela 4.4). Uma vez que o N₈₀ coincidiu com a classe de tráfego T4, este acerto fez-se alterando o valor do fator de agressividade para 4 na fórmula (3.5) (ver Tabela 4.5).

Tabela 4.4- Verificação da correspondência entre a classe de tráfego e o número de eixos-padra de 80 kN (CE1)

N ₈₀ dim			
10 anos	15 anos	10 anos	15 anos
1,36E+07	2,17E+07	T4 (≠T3) Usar o valor de 4 para o fator de agressividade	T4 (≠T3) Usar o valor de 4 para o fator de agressividade

Tabela 4.5- Acerto da classe de tráfego (CE1)

N ₈₀ dim			
10 anos	15 anos	10 anos	15 anos
1,21E+07	1,93E+07	T4	T4

Desta maneira, quando se recorre ao MADIPAV para determinar a espessura de reforço do pavimento deve considerar-se a classe de tráfego T4.

d) *Cálculo da espessura efetiva do pavimento.*

A espessura efetiva de cada camada i (T_{ei}) é igual ao produto entre o fator de conversão C e a espessura real da camada.

Consultando a tabela 3.5 foram obtidos os seguintes fatores de conversão C :

- para as misturas betuminosas $C = 0,6$ tendo como base a informação fornecida sobre a gravidade das patologias, que apresentam, de um modo geral, um nível de gravidade entre I e II (Baixo e Médio).
- como a camada de sub base é constituída por agregado britado de granulometria extensa, o fator C escolhido foi de 0,2.

Multiplicando a espessura real de cada camada pelo fator de conversão C correspondente e somando estas, a espessura efetiva total T_e obtida foi de 19,2 cm.

A espessura efetiva do pavimento foi determinada para possibilitar a determinação da espessura do reforço pelo método do Asphalt Institute.

e) Cálculo da espessura de camada de reforço.

A espessura de reforço necessária foi obtida a partir da espessura requerida para um pavimento novo (T_n). T_n foi determinada com auxílio dos ábacos “Full-Depth Asphalt Concrete” do Manual “Thickness Design” do Asphalt Institute de 1983 e 2008 (ábaco A-7). Foi ainda determinada uma solução a partir do ábaco A-12 “Untreated Aggregate Base 300mm thickness” do Manual de 2008, uma vez que o pavimento em análise tem uma sub-base com 30 cm de agregado britado. Foram escolhidos os ábacos de 15,5°C de temperatura média anual do ar tendo como base os dados disponibilizados pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P. (IPMA, I.P.) para o ano de 2015.

Foram considerados, para utilização dos ábacos, o módulo de deformabilidade do solo de fundação e o número de eixos padrão de dimensionamento de 80 kN obtidos.

Apresenta-se na tabela 4.6 as espessuras T_n obtidas a partir dos 3 ábacos utilizados. A determinação desta espessura recorrendo aos ábacos pode ser consultada no anexo II.

Tabela 4.6- Espessura requerida para o pavimento (T_n) segundo os abacos: Asphalt Institute 1983, A-7 2008 e A-12 2008 (CE1)

Espessura requerida para o pavimento (T_n)					
Full-Depth Asphalt Concrete (1983)		A-7 (2008)		A-12 (2008)	
10 anos	15 anos	10 anos	15 anos	10 anos	15 anos
33,5 cm	37,1 cm	33,7 cm	37,3 cm	29,2 cm	32,4 cm

O cálculo da espessura requerida também foi efetuado com recurso ao MADIPAV, tendo-se adotado a estrutura de pavimento tipo BD+MB/MBD+SbG, uma vez que é a mais próxima da estrutura do pavimento em análise. A classe da plataforma foi determinada com recurso ao à tabela 3.6 a partir do módulo de deformabilidade da fundação de 100 MPa, o que corresponde a uma classe de fundação F3.

A estrutura do pavimento obtida para uma classe de tráfego T4 e uma classe de plataforma F3 corresponde a 21 cm de misturas betuminosas e 20 cm de material granular. As espessuras obtidas foram convertidas em espessura equivalente de misturas betuminosas por aplicação do fator C à espessura de material granular, como indicado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7- Espessura requerida de material betuminoso (T_n) segundo o MADIPAV (CE1)

Espessura requerida para o pavimento (T_n) MADIPAV	
10 anos	15 anos
$20 \times 0,2 + 21 = 25\text{cm}$	$20 \times 0,2 + 21 = 25\text{cm}$

A espessura da camada de reforço T_0 é obtida pela subtração entre a espessura requerida T_n , obtidas nos ábacos do AI e no MADIPAV, e a espessura efetiva T_e .

Foi adicionado 1 cm à espessura de reforço T_0 para prever a necessidade de incorreções na colocação em obra (ver Tabela 4.8).

Tabela 4.8- Espessura da camada de reforço segundo os métodos expeditos AI (1983), AI (2008) e MADIPAV (CE1)

Período	Espessura da camada do reforço			
	AI 1983	AI 2008 (A-7)	AI 2008 (A-12)	MADIPAV
10 anos	16 cm	16 cm	17 cm	7 cm
15 anos	19 cm	20 cm	21 cm	7 cm

f) Vida útil restante do pavimento.

A vida útil restante do pavimento foi determinada através dos ábacos do Asphalt Institute, usando como dados de entrada a espessura efetiva T_e e o módulo de deformabilidade do solo de fundação. Assim, foi possível obter o número de eixos padrão admissível (ver Tabela 4.9). Seguidamente, usou-se a fórmula (3.3) e calculou-se o n , que corresponde ao período de vida útil do pavimento em anos (ver Tabela 4.10).

Tabela 4.9- Número de eixos-padrão de 80 kN admissíveis segundo os ábacos do Asphalt Institute (CE1)

N_{80} admissível		
AI 1983	AI 2008 (A-7)	AI 2008 (A-12)
700 000	1 000 000	2 200 000

Tabela 4.10- Período de vida útil restante do pavimento em anos segundo os ábacos do Asphalt Institute (CE1)

Vida útil (anos)			t
AI 1983	AI 2008 (A-7)	AI 2008 (A-12)	
0,6	0,8	1,8	0,019754181 (período de dimensionamento de 10 anos)
0,6	0,8	1,7	0,020502125 (período de dimensionamento de 15 anos)

Para a determinação do número de eixos padrão admissíveis pelo MADIPAV foi necessário relacionar a espessura equivalente de material betuminoso com a classe de tráfego da estrutura de pavimento tipo considerada (BD+MB/MBD+SbG). Para este efeito foi retirado à espessura efetiva T_e de 19,2 cm a espessura de 20 cm de material granular já convertido em material betuminoso. Assim, o T_e de misturas betuminosas é igual a $19,2 - 20 \times 0,2 = 15,2$ cm.

O valor obtido está compreendido entre as soluções proposta pelo MADIPAV para as classes de tráfego T6 e T5, pelo que foi feita uma interpolação para obter o N_{80} correspondente à espessura de 15,2 cm (Tabela 4.11). Para a determinação da vida útil do pavimento foi usada novamente a expressão (3.3) (ver Tabela 4.12).

Tabela 4.11- Número de eixos-padrão de 80 kN admissíveis segundo o MADIPAV (CE1)

Espessura/Classe de tráfego	
12 cm/T6	$N_{80} \text{ min} = 9,81 \times 10^5$
15,2 cm	$N_{80} \text{ admissível} = 5,17 \times 10^6$
18 cm/T5	$N_{80} \text{ máx} = 8,83 \times 10^6$

Tabela 4.12- Período de vida útil restante do pavimento em anos segundo o MADIPAV (CE1)

Vida útil (anos)	
MADIPAV	t
4,0	0,019754181 (período de dimensionamento de 10 anos)
4,0	0,020502125 (período de dimensionamento de 15 anos)

4.1.2 Caso de estudo 2

a) *Determinação das características de resistência do solo de fundação.*

O módulo de deformabilidade do solo de fundação considerado em projeto foi fornecido e varia entre os 80 e os 100 MPa.

b) *Determinação da espessura e composição de cada camada.*

As espessuras e composições facultadas de cada camada constituinte do pavimento encontram-se ilustradas na Figura 4.2.

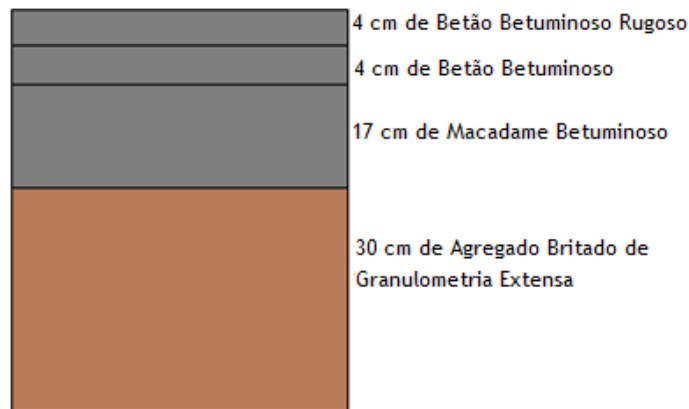


Figura 4.2- Espessura e composição de cada camada constituinte do pavimento (CE2)

c) *Cálculo do tráfego solicitante*

O tráfego médio diário anual de pesados na via mais solicitada para o ano 0 foi calculado através da seguinte informação: o trecho em estudo apresenta um perfil transversal 2x2 e o tráfego médio diário anual total de pesados no ano 0 (2014) é de 3084 veículos (nos dois sentidos de circulação). Assim,

$$(TMDA)_p^0 \text{ na via mais solicitada} = \frac{0,9 \times 3084}{2} = 1387,80 \text{ veículos} \cong 1388 \text{ veículos}$$

Os dados sobre o tráfego no ano 0 e sobre o tráfego futuro podem ser consultados no anexo I.

Os valores das taxas médias de crescimento anual para 10 e 15 anos podem ser consultadas na Tabela 4.13.

Tabela 4.13- Taxa média de crescimento anual do tráfego pesado para o período de dimensionamento 10 e 15 anos (CE2)

	Taxa média de crescimento anual do tráfego pesado	
	10 anos	15 anos
Média da taxa de variação anual para cada ano (%)	2,6	2,5
$(TMDA)_{p(\text{ano } n)} = (TMDA)_{p(\text{ano } 0)} \times (1+t)^n$ (%)	2,6	2,4

Uma vez que estamos perante uma classe de tráfego T1, o valor do fator de agressividade, consultando a Tabela 3.3 corresponde a 5,5.

O número acumulado de eixos padrão para 10 e 15 anos foi calculado com recurso às fórmulas (3.3) e (3.5) (ver Tabela 4.14).

Tabela 4.14- Somatório dos veículos pesados (N_{pes}) e número de eixos-padrão de 80 kN de dimensionamento ($N_{80\text{dim}}$) para 10 e 15 (CE2)

N_{pesados}		$N_{80\text{dim}}$	
10 anos	15 anos	10 anos	15 anos
5 690 722,60	9 036 199,22	3,13E+07	4,97E+07

Tal como no primeiro caso de estudo foi necessário proceder a um acerto para que a classe de tráfego coincidissem com o número de eixos-padrão de dimensionamento de 80 kN (ver Tabelas 4.15 e 4.16).

Tabela 4.15- Verificação da correspondência entre a classe de tráfego e o número de eixos-padrão de dimensionamento 80 kN (CE2)

$N_{80\text{dim}}$			
10 anos	15 anos	10 anos	15 anos
3,13E+07	4,97E+07	T3 (\neq T1) Usar o valor de 4,5 para o fator de agressividade	T2 (\neq T1) Usar o valor de 5 para o fator de agressividade

Tabela 4.16- Acerto da classe de tráfego (CE2)

$N_{80\text{dim}}$			
10 anos	15 anos	10 anos	15 anos
2,65E+07	4,65E+07	T3	T2
2,57E+07	4,53E+07		
2,56E+07	4,52E+07		

Assim, ao consultar o MADIPAV a classe de tráfego a utilizar para 10 anos é T3 e para 15 anos é T2.

d) *Cálculo da espessura efetiva.*

Perante as informações fornecidas sobre a composição das camadas e a degradação visível do pavimento, os fatores *c* escolhidos, com auxílio da Tabela 3.5, foram os seguintes (ver Tabela 4.17):

Tabela 4.17- Fatores de conversão (CE2)

	C
Camada de desgaste	0,6
Camada de ligação	0,6
Camada de base	0,6
Camada de sub base	0,2

A espessura efetiva total T_e obtida foi de 21 cm. Na utilização do ábaco AI (2008) A-12 a espessura efetiva total T_e utilizada foi de 15 cm, que corresponde à multiplicação das espessuras reais das camadas betuminosas pelo fator de conversão *C* correspondente, ou seja, para este cálculo exclui-se a camada de sub-base.

e) *Cálculo da espessura de camada de reforço.*

Tal como no caso de estudo anterior, a espessura requerida para o pavimento (T_n) foi determinada com auxílio aos ábacos “Full-Depth Asphalt Concrete” do Manual “Thickness Design” do Asphalt Institute e pelo MADIPAV (ver Tabelas 4.18 e 4.19). A determinação desta espessura recorrendo aos ábacos pode ser consultada no anexo II.

Tabela 4.18- Espessura requerida para o pavimento (T_n) segundo o Ábaco Asphalt Institute 1983, 2008 A-7 e 2008 A-12 (CE2)

Espessura requerida para o pavimento (T_n)					
Ábaco AI (1983)		Ábaco AI (2008) A-7		Ábaco AI (2008) A-12	
10 anos	15 anos	10 anos	15 anos	10 anos	15 anos
41,2 cm	44 cm	40 cm	42,7 cm	35 cm	Excede os limites do ábaco

Tabela 4.19- Espessura requerida para o pavimento (T_n) segundo o MADIPAV (CE2)

Espessura requerida para o pavimento (T_n) MADIPAV	
10 anos	15 anos
30cm	32cm

As espessuras das camadas de reforço T_0 , resultantes de cada ábaco e do MADIPAV, podem ser consultadas na Tabela 4.20, tendo já incorporado 1 cm para prever a necessidade de incorreções na colocação em obra.

Tabela 4.20- Espessura da camada do reforço segundo os métodos expeditos já com 1 cm adicional para prever a necessidade de incorreções na colocação em obra (CE2)

Período	Espessura da camada do reforço			
	AI 1983	AI 2008 (A-7)	AI 2008 (A-12)	MADIPAV
10 anos	22 cm	20 cm	21 cm	10 cm
15 anos	24 cm	23 cm	(excede os limites do ábaco)	12 cm

f) Vida útil restante do pavimento

O cálculo da vida útil do pavimento foi feito com recurso aos mesmos processos utilizados no caso de estudo 1. Resumidamente, foram calculados os números de eixos-padrão de 80 kN admissíveis pelos ábacos e pelo MADIPAV (ver Tabela 4.21 e 4.23) e seguidamente o período de vida útil para cada método (ver Tabela 4.22 e 4.24).

Tabela 4.21- Número de eixos-padrão de 80 kN admissível segundo os ábacos da Asphalt Institute (CE2)

N ₈₀		
AI 1983	AI 2008 (A-7)	AI 2008 (A-12)
720 000	1 200 000	1 400 000

Tabela 4.22- Período de vida útil do pavimento em anos segundo os ábacos da Asphalt Institute (CE2)

Vida útil (anos)			t
AI 1983	AI 2008 (A-7)	AI 2008 (A-12)	
0,3	0,5	0,6	0,025961911 (período de dimensionamento de 10 anos)
0,3	0,5	0,6	0,024526446 (período de dimensionamento de 10 anos)

Tabela 4.23- Número de eixos-padrão de 80 kN admissível segundo o MADIPAV (CE2)

Espessura/Classe de tráfego	
12 cm/T6	N ₈₀ min= 9.81x10 ⁵
17 cm	N ₈₀ admissível= 7,52x10 ⁶
18 cm/T5	N ₈₀ máx= 8.83x10 ⁶

Tabela 4.24- Período de vida útil do pavimento em anos segundo o MADIPAV (CE2)

Vida útil (anos)	t
MADIPAV	
3,2	0,025961911 (período de dimensionamento- 10 anos)
3,2	0,024526446 (período de dimensionamento- 15 anos)

4.1.3. Síntese

Fazendo uma análise aos resultados obtidos para a espessura da camada de reforço pelos diferentes métodos expeditos, contata-se, com ajuda da figura 4.3, que o ábaco do AI 2008 (A-12) é o que apresenta valores de espessura mais elevados, apresentando valores muito aproximados dos restantes ábacos para o primeiro caso de estudo.

O mesmo não se verifica com o MADIPAV que deu soluções muito díspares em relação a estes ábacos, obtendo um espessura inferior na ordem dos 10 cm para 10 anos e de 14 cm para 15 anos.

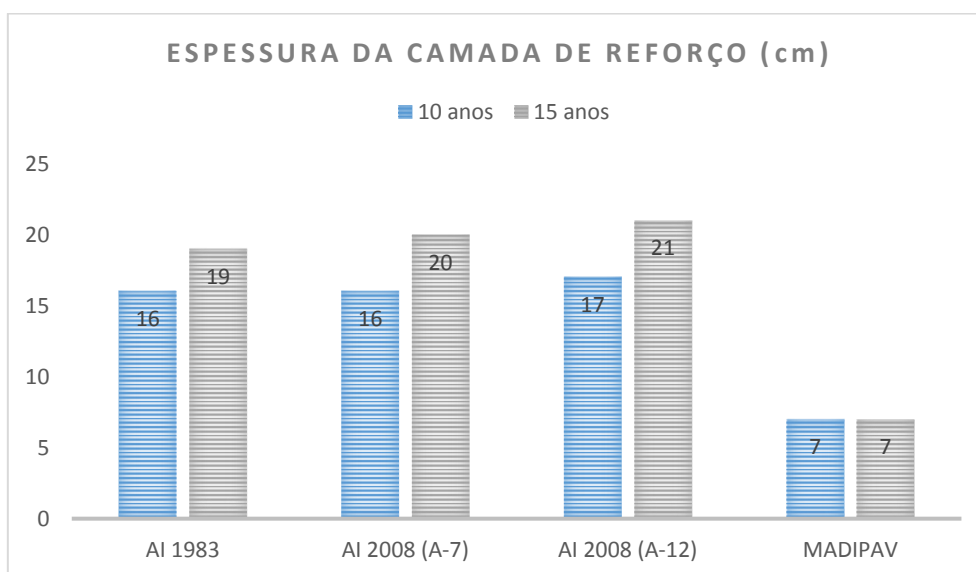


Figura 4.3- Espessura da camada de reforço (cm) determinada pelos métodos expeditos (CE1)

Em relação ao período de vida útil do pavimento, o MADIPAV foi o método que apresentou valores mais elevados, apontando para 4 anos. Quanto ao abaco do AI 1983, este indica que a vida útil do pavimento é inferior a 1 ano (Ver Figura 4.4).

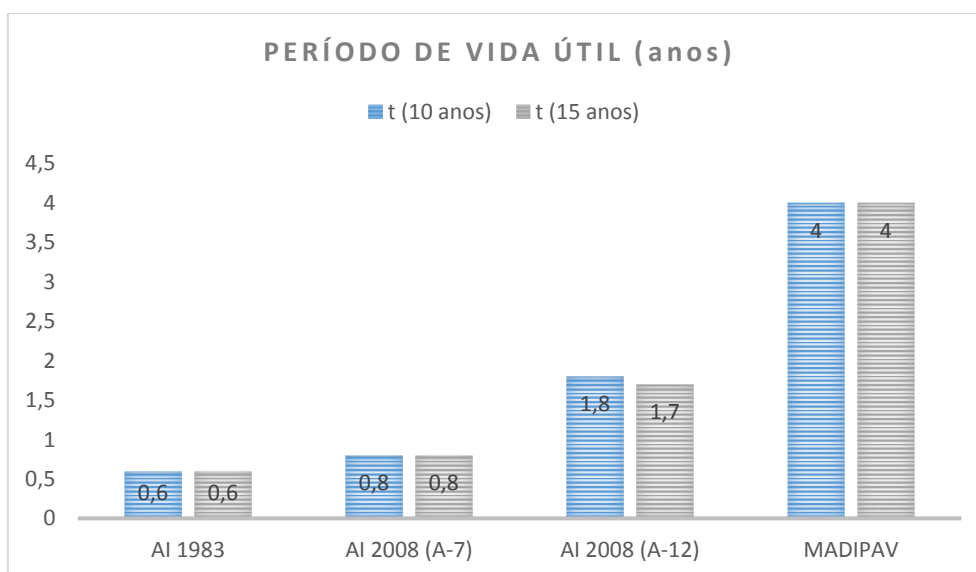


Figura 4.4- Período de vida útil (anos) do pavimento determinado pelos métodos expeditos (CE1)

Para o segundo caso de estudo verifica-se que o ábaco do AI (1993) é o que apresenta valores mais elevados de espessura necessária de camada de reforço, e tal como no caso de estudo anterior, este apresentou valores muito próximos dos restantes ábacos e muito díspares do MADIPAV (ver Figura 4.5).

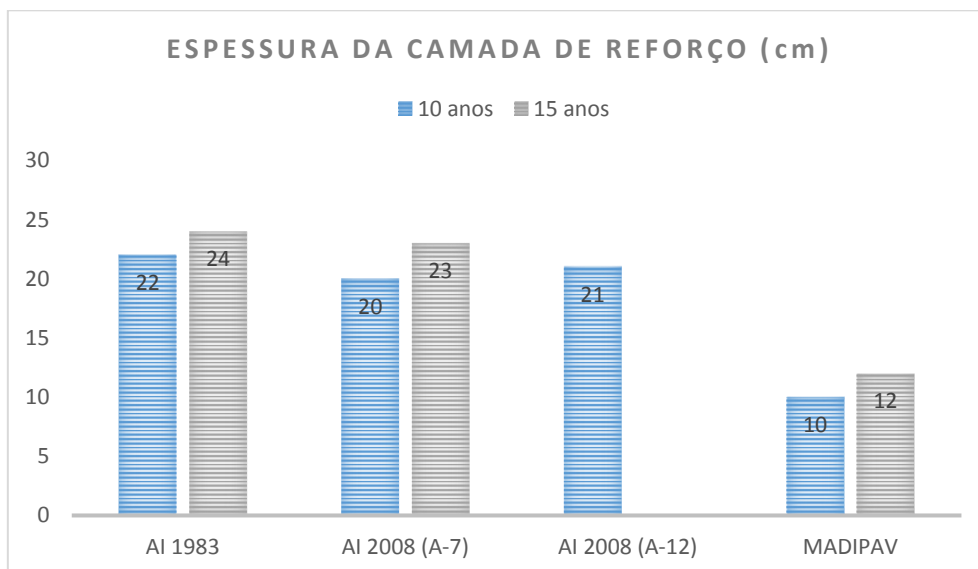


Figura 4.5- Espessura da camada de reforço (cm) determinada pelos métodos expeditos (CE2)

Em semelhança ao caso anterior, o MADIPAV foi o método expedito que indicou valores superiores em relação à vida útil restante do pavimento, apontando para, sensivelmente, 3 anos. O ábaco do AI 1983 indica que a vida útil do pavimento é inferior a meio ano (ver Figura 4.6).

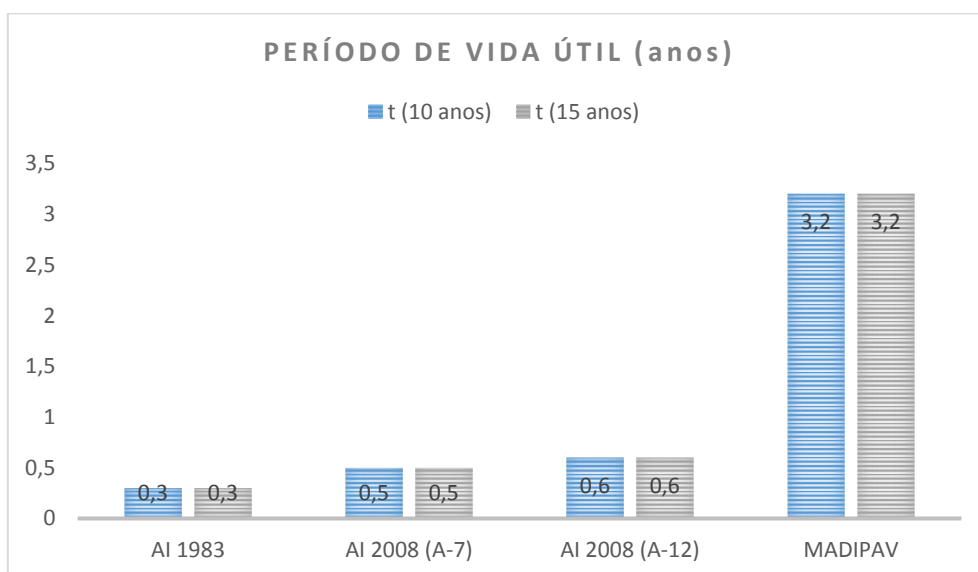


Figura 4.6- Período de vida útil (anos) do pavimento determinado pelos métodos expeditos (CE2)

4.2 Procedimento baseado nas deflexões reversíveis

4.2.1 Caso de estudo 1

a) Campanha de ensaios.

Os dados facultados para o estudo da caracterização da capacidade estrutural foram obtidos por ensaios não destrutivos com o defletómetro de impacto.

Estes ensaios foram efetuados numa extensão de 10,9 km, na via da direita, nos dois sentidos de circulação e no mês de Dezembro de 2015. A localização exata da auto-estrada não foi facultada, apenas foi fornecida a informação de que esta se localiza na região centro do país.

A tabela 4.25 apresenta as características do defletómetro de impacto usado nos ensaios.

Tabela 4.25- Características do defletómetro de impacto usadas no ensaio

Distância dos acelerómetros ao centro da placa (m)	0,0	0,3	0,45	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1
Força de impacto nominal de ensaio (kN)	65								
Diâmetro da placa (mm)	300								

As deflexões fornecidas não se encontravam normalizadas, tendo sido necessário realizar esta normalização para uma carga de 65 kN através da aplicação da fórmula (3.7).

As deflexões normalizadas podem ser consultadas no anexo III.

b) Divisão do troço em secções de comportamento estrutural homogéneo.

A divisão do troço em análise foi realizada por dois métodos: Método das somas acumuladas e o método das diferenças acumuladas, propostos respetivamente pela AASHTO (1986) e AASHTO (1993). Ambos os métodos apresentaram resultados muito idênticos.

No anexo IV podem ser consultadas as tabelas de cálculo para a determinação das secções homogéneas por cada método.

Nas figuras 4.7 e 4.8 são apresentadas as divisões do troço em secções de comportamento estrutural homogéneo, para cada sentido, segundo o método das diferenças acumuladas (AASHTO, 1993). Nas abcissas foram representados os pontos de ensaio e nas ordenadas os valores dos desvios acumulados.

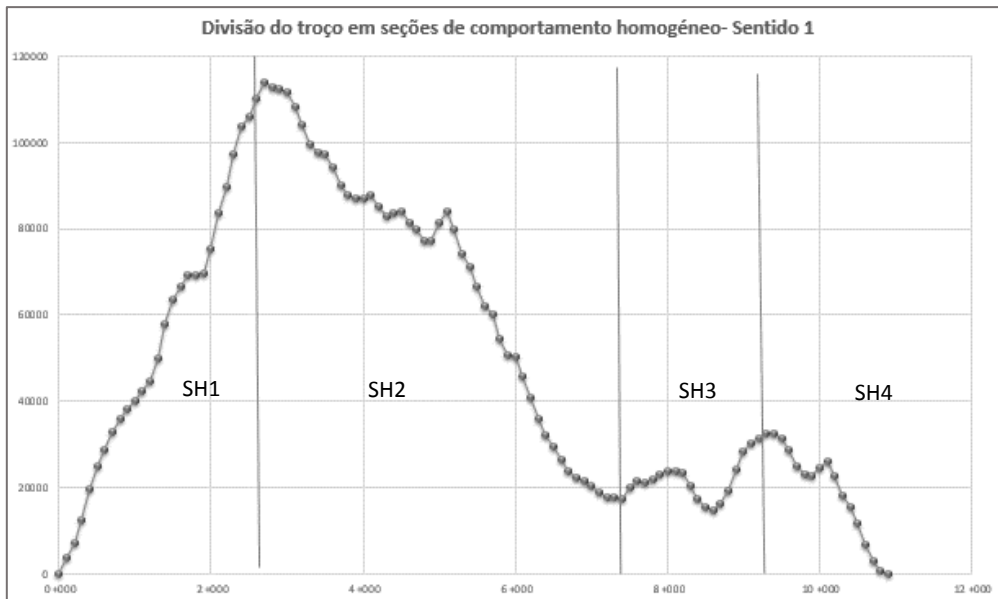


Figura 4.7- Divisão do trecho em secções de comportamento homogéneo para o sentido 1 (CE1)

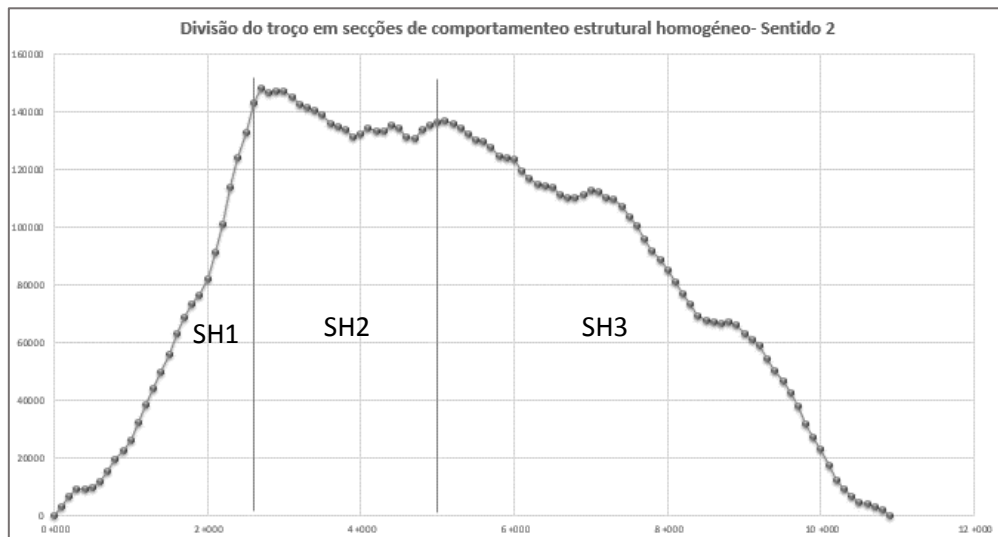


Figura 4.8- Divisão do trecho em secções de comportamento homogéneo para o sentido 2 (CE1)

Tal como referido anteriormente no ponto 3.3, sempre que a inclinação da reta muda indica a mudança de comportamento do trecho (o comportamento deixou de ser homogéneo). Segundo Thomas, F. (2004) um pico, ou seja, ponto onde se dá a mudança de inclinação, é considerado substancial se o seu valor for o mais alto/baixo numa série de 7 pontos vizinhos para a esquerda e para a direita. Assim, foram identificadas 4 secções homogéneas para o sentido 1 e 3 secções homogéneas para o sentido 2.

Como a informação fornecida sobre a gravidade das patologias aponta, de um modo geral, para os níveis de gravidade I e II (Baixo e Médio), a composição do pavimento é igual para todo o trecho em análise e por não haver informações sobre os locais da estrada que se desenvolvem em aterro ou escavação, as secções homogéneas foram delimitadas apenas com base nas deflexões.

Após se terem definido as secções homogéneas foi necessário avaliar o grau de homogeneidade destas através da determinação do coeficiente de variação das deflexões (COV) (ver Tabelas 4.26 e 4.27).

Tabela 4.26- Coeficiente de variação das deflexões para o sentido 1 (CE1)

Sentido 1		
SH1	Desvio padrão	28,31
	Média	215,82
	CV	13% (boa homogeneidade)
SH2	Desvio padrão	32,36
	Média	152,75
	CV	21% (homogeneidade moderada)
SH3	Desvio padrão	27,41
	Média	181,02
	CV	15% (boa homogeneidade)
SH4	Desvio padrão	27,26
	Média	152,99
	CV	18% (boa homogeneidade)

Tabela 4.27- Coeficiente de variação das deflexões para o sentido 2 (CE1)

Sentido 2		
SH1	Desvio padrão	36,67
	Média	234,27
	CV	16% (boa homogeneidade)
SH2	Desvio padrão	23,88
	Média	173,59
	CV	14% (boa homogeneidade)
SH3	Desvio padrão	22,34
	Média	154,48
	CV	14% (boa homogeneidade)

c) Defletograma característico.

Para definir o local mais representativo de cada secção homogénea é necessário determinar o defletograma característico. Para o efeito determinaram-se as deflexões correspondentes ao percentil 85. As tabelas 4.28 e 4.29 apresentam essas deflexões para cada secção homogénea.

Tabela 4.28- Deflexões correspondentes ao percentil 85 para o sentido 1 (CE1)

Sentido 1									
Secção homogénea	Percentil 85 (µm)								
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9
SH1	247,86	223,27	209,39	192,33	155,88	123,41	98,03	75,80	59,36
SH2	181,64	159,84	145,55	131,43	102,06	77,23	61,94	48,53	40,95
SH3	207,02	177,31	157,31	138,94	103,94	76,22	57,19	43,70	32,92
SH4	168,39	143,07	128,61	113,83	86,76	66,81	48,90	33,99	27,47

Tabela 4.29- Deflexões correspondentes ao percentil 85 para o sentido 2 (CE1)

Sentido 2 (μm)									
Secção homogénea	Percentil 85								
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9
SH1	273,71	246,42	228,38	209,28	169,83	135,10	106,93	84,68	66,98
SH2	199,88	175,56	160,44	146,12	116,35	90,41	69,14	52,58	40,69
SH3	177,10	156,54	140,60	125,75	97,42	73,93	56,86	45,79	36,09

Para definir o local mais representativo de cada secção homogénea foi escolhido o defletograma real que mais se aproxima do defletograma correspondente ao percentil 85 (ver Tabelas 4.30 e 4.31). Os gráficos que mostram a semelhança entre os defletogramas reais e os correspondentes ao percentil 85 podem ser consultados no anexo V.

Tabela 4.30- Deflexões características para o sentido 1 (CE1)

Sentido 1										
Secção homogénea	Deflexão Característica (μm)									Pk (km)
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	
SH1	247,57	224,04	209,06	191,86	155,56	123,08	97,94	74,41	57,12	2+600
SH2	189,69	159,85	145,57	131,49	102,83	80,22	62,07	50,08	40,95	4+400
SH3	202,57	174,12	155,49	137,75	102,59	74,64	53,00	38,97	28,15	9+000
SH4	168,54	143,68	129,00	114,62	87,17	63,40	49,12	34,85	27,86	9+900

Tabela 4.31- Deflexões características para o sentido 2 (CE1)

Sentido 2										
Secção homogénea	Deflexão Característica (μm)									PK (km)
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	
SH1	272,60	245,78	227,93	209,09	169,60	135,40	106,89	84,55	67,00	2+500
SH2	198,50	174,00	160,00	145,30	114,90	89,30	68,40	52,50	39,90	3+700
SH3	183,94	156,39	140,66	125,63	94,77	73,94	56,70	45,98	35,87	8+700

d) Determinação dos módulos de deformabilidade.

Como já mencionado anteriormente, a retro análise permite, através de um processo iterativo, determinar os módulos de deformabilidade de cada camada do pavimento.

O principal objetivo desta parte do estudo foi conseguir, com recurso ao programa Bisar, um defletograma de cálculo idêntico ao defletograma característico para cada secção homogénea. Foi ainda estabelecido um RMS máximo de 10% como representativo de uma aproximação satisfatória entre o defletograma calculado e o defletograma real.

Após se ter determinado os módulos de deformabilidade com recurso ao Bisar, foi também utilizado o programa de cálculo ELSYM5 para comparação de resultados. Os resultados obtidos pelo BISAR e pelo ELSYM5 podem ser consultados no anexo VI.

Como se pode observar na figura 4.9, no primeiro separador do programa Bisar deve ser preenchido com informação referente à carga usada no ensaio FWD. A carga vertical utilizada no ensaio foi de 65 kN e o raio da placa foi de 0,15m. O centro da placa coincide com o ponto (0,0).

Load Number	Vertical Load (kN)	Radius (m)	X Coordinate (m)	Y Coordinate (m)	Horizontal Load (kN)	Shear Direction (degr.)
1	65,000	0,1500	0,0000	0,0000	0,000	0,0

Figura 4.9- Introdução dos dados referentes ao separador Loads no Bisar

O segundo separador refere-se às camadas do pavimento. É necessário indicar as espessuras, os coeficientes de Poisson e os módulos de deformabilidade para cada camada (ver Figura 4.10). No programa Bisar, a introdução de camadas finas com espessura inferior a 5 cm pode dar origem à obtenção de valores do módulo de deformabilidade menos precisos. Para evitar essa situação optou-se por juntar as camadas de betão betuminoso drenante e betão betuminoso, ficando a primeira camada com 0,09 m de espessura.

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio
1	0,090	1,00E+04	0,35
2	0,150	1,20E+04	0,35
3	0,300	2,60E+02	0,35
4	2,500	1,00E+02	0,40
5		2,10E+02	0,40

Figura 4.10- Introdução dos dados referentes ao separador Layers no Bisar.

No terceiro separador foi necessário introduzir as coordenadas dos pontos para os quais se pretende que o programa calcule as deflexões (ver Figura 4.11). Estas coordenadas correspondem às posições dos geofones no ensaio de carga.

Position Number	X Coordinate (m)	Y Coordinate (m)	Z (depth) Coordinate (m)	Layer No
1	0,0000	0,0000	0,0000	1
2	0,3000	0,0000	0,0000	1
3	0,4500	0,0000	0,0000	1
4	0,6000	0,0000	0,0000	1
5	0,9000	0,0000	0,0000	1
6	1,2000	0,0000	0,0000	1
7	1,5000	0,0000	0,0000	1
8	1,8000	0,0000	0,0000	1
9	2,1000	0,0000	0,0000	1

Figura 4.11- Introdução dos dados referentes ao separador Positions no Bisar

O preenchimento dos 3 separadores completa a introdução dos dados no programa. As deflexões calculadas pelo programa para o conjunto de dados introduzidos correspondem aos deslocamentos verticais UZ. Com as deflexões obtidas (UZ) criou-se um defletograma de cálculo que foi comparado ao defletograma característico (ver Figura 4.12).

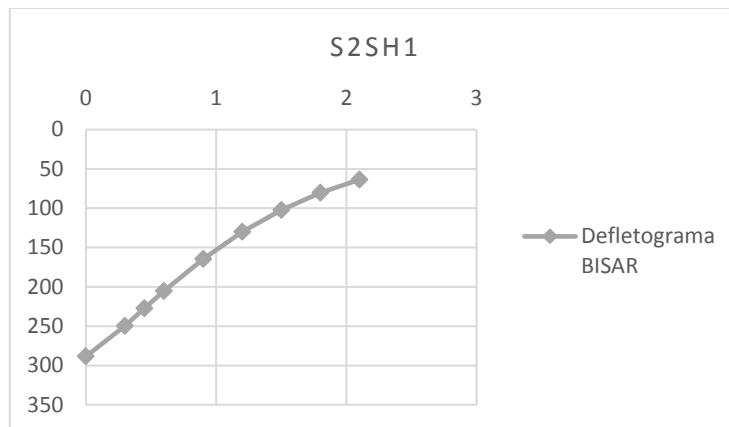


Figura 4.12- Exemplo de um defletograma obtido para o S2SH1

Iniciou-se o processo iterativo considerando-se o solo de fundação com espessura infinita, o que dificultou a obtenção de módulos de deformabilidade aceitáveis para a fundação. Uma vez que as deflexões dos últimos geofones são muito baixas, houve a necessidade de aumentar os módulos de deformabilidade do solo de tal maneira que se concluiu que havia necessidade de considerar uma camada rígida.

Na segunda abordagem, já com camada rígida, foi necessário determinar a que profundidade deveria ser considerada. Segundo Correia, J. (2014), “Caso exista uma camada rígida no modelo, nenhuma deflexão será medida à superfície do pavimento, a partir da distância à aplicação da carga correspondente à interseção da zona de tensões com a camada rígida. Desta forma a distância à placa rígida para o qual a deflexão superficial é zero pode ser correlacionada com a distância em profundidade à camada rígida.”

Assim, uma vez que nesta camada as deflexões se podem considerar nulas, recorreu-se a uma folha de cálculo para a obtenção, por secção considerada, da linha de tendência polinomial que melhor se ajusta aos valores das deflexões e localização dos geofones. O valor da profundidade da camada rígida é obtido fazendo a deflexão igual a 0 na equação da linha de tendência.

Esta abordagem levantou problemas ao nível dos módulos de deformabilidade a adotar para as camadas betuminosas. Efetuaram-se várias tentativas de atribuição de módulos de deformabilidade tendo-se concluído que os valores das deflexões se aproximavam dos valores característicos para valores de E das camadas betuminosas da ordem do 15 000 MPa e valores de 1 000 MPa da camada rígida. Uma vez que os valores dos módulos de deformabilidade das camadas betuminosas se demonstraram muito elevados foi necessário proceder a mais uma tentativa.

Na última tentativa considerou-se que, os módulos de deformabilidade do solo de fundação iam aumentando. Assim, para a profundidade da camada rígida calculada anteriormente, os módulos de deformabilidade tiveram valores mais baixos que os valores usuais das camadas rígidas (ver Tabelas 4.32 e 4.33).

Tabela 4.32- Módulos de deformabilidade obtidos com recurso ao Bisar para o sentido 1 (CE1)

Secção homogénea	Módulos de Deformabilidade (MPa) BISAR				
	BBD+BB	MB	ABGE	Fundação	Camada rígida
SH1	10000	12000	260	(Espessura-2,5m) 100	210
SH2	11000	13000	390	(Espessura- 3,0 m) 150	300
SH3	11000	13000	287	(Espessura -2,5m) 110	1500
SH4	11000	13000	365	(Espessura -2,5m) 140	1000

Tabela 4.33- Módulos de deformabilidade obtidos com recurso ao Bisar para o sentido 2 (CE1)

Secção homogénea	Módulos de Deformabilidade (MPa) BISAR				
	BBD+BB	MB	ABGE	Fundação	Camada rígida
SH1	10000	12000	234	(Espessura-2.5m) 90	200
SH2	11000	13000	390	(Espessura- 3m) 150	300
SH3	12000	13500	365	(Espessura-2.5m) 140	450

e) *Correção dos módulos de deformabilidade.*

Como referido no ponto 3.3, foi necessário proceder à correção dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas uma vez que os valores obtidos com o Bisar correspondem a módulos de deformabilidade à temperatura de ensaio, temperatura esta que difere da temperatura de serviço adotada no dimensionamento. A temperatura de serviço foi facultada, correspondendo a 21,3°C.

Durante o ensaio FWD foram registadas as temperaturas do ar, da superfície do pavimento e a hora a que estas medições foram realizadas (ver tabelas 4.34 e 4.39). Como se pode constatar, as temperaturas de ensaio são mais baixas que a temperatura de serviço, esperando-se uma diminuição dos módulos de deformabilidade após a correção da temperatura.

Utilizou-se a fórmula (3.17) do LNEC para efetuar esta correção. Para possibilitar a utilização desta fórmula foi necessário calcular a temperatura de ensaio em profundidade, especificamente a meia espessura para cada camada betuminosa. Como não havia informação sobre a média da temperatura do ar no dia anterior à campanha, necessária para aplicação da fórmula (3.18) de Bells, esta temperatura em profundidade foi determinada usando a fórmula (3.19) de Park.

Nas Tabelas 4.35 a 4.43 são apresentados os resultados dos cálculos efetuados para a correção dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas.

Tabela 4.34- Temperaturas do ar, da superfície do pavimento e hora a que as medições foram realizadas durante o ensaio FWD, sentido 1 (CE1)

Secção homogénea	Pk (km)	Hora	Temperatura do ar (°C)	Temperatura à sup. Pavimento (°C)
SH1	2+600	10:28:34	13,9	15,2
SH2	4+400	10:45:19	13,7	15,6
SH3	9+000	11:28:50	17,6	16,8
SH4	9+900	11:37:01	17,7	16,2

Tabela 4.35- Profundidade à qual se pretende determinar a temperatura (cm), sentido 1 (CE1)

Camada betuminosa	Espessura da camada (cm)	d (a temperatura T _d da camada betuminosa calcula-se a meia espessura da camada)(cm)
BBD+BB	9	4,5
MB	15	16,5

Para o cálculo da temperatura à profundidade foi necessário converter a hora para hora decimal e esta para dias, sendo que um dia (24 horas) corresponde a 1.

Tabela 4.36- Horário em que a temperatura da superfície do pavimento foi medida (dias), sentido 1 (CE1)

Secção homogénea	Hora	Decimal	t _d
SH1	10:28:34	10,48	0,44
SH2	10:45:19	10,76	0,45
SH3	11:28:50	11,48	0,48
SH4	11:37:01	11,62	0,48

Tabela 4.37- Temperatura das camadas betuminosas, sentido 1 (CE1)

Secção homogénea	T _d BBD+BB (°C)	T _d MB(°C)
SH1	13,6	8,96
SH2	13,9	8,9
SH3	14,8	9,2
SH4	14,2	8,5

Para o cálculo dos módulos de deformabilidade à temperatura de serviço foi necessário, com recurso à equação (3.17) do LNEC, calcular os módulos de deformabilidade à temperatura de referência de 20°C, sendo que o ET corresponde aos módulos de deformabilidade calculados por retro-análise e o T à temperatura em profundidade de cada camada.

Para determinar os ET (21,3°C), recorre-se novamente à expressão do LNEC considerando o valor obtido para E (20°C) a temperatura de projeto T igual a 21,3°C.

Tabela 4.38- Módulos de deformabilidade à temperatura de referência de 20°C à temperatura de serviço de 21,3°C, sentido 1 (CE1)

Secção homogénea	E20°C (MPa)		E21,3°C (MPa)	
	BBD+BB	MB	BBD+BB	MB
SH1	8 302	8 882	7 968	8 525
SH2	9 202	9 617	8 832	9 231
SH3	9 442	9 679	9 062	9 290
SH4	9 281	9 512	8 908	9 130

A correção dos módulos de deformabilidade para o sentido 2 foi efetuada segundo o descrito para o sentido 1.

Tabela 4.39- Temperaturas do ar, da superfície do pavimento e hora a que as medições foram realizadas durante o ensaio FWD, para o sentido 2 (CE1)

Secção homogénea	Pk (km)	Hora	Temperatura do ar (°C)	Temperatura à sup. Pavimento (°C)
Z1	2+500	11:35:22	17,7	15,2
Z2	3+700	11:14:16	15,5	15,5
Z3	8+700	10:22:35	13,6	13,2

Tabela 4.40- Profundidade à qual se pretende determinar a temperatura (cm), sentido 2 (CE1)

Camada betuminosa	Espessura da camada (cm)	d (a temperatura Td da camada betuminosa calcula-se a meia espessura da camada)(cm)
BBD+BB	9	4,5
MB	15	16,5

Tabela 4.41- Horário em qua a temperatura da superfície foi medida (dias), sentido 2 (CE1)

Secção homogénea	Hora	Decimal	td
SH1	11:35:22	11,59	0,48
SH2	11:14:16	11,24	0,47
SH3	10:22:35	10,38	0,43

Tabela 4.42- Temperatura das camadas betuminosas, sentido 2 (CE1)

Secção homogénea	T _d BBD+BB (°C)	T _d MB (°C)
SH1	13,2	7,5
SH2	13,6	8,2
SH3	11,6	7,1

Tabela 4.43- Módulos de deformabilidade à temperatura de referência de 20°C e módulos de deformabilidade corrigidos para a temperatura de serviço, sentido 2 (CE1)

Secção homogénea	E20°C (MPa)		E21,3°C (MPa)	
	BBD+BB	MB	BBD+BB	MV
SH1	8 219,10	8 586,96	7 889	8 242
SH2	9 136,98	9 451,93	8 770	9 072
SH3	9 473,57	9 578,95	9 093	9 194

Quanto ao módulo de deformabilidade do solo de fundação, este não foi alvo de correções, uma vez que o ensaio se realizou num período considerado húmido (mais desfavorável do ponto de vista da humidade).

f) *Análise estrutural.*

A verificação à fadiga e à deformação permanente apenas foram efetuadas para a secção homogénea mais crítica de cada sentido. Para o sentido 1 a secção homogénea mais crítica foi a SH1 e para o sentido 2 foi igualmente a SH1.

Para a obtenção da extensão radial de tração associada ao critério de fadiga e a extensão vertical de compressão associada ao critério de deformação permanente, foi utilizado o programa de cálculo Bisar.

No separador referente às cargas foi escolhida a opção “use standard dual wheel?” para representar a carga que os pneus de um veículo pesado provocam no pavimento (ver Figura 4.13).

Load Number	Vertical Load (kN)	Radius (m)	X Coordinate (m)	Y Coordinate (m)	Horizontal Load (kN)	Shear Direction (degr.)
1	20,000	0,1050	0,0000	-0,1575	0,000	0,0
2	20,000	0,1050	0,0000	0,1575	0,000	0,0

Figura 4.13- Introdução dos dados referentes ao separador Loads no Bisar para realização da análise estrutural

No separador “layers” foram inseridos os valores corrigidos dos módulos de deformabilidade, os coeficientes de Poisson e as espessuras de cada camada do pavimento.

No separador “positions” foram inseridas as coordenadas para as quais se pretende calcular as extensões (ver Figura 4.14). O ponto onde foi determinada a extensão de tração situa-se 1 mm acima do limite inferior da camada de base e o ponto onde foi calculada a extensão de compressão localiza-se 1 mm abaixo do limite inferior da última camada granular, tal como mostra a seguinte figura.

Loads Layers **Positions**

Select Positions for Standard Dual Wheel

Save Retrieve

No of Position Entries (1-10): 2

Position Number	X Coordinate (m)	Y Coordinate (m)	Z (depth) Coordinate (m)	Layer No
1	0,0000	0,0000	0,2390	2
2	0,0000	0,0000	0,5410	4

Figura 4.14- Introdução dos dados referentes ao separador Positions no Bisar para cálculo automático das extensões

Dos resultados obtidos, a extensão de tração corresponde ao “strain XX” e a extensão de compressão corresponde ao “strain ZZ” (ver Tabela 4.44).

Tabela 4.44- Extensão de tração (strain XX) e extensão de compressão (strain ZZ) obtidos pelo BISAR para o S2SH1

Strain	Strain	Strain
XX	YY	ZZ
µstrain	µstrain	µstrain
5,322E+01	3,222E+01	-4,835E+01
5,116E+01	4,652E+01	-1,270E+02

Com recurso às expressões (3.20) e (3.22) propostas pela Shell calculou-se o número de eixos-padrão de 80 kN admissível. Com este valor e o número de eixos padrão de dimensionamento calculou-se o dano. Este dano foi primeiramente calculado para o pavimento existente que indicou sobredimensionamento, não sendo por isso necessário intervir no pavimento de forma estrutural. Nas tabelas 4.45 e 4.46 são apresentados os resultados dos cálculos do número de eixos-padrão de 80 kN admissível e a percentagem de dano para os dois sentidos.

Tabela 4.45- Verificação à fadiga, sentido 1 e 2 (CE1)

	Verificação à fadiga- Sentido 1		Verificação à fadiga- Sentido 2
	Com camada rígida	Sem camada rígida	Sem camada rígida
ϵ_t (BISAR)	0,00005208	0,00005213	0,00005322
E da mistura betuminosa onde se dá ϵ_t (MPa)	8525000000	8525000000	8242000000
N_{adm}	3,51E+08	3,50E+08	3,35E+08
N_{dim} (10 anos)	1,36E+07	1,36E+07	1,36E+07
N_{dim} (15 anos)	2,17E+07	2,17E+07	2,17E+07
Dano (10 anos)	3,9%	3,9%	4,1%
Dano (15 anos)	6,2%	6,2%	6,5%

Tabela 4.46- Verificação à deformação permanente, sentido 1 e 2 (CE1)

	Verificação à deformação permanente- Sentido 1		Verificação à deformação permanente- Sentido 2
	Com camada rígida	Sem camada rígida	Sem camada rígida
$\epsilon_z(\text{Bisar})$	0,0001257	0,0001256	0,000127
N_{adm}	4,20E+08	4,22E+08	4,04E+08
K_s	0,018	0,018	0,018
Dano (10 anos)	3,2%	3,2%	3,4%
Dano (15 anos)	5,2%	5,1%	5,4%

4.2.2 Caso de estudo 2

a) Campanha de ensaios.

Os dados concedidos para o estudo da caracterização da capacidade estrutural foram obtidos por ensaios não destrutivos realizados com defletómetro de impacto.

Estes ensaios foram executados numa extensão de 6,5 km, na via da direita, nos dois sentidos de circulação e no mês de Julho de 2014. Neste caso prático não foi fornecida a localização da auto-estrada.

As características do defletómetro de impacto usadas no ensaio foram as mesmas que no caso de estudo anterior e podem ser consultadas na Tabela 4.25.

Foi necessário normalizar as deflexões facultadas (ver anexo III).

b) Divisão do troço em secções de comportamento estrutural homogéneo.

A divisão do troço para cada sentido foi realizada pelo método mais recente das diferenças acumuladas proposto pela AASHTO (1993) (ver Figuras 4.15 e 4.16). No anexo IV podem ser consultadas as tabelas de cálculo para a determinação das secções homogéneas por este método.

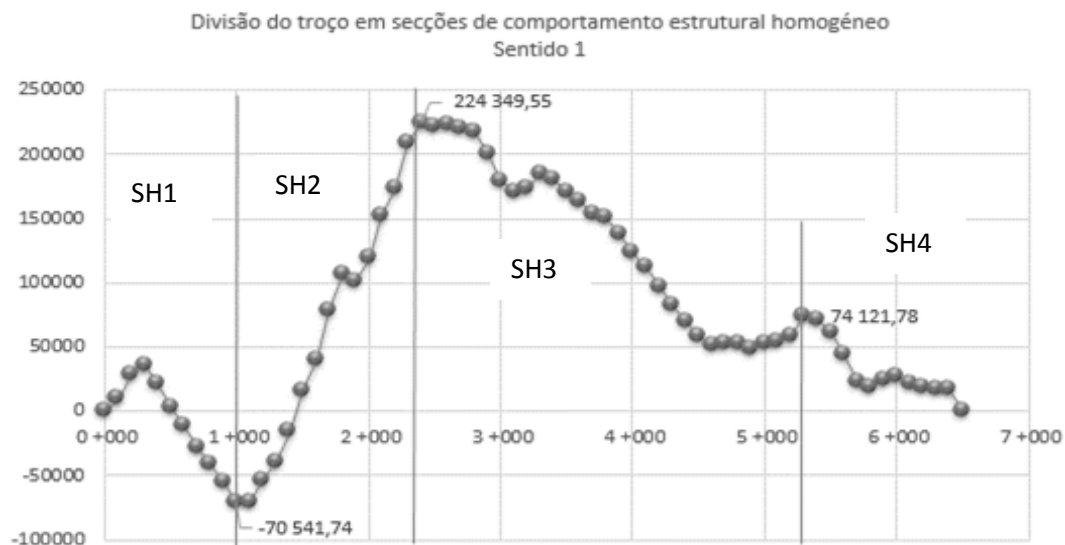


Figura 4.15- Divisão do troço em secções de comportamento homogéneo para o sentido 1 (CE2)

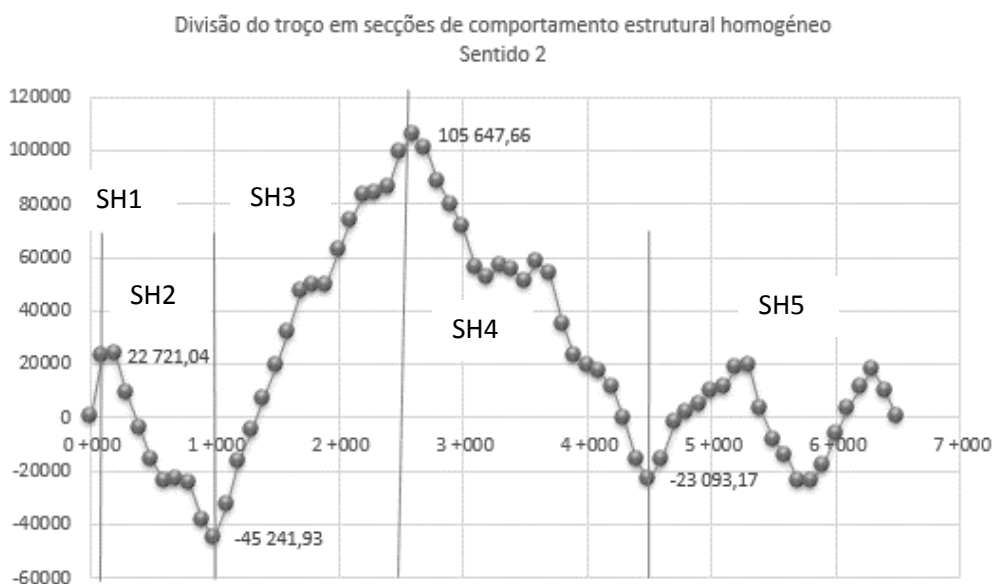


Figura 4.16- Divisão do troço em secções de comportamento homogéneo para o sentido 2 (CE2)

Os critérios usados para a divisão do troço foram análogos aos usados no caso de estudo anterior. Foram identificadas 4 secções homogéneas na via da direita-sentido 1 e 5 secções homogéneas na via da direita-sentido 2.

O grau de homogeneidade foi avaliado com recurso à determinação do coeficiente de variação das deflexões (COV), encontrando-se, na generalidade, entre 20 e 30% (homogeneidade moderada) (ver Tabela 4.47).

Tabela 4.47- Coeficiente de variação das deflexões (CE2)

	Secções Homogéneas	COV (%)
Sentido 1	SH1	27,8
	SH2	22,7
	SH3	21,1
	SH4	28,2
Sentido 2	SH1	6,0
	SH2	23,1
	SH3	17,7
	SH4	26,5
	SH5	24,2

c) *Defletograma característico.*

Nas tabelas 4.48 e 4.49 podem ser consultadas as deflexões correspondentes ao percentil 85 para o sentido 1 e 2 respetivamente.

Tabela 4.48- Deflexões correspondentes ao percentil 85 para o sentido 1 (CE2)

Sentido 1									
Secção homogénea	Percentil 85								
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
SH1	695,80	378,19	294,14	227,78	134,52	75,24	46,97	35,96	23,52
SH2	1051,6	492,5	388,0	299,1	172,5	111,6	76,8	57,2	45,1
SH3	691,4	332,7	259,7	206,2	122,7	72,7	44,0	32,4	23,9
SH4	623,9	322,2	263,4	210,5	134,4	86,1	56,0	38,1	29,2

Tabela 4.49- Deflexões correspondentes ao percentil 85 para o sentido 2 (CE2)

Sentido 2									
Secção homogénea	Percentil 85								
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
SH1	713,5	488,6	367,5	269,5	134,1	72,7	42,6	28,4	20,8
SH2	472,5	346,3	262,0	183,7	92,6	56,8	39,7	31,6	24,5
SH3	621,3	449,5	366,1	274,6	177,2	114,2	77,8	58,0	44,3
SH4	495,7	338,9	265,9	201,5	117,8	71,6	46,8	36,3	26,0
SH5	597,0	393,0	290,1	220,7	130,3	79,6	49,9	34,4	26,1

De seguida são apresentados os defletogramas reais (característicos) que mais se aproximam dos defletogramas correspondentes ao percentil 85, para cada sentido (ver Tabelas 4.50 e 4.51).

Tabela 4.50- Deflexões características para o sentido 1 (CE2)

Sentido 1										
Secção homogénea	Deflexão Característica									PK (km)
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	
SH1	603,11	276,67	236,61	190,88	124,18	78,64	51,81	40,15	23,70	0+000
SH2	1094,11	493,13	374,14	286,79	170,77	109,31	74,12	54,56	42,86	2+000
SH3	714,66	323,98	260,70	207,78	124,92	74,82	45,45	32,95	21,90	3+300
SH4	616,60	328,72	269,44	216,92	136,99	84,76	51,46	32,63	21,05	5+800

Tabela 4.51- Deflexões características para o sentido 2 (CE2)

Sentido 2										
Secção homogénea	Deflexão Característica									PK (km)
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	
SH1	722,3	492,1	374,1	276,7	139,9	77,4	46,1	30,9	23,0	0+00
SH2	491,1	358,2	272,5	194,5	114,0	68,9	44,8	38,5	32,0	1+000
SH3	590,9	451,3	369,8	292,7	183,3	114,4	71,4	48,5	35,8	1+300
SH4	517,0	343,4	257,9	193,3	111,5	66,4	42,6	35,2	25,8	3+200
SH5	578,4	359,5	271,7	205,7	121,7	77,1	49,2	33,7	24,2	4+700

d) Determinação dos módulos de deformabilidade.

A determinação dos módulos de deformabilidade realizou-se com recurso ao programa de cálculo automático Bisar (ver Tabelas 4.52 e 4.53).

Tabela 4.52- Módulos de deformabilidade obtidos com recurso ao Bisar para o sentido 1 (CE2)

Secção homogénea	Módulos de Deformabilidade (MPa) BISAR					RMS (%)
	BBD+BB	MB	ABGE	Fundação	Camada rígida	
SH1	1200	900	260	(Espessura-2,5m) 100	3000	7,4
SH2	400	350	208	(Espessura-2,5m) 80	450	7,9
SH3	600	500	273	(Espessura -2,5m) 105	3000	6,2
SH4	800	700	273	(Espessura -2,5m) 105	3000	7,2

Tabela 4.53- Módulos de deformabilidade obtidos com recurso ao Bisar para o sentido 2 (CE2)

Secção homogénea	Módulos de Deformabilidade (MPa) BISAR					RMS (%)
	BBD+BB	MB	ABGE	Fundação	Camada rígida	
SH1	400	500	234	(Espessura-2m) 90	1000	17,0
SH2	700	800	273	(Espessura-2,5m) 105	3000	16,8
SH3	1100	1000	208	(Espessura -3m) 80	3000	9,9
SH4	900	900	287	(Espessura -2,5m) 110	3500	12,0
SH5	1000	900	247	(Espessura -2,5m) 95	1500	8,0

Neste caso de estudo houve dificuldade em obter um RMS inferior a 10%, nomeadamente no sentido 2.

Os defletogramas obtidos pelo BISAR podem ser consultados no anexo VI.

e) Correção dos módulos de deformabilidade.

Para esta correção foram registadas durante o ensaio FWD as temperaturas do ar, da superfície do pavimento e a hora a que estas medições foram realizadas (ver Tabelas 4.54 e 4.57).

A fórmula utilizada para a correção dos módulos de deformabilidade das camadas betuminosas devido ao efeito da temperatura foi a proposta pelo LNEC (3.17) (ver Tabela 4.56 e 4.59). Como no caso de estudo anterior, foi necessário calcular a temperatura de ensaio em profundidade usando a fórmula (3.19) de Park (2001) (ver Tabelas 4.55 e 4.58).

A temperatura de serviço fornecida foi de 22,2°C.

Tabela 4.54- Temperaturas do ar, da superfície do pavimento e hora a que as medições foram realizadas durante o ensaio FWD para o sentido 1 (CE2)

Secção homogénea	Pk (km)	Hora	Temperatura do ar (°C)	Temperatura à sup. pavimento (°C)
SH1	0+00	09:11:59	28,1	26,7
SH2	2+000	09:32:11	39,1	26,5
SH3	3+300	09:43:52	29,0	27,3
SH4	5+800	10:06:11	27,6	26,6

Tabela 4.55- Temperatura das camadas betuminosas, sentido 1 (CE2)

	T _d BBD+BB (°C)	T _d MB (°C)
SH1	25,8	22,79
SH2	25,5	21,9
SH3	26,2	22,3
SH4	25,3	21,0

Tabela 4.56- Módulos de deformabilidade à temperatura de referência de 20°C e módulos de deformabilidade corrigidos para a temperatura de serviço, sentido 1 (CE2)

Secção homogénea	E20°C (MPa)		E22,2°C (MPa)	
	BBD+BB	MB	BBD+BB	MB
SH1	1 470	986	1 369	918
SH2	483	372	450	347
SH3	745	540	694	503
SH4	962	722	896	672

Tabela 4.57- Temperaturas do ar, da superfície do pavimento e hora a que as medições foram realizadas durante o ensaio FWD para o sentido 2 (CE2)

Secção Homogénea	Pk (km)	Hora	Temperatura do ar (°C)	Temperatura à sup. Pavimento (°C)
SH1	0+000	08:53:52	27,7	25,3
SH2	1+000	09:04:07	27,7	25,3
SH3	1+300	09:06:53	27,9	25,6
SH4	3+200	09:26:30	29,6	28,5
SH5	4+700	09:42:55	29,3	26,5

Tabela 4.58- Temperatura das camadas betuminosas, sentido 2 (CE2)

	T _d BBD+BB (°C)	T _d MB (°C)
SH1	24,6	22,0
SH2	24,5	21,7
SH3	24,8	21,9
SH4	27,5	24,1
SH5	25,4	21,6

Tabela 4.59- Módulos de deformabilidade à temperatura de referência de 20°C e módulos de deformabilidade corrigidos para a temperatura de serviço, sentido 2 (CE2)

Secção homogénea	E20°C (MPa)		E22,2°C (MPa)	
	BBD+BB	MB	BBD+BB	MB
SH1	467,05	533,49	435	497
SH2	814,92	843,41	759	785
SH3	1 293,89	1 061,53	1 205	989
SH4	1 179,69	1 033,36	1 099	962
SH5	1 204,74	946,37	1 122	881

f) *Análise estrutural.*

De seguida apresentam-se as verificações à fadiga e à deformação permanente e os respetivos danos, determinados com recurso ao programa Bisar, para as secções homogéneas mais críticas de cada sentido. Para o sentido 1 a secção homogénea mais crítica foi a SH2 e para o sentido 2 foi a SH1 (ver Tabelas 4.60 a 4.61).

Tabela 4.60- Verificação à fadiga, sentido 1 e 2 (CE2)

	Verificação à fadiga- Sentido 1	Verificação à fadiga- Sentido 2
ϵ_t (BISAR)	0,0002537	0,0002098
E da mistura betuminosa onde se dá ϵ_t (MPa)	347000000	496820000
N _{adm}	4,08E+07	5,52E+07
N _{dim} (10 anos)	3,24E+07	3,24E+07
N _{dim} (15 anos)	5,11E+07	5,11E+07
Dano (10 anos)	79,5%	58,6%
Dano (15 anos)	125,4%	92,6%

Tabela 4.61- Verificação à deformação permanente, sentido 1 e 2 (CE2)

	Verificação à deformação permanente- Sentido 1	Verificação à deformação permanente- Sentido 2
ϵ_z (Bisar)	0,000397	0,0003562
N_{adm}	4,23E+06	6,52E+06
K_s	0,018	0,018
Dano (10 anos)	766,6%	496,8%
Dano (15 anos)	1209,8%	784,0%

Perante os valores de dano obtidos, pode-se concluir que o pavimento necessita de uma intervenção por motivos estruturais, uma vez que os danos, nomeadamente à deformação permanente, são superiores a 100%.

g) Cálculo da espessura do reforço.

Primeiramente foi necessário determinar o módulo de deformabilidade da mistura betuminosa a usar na camada de reforço. As misturas escolhidas para a camada de reforço foram o Betão Betuminoso com ligante 50/70 e a Mistura Betuminosa de Alto Módulo com ligante 10/20. Para o cálculo de E foram utilizadas as expressões propostas pela Shell.

O cálculo da rigidez do betume foi efetuado com recurso à expressão (3.25) e as propriedades e exigências do betume escolhido foram consultadas no caderno de encargos 14.03, referente à pavimentação, da Infraestruturas de Portugal (IP) (ver Tabela 4.62).

O cálculo do módulo de deformabilidade do Betão Betuminoso 50/70 (ver Tabela 4.63), para valores da rigidez do betume entre 5 e 1000 MPa, foi determinado com recurso à expressão (3.30), consultando novamente as propriedades e exigências apresentadas no caderno de encargos 14.03 da IP.

Tendo o módulo de deformabilidade da mistura betuminosa, foi calculada a espessura da camada de reforço necessária.

Com recurso à utilização do programa de cálculo Bisar, fez-se variar a espessura desta camada até se obter uma percentagem de dano compreendida entre 80 e 100% (ver Tabelas 4.64 a 4.66).

Assim, para o sentido 1, seção homogénea 2, obteve-se uma espessura de reforço necessária de 9 cm para 10 anos e 11 cm para 15 anos (ver Tabela 4.64).

Tabela 4.62- Cálculo da rigidez do betume para a camada de reforço de BB, sentido 1 e 2 (CE2)

Tipo de betume	50/70
pen25 - penetração a 25°C	60
Tab - temperatura de amolecimento determinada pelo método do anel e bola (°C)	50
vt- velocidade média da corrente do tráfego de pesados (km/h)	50
tc - tempo de carregamento (s)	0,02
pen25r	39
Tabr	57,2
IPen - índice de penetração do betume	-0,162
Temperatura de serviço (°C)	22,2
Sb- rigidez do betume 50/70 (MPa)	30,17

Tabela 4.63- Cálculo do módulo de deformabilidade da camada de reforço em BB 50/70, sentido 1 e 2 (CE2)

γ_a - peso específico do agregado (kN/m ³)	26
γ_b - peso específico do betume (kN/m ³)	10,4
tb- percentagem de betume	5
n- porosidade (%)	5
Vb	10,56%
Va	84,44%
Sm108	10,16
Sm3109	10,60
S68	0,64
S89	0,34
A	9,823
E (BB 50/70) (MPa)	6648,26

Tabela 4.64- Estrutura do pavimento com camada de reforço em BB, sentido 1 (CE2)

	Espessura (m)	Módulos de deformabilidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
Reforço BB 50/70	0,09 (10 anos) 0,11 (15 anos)	6648,26	0,35
BBD+BB	0,08	450	0,35
MB	0,17	347	0,35
ABGE	0,3	208	0,30
Fundação	2,5	80	0,35

Tabela 4.65- Verificação à fadiga pelo método da Shell com a nova camada de reforço em BB 50/70, sentido 1 (CE2)

Período de dimensionamento- 10 anos		Período de dimensionamento- 15 anos	
ϵt (BISAR)	0,0001227	ϵt (BISAR)	0,0001043
E da mistura betuminosa onde se dá ϵt (MPa)	347000000	E da mistura betuminosa onde se dá ϵt (MPa)	347000000
N_{adm}	1,54E+09	N_{adm}	3,47E+09
N_{dim}	3,24E+07	N_{dim}	5,11E+07
Dano	2,1%	Dano	1,47%

Tabela 4.66- Verificação à deformação permanente pelo método da Shell com a nova camada de reforço em BB 50/70, sentido 1 (CE2)

Período de dimensionamento 10 anos		Período de dimensionamento 15 anos	
ϵz (Bisar)	0,0002356	ϵz (Bisar)	0,0002118
N_{adm}	3,41E+07	N_{adm}	5,22E+07
K_s	0,018	K_s	0,018
Dano	95,1%	Dano	98,0%

Foram ainda calculadas, para comparação, as espessuras de reforço necessárias para as restantes seções homogéneas do sentido 1 (ver Tabela 4.67). Neste cálculo não foi considerada a limitação referente à consideração de camadas finas no Bisar (espessuras inferiores a 5 cm).

Tabela 4.67- Espessura da camada de reforço em BB 50/70 necessária para as secções menos críticas, sentido 1 (CE2)

Secção Homogénea	Espessura de reforço BB 50/70 (cm)	
	10 anos	15 anos
SH1	1	3
SH3	4	5
SH4	3	4

Para o sentido 2, seção homogénea 1, e para este tipo de mistura betuminosa, obteve-se uma espessura de reforço necessária de 7 cm para 10 anos e 9 cm para 15 anos (ver Tabela 4.68 a 4.70).

Tabela 4.68- Estrutura do pavimento com camada de reforço de BB, sentido 2 (CE2)

	Espessura (m)	Módulos de deformabilidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
Reforço BB 50/70	0,07 (10 anos) 0,09 (15 anos)	6648,26	0,35
BBD+BB	0,08	434,94	0,35
MB	0,17	496,82	0,35
ABGE	0,3	234	0,30
Fundação	2,5	90	0,35

Tabela 4.69- Verificação à fadiga pelo método da Shell com a nova camada de reforço em BB 50/70, sentido 2 (CE2)

Período de dimensionamento- 10 anos		Período de dimensionamento- 15 anos	
ϵt (BISAR)	0,0001317	ϵt (BISAR)	0,0001118
E da mistura betuminosa onde se dá ϵt (MPa)	496820000	E da mistura betuminosa onde se dá ϵt (MPa)	496820000
N_{adm}	5,67E+08	N_{adm}	1,29E+09
N_{dim}	3,24E+07	N_{dim}	5,11E+07
Dano	5,7%	Dano	3,98%

Tabela 4.70- Verificação à deformação permanente pelo método da Shell com a nova camada de reforço em BB 50/70, sentido 2 (CE2)

Período de dimensionamento- 10 anos		Período de dimensionamento- 15 anos	
ϵz (Bisar)	0,0002308	ϵz (Bisar)	0,0002092
N_{adm}	3,70E+07	N_{adm}	5,48E+07
K_s	0,018	K_s	0,018
Dano (10 anos)	87,6%	Dano (15 anos)	93,3%

O cálculo do módulo de deformabilidade da Mistura Betuminosa de Alto Módulo com ligante 10/20 foi efetuado de forma igual ao caso anterior. Este cálculo pode ser consultado no anexo VII, tendo sido obtido um valor de E de 16962,42 MPa para esta mistura.

Para o sentido 1, SH2, obteve-se uma espessura de reforço de 7 cm para 10 anos e 9 cm para 15 anos. Os valores utilizados nos cálculos podem ser consultados nas tabelas 4.71 e 4.72.

Tabela 4.71- Verificação à fadiga pelo método da Shell com a nova camada de reforço em MBAM 10/20, sentido 1 (CE2)

Período de dimensionamento- 10 anos		Período de dimensionamento- 15 anos	
ϵt (BISAR)	0,0001224	ϵt (BISAR)	0,0000975
E da mistura betuminosa onde se dá ϵt (MPa)	347000000	E da mistura betuminosa onde se dá ϵt (MPa)	347000000
N_{adm}	1,56E+09	N_{adm}	4,86E+09
N_{dim}	3,24E+07	N_{dim}	5,11E+07
Dano	2,1%	Dano	1,05%

Tabela 4.72- Verificação à deformação permanente pelo método da Shell com a nova camada de reforço em MBAM 10/20, sentido 1 (CE2)

Período de dimensionamento- 10 anos		Período de dimensionamento- 15 anos	
ϵz (Bisar)	0,0002353	ϵz (Bisar)	0,0002042
N_{adm}	3,42E+07	N_{adm}	6,04E+07
K_s	0,018	K_s	0,018
Dano	94,6%	Dano	84,7%

Para o sentido 2, SH1 obteve-se uma espessura de reforço necessária de 5 cm para 10 anos e 7 cm para 15 anos. Os valores dos danos podem ser consultados nas tabelas 4.73 e 4.74.

Tabela 4.73- Verificação à fadiga pelo método da Shell com a nova camada de reforço em MBAM 10/20, sentido 2 (CE2)

Período de dimensionamento- 10 anos		Período de dimensionamento- 15 anos	
ϵ_t (BISAR)	0,000138	ϵ_t (BISAR)	0,0001098
E da mistura betuminosa onde se dá ϵ_t (MPa)	496820000	E da mistura betuminosa onde se dá ϵ_t (MPa)	496820000
N_{adm}	4,49E+08	N_{adm}	1,41E+09
N_{dim}	3,24E+07	N_{dim}	5,11E+07
Dano	7,2%	Dano	3,63%

Tabela 4.74- Verificação à deformação permanente pelo método da Shell com a nova camada de reforço em MBAM, sentido 2 (CE2)

Período de dimensionamento- 10 anos		Período de dimensionamento- 15 anos	
ϵ_z (Bisar)	0,000238	ϵ_z (Bisar)	0,0002103
N_{adm}	3,27E+07	N_{adm}	5,37E+07
Ks	0,018	Ks	0,018
Dano (10 anos)	99,0%	Dano (15 anos)	95,3%

4.2.3. Síntese

Para o primeiro estudo de caso concluiu-se que o pavimento, para ambos os sentidos, se encontrava sobredimensionado, não tendo sido necessário dimensionar camada de reforço.

No segundo caso de estudo foi verificado que o pavimento precisava de intervenção estrutural. Fazendo uma análise aos resultados obtidos constata-se que o sentido 1 necessita de uma espessura de camada de reforço superior que o sentido 2.

Comparando os materiais escolhidos para a camada de reforço, o Betão Betuminoso leva a camadas de espessura maiores que a Mistura Betuminosa de Alto Módulo (ver Figuras 4.17 e 4.18).

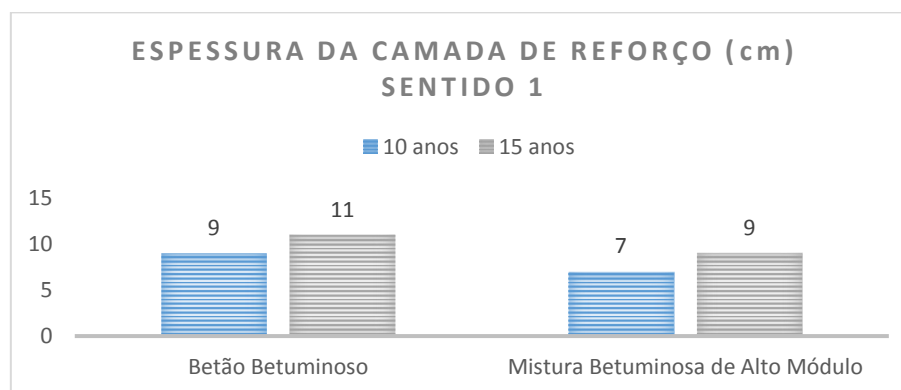


Figura 4.17- Espessura da cama de reforço (cm) determinada pelo método das deflexões reversíveis, sentido 1 (CE2)

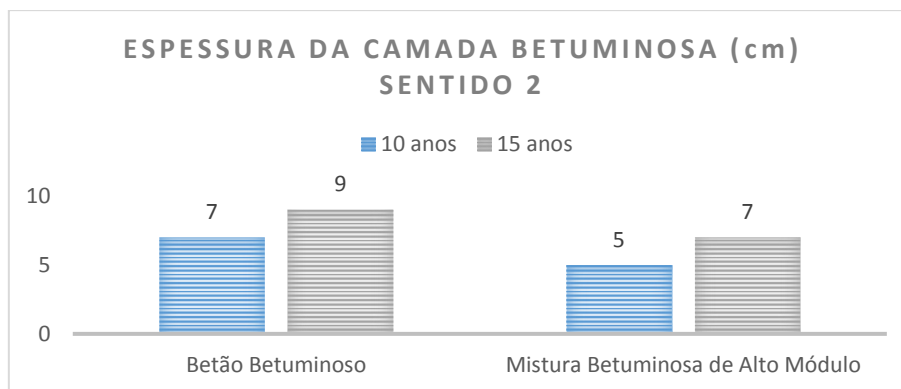


Figura 4.18- Espessura da cama de reforço (cm) determinada pelo método das deflexões reversíveis, sentido 2 (CE2)

4.3 Procedimento baseado na determinação dos fatores de carga

4.3.1 Caso de estudo 1

a) *Caracterização do pavimento existente.*

Como explicado no ponto 3.4, a primeira parte do procedimento baseia-se no método das deflexões reversíveis.

Assim, interessa rever os defletogramas característicos e as características mecânicas de cada camada constituinte do pavimento, já determinados no ponto anterior.

Irão ser abordadas apenas as secções homogêneas mais críticas identificadas para cada sentido. Para a aplicação deste método importam os valores de duas deflexões em particular, a deflexão máxima e a deflexão a 90 cm do centro da placa, obtidas por consulta do defletograma característico. Na tabela 4.75 são apresentados os valores das deflexões para as secções homogêneas 1 em ambos os sentidos.

Tabela 4.75- Deflexão máxima e deflexão a 90 cm do centro da placa, sentido 1 e 2 (CE1)

	G1 (0m)	G5 (0,9m)
Deflexão Característica (μm) Sentido 1 SH1	247,57	155,56
Deflexão Característica (μm) Sentido 2 SH1	272,60	169,60

Do método das deflexões reversíveis foi também retirada a informação dos módulos de deformabilidade dos materiais não ligados, uma vez que para os cálculos seguintes, as espessuras e as características mecânicas referentes a estes materiais serão as determinadas por retro-análise. Esta informação pode ser consultada na tabela 4.76.

Tabela 4.76- Módulos de deformabilidade dos materiais não ligados, sentido 1 e 2 (CE1)

Módulos de deformabilidade (MPa) Sentido 1 SH1	ABGE (0,3m)	260
	Fundação (2,5m)	100
	Camada Rígida	210
Módulos de deformabilidade (MPa) Sentido 2 SH1	ABGE (0,3m)	234
	Fundação (2,5m)	90
	Camada Rígida	200

b) *Dimensionamento do pavimento como se fosse novo.*

- Cálculo do tráfego solicitante

O cálculo do tráfego solicitante para dimensionamento do pavimento como se fosse novo é determinado para o período de dimensionamento do reforço (10 e 15 anos). Contudo, uma vez que os resultados obtidos anteriormente (ponto 4.1) apontam para a não necessidade de reforço, apenas se fez uma análise para 15 anos. Este cálculo já foi realizado na aplicação do método das espessuras efetivas, sendo o número de eixo-padrão de 80 kN de $2,17E+07$.

- Pré-dimensionamento do pavimento segundo o MADIPAV

Após acerto, a classe de tráfego para o caso em estudo corresponde a T4. Como o módulo de deformabilidade do solo de fundação é de 100 MPa no sentido 1 e de 90 MPa no sentido 2, a classe de plataforma corresponde a F3 para ambos os sentidos.

A estrutura de pavimento “tipo” usada foi BD+MB/MBD/SbG.

Uma vez que este método recomenda a manutenção da espessura dos materiais granulares, neste caso de 30 cm, e o MADIPAV não considera soluções para esta espessura de material granular, considera-se que 3 cm de mistura de betuminosa correspondem aos 10 cm que faltam à camada de sub-base. Assim, para efeitos de pré-dimensionamento, a espessura da mistura betuminosa determinada foi de 18 cm (21-3).

- Determinação das espessuras e características mecânicas das misturas betuminosas

Para determinação dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas foram utilizadas as expressões propostas pela Shell.

O cálculo da rigidez do betume foi efetuado através da aplicação da expressão (3.25) e as propriedades e exigências do betume escolhido foram consultadas no caderno de encargos 14.03, referente à pavimentação, da Infraestruturas de Portugal (ver Tabela 4.77).

Na Tabela 4.78 é apresentado um resumo dos principais resultados dos cálculos efetuados para a obtenção dos módulos de deformabilidade para cada camada constituinte do pavimento.

Tabela 4.77- Cálculo da rigidez do betume 50/70, sentido 1 e 2 (CE1)

Tipo de betume	50/70
pen25 - penetração a 25°C	60
Tab - temperatura de amolecimento (°C) determinada pelo método do anel e bola	50
vt- velocidade média da corrente do tráfego de pesados (km/h)	50
tc - tempo de carregamento (s)	0,02
pen25r	39
Tabr	57,2
IPen - índice de penetração do betume	-0,162
Temperatura de serviço (°C)	21,3
Sb- rigidez do betume (MPa)	34,26

Tabela 4.78- Cálculo dos módulos de deformabilidade de cada camada betuminosa constituinte do pavimento, sentido 1 e 2 (CE1)

Camada de betão betuminoso drenante		Camada de betão betuminoso		Camada de macadame betuminoso	
γ_a (kN/m ³)	26	γ_a (kN/m ³)	26	γ_a (kN/m ³)	26
γ_b (kN/m ³)	10,4	γ_b (kN/m ³)	10,4	γ_b (kN/m ³)	10,4
tb (%)	4,5	tb (%)	5	tb	4,5
n (%)	26	n (%)	4	n (%)	6
Vb	7,48%	Vb	10,67%	Vb	9,51%
Va	66,52%	Va	85,33%	Va	84,49%
Sm108	9,42	Sm108	10,20	Sm108	10,16
Sm3109	10,21	Sm3109	10,61	Sm3109	10,60
S68	0,56	S68	0,64	S68	0,61
S89	0,60	S89	0,32	S89	0,33
A	9,159	A	9,897	A	9,872
E (MPa)	1441	E (MPa)	7894 MPa	E (MPa)	7449 MPa

- Análise estrutural do novo pavimento

Seguidamente, foi necessário utilizar o programa Bisar para determinar a extensão radial de tração, associada ao critério de fadiga, e a extensão vertical de compressão, associada ao critério de deformação permanente.

O cálculo da espessura foi efetuado através de um processo iterativo, com a finalidade de obter um valor de dano entre os 80 e os 100% (ver Tabelas 4.79 a 4.82).

Para o sentido 1, a espessura de misturas betuminosa determinada foi de 18 cm, sendo 4 cm de BBd, 5 cm de BB e 9 cm de MB. Para o sentido 2, a espessura de misturas betuminosa determinada foi de 18,5 cm, sendo 4 cm de BBd, 5 cm de BB e 9,5 cm de MB. É preciso clarificar que não se usam “meios centímetros” na pavimentação contudo para o valor de 19 cm o dano

à fadiga apresentou uma percentagem um pouco mais baixa que 80%, tendo apenas sido efetuados arredondamentos na espessura final da camada de reforço.

Tabela 4.79- Verificação à fadiga pelo método da Shell, sentido 1 (CE1)

ϵ_t (BISAR)	0,00009293
E da mistura betuminosa onde se dá ϵ_t (MPa)	7448587816
N_{adm}	2,47E+07
N_{dim} (15 anos)	2,17E+07
Dano (15 anos)	87,61%

Tabela 4.80- Verificação à deformação permanente pelo método da Shell, sentido 1 (CE1)

ϵ_z (Bisar)	0,0002288
N_{adm}	3,83E+07
K_s	0,018
Dano (15 anos)	57%

Tabela 4.81- Verificação à fadiga pelo método da Shell, sentido 2 (CE1)

ϵ_t (BISAR)	0,00009349
E da mistura betuminosa onde se dá ϵ_t (MPa)	7448587816
N_{adm}	2,40E+07
N_{dim} (15 anos)	2,17E+07
Dano (15 anos)	90,28%

Tabela 4.82- Verificação à deformação permanente pelo método da Shell, sentido 2 (CE1)

ϵ_z (Bisar)	0,0002359
N_{adm}	3,39E+07
K_s	0,018
Dano (15 anos)	64%

- Deflexões do novo pavimento

Com as espessuras e as características mecânicas das camadas constituintes do pavimento determinadas nos passos anteriores, realizou-se uma simulação do ensaio FWD no programa Bisar para determinação da deflexão máxima e da deflexão a 90 cm do centro da placa (ver Tabela 4.83). Para a simulação do ensaio FWD foram consideradas as mesmas características da campanha de ensaios realizada.

Tabela 4.83- Deflexão máxima e deflexão a 90 cm do centro da placa do pavimento novo, sentido 1 e 2(CE1)

	G1 (0m)	G5 (0,9m)
Deflexões calculadas (μm) (BISAR) Sentido 1 SH1	450,9	167,3
Deflexões calculadas (μm) (BISAR) Sentido 2 SH1	472,1	183,4

c) Cálculo dos fatores de carga

O cálculo dos fatores de carga foi efetuado com recurso às fórmulas (3.43) e (3.44) (ver Tabela 4.84).

Tabela 4.84- Fatores de carga e f^* , sentido 1 e 2 (CE1)

Sentido 1		Sentido 2	
F_{novo}	309,1	F_{novo}	327,75
F_{cp}	201,566	F_{cp}	221,104
f^*	1,53	f^*	1,48

Perante os resultados obtidos pode-se concluir que, para ambos os sentidos, o pavimento não precisa de intervenção a nível estrutural.

4.3.2 Caso de estudo 2

a) Caracterização do pavimento existente.

Como referido, para este método importam os valores da deflexão máxima e da deflexão a 90 cm da placa retirados dos defletogramas característicos determinados no ponto anterior. Esta análise foi realizada para as secções mais críticas de cada sentido: para o sentido 1 a secção homogénea 2 e para o sentido 2 a secção homogénea 1 (ver Tabela 4.85).

Tabela 4.85- Deflexão máxima e deflexão a 90 cm do centro da placa, sentido 1 e 2 (CE2)

	G1 (0m)	G5 (0,9m)
Deflexão Característica (μm) Sentido 1 SH2	1094,11	170,77
Deflexão Característica (μm) Sentido 2 SH1	722,26	139,90

Na tabela 4.86 são apresentadas as espessuras e os módulos de deformabilidade dos materiais não ligados determinados por retro-análise no método das deflexões reversíveis, para cada sentido.

Tabela 4.86- Módulos de deformabilidade dos materiais não ligados, sentido 1 e 2 (CE2)

Módulos de deformabilidade (MPa) Sentido 1 SH2	ABGE (0,3m)	280
	Fundação (2,5m)	80
	Camada Rígida	450
Módulos de deformabilidade (MPa) Sentido 2 SH1	ABGE (0,3m)	234
	Fundação (2,5m)	90
	Camada Rígida	1000

b) *Dimensionamento do pavimento como se fosse novo.*

- Cálculo do tráfego solicitante

Este cálculo foi realizado no ponto 4.1, sendo o número de eixo-padrão de 80 kN de 3,24E+07 para 10 anos e de 5,11E+07 para 15 anos.

- Pré-dimensionamento do pavimento segundo o MADIPAV

A classe de tráfego para o caso em estudo corresponde a T3 e a classe de plataforma corresponde a F3, para ambos os sentidos.

Assim, a estrutura de pavimento “tipo” usada foi BD+MB/MBD+SbG do MADIPAV.

Foi determinada, para efeitos de pré-dimensionamento, uma espessura da mistura betuminosa de 21 cm, tendo sido feito, como no caso de estudo 1, a conversão de 3 cm de mistura betuminosa para 10 cm de material granular. Para efeitos de pré-dimensionamento, a espessura da mistura betuminosa determinada foi de 21 cm (24-3).

- Determinação das espessuras e características mecânicas das misturas betuminosas

Os módulos de deformabilidade das misturas betuminosas foram calculados usando as expressões propostas pela Shell e com recurso ao caderno de encargos 14.03, referente à pavimentação, da Infraestruturas de Portugal.

Na tabela 4.87 pode ser consultada a sequência de cálculo da rigidez do betume 50/70 para este caso de estudo.

Nas Tabelas 4.88 podem ser consultados os cálculos dos módulos de deformabilidade para cada camada constituinte do pavimento.

Tabela 4.87- Cálculo da rigidez do betume 50/70, sentido 1 e 2 (CE2)

Tipo de betume	50/70
pen25 - penetração a 25°C	60
Tab -temperatura de amolecimento (°C) determinada pelo método do anel e bola)	50
vt- velocidade média da corrente do tráfego de pesados (km/h)	50
tc - tempo de carregamento (s)	0,02
pen25r	39
Tabr	57,2
IPen - índice de penetração do betume;	-0,162
Temperatura de serviço (°C)	22,2
Sb- rigidez do betume (MPa);	30,17

Tabela 4.88- Cálculo dos módulos de deformabilidade de cada camada betuminosa constituinte do pavimento, sentido 1 e 2 (CE2)

Camada de betão betuminoso rugoso		Camada de betão betuminoso		Camada de macadame betuminoso	
γ_a (kN/m ³)	26	γ_a (kN/m ³)	26	γ_a (kN/m ³)	26
γ_b (kN/m ³)	10,4	γ_b (kN/m ³)	10,4	γ_b (kN/m ³)	10,4
tb	5	tb	5	tb	4,5
n (%)	4,5	n (%)	4	n (%)	6
Vb	10,61%	Vb	10,67%	Vb	9,51%
Va	84,89%	Va	85,33%	Va	84,49%
Sm108	10,18	Sm108	10,20	Sm108	10,16
Sm3109	10,61	Sm3109	10,61	Sm3109	10,60
S68	0,64	S68	0,64	S68	0,61
S89	0,33	S89	0,32	S89	0,33
A	9,842	A	9,862	A	9,838
E (MPa)	6954	E (MPa)	7276	E (MPa)	6890

- Análise estrutural do novo pavimento

As espessuras das misturas betuminosas necessárias para obter um dano entre 80 e 100% (ver Tabelas 4.89 a 4.92) foram determinadas com recurso ao programa Bisar.

Para 10 anos, sentido 1, a espessura de misturas betuminosas determinada foi de 18,5 cm, sendo 4 cm de BBr, 5 cm de BB e 9,5 cm de MB. Para o sentido 2, a espessura de misturas betuminosa determinada foi de 18 cm, com 4 cm de BBr, 5 cm de BB e 9 cm de MB.

Para 15 anos, sentido 1, a espessura de misturas betuminosas determinada foi de 20 cm, sendo 4 cm de BBr, 5 cm de BB e 11 cm de MB. Para o sentido 2, a espessura de misturas betuminosa determinada foi de 19 cm, com 4 cm de BBr, 5 cm de BB e 10 cm de MB.

Tabela 4.89- Verificação à fadiga pelo método da Shell, sentido 1 (CE2)

	10 anos	15 anos
ϵ_t (BISAR)	0,00008837	0,00008025
E da mistura betuminosa onde se dá ϵ_t	6890255943	6890255943
N_{adm}	3,66E+07	5,92E+07
N_{dim}	3,24E+07	5,11E+07
Dano	88,56%	86,31%

Tabela 4.90- Verificação à deformação permanente pelo método da Shell, sentido 1 (CE2)

	10 anos	15 anos
ϵ_z (Bisar)	0,0002218	0,0002056
N_{adm}	4,34E+07	5,87E+07
K_s	0,018	0,018
Dano	75%	87%

Tabela 4.91- Verificação à fadiga pelo método da Shell, sentido 2 (CE2)

	10 anos	15 anos
ϵ_t (BISAR)	0,00008766	0,0000822
E da mistura betuminosa onde se dá ϵ_t	6890255943	6890255943
N_{adm}	3,81E+07	5,25E+07
N_{dim} (10 anos)	3,24E+07	5,11E+07
Dano (10 anos)	85,05%	97,32%

Tabela 4.92- Verificação à deformação permanente pelo método da Shell, sentido 2

	10 anos	15 anos
ϵ_z (Bisar)	0,0002188	0,0002048
N_{adm}	4,58E+07	5,97E+07
K_s	0,018	0,018
Dano (10 anos)	71%	86%

- Deflexões do novo pavimento

Determinadas as espessuras e características mecânicas das camadas constituintes do pavimento, efetuou-se uma simulação do ensaio FWD no programa Bisar para determinação da deflexão máxima e da deflexão a 90 cm do centro da placa (ver Tabela 4.93).

Tabela 4.93- Deflexão máxima e deflexão a 90 cm do centro da placa do pavimento novo, sentido 1 e 2 (CE2)

		G1 (0m)	G5 (0,9m)
10 anos	Deflexões calculadas (μm) (BISAR) Sentido 1 SH2	426,9	178,6
	Deflexões calculadas (μm) (BISAR) Sentido 2 SH1	380,1	138,8
15 anos	Deflexões calculadas (μm) (BISAR) Sentido 1 SH2	398,6	176,0
	Deflexões calculadas (μm) (BISAR) Sentido 2 SH1	362,2	137,9

c) *Cálculo dos fatores de carga.*

O cálculo dos fatores de carga foi realizado com recurso às fórmulas (3.13) e (3.44) (ver Tabela 4.94).

Tabela 4.94- Fatores de carga e f^* , sentido 1 e 2 (CE2)

	Sentido 1		Sentido 2	
	10 anos	$F_{\text{nov}}o$	302,75	$F_{\text{nov}}o$
F_{cp}		632,44	F_{cp}	431,08
f^*		0,48	f^*	0,60
15 anos	$F_{\text{nov}}o$	287,3	$F_{\text{nov}}o$	250,05
	F_{cp}	632,44	F_{cp}	431,08
	f^*	0,45	f^*	0,58

Ao dividir o $F_{\text{nov}}o$ pelo F_{cp} obteve-se um f^* inferior a 1 para ambos os sentidos, o que permite concluir que o pavimento necessita de intervenção a nível estrutural. Assim, por aplicação da fórmula (3.45) conclui-se que são necessários 7 cm de espessura de reforço para o sentido 1 e 3 cm de espessura de reforço para o sentido 2 para um período de dimensionamento de 10 anos. Para 15 anos são necessários 9 cm de espessura de reforço para o sentido 1 e 4 cm de espessura de reforço para o sentido 2.

4.3.3. Síntese

Devido ao f^* ter obtido um valor superior à unidade no primeiro caso prático, concluiu-se que o pavimento não necessitava de intervenção estrutural tanto para o sentido 1 como para o sentido 2.

Em relação ao segundo caso de estudo constata-se que o pavimento necessitava de colocação de reforço, sendo o sentido 1 aquele que precisa de maior espessura.

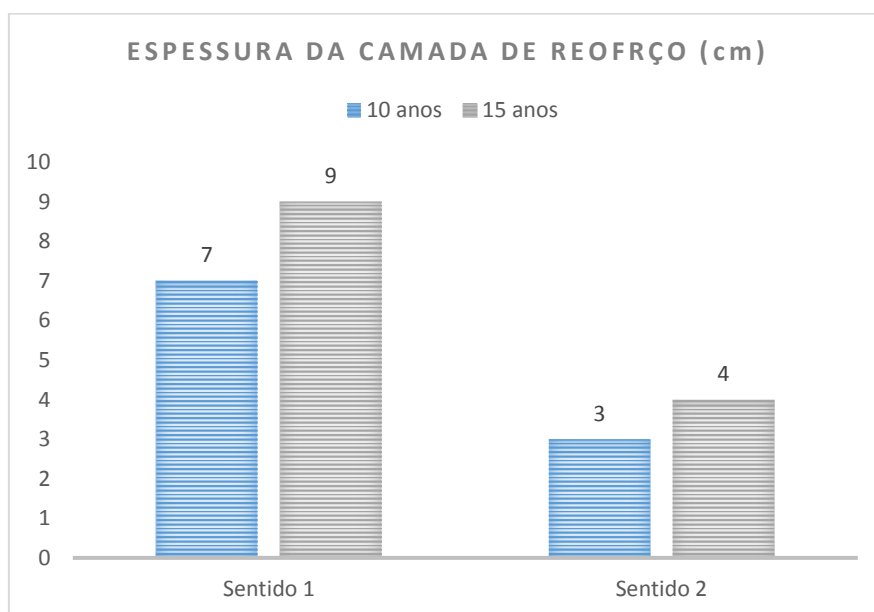


Figura 4.19- Espessura da camada de reforço (cm) determinada pelo método dos fatores de carga (CE2)

4.4 Comparação dos resultados obtidos pelas diferentes metodologias

A comparação dos resultados obtidos pelas diferentes metodologias aplicadas para determinação de camadas de reforço foi feita para os dois casos de estudo e para as secções homogêneas críticas de cada sentido de circulação, para períodos de dimensionamento de 10 e 15 anos.

As Figuras 4.20 a 4.21 apresentam os resultados das espessuras da camada de reforço obtida pelas diferentes metodologias para o caso de estudo 1 e 2.

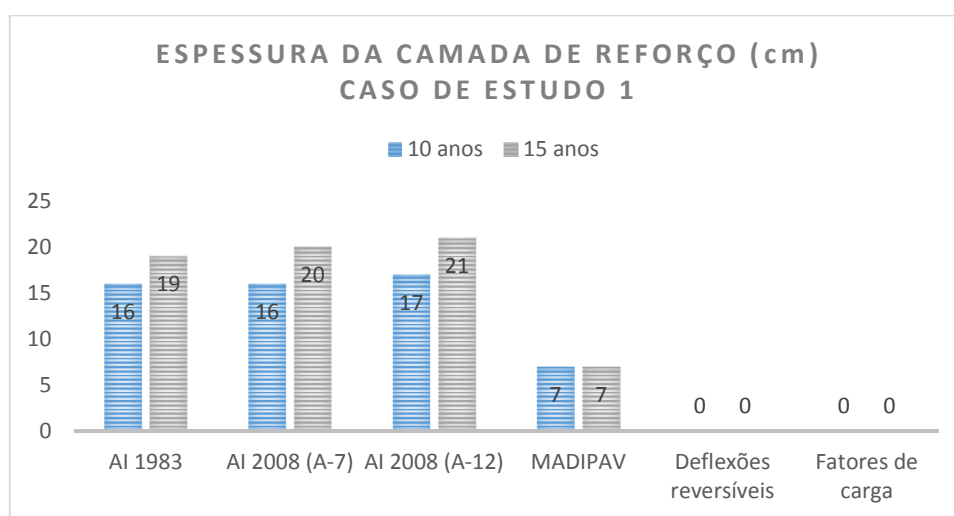


Figura 1.20- Espessura da camada de reforço obtida pelas diferentes metodologias (CE1)

Para o caso de estudo 1, ao fazer uma análise comparativa das soluções obtidas, constatou-se que os métodos expeditos apresentaram valores de espessura de reforço díspares dos valores obtidos pelos métodos empírico-mecanicistas.

O procedimento baseado nas deflexões reversíveis remeteu para um sobredimensionamento do pavimento para os dois sentidos de circulação, por esse motivo não se justificou a intervenção a nível estrutural. O procedimento baseado na determinação dos fatores de carga confirmou o mesmo resultado. Assim, os dois métodos empírico-mecanicistas apontam para a não necessidade de reforçar o pavimento. Contrariamente a estes, os métodos expeditos apontam para a necessidade de reforço, sendo que os ábacos do AI indicaram valores superiores comparativamente ao MADIPAV.

Tendo em conta que os métodos empírico-mecanicistas incorporam informação sobre o estado do pavimento mais próxima da realidade, uma vez que consideram informação sobre a capacidade estrutural do pavimento e permitem conhecer as características mecânicas das camadas, verifica-se que os métodos expeditos, neste caso prático, apresentaram resultados pouco fiáveis.

No caso de estudo 2, tal como se pode observar nas figuras 4.21 e 4.22, a solução proposta pelo MADIPAV aproximou-se das soluções propostas pelos métodos empírico-mecanicistas, principalmente para a secção crítica do sentido 1. As espessuras obtidas pelos ábacos do AI correspondem aproximadamente ao dobro das obtidas pelos restantes procedimentos, demonstrando novamente que a aplicação destes métodos dão origem a soluções sobredimensionados de reforço.

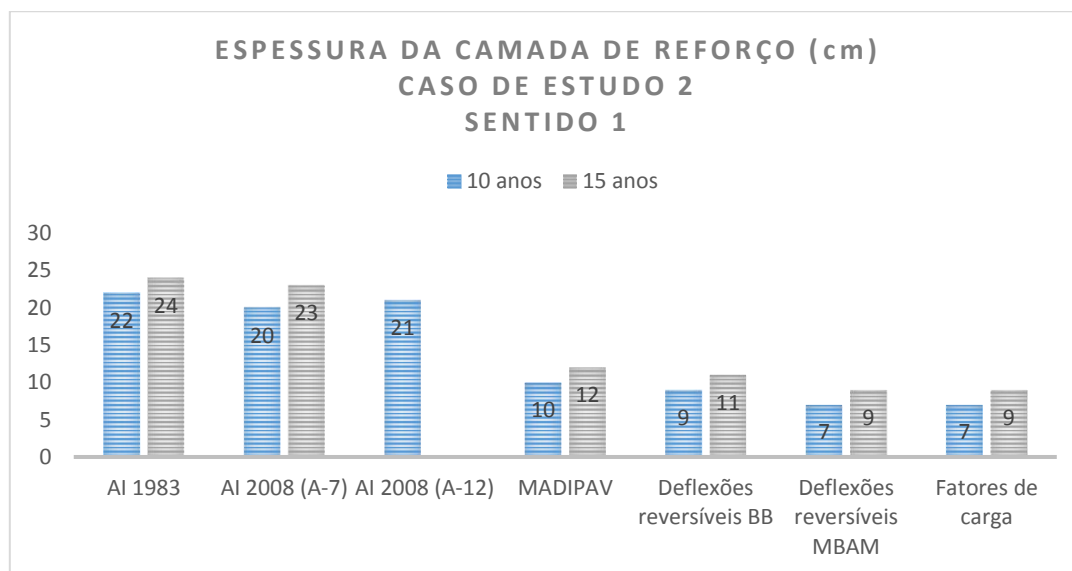


Figura 4.21 - Espessura da camada de reforço obtida pelas diferentes metodologias, sentido 1 (CE2)

Para o sentido 1 os métodos empírico-mecanicistas indicaram valores de espessura da camada de reforço muito semelhantes, tendo-se obtido o mesmo valor para o método das deflexões reversíveis com MBAM e o método dos fatores de carga.

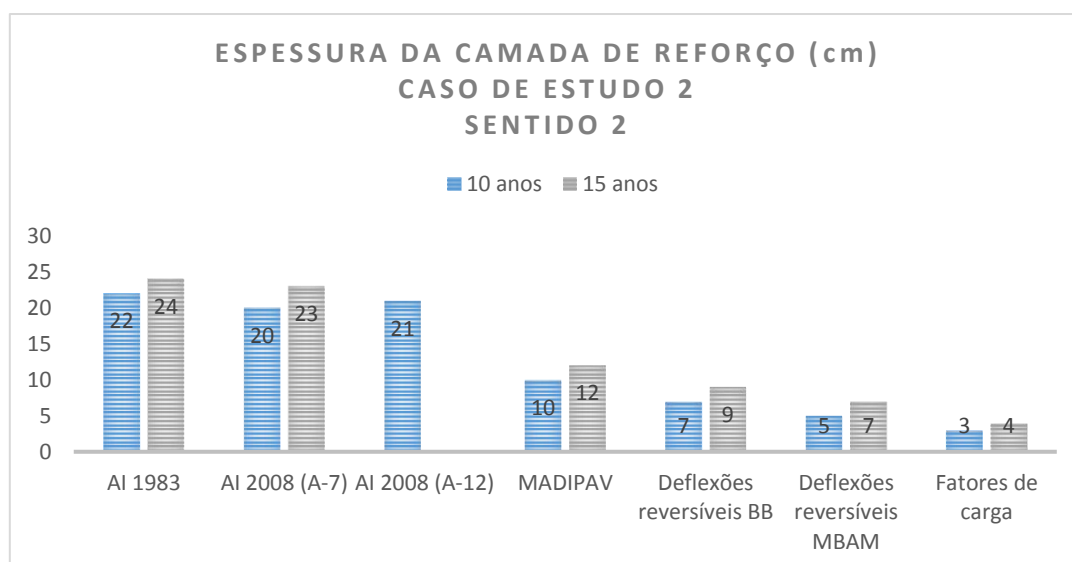


Figura 4.22- Espessura da camada de reforço obtida pelas diferentes metodologias, sentido 2 (CE2)

Para o sentido 2 os valores relativos aos métodos mecanicistas já foram mais díspares, tendo o método dos fatores de carga indicado soluções de reforço com espessuras mais reduzidas.

CAPÍTULO 5- Conclusões e desenvolvimentos futuros

O principal objetivo definido para esta dissertação, focada na ação de reabilitação estrutural do tipo reforço, foi o estudo comparativo de diferentes metodologias que possibilitam o dimensionamento da espessura de camadas betuminosas de reforço a utilizar em pavimentos rodoviários flexíveis com capacidade resistente reduzida. Nesta etapa final do trabalho é possível afirmar que este objetivo foi alcançado.

A intervenção no pavimento aplicando medidas de reabilitação torna-se imprescindível quando o pavimento apresenta desenvolvimento de um estado de ruína. Para melhor avaliar o estado de um pavimento é necessário ter conhecimento das várias degradações que surgem no pavimento. Do estudo efetuado foi possível concluir que as degradações que mais afetam o comportamento dos pavimentos flexíveis são o aparecimento de deformações permanentes e o desenvolvimento de fendilhamento. O aparecimento de deformações permanentes está normalmente associado a fenómenos de assentamento ou colapso ao nível das camadas inferiores e podem ainda ter origem nas camadas betuminosas. Quanto ao fendilhamento este está diretamente relacionado com as camadas betuminosas.

Para obter uma correta avaliação do estado de degradação do pavimento usam-se essencialmente técnicas de observação do estado superficial e técnicas de observação da capacidade estrutural. A primeira técnica pode ser realizada através de observação visual, com registo do estado observado em diferentes suportes (formulários específicos ou suporte informático) para posterior tratamento ou através da utilização de equipamento de registo de imagem (do tipo vídeo ou fotográfico). As técnicas de observação da capacidade estrutural permitem, através de certos equipamentos, obter as deflexões que traduzem o comportamento geral do pavimento e posteriormente permitem determinar as suas características mecânicas. O equipamento mais usado para esse efeito é o defletómetro de impacto (FWD).

Assim, o acompanhamento do estado de degradação, com recurso às técnicas referidas anteriormente, mostra-se importantíssimo uma vez que permite às entidades responsáveis pela gestão da rede rodoviária saber como e quando intervir sobre o pavimento.

As técnicas mais usuais empregues na reabilitação dos pavimentos passam pela reciclagem do pavimento existente, a reconstrução, ou colocação de uma camada de reforço, sendo esta última a mais utilizadas para melhorar o estado global do pavimento.

O cálculo da espessura de uma camada de reforço pode ser efetuado através da aplicação de várias metodologias, sendo que as expeditas se utilizam ao nível dos estudos prévios ou para vias com tráfego reduzido, e as empírico-mecanicistas, sendo mais complexas e fornecendo resultados mais fidedignos, se apresentam como as mais utilizadas em Portugal.

Começando pelos métodos expeditos, o “procedimento baseado nas espessuras efetivas” com recurso aos ábacos do AI permite determinar espessuras de reforço em função de 4 parâmetros, sendo estes o tráfego solicitante em eixos padrão de 80 kN, o módulo de deformabilidade do solo de fundação, a temperatura média anual do ar e as características das camadas existentes do pavimento (espessura e composição obtidas por sondagem e estado de degradação visível). Os primeiros 3 parâmetros são necessários para o cálculo da espessura requerida para o pavimento e são usados como dados de entrada na leitura dos ábacos do AI. As características das camadas existentes permitem definir os fatores C a utilizar na determinação da espessura efetiva do pavimento. A leitura dos ábacos e a escolha do fator c por técnicos distintos podem dar origem à obtenção de diferentes espessuras de reforço para o mesmo caso de estudo.

Este procedimento também pode ser aplicado em conjunto com o manual MADIPAV (atual IP,SA), contudo, é necessário ter presente que este manual foi concebido para dimensionar pavimentos flexíveis novos e considera um período de dimensionamento de 20 anos. Nesta abordagem é necessário escolher, de entre as estruturas tipo consideradas no manual, a mais próxima da situação existente, assim como obter a classe da plataforma de fundação e a classe de tráfego ajustada para o período de dimensionamento considerado para o reforço (10/15 anos). Ao contrário do procedimento anterior, os valores resultantes desta análise são fixos, existindo apenas uma solução possível para a espessura requerida. O cálculo da espessura efetiva é realizado segundo o descrito na abordagem anterior.

Nenhum dos métodos expeditos incorpora informação específica sobre a capacidade estrutural do pavimento, considerando-a indiretamente através da informação sobre o estado superficial dos pavimentos ao contemplar as degradações na determinação dos fatores C.

O “procedimento baseado nas deflexões reversíveis”, sendo um método empírico-mecanicista, demonstrou-se mais complexo que os procedimentos anteriores, sendo necessário para a sua aplicação um conjunto de dados específicos caracterizadores dos materiais existentes e das condições de funcionamento do pavimento. De entre a informação necessária ao dimensionamento destaca-se a espessura e composição das camadas constituintes do pavimento, as deflexões obtidas por ensaios com o defletómetro de impacto e o tráfego solicitante em eixos padrão de 80 kN.

Este método recorre a várias abordagens e métodos nas fases intermédias do cálculo, nomeadamente: o método da AASHTO para a divisão do troço em seções de comportamento estrutural homogéneo; a determinação do coeficiente de variação das deflexões (COV) para avaliar as soluções obtidas na aplicação do método da AASHTO; determinação de defletogramas representativos de cada secção; determinação dos módulos de deformabilidade das camadas através dos programas de cálculo automático BISAR e ELSYM5; verificação à fadiga e à deformação permanente, recorrendo às fórmulas propostas pela Shell, para posterior cálculo do dano e cálculo da espessura da camada de reforço caso necessite.

Estas operações permitem obter soluções mais sustentadas que os métodos expeditos, apesar de em alguns dos passos efetuados a solução poder depender das opções tomadas pelo técnico que efetua o cálculo.

No que diz respeito aos casos de estudo, a divisão do troço em secções homogéneas pelo método mais recente da AASHTO (1993) apresentou um procedimento de cálculo mais exaustivo que o método mais antigo (1986), no entanto, ambos os métodos deram o mesmo número de secções homogéneas.

Quanto aos resultados obtidos na fase de retro-análise, pode-se constatar que o BISAR e o ELSYM5 obtiveram soluções de deflexões muito semelhantes. Houve, no entanto, uma enorme dificuldade em obter valores de RMS, que permite avaliar o grau de aproximação entre o defletograma de cálculo e o defletograma característico, baixos. Foi notória a complexidade desta fase do cálculo, uma vez que nem sempre um RMS baixo levava a módulos de deformabilidade coerentes, tendo sido claro que para o uso destes programas a experiência é um fator preponderante.

Posteriormente, na correção dos módulos de deformabilidade devido ao efeito da temperatura, constatou-se que, no primeiro caso prático, tendo em conta que a temperatura de serviço era mais elevada que a de ensaio houve uma redução dos módulos na ordem dos 26% para a camada superior e 35% para a camada de sub-base no sentido 1 e na ordem dos 22% para a camada superior e 31% na camada de sub-base no sentido 2. Já no segundo caso de estudo, uma vez que a temperatura de serviço era um pouco mais baixa que a de ensaio houve um aumento dos módulos na ordem dos 14% para as camadas superiores e de 1% para a camada de sub-base, no sentido 1. No sentido 2 a média desse aumento andou nos 12% para as camadas superiores e 0,2% na camada de sub base.

Com a finalidade de confirmar os resultados obtidos por este método foi efetuado um outro procedimento baseado também em métodos empírico-mecanicistas, igualmente fundamentado nas deflexões reversíveis, mas que tem como principal objetivo o cálculo de fatores de carga.

Comparando os resultados das espessuras de reforço obtidas por cada procedimento, pode-se chegar à conclusão que os métodos expeditos apresentam valores superiores em relação aos métodos empírico-mecanicistas.

Assim, ao analisar os resultados obtidos é possível verificar que o procedimento baseado nas espessuras efetivas com recurso aos ábacos do AI apresenta valores muito elevados de espessura de reforço quando comparados com as restantes abordagens, apontando-se como principais causas desta diferença parâmetros necessários para o cálculo, nomeadamente no que diz respeito a parâmetros de caracterização mecânica dos materiais de cada camada do pavimento.

As soluções obtidas da aplicação do procedimento baseado nas espessuras efetivas com recurso ao MADIPAV apresentam valores mais baixos dos obtidos pelo método anterior, estando menos desviados dos valores alcançados pelos métodos mecanicistas. Contudo, para o caso de estudo

1, os métodos expeditos indicaram necessidade de reforço ao contrário dos métodos empírico-mecanicistas. Já no segundo caso prático os valores obtidos por esta abordagem são superiores mas apresentam uma grandeza semelhante aos obtidos pelos métodos empírico-mecanicistas. Pode-se concluir que estes métodos expeditos requerem uma análise cuidada dos resultados, uma vez que podem levar a um sobredimensionamento da camada de reforço, tornando-se pouco viável em termos económicos.

Comparando os métodos empírico-mecanicistas aplicados no segundo caso de estudo, constatou-se que com o método dos fatores de carga foram obtidas espessuras inferiores às apontadas pelo método baseado nos critérios de ruína do Método Shell, sendo esta diferença mais notória no sentido 2 (5 cm). O facto de, para esse sentido, se ter obtido um RMS muito elevado, na ordem dos 17%, pode indicar que o método baseado nos critérios de ruína da Shell possa dar origem a valores de espessura diferentes do que realmente é necessário, pois o facto de ter um RMS dessa dimensão pressupõe que os módulos de deformabilidade apresentados, nomeadamente das misturas betuminosas, se encontram diferentes dos reais. Assim, fica evidenciado que fazer uma análise com recurso a mais do que um método é essencial para validar as soluções obtidas.

Para o primeiro caso de estudo não foi possível fazer a comparação entre estes métodos, uma vez que com ambos se concluiu que o pavimento se encontrava sobredimensionado, não sendo necessária a consideração de uma camada de reforço. Este resultado pode ser justificado pelo facto de a deflexão máxima determinada pelo ensaio de carga não ultrapassar os 300 μm , pela previsão de tráfego pouco intenso para a autoestrada e pelo pavimento existente apresentar uma espessura de camadas betuminosas e respetivos módulos de deformabilidade elevados.

Quanto aos materiais utilizados na camada de reforço, conclui-se que a espessura necessária para reforços efetuados com mistura betuminosa de alto módulo apresentaram valores inferiores quando comparados com a utilização de uma mistura de betão betuminoso (cerca de 2 cm). Estes resultados já eram esperados uma vez que o betume usado nas misturas betuminosas de alto módulo (10/20) é mais duro, conferindo módulos mais elevados quando comparado com as misturas de betão betuminoso que utilizam betume (50/70).

Para trabalhos futuros propõem-se comparar soluções finais de reforço obtidas a partir de resultados da retro-análise efetuadas por vários programas, como o ELMOD, o Modulos, o BISAR e o ELSYM5, e por outras metodologias de dimensionamento de reforço. Sugere-se ainda uma preparação sustentada de um documento com indicações claras sobre as abordagens a adotar nos diferentes passos do dimensionamento do reforço, assim como recomendações para validação dos resultados intermédios do cálculo.

Nota após revisão: Devido a um erro existente na bibliografia consultada, a expressão (3.37) considerada nos cálculos efetuados para os dois casos de estudo foi $S_{m108} = 8 + 5.68 \times 10^{-3} \times Va + 2.35 \times 10^{-4} \times Va^2$ em vez de $S_{m108} = 8 + 5.68 \times 10^{-3} \times Va + 2.135 \times 10^{-4} \times Va^2$. A expressão foi corrigida nesta revisão final do documento, contudo, os

cálculos apresentados nesta versão não se encontram corrigidos, o que se traduz na obtenção de valores dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas mais elevados.

Referências Bibliográficas

AASHTO. (1986). "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures", Washington, D.C., USA.

AASHTO. (1993). "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures.", Washington D. C., USA.

Alves, T. (2007). "Metodologias de auscultação de pavimentos rodoviários". Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Antunes, L. (2008). "Reforço de Pavimentos Rodoviários com Geossintéticos ". Tese de Mestrado em Geotécnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasil.

Antunes, M.L. (1993). "Avaliação da Capacidade de Carga de Pavimentos Utilizando Ensaios Dinâmicos." Tese de Doutorado, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Asphalt Institute. (1983). "Asphalt overlays for highway and street rehabilitation", Manual Series N°17 (MS-17), Maryland.

Asphalt Institute. (2008). "Thickness Design: Asphalt Pavements for Highways and Streets", Manual Series N° 1 (MS-1). 9ª Edição.

Baptista, A. (1999). "Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Fléxiveis: Aplicabilidade em Portugal dos Métodos Existentes", Dept Engª Civil da F.C.T da U. de Coimbra, Tese de Mestrado em Engenharia Urbana, Coimbra.

Batista, F. (2004). "Novas Técnicas de Reabilitação de Pavimentos - Misturas Betuminosas Densas a Frio." Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

Bernucci, L. et al. (2008). "Pavimentação Asfáltica." A. Petrobras, ed., Rio de Janeiro, Brasil.

Capitão, S. (2012). "Apontamentos de apoio à Disciplina de Conservação de Vias de Comunicação", Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.

Carreteras. (2002). "Norma 6.3-IC "Rehabilitación de Firmes"." Ministerio de Fomento, Secretaría de Estado de Infraestructuras, Dirección General de Carreteras, Madrid, Espanha.

CEPSA Portuguesa Petróleos, S.A. (2010). “Manual de Pavimentação”. 2ª Edição.

Claessen, A. et al. (1977). “Asphalt pavement design - The Shell method”, Proceedings of the 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, pp. 39-74.

Correia, J. (2014). “Retro-análise de Resultados de Caracterização Estrutural de Pavimentos” Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Cunha, C. (2010). “Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis Diferentes Tipos de Reciclagem”, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.

Dias, J. (2009). “Estudo de Reforço do Pavimento Rodoviário da EN 333-3 entre a A25 e Oliveira de Frades”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Domingos, P. (2007). “Reforço de Pavimentos Rígidos: Modelação do Comportamento Estrutural.” Tese de Mestrado em Transportes, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Dynatest. (2013). “ELMOD 6 Quick start manual”.

EAPA (European Asphalt Pavement Association) (1998). “Directivas ambientais sobre as melhores técnicas disponíveis (BAT) para a produção de misturas betuminosas”. Breukelen, Holanda (Traduzido pela APORBET, Portugal).

EP-JAE. (1995). “Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional - MACOPAV.” EP - Estradas de Portugal S.A., Lisboa.

EP-JAE. (2007). “Manual da Utilização da Aplicação - Histórico das Intervenções.” Gestão da Conservação, Gabinete de Gestão da Rede, EP - Estradas de Portugal S.A., Lisboa.

EP-JAE. (2008). “Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários.” Volume 1: Projecto de Reabilitação, Gabinete de Gestão da Rede, EP - Estradas de Portugal S.A., Lisboa, 71p.

EP-JAE. (2009). “Caderno de Encargos - Pavimentação, Características dos Materiais.” Volume V:03 - Pavimentação - Capítulo 14.03, EP - Estradas de Portugal S.A., Lisboa, 120p.

EP. (2013). “Concessões Rodoviárias: Um Novo Paradigma Operacional”. Estradas de Portugal S.A, Lisboa.

FHWA. (2002). “Back-Calculation of Layer Parameters for LTPP Test Sections, Volume II” U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. Disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltpp/reports/01113/>

Francisco, A. (2012). “Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis”. Tese de Mestrado em Engenharia da Construção, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.

Freitas, M. (2012). “Avaliação Numérica do Comportamento de Reforços de Pavimento à Reflexão de Fendas”. Tese de Mestrado em Engenharia da Construção, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, (1970). E 240. Solos. Classificação para fins rodoviários.

Maganinho, L. (2013). “Desenvolvimento de uma base de dados de patologias para a avaliação da qualidade de pavimentos rodoviários com recurso a GPS, imagem vídeo e SIG”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Beira Interior, Covilhã.

Murtinheira, F. (2011). “Reabilitação estrutural de pavimentos rodoviários. Correção do módulo de deformabilidade das camadas betuminosas”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Viseu.

Nogueira, A. (2015). “Avaliação de rodeiras de pavimentos rodoviários com recurso a varrimento laser”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã.

Pereira, P. (1971). “Pavimentos Rodoviários”. LNEC, CE 139, vol. III, Lisboa.

Pereira, P. et al. (1999). “Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários.” Universidade do Minho, Braga.

Picado-Santos, L. et al. (2002). “Pavimentos Rodoviários”. Edição de autor (ISBN 972-8692-02-1), Braga.

Picado-Santos, L. et al. (2008). “Pavimentos Rodoviários.” Edições Almedina, Coimbra

Quaresma, L. (1985). “Características mecânicas de camadas de pavimentos rodoviários e aeroportuários constituídas por materiais granulares”. LNEC, Ref. 232/85-NPR-DVC, Lisboa.

Santos, B. (2002). “Implementação de um sistema de gestão da conservação de pavimentos rodoviários para a cidade de Lisboa”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Santos, M. (2009). “Dimensionamento de Camadas de Reforço de Pavimentos Rodoviários Flexíveis”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Aveiro.

SHELL. (1998). “BISAR - User Manual”. Bitumen Business Group

Silva, D. (2014). “Avaliação da sustentabilidade de diferentes soluções de reabilitação de pavimentos urbanos betuminosos”. Tese de Mestrado em Engenharia Urbana, Universidade do Minho, Braga.

Tavares, M. (2013). “Sistemas de apoio à conservação corrente”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã.

Thomas, F. (2004). “Generating homogeneous road sections based on surface measurements: available methods”. 2nd European Pavement and Asset Management Conference, Berlin, Germany.

Vrancianu, I. e Freitas, E. (2007). “Definition of homogenous road sectors according to COST 336”. Technical University, Romania; Universidade do Minho, Guimarães.

Anexos

- I. Tráfego no ano 0 e tráfego futuro.
- II. Determinação da espessura requerida T_n para 10 e 15 anos com recurso aos seguintes ábacos:
 - Ábaco AI (1983);
 - Ábaco AI (2008) A-7;
 - Ábaco AI (2008) A-12.
- III. Deflexões normalizadas.
- IV. Divisão do troço em secções de comportamento estrutural homogéneo:
 - Método das somas acumuladas (AASHTO,1986);
 - Método das diferenças acumuladas (AASHTO,1993).
- V. Aproximação entre o defletograma real e o defletograma correspondente ao percentil 85 para cada secção homogénea.
- VI. Retro análise:
 - Módulos de deformabilidade finais usando o Bisar;
 - Módulos de deformabilidade finais usando o ELSYM5.
- VII. Cálculo do módulo de deformabilidade da Mistura Betuminosa de Alto Módulo com ligante 10/20.

Anexo I

- Caso de estudo 1

2016			2017			2018			2019			2020		
Dezembro			Dezembro			Dezembro			Dezembro			Dezembro		
Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total
7 709	1 688	9 397	7 834	1 715	9 549	7 959	1 742	9 701	8 100	1 772	9 872	8 284	1 808	10 092

2021			2022			2023			2024			2025		
Dezembro			Dezembro			Dezembro			Dezembro			Dezembro		
Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total
8 473	1 845	10 318	8 665	1 883	10 548	8 862	1 922	10 784	9 064	1 961	11 025	9 279	2 006	11 286

2026			2027			2028			2029			2030		
Dezembro			Dezembro			Dezembro			Dezembro			Dezembro		
Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total
9 500	2 053	11 553	9 726	2 101	11 827	9 957	2 150	12 107	10 194	2 200	12 394	10 402	2 244	12 646

2031		
Dezembro		
Ligeiros	Pesados	Total
10 614	2 289	12 903

- Caso de estudo 2

2014			2015			2016			2017			2018		
Dezembro			Dezembro			Dezembro			Dezembro			Dezembro		
Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total
7 576	3 084	10 660	7 114	3 421	10 535	7 225	3 469	10 694	7 338	3 518	10 856	7 454	3 568	11 022

2019			2020			2021			2022			2023		
Dezembro			Dezembro			Dezembro			Dezembro			Dezembro		
Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total
7 580	3 623	11 203	7 734	3 691	11 425	7 890	3 759	11 649	8 050	3 828	11 878	8 213	3 899	12 112

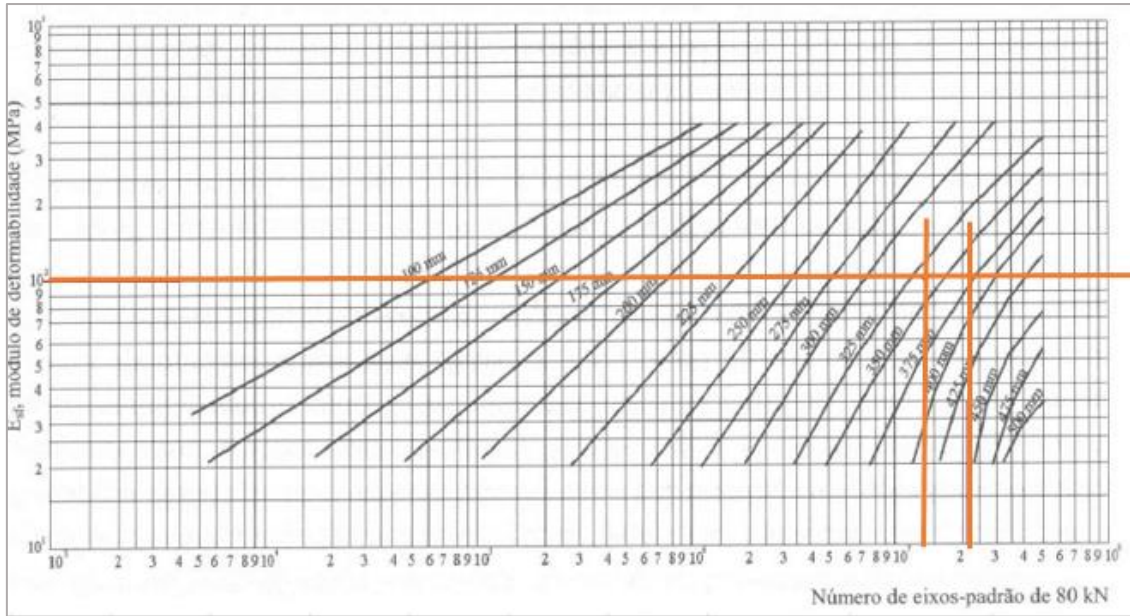
2024			2025			2026			2027			2028		
Dezembro			Dezembro			Dezembro			Dezembro			Dezembro		
Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total	Ligeiros	Pesados	Total
8 379	3 971	12 350	8 576	4 057	12 633	8 778	4 144	12 922	8 984	4 235	13 219	9 194	4 326	13 520

2029		
Dezembro		
Ligeiros	Pesados	Total
9 410	4 420	13 830

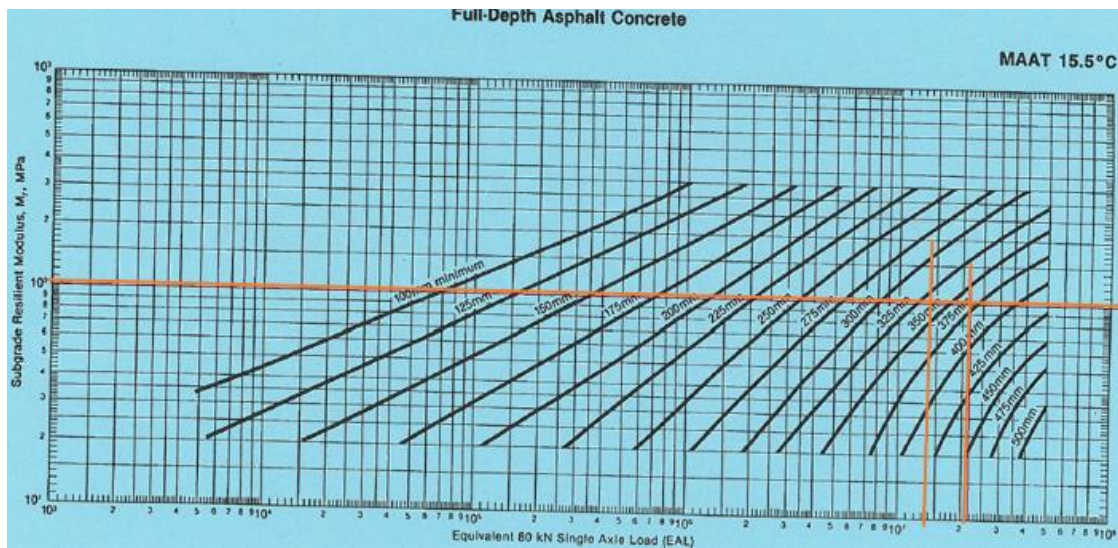
Anexo II

- Caso de estudo 1

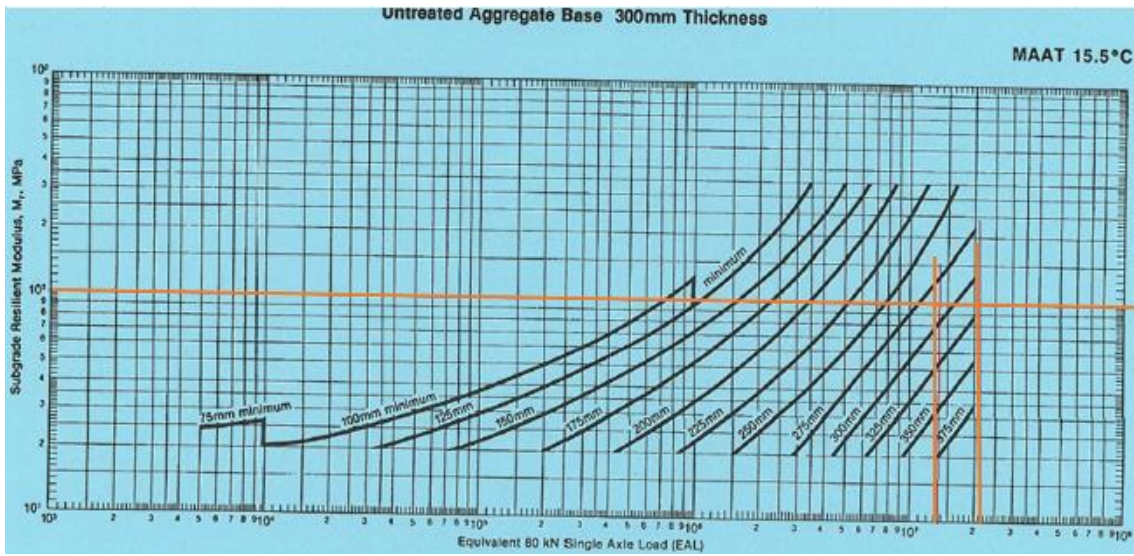
Ábaco AI (1983):



Ábaco AI (2008) A-7:

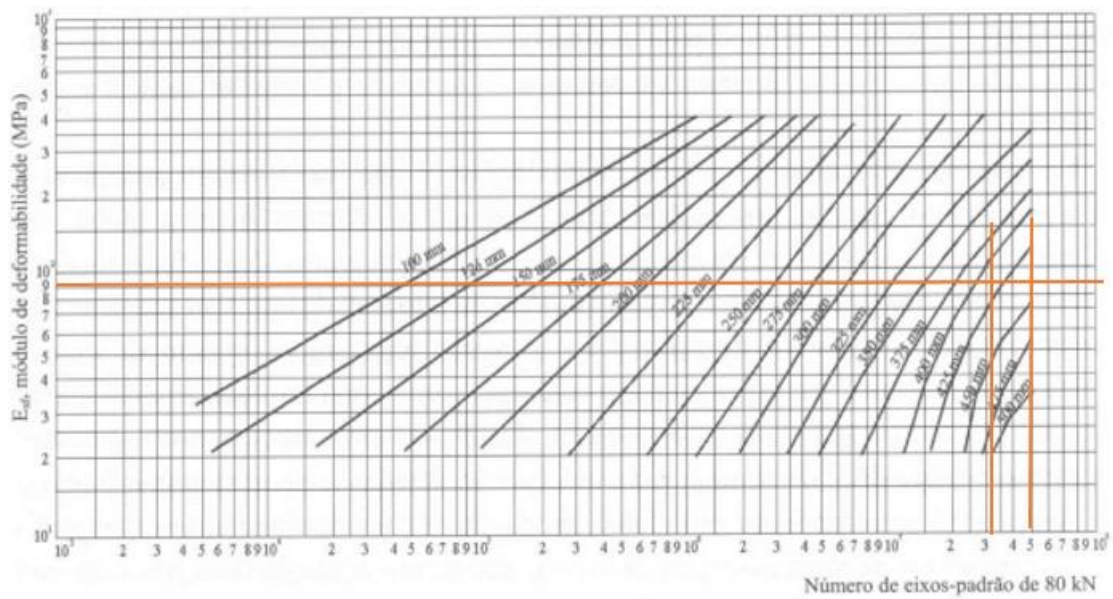


Ábaco AI (2008) A-12:

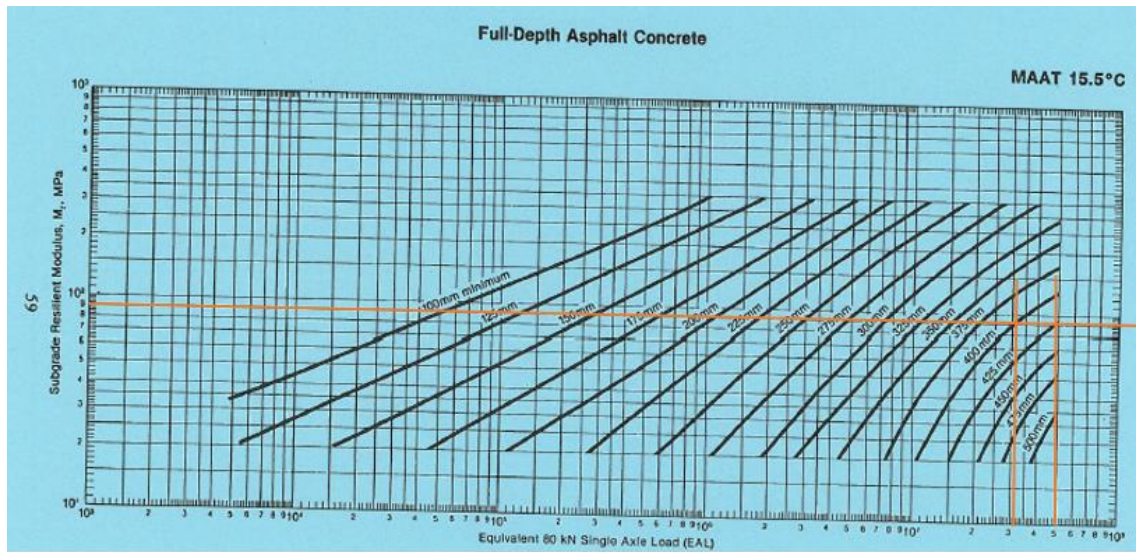


- Caso de estudo 2

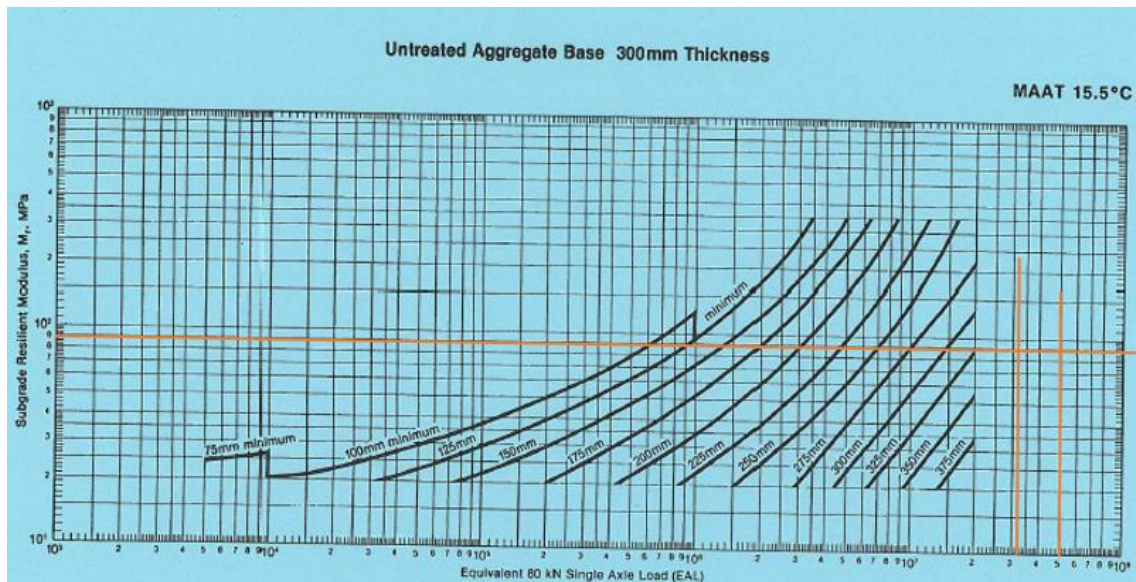
Ábaco AI (1983):



Ábaco AI (2008) A-7:



Ábaco AI (2008) A-12:



Anexo III

- Caso de estudo 1

Sentido 1													
PK (km)	Força (kN)	Distância (metros)									Hora	Temperatura	
		0	0,3	0,45	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1		Pavimento	Ar
0 +000	65,07	208,68	180,41	161,13	143,55	107,48	79,81	57,94	41,76	30,57	10:06:05	12,3	13,4
0 +100	64,95	213,56	178,04	159,52	138,41	101,38	71,96	50,24	32,53	26,42	10:06:54	12,8	14,6
0 +200	65,28	202,13	174,15	156,33	139,60	106,24	76,67	56,46	39,33	32,56	10:07:47	12,8	14,9
0 +300	64,95	247,29	220,97	206,16	186,04	151,32	113,19	88,17	64,75	52,64	10:08:36	12,9	14,4
0 +400	65,09	245,46	218,70	203,42	187,54	151,89	121,73	96,77	75,80	59,32	10:09:27	12,8	15,2
0 +500	65,58	199,22	177,81	165,82	152,14	124,19	99,61	79,49	62,24	48,67	10:10:16	12,8	15,9
0 +600	64,77	228,81	216,77	212,35	207,23	193,38	179,54	165,79	149,93	134,17	10:11:06	12,3	15,1
0 +700	65,30	198,68	176,29	159,66	146,32	114,67	91,38	70,67	53,45	44,79	10:11:56	12,8	14,8
0 +800	64,77	206,53	178,93	162,98	146,92	114,81	86,81	68,14	52,08	41,95	10:12:47	13,0	15,1
0 +900	64,92	186,53	162,30	147,08	133,06	103,13	79,70	62,08	49,06	39,55	10:13:37	13,1	15,6
1 +000	64,96	193,92	170,60	156,20	141,99	112,27	89,35	69,74	54,53	42,63	10:14:24	13,4	14,9
1 +100	64,91	197,37	175,54	163,23	149,01	119,06	95,43	76,21	60,98	50,67	10:15:17	13,7	14,8
1 +200	65,23	198,50	171,19	156,75	140,90	111,51	86,79	68,76	55,50	45,84	10:16:07	13,9	14,6
1 +300	65,21	250,49	223,18	204,14	188,99	153,01	120,11	94,20	73,16	59,21	10:16:58	13,9	14,7
1 +400	64,61	253,82	229,38	212,78	196,58	158,75	126,36	98,79	75,86	59,76	10:17:50	13,9	14,6
1 +500	65,76	203,62	175,25	159,34	142,93	110,11	85,10	65,93	51,20	39,64	10:18:40	13,7	14,4
1 +600	65,55	205,86	178,89	164,41	146,26	114,23	87,36	69,81	54,44	42,54	10:19:31	13,3	14,8
1 +700	64,98	188,56	163,15	147,95	131,64	100,83	77,22	60,02	47,31	38,11	10:20:27	13,3	15,0
1 +800	64,75	161,92	138,23	127,89	113,84	91,45	70,67	55,01	45,37	38,35	10:21:19	13,3	14,5
1 +900	65,19	188,55	164,22	149,16	133,41	104,00	80,07	62,22	47,66	37,39	10:22:12	13,5	14,0
2 +000	64,84	273,37	253,42	235,08	217,23	180,14	145,16	116,29	89,22	75,39	10:23:18	13,4	14,9
2 +100	65,30	234,72	210,93	195,50	179,97	146,13	117,66	91,78	73,26	56,34	10:24:08	13,4	15,2
2 +200	65,05	233,12	205,14	187,56	172,07	136,79	107,22	83,04	63,75	50,26	10:25:03	13,4	15,0
2 +300	64,70	266,63	240,81	223,33	213,28	176,01	135,93	105,79	78,56	62,99	10:25:55	13,4	14,2
2 +400	65,31	208,31	182,93	173,27	154,36	125,70	98,23	76,34	65,79	54,54	10:26:49	13,5	15,0

2 +500	65,24	183,82	161,80	148,95	135,30	110,09	86,18	68,75	54,90	44,73	10:27:39	13,6	14,9
2 +600	64,64	247,57	224,04	209,06	191,86	155,56	123,08	97,94	74,41	57,12	10:28:34	13,9	15,2
2 +700	65,33	170,04	149,74	137,30	123,08	98,10	72,73	54,62	39,10	27,56	10:29:26	13,9	14,9
2 +800	64,84	151,37	129,82	117,19	104,36	79,09	57,74	40,10	27,97	20,05	10:30:17	13,9	15,2
2 +900	64,75	192,34	167,44	154,69	137,03	110,63	79,91	61,94	42,36	31,22	10:31:09	14,1	15,0
3 +000	65,79	131,80	111,94	105,72	89,22	63,03	44,66	29,15	18,97	15,91	10:32:02	13,4	15,0
3 +100	64,59	146,22	123,18	110,70	97,62	73,16	54,14	38,85	28,78	20,53	10:32:53	13,8	15,6
3 +200	65,35	116,77	95,59	86,73	76,99	59,48	44,96	34,12	26,56	20,09	10:33:44	13,4	15,0
3 +300	65,07	137,45	120,37	107,78	98,69	79,41	57,54	44,75	35,46	28,67	10:34:37	13,1	15,2
3 +400	64,42	174,96	148,83	138,64	124,21	98,58	75,88	57,11	44,09	32,79	10:35:25	13,1	15,7
3 +500	65,10	162,15	136,29	125,31	114,82	88,36	63,30	47,23	34,95	26,16	10:36:15	13,2	15,8
3 +600	65,10	119,62	97,55	87,17	76,88	56,61	41,04	28,56	20,37	13,98	10:37:05	13,4	15,5
3 +700	65,53	143,03	120,62	109,51	97,01	74,00	55,75	39,08	28,57	19,94	10:37:53	13,5	15,6
3 +800	64,91	159,92	141,10	128,48	118,96	100,04	75,50	60,08	45,36	41,56	10:38:41	13,4	15,4
3 +900	65,09	167,37	144,70	134,41	122,93	97,47	73,90	56,52	44,74	33,35	10:39:30	13,6	15,0
4 +000	65,12	181,96	159,71	147,83	135,85	102,01	76,86	62,98	43,72	40,82	10:40:38	13,9	15,1
4 +100	64,95	175,43	160,22	146,01	131,80	107,78	84,77	67,95	52,84	42,43	10:41:32	14,3	16,7
4 +200	65,41	123,52	100,17	93,31	86,06	66,78	49,29	38,16	29,12	27,63	10:42:29	15,2	15,9
4 +300	64,31	172,23	147,67	134,02	120,68	92,78	72,47	57,01	45,68	37,09	10:44:24	14,0	15,9
4 +400	65,55	189,69	159,85	145,57	131,49	102,83	80,22	62,07	50,08	40,95	10:45:19	13,7	15,6
4 +500	64,73	164,58	142,49	128,63	115,58	89,57	69,09	53,52	42,78	33,84	10:46:08	13,3	15,8
4 +600	65,81	128,89	110,23	104,40	95,90	80,10	63,90	51,66	44,05	36,84	10:46:59	13,7	15,5
4 +700	64,50	183,41	160,23	145,22	130,40	99,26	75,78	56,74	44,54	34,36	10:47:46	13,7	15,6
4 +800	65,79	110,46	84,77	82,30	75,98	67,48	58,59	45,65	44,26	35,27	10:48:35	16,1	16,1
4 +900	65,05	233,62	201,45	185,56	164,97	127,90	96,53	72,74	55,36	44,67	10:49:25	15,1	16,2
5 +000	64,27	201,97	179,82	165,26	151,20	115,60	87,99	68,17	53,50	42,98	10:50:20	14,0	16,8
5 +100	66,27	194,79	163,41	149,87	132,41	103,67	76,90	58,16	44,73	36,59	10:51:12	16,5	16,6
5 +200	65,28	70,40	54,96	49,98	45,70	38,24	33,56	29,07	26,19	22,50	10:52:07	14,0	16,0
5 +300	64,89	156,46	130,02	115,70	101,27	74,73	55,59	42,87	34,16	26,65	10:53:32	14,7	16,3
5 +400	65,21	131,77	114,83	103,37	92,90	71,87	56,12	44,26	35,78	29,11	10:54:24	14,9	15,9
5 +500	64,75	119,36	99,18	87,24	76,69	56,52	43,17	33,93	27,20	24,29	10:55:14	14,5	15,9
5 +600	64,95	135,30	112,79	104,38	96,17	79,56	60,25	48,64	36,13	33,63	10:56:06	14,4	16,8

5 +700	65,0	173,11	151,69	138,08	123,78	102,06	77,25	61,94	48,63	42,13	10:58:19	14,0	16,2
5 +800	65,7	61,07	45,23	40,58	35,24	27,42	21,58	18,01	16,03	14,06	10:59:15	15,2	16,2
5 +900	64,7	206,76	181,25	166,39	149,12	117,29	90,48	69,99	54,43	44,28	11:00:05	15,1	16,5
6 +000	65,2	135,16	113,13	102,97	91,70	71,67	55,92	43,86	35,98	29,31	11:01:16	15,4	15,8
6 +100	64,6	120,09	103,79	94,42	85,36	67,65	53,35	42,18	32,82	27,48	11:02:11	15,4	15,8
6 +200	65,1	127,43	111,76	102,08	92,10	73,04	57,48	45,20	35,92	29,44	11:04:57	15,8	16,3
6 +300	65,1	118,25	101,38	95,19	84,92	69,25	54,58	45,40	36,02	32,03	11:05:53	16,0	16,2
6 +400	65,0	151,65	129,04	118,54	107,43	85,03	67,32	53,22	43,11	34,81	11:06:39	16,3	16,5
6 +500	65,1	143,70	122,63	111,75	99,46	77,29	59,42	46,24	35,75	29,56	11:07:31	15,3	16,8
6 +600	65,0	140,79	117,67	105,56	93,26	71,04	53,63	41,03	31,62	25,22	11:08:18	16,2	17,3
6 +700	65,1	154,07	130,62	120,24	107,97	85,32	65,46	49,39	41,31	33,03	11:09:14	16,7	16,0
6 +800	65,1	159,93	141,15	130,96	120,97	98,99	81,11	65,63	53,34	43,15	11:10:01	15,6	16,2
6 +900	65,2	170,08	147,44	134,67	121,50	95,66	75,61	59,35	48,88	38,90	11:10:52	16,6	16,2
7 +000	64,4	151,73	132,56	121,47	110,87	87,67	70,22	57,30	46,61	38,74	11:11:47	16,5	16,1
7 +100	65,1	161,55	140,10	128,12	114,65	89,11	69,35	54,38	42,21	34,23	11:12:43	17,0	16,1
7 +200	65,0	166,60	143,20	128,70	114,00	85,90	65,20	48,60	36,90	27,90	11:13:34	16,8	16,1
7 +300	65,0	174,71	151,29	137,98	122,48	96,36	70,34	56,13	42,83	34,02	11:14:26	16,7	16,1
7 +400	65,2	168,36	146,12	130,86	119,29	91,26	69,02	52,66	41,29	32,81	11:15:20	17,1	16,3
7 +500	64,8	223,59	195,19	176,73	158,36	119,72	89,62	65,53	47,67	36,43	11:16:13	16,9	16,3
7 +600	65,4	153,11	128,37	114,46	100,65	73,33	52,16	36,17	26,03	18,18	11:17:04	16,4	16,4
7 +700	65,1	186,91	160,65	144,68	127,00	94,55	68,20	49,22	34,55	25,46	11:17:56	16,7	16,4
7 +800	65,2	177,97	152,56	137,41	121,07	88,69	63,87	44,24	31,59	21,52	11:18:45	17,4	16,1
7 +900	64,9	187,45	154,49	135,15	116,31	81,35	59,01	42,88	32,26	24,04	11:19:30	17,4	16,5
8 +000	65,5	174,18	145,22	127,36	110,70	77,96	53,56	36,30	24,90	18,15	11:20:26	15,8	16,1
8 +100	64,8	172,28	142,08	124,92	106,46	73,65	49,67	33,01	21,67	14,25	11:21:20	16,1	15,6
8 +200	65,3	165,86	134,72	117,40	99,59	67,36	42,48	25,87	16,32	10,65	11:22:12	16,1	16,3
8 +300	65,3	116,44	94,35	83,70	72,85	52,75	37,42	25,28	17,52	11,54	11:23:01	15,6	16,4
8 +400	64,7	168,53	139,29	122,00	104,72	72,86	49,14	32,56	21,61	14,47	11:23:50	16,4	16,7
8 +500	64,6	140,48	113,93	100,26	87,89	62,35	44,85	32,18	20,71	15,18	11:24:42	14,8	18,4
8 +600	64,7	188,33	162,80	147,02	131,45	102,30	76,38	56,78	43,11	32,86	11:25:31	16,6	17,8
8 +700	65,1	187,94	160,88	144,30	128,42	96,77	73,60	55,32	43,24	33,05	11:26:20	16,6	16,3
8 +800	65,1	217,40	184,74	161,58	141,70	99,86	70,20	45,74	31,46	20,47	11:27:10	16,9	17,3

8 +900	65,1	229,48	196,64	174,88	151,62	109,70	76,16	50,91	34,54	23,36	11:28:00	17,5	16,6
9 +000	64,9	202,57	174,12	155,49	137,75	102,59	74,64	53,00	38,97	28,15	11:28:50	17,6	16,8
9 +100	65,2	176,04	151,60	138,64	125,57	100,14	76,00	58,15	44,78	32,81	11:29:45	17,9	16,7
9 +200	65,0	196,00	166,30	151,00	136,30	107,10	82,20	63,50	50,90	39,70	11:30:38	18,1	17,0
9 +300	64,9	174,74	146,40	130,18	114,66	85,72	64,19	48,27	38,85	30,64	11:31:27	18,1	17,9
9 +400	65,1	166,52	141,25	125,96	110,38	80,81	56,14	42,05	28,97	23,27	11:32:16	18,4	17,1
9 +500	64,9	162,27	135,23	118,80	102,87	73,42	51,99	36,76	26,65	20,03	11:33:05	18,7	17,4
9 +600	65,3	128,75	105,45	92,10	78,26	52,67	38,24	25,79	17,33	14,24	11:33:54	18,3	17,3
9 +700	64,8	141,14	115,85	101,59	87,54	61,74	43,17	30,02	21,78	15,96	11:34:46	17,8	17,8
9 +800	65,2	167,61	139,01	122,77	106,02	76,43	53,61	37,87	27,80	19,53	11:35:38	17,8	16,9
9 +900	65,1	168,54	143,68	129,00	114,62	87,17	63,40	49,12	34,85	27,86	11:37:01	17,7	16,2
10 +000	65,1	212,21	178,67	162,40	143,93	105,61	71,37	48,21	31,04	20,96	11:37:55	17,2	16,3
10 +100	65,0	167,95	140,74	127,44	111,43	82,73	60,02	42,31	30,91	20,11	11:38:45	16,8	17,2
10 +200	65,1	104,74	83,97	74,09	63,90	45,43	31,85	22,47	15,28	11,28	11:39:41	17,6	17,3
10 +300	64,8	150,86	121,98	105,02	87,87	59,18	37,82	22,27	14,44	10,73	11:40:44	16,4	17,3
10 +400	65,4	145,71	120,48	105,09	91,48	64,17	41,42	27,51	18,18	13,91	11:42:08	16,3	16,8
10 +500	64,8	126,93	104,75	97,53	85,59	67,83	52,68	41,14	31,41	26,29	11:43:05	16,2	16,8
10 +600	64,9	116,27	99,03	89,31	79,68	61,84	46,71	37,29	29,77	25,56	11:43:59	17,9	16,8
10 +700	65,0	154,40	132,58	121,07	109,67	85,55	67,94	53,03	43,23	34,62	11:44:53	17,2	17,2
10 +800	65,6	142,99	121,08	109,77	95,99	70,90	50,67	35,00	24,69	16,36	11:45:43	17,7	17,4
10 +900	64,4	190,99	170,00	156,47	142,34	115,28	90,75	70,76	56,83	46,84	11:46:36	17,9	17,5

Sentido 2													
PK (km)	Força (kN)	Distância (metros)									Hora	Temperatura	
		0	0,3	0,45	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1		Pavimento	Ar
0 +000	65,35	210,67	182,42	165,41	147,80	112,89	83,95	61,07	43,96	30,83	11:59:03	13,3	17,6
0 +100	65,02	211,04	181,64	162,05	144,46	107,37	77,98	55,68	38,59	26,69	11:58:03	16,9	17,8
0 +200	65,44	217,73	188,62	171,84	153,76	117,31	87,51	64,66	47,08	33,87	11:57:07	17,3	17,0
0 +300	64,64	190,15	163,71	147,52	131,23	100,36	75,02	56,92	43,54	33,59	11:56:09	17,8	17,4
0 +400	65,38	164,14	137,20	123,58	110,26	84,31	65,02	50,11	39,57	31,52	11:55:06	16,9	17,1
0 +500	64,92	199,25	170,81	155,19	138,77	106,63	82,50	63,48	49,06	39,15	11:54:11	17,1	17,1
0 +600	65,21	196,07	169,55	155,70	143,04	114,83	91,80	73,56	58,41	47,35	11:53:14	16,2	17,7
0 +700	65,14	237,29	202,66	184,60	167,34	129,82	97,19	75,14	59,47	47,60	11:52:16	16,3	16,5
0 +800	65,24	200,36	178,24	163,80	148,25	114,18	88,37	64,06	48,02	39,55	11:51:18	15,6	16,1
0 +900	64,92	216,17	187,33	175,12	154,19	122,05	94,02	69,69	52,16	40,25	11:50:28	15,3	16,8
1 +000	65,14	218,93	197,67	182,21	166,34	134,91	103,18	79,23	63,46	48,20	11:49:35	16,0	16,6
1 +100	64,68	261,69	232,34	214,46	194,76	155,06	121,70	94,36	72,76	56,48	11:48:38	15,8	17,0
1 +200	65,31	218,96	195,27	174,87	159,14	123,41	92,46	71,26	56,93	46,48	11:47:45	15,6	17,7
1 +300	64,82	242,17	215,40	200,66	183,61	146,10	117,32	91,85	71,00	55,15	11:46:52	16,2	16,7
1 +400	64,91	232,12	202,98	186,76	167,23	129,78	102,84	78,11	59,28	44,06	11:45:55	16,2	17,5
1 +500	65,00	252,40	223,90	203,40	181,80	145,00	109,90	86,60	68,40	55,00	11:45:01	17,9	16,2
1 +600	64,80	244,25	214,96	195,80	177,35	137,52	106,03	81,05	61,69	48,95	11:44:10	16,6	15,2
1 +700	65,21	225,57	202,74	187,29	165,66	131,97	103,17	79,74	62,50	49,64	11:43:14	16,6	15,7
1 +800	65,28	225,13	199,04	182,91	165,69	131,14	102,76	79,86	61,53	49,29	11:42:18	16,3	15,6
1 +900	65,42	187,49	163,15	147,75	133,24	104,03	80,98	62,99	49,68	39,74	11:41:24	16,3	16,1
2 +000	64,38	283,71	252,21	232,42	211,01	171,84	134,89	106,01	81,17	64,11	11:40:03	16,7	15,3
2 +100	65,70	255,84	227,95	211,92	194,90	156,71	124,06	96,76	76,97	57,98	11:39:08	17,1	16,1
2 +200	64,59	303,41	276,75	258,23	237,10	191,41	151,05	116,64	88,96	67,73	11:38:12	18,3	16,5
2 +300	65,33	306,34	276,30	257,99	238,79	195,41	158,00	125,26	97,80	75,12	11:37:12	18,0	16,9
2 +400	64,63	257,57	232,42	217,44	201,25	165,04	135,07	107,31	85,79	66,98	11:36:17	17,7	16,6
2 +500	65,19	272,60	245,78	227,93	209,09	169,60	135,40	106,89	84,55	67,00	11:35:22	17,7	15,2
2 +600	64,95	294,13	267,61	251,19	233,78	192,15	155,62	122,59	94,97	72,26	11:34:32	17,8	15,5

2 +700	65,09	162,67	134,21	119,93	105,65	76,79	53,93	37,45	24,87	16,18	11:33:27	17,5	15,0
2 +800	65,90	165,51	141,34	127,53	113,13	84,04	60,66	42,61	29,10	19,43	11:32:32	17,6	15,1
2 +900	64,27	195,19	173,55	161,11	147,35	118,53	93,35	72,01	55,22	41,87	11:31:40	17,3	15,3
3 +000	65,19	163,22	136,90	126,33	112,67	86,45	61,02	45,77	32,41	21,84	11:30:48	17,5	14,9
3 +100	64,88	149,38	123,03	109,90	97,48	72,53	53,30	37,57	27,25	19,24	11:29:54	17,5	16,1
3 +200	65,24	159,61	134,30	119,76	105,91	79,31	57,99	41,85	29,79	21,52	11:29:00	17,5	17,0
3 +300	64,68	179,48	151,45	137,58	123,51	95,57	73,96	57,08	43,72	34,07	11:28:08	17,1	16,8
3 +400	65,00	159,50	135,30	122,20	108,50	82,40	61,10	44,60	32,10	24,20	11:27:11	17,6	15,0
3 +500	65,48	158,63	135,40	121,90	108,40	80,90	58,96	41,99	29,98	21,14	11:26:13	18,6	14,6
3 +600	65,65	138,02	112,77	99,31	86,04	61,39	42,77	29,21	19,01	12,97	11:15:10	15,8	15,6
3 +700	65,00	198,50	174,00	160,00	145,30	114,90	89,30	68,40	52,50	39,90	11:14:16	15,5	15,5
3 +800	65,09	135,41	116,24	107,35	97,27	78,19	61,12	48,73	38,65	31,06	11:13:21	15,0	14,4
3 +900	65,31	172,98	143,91	129,18	115,15	87,08	66,08	49,66	39,31	28,27	11:12:23	15,5	14,7
4 +000	65,51	204,59	177,90	156,87	137,82	107,75	83,15	64,79	52,09	42,27	11:11:24	16,1	14,6
4 +100	64,13	190,55	157,51	139,06	119,90	84,73	60,81	41,35	28,79	19,56	11:10:28	16,3	15,0
4 +200	65,12	145,03	116,78	104,41	92,33	70,27	54,40	42,92	35,04	28,85	11:09:32	14,0	15,2
4 +300	64,39	218,75	187,26	171,31	155,16	119,72	92,06	70,26	52,69	39,47	11:07:24	15,6	13,8
4 +400	65,05	180,36	155,68	140,69	124,50	95,33	73,44	56,96	44,87	36,47	11:06:25	16,4	14,8
4 +500	64,91	152,81	130,08	117,86	105,45	81,81	64,29	51,17	40,76	33,55	11:05:33	16,8	14,2
4 +600	64,92	143,88	122,55	114,44	101,52	83,00	63,28	50,96	39,25	35,34	11:04:37	16,9	14,2
4 +700	65,21	201,95	178,92	164,37	150,61	120,01	94,10	76,05	57,91	46,95	11:03:44	17,0	13,8
4 +800	64,89	211,86	187,42	173,19	157,27	127,62	101,17	80,44	64,21	52,09	11:02:48	16,9	14,5
4 +900	65,17	176,94	153,80	144,72	129,46	103,23	79,49	61,24	50,17	39,30	11:01:53	16,4	14,6
5 +000	64,75	197,76	170,56	155,90	139,64	107,11	82,02	62,74	48,39	38,35	11:00:54	17,1	14,8
5 +100	65,28	177,24	152,64	141,29	127,65	99,57	74,98	57,55	43,81	35,85	10:59:58	16,8	14,9
5 +200	65,16	155,12	135,37	124,09	112,32	88,68	70,73	56,06	44,79	36,41	10:58:28	16,4	14,3
5 +300	64,85	167,39	145,74	132,41	120,08	93,92	74,07	58,74	46,21	37,19	10:57:19	16,6	14,1
5 +400	65,17	147,81	127,87	118,39	106,92	84,98	67,72	53,56	46,38	35,11	10:56:24	16,4	14,0
5 +500	65,41	175,19	152,44	140,41	127,89	101,96	80,99	64,79	51,18	40,05	10:55:29	16,1	13,4
5 +600	65,21	164,07	503,57	123,80	116,32	97,98	70,77	57,91	46,85	39,97	10:54:15	16,3	13,2
5 +700	64,96	161,30	145,69	136,88	122,88	99,96	73,15	59,14	46,23	49,53	10:53:10	16,1	14,5
5 +800	65,21	132,67	115,63	106,76	94,40	78,35	59,51	46,95	39,27	32,99	10:51:14	15,9	13,5

5 +900	65,26	212,65	186,95	169,02	148,51	109,86	77,09	52,39	41,63	30,58	10:49:57	15,4	13,6
6 +000	65,05	127,10	111,61	100,32	90,53	69,75	55,96	44,57	35,67	29,48	10:49:01	15,1	14,8
6 +100	65,05	149,29	128,80	114,91	100,02	80,74	55,46	42,67	33,17	26,68	10:47:42	14,5	13,7
6 +200	64,98	159,55	134,14	120,14	106,63	80,22	60,42	45,61	35,91	29,21	10:46:46	14,1	14,3
6 +300	65,33	157,50	131,53	118,60	105,56	80,79	62,78	49,55	38,41	29,65	10:45:47	14,2	15,1
6 +400	64,43	189,36	162,63	148,50	132,87	101,49	81,72	62,95	51,05	38,54	10:44:52	13,9	14,5
6 +500	65,16	150,53	129,38	116,11	102,15	77,61	58,95	45,09	35,01	26,73	10:44:01	14,0	16,1
6 +600	65,00	159,50	137,90	125,90	114,00	88,90	69,90	55,00	43,90	35,80	10:43:04	13,7	15,3
6 +700	64,78	175,79	156,73	146,70	135,36	111,68	92,81	75,56	61,21	49,77	10:42:16	13,8	14,8
6 +800	65,33	184,76	159,09	144,86	130,04	99,30	77,71	59,90	43,18	33,73	10:41:15	13,9	14,0
6 +900	65,03	187,61	160,13	142,63	126,04	93,46	68,87	50,98	38,48	29,49	10:40:24	13,6	14,3
7 +000	65,02	204,24	171,45	153,15	132,86	97,87	69,18	49,18	35,79	27,69	10:39:20	13,5	12,7
7 +100	65,51	141,49	116,59	104,78	90,69	70,15	53,58	40,58	32,54	26,69	10:37:28	13,3	12,2
7 +200	65,30	168,92	145,13	131,49	117,36	89,29	68,28	51,16	38,62	30,56	10:36:30	13,2	12,4
7 +300	64,49	183,14	157,13	141,41	125,89	94,64	69,44	50,70	37,59	29,13	10:35:31	13,3	12,3
7 +400	65,16	120,20	101,45	91,08	80,80	61,05	50,58	40,80	32,62	25,44	10:34:34	13,1	12,9
7 +500	64,88	159,59	137,05	125,93	112,81	87,86	67,02	49,89	37,27	27,55	10:33:39	13,4	12,5
7 +600	65,26	136,16	116,63	107,17	99,10	79,18	61,35	47,11	38,25	29,78	10:32:43	13,3	12,1
7 +700	65,16	131,48	107,24	93,77	79,60	56,86	41,90	29,13	21,25	15,36	10:31:49	13,4	12,1
7 +800	64,75	144,15	120,26	107,61	94,56	70,07	52,00	39,05	30,02	23,69	10:30:50	13,5	12,4
7 +900	64,77	149,03	122,94	110,29	97,55	73,36	55,70	42,05	32,41	25,09	10:29:58	13,3	12,3
8 +000	65,41	140,71	116,86	103,65	91,03	66,08	47,40	32,99	22,76	15,60	10:29:01	13,3	12,4
8 +100	64,84	130,82	105,76	93,93	82,10	59,25	43,21	30,37	21,65	14,74	10:28:06	13,6	12,4
8 +200	65,58	148,28	121,52	107,34	93,86	68,09	48,27	33,80	23,89	16,55	10:27:12	13,7	12,5
8 +300	65,23	131,14	110,01	97,26	86,89	63,58	44,14	30,99	21,92	15,15	10:26:17	13,7	13,1
8 +400	65,30	148,81	124,43	109,59	94,66	66,29	44,99	29,76	19,61	13,24	10:25:22	13,2	13,1
8 +500	65,05	173,07	151,48	135,60	122,31	97,13	75,14	58,26	46,46	36,37	10:24:33	13,7	13,3
8 +600	64,98	169,95	148,85	133,74	120,04	91,03	72,92	54,52	42,81	32,61	10:23:35	13,7	13,5
8 +700	64,88	183,94	156,39	140,66	125,63	94,77	73,94	56,70	45,98	35,87	10:22:35	13,6	13,2
8 +800	64,71	178,70	147,46	129,08	111,40	76,54	50,32	32,85	20,59	13,26	10:21:40	13,8	13,1
8 +900	65,10	155,36	129,20	113,43	97,45	68,29	46,73	31,05	20,27	12,68	10:20:44	14,0	12,8
9 +000	65,24	141,98	116,37	102,62	88,77	62,97	43,44	29,09	18,83	12,45	10:19:50	14,1	13,5

9 +100	64,98	175,45	154,15	140,54	125,64	97,13	73,92	56,12	41,91	31,31	10:18:54	14,2	13,6
9 +200	64,82	142,70	124,44	114,92	105,79	85,44	69,89	57,06	45,63	37,40	10:17:57	13,6	13,7
9 +300	65,02	122,26	101,47	91,97	82,37	61,18	46,79	35,79	26,79	20,79	10:17:03	14,1	16,2
9 +400	64,98	144,64	123,94	113,13	101,33	78,22	59,62	46,11	35,11	26,51	10:16:08	13,7	15,6
9 +500	64,98	139,24	117,24	106,93	95,33	73,32	56,42	42,91	33,81	26,91	10:15:12	13,9	14,5
9 +600	64,63	143,52	122,60	112,54	102,48	81,46	64,06	51,09	40,63	33,69	10:14:16	13,4	15,0
9 +700	65,46	114,69	91,35	80,73	70,70	51,63	37,83	27,31	21,55	15,89	10:13:18	13,5	13,4
9 +800	65,00	118,00	97,90	88,30	79,80	61,80	49,20	36,30	29,70	21,60	10:12:25	13,1	13,1
9 +900	64,78	154,02	130,04	116,90	103,45	78,67	59,40	43,75	32,01	23,38	10:11:31	13,1	13,9
10 +000	65,21	118,22	94,99	84,23	72,86	52,63	36,58	24,92	17,54	11,76	10:10:36	12,8	14,3
10 +100	64,78	126,53	103,35	90,71	79,27	59,10	44,95	33,61	25,69	19,57	10:09:40	12,4	12,7
10 +200	65,03	127,04	104,15	91,56	79,56	55,27	37,98	24,99	16,39	10,30	10:08:39	11,9	12,5
10 +300	64,47	168,37	146,19	133,09	119,78	93,06	71,89	53,74	41,24	30,85	10:07:44	11,9	12,3
10 +400	66,06	133,42	112,66	102,04	92,00	70,35	54,90	41,72	33,45	25,88	10:06:43	11,9	13,4
10 +500	65,48	182,85	157,54	143,84	127,96	97,78	74,45	56,68	45,36	35,54	10:05:39	11,8	12,5
10 +600	64,91	166,73	143,80	130,28	115,76	89,22	68,39	52,57	41,26	32,24	10:04:38	11,6	11,8
10 +700	65,17	165,97	144,02	128,56	113,90	85,68	62,14	43,69	31,12	24,64	10:03:38	11,6	12,8
10 +800	64,38	169,92	140,44	125,30	111,16	83,50	61,89	45,53	33,92	25,24	10:02:39	11,6	11,6
10 +900	65,09	147,90	118,04	105,35	91,67	68,51	47,43	33,35	24,87	18,57	10:01:43	12,0	11,8

- Caso de estudo 2

Sentido 1										
PK (km)	Força (kN)	Distância (metros)								
		0	0,3	0,45	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1
0 +000	66,37	603,11	276,67	236,61	190,88	124,18	78,64	51,81	40,15	23,70
0 +100	65,97	788,49	489,99	398,95	316,28	193,32	112,82	65,72	43,75	30,35
0 +200	65,69	799,85	479,71	351,67	264,69	144,86	71,84	37,50	31,76	18,40
0 +300	66,02	551,12	250,86	201,44	157,23	92,84	54,35	31,41	20,08	13,19
0 +400	65,67	342,01	206,87	166,48	128,97	75,72	41,57	22,86	16,53	10,69
0 +500	65,30	491,13	240,29	182,56	138,06	80,43	46,58	27,27	19,71	12,04
0 +600	65,63	429,55	214,52	163,71	124,00	68,73	36,55	19,11	13,27	9,71
0 +700	64,64	442,91	205,94	174,67	145,00	98,04	64,46	42,13	27,35	20,41
0 +800	65,42	486,01	228,23	182,72	142,38	83,36	53,65	37,46	29,51	23,35
0 +900	64,52	438,78	257,20	185,47	133,59	75,05	45,94	27,91	18,64	14,20
1 +000	66,02	453,16	259,92	213,35	166,49	101,11	62,52	39,78	29,44	23,33
1 +100	64,49	744,48	422,31	336,64	264,88	160,96	101,80	65,61	46,97	34,37
1 +200	65,67	783,70	396,31	312,78	241,02	143,92	88,98	56,72	43,35	32,56
1 +300	65,49	710,18	379,64	309,96	245,25	151,56	96,37	62,13	43,77	33,35
1 +400	64,91	975,23	461,84	353,19	269,97	162,42	101,14	64,29	44,46	32,65
1 +500	64,84	846,75	474,67	378,33	291,32	171,62	104,16	64,16	44,81	33,68
1 +600	66,40	841,55	445,90	342,52	254,03	152,22	95,84	62,75	44,05	33,48
1 +700	67,08	1134,25	612,98	448,84	330,04	165,41	91,57	54,75	38,18	29,55
1 +800	68,78	628,22	292,40	215,56	158,20	92,05	60,29	42,81	33,45	27,22
1 +900	68,92	459,25	268,98	210,69	160,24	83,75	43,86	24,33	13,86	11,13
2 +000	67,79	1094,11	493,13	374,14	286,79	170,77	109,31	74,12	54,56	42,86
2 +100	68,20	764,19	418,12	324,05	248,09	144,68	87,49	54,90	39,36	28,69
2 +200	67,77	864,61	399,00	332,72	266,25	175,90	120,56	87,47	68,00	53,90
2 +300	66,78	1041,03	492,32	426,52	358,48	251,80	175,30	122,06	89,84	68,43
2 +400	68,66	479,05	250,59	189,72	142,19	77,25	42,60	27,74	21,58	17,51
2 +500	68,81	669,15	306,34	242,68	187,04	109,77	64,61	39,11	28,24	21,16
2 +600	68,83	557,41	297,76	224,00	168,28	90,09	50,62	32,58	20,11	16,72

2 +700	68,69	602,66	296,19	228,72	173,74	98,98	58,48	34,63	20,82	13,91
2 +800	67,99	538,08	283,17	215,97	153,92	76,77	39,67	19,31	9,27	4,30
2 +900	68,59	321,37	193,23	151,15	109,55	52,12	21,13	7,01	1,90	0,00
3 +000	67,58	445,10	209,29	168,61	128,60	72,91	42,32	23,95	15,29	8,94
3 +100	67,21	572,46	303,77	237,43	173,69	96,42	57,16	36,27	23,89	16,44
3 +200	66,57	703,31	374,46	297,71	231,61	136,99	83,09	50,09	33,49	23,82
3 +300	67,07	714,66	323,98	260,70	207,78	124,92	74,82	45,45	32,95	21,90
3 +400	67,19	406,30	238,47	188,55	143,37	86,00	53,59	36,57	27,28	22,25
3 +500	67,50	590,33	333,28	257,88	200,01	116,23	69,14	44,39	35,15	24,84
3 +600	68,20	466,43	270,67	206,34	144,58	76,63	45,84	30,69	22,59	18,30
3 +700	68,21	548,82	255,86	194,30	143,99	74,14	37,93	20,68	13,06	10,77
3 +800	67,77	578,90	270,09	204,39	146,55	72,99	38,75	23,11	14,39	9,40
3 +900	67,91	367,60	215,93	145,39	93,13	37,42	17,32	9,09	6,41	5,17
4 +000	67,61	548,75	274,29	229,49	181,42	110,56	67,59	43,17	31,34	24,23
4 +100	68,39	433,99	232,29	162,24	109,87	46,86	18,91	6,84	2,28	0,10
4 +200	67,86	451,97	207,76	159,20	116,28	61,97	33,05	16,76	11,21	6,80
4 +300	67,54	457,73	248,30	190,55	141,57	77,47	46,29	30,22	20,79	15,40
4 +400	67,82	483,45	227,43	174,91	132,93	75,81	46,20	28,75	22,24	17,44
4 +500	67,38	490,98	242,42	195,73	150,01	82,67	48,81	31,64	22,57	16,79
4 +600	66,94	580,92	285,97	224,60	171,38	101,18	57,97	34,18	21,56	14,47
4 +700	66,22	643,00	325,29	253,93	191,51	105,03	60,86	40,54	27,58	20,02
4 +800	65,42	572,14	331,56	256,64	196,23	105,22	60,41	36,96	25,73	19,47
4 +900	64,27	527,53	286,62	246,16	203,38	138,76	95,27	66,95	49,56	38,13
5 +000	65,53	756,45	339,23	275,55	225,66	143,83	97,41	67,95	50,29	39,28
5 +100	65,24	476,90	238,72	185,91	137,59	81,90	56,59	41,15	31,28	24,01
5 +200	64,82	801,55	357,19	290,30	228,13	134,27	74,61	39,31	20,56	9,93
5 +300	66,61	720,20	352,47	279,87	213,61	118,56	64,01	34,15	19,81	12,20
5 +400	67,01	419,46	242,11	199,63	157,92	97,39	61,98	40,16	29,10	22,70
5 +500	66,52	593,55	282,10	242,43	187,81	115,79	73,97	47,98	30,49	20,52
5 +600	67,01	268,33	150,64	123,00	97,00	60,92	39,96	27,45	20,86	16,10
5 +700	66,52	494,88	298,23	234,61	173,74	94,39	54,13	34,69	25,60	21,30
5 +800	67,33	616,60	328,72	269,44	216,92	136,99	84,76	51,46	32,63	21,05

5 +900	66,89	712,99	318,73	254,79	195,13	112,92	67,92	42,66	29,25	22,16
6 +000	67,60	540,70	285,67	222,69	169,33	98,65	60,19	38,17	27,60	21,15
6 +100	67,07	530,82	318,36	260,21	207,01	133,06	88,48	64,35	46,91	37,51
6 +200	67,26	618,74	360,95	297,17	240,73	161,10	107,75	73,25	49,00	36,34
6 +300	67,43	558,80	252,27	201,95	157,22	95,82	58,32	37,02	25,74	18,51
6 +400	66,69	633,38	297,27	250,68	202,73	128,07	79,63	49,03	33,33	25,34
6 +500	67,49	229,01	114,51	93,42	77,53	55,47	40,07	29,76	23,60	18,68

Sentido 2										
PK (km)	Força (kN)	Distância (metros)								
		0	0,3	0,45	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1
0 +000	65,35	722,26	492,13	374,12	276,74	139,90	77,40	46,06	30,87	23,03
0 +100	65,02	663,90	468,66	329,68	228,44	100,95	45,84	22,78	14,48	8,20
0 +200	65,44	296,05	217,94	162,64	116,88	61,40	36,51	24,60	16,30	12,87
0 +300	64,64	332,53	215,70	159,52	117,86	64,56	34,44	20,20	11,55	7,12
0 +400	65,38	334,84	225,48	171,54	130,19	78,17	50,00	33,46	23,46	15,77
0 +500	64,92	368,44	240,01	180,13	133,35	72,70	39,41	22,00	13,11	7,94
0 +600	65,21	397,81	298,92	226,52	170,55	94,42	53,33	29,55	18,10	11,84
0 +700	65,14	555,45	423,14	270,82	187,02	84,41	44,77	27,97	21,73	17,40
0 +800	65,24	347,68	264,39	188,04	134,86	75,15	47,76	36,82	30,80	23,48
0 +900	64,92	302,87	211,19	169,03	131,98	85,22	57,68	40,46	31,74	24,73
1 +000	65,14	491,13	358,18	272,46	194,48	114,03	68,93	44,80	38,54	31,98
1 +100	64,68	688,85	497,61	376,55	274,63	145,42	81,69	40,65	32,21	22,39
1 +200	65,31	575,84	423,16	334,26	259,10	157,63	98,65	63,56	51,37	42,11
1 +300	64,82	590,94	451,34	369,82	292,66	183,27	114,43	71,45	48,50	35,82
1 +400	64,91	575,39	485,27	370,07	274,45	148,97	82,31	42,38	34,06	23,98
1 +500	65,00	601,03	443,80	330,00	241,87	128,17	68,90	37,41	23,71	16,91
1 +600	64,80	574,96	342,52	264,59	206,50	128,66	86,26	61,28	48,12	35,63
1 +700	65,21	670,80	408,16	335,23	274,07	191,30	131,00	97,91	72,93	57,40

1 +800	65,28	305,86	223,14	155,01	109,06	59,31	35,63	20,18	15,73	11,65
1 +900	65,42	617,36	384,63	289,82	211,45	112,97	61,37	35,76	24,64	14,69
2 +000	64,38	584,03	374,84	293,35	223,98	128,92	81,01	55,42	41,08	32,13
2 +100	65,70	570,52	429,10	354,85	288,26	186,45	122,20	79,98	60,18	45,04
2 +200	64,59	545,71	329,52	272,90	224,82	158,88	113,63	80,90	67,98	52,25
2 +300	65,33	401,85	254,20	206,14	164,46	105,83	75,11	55,24	45,36	36,54
2 +400	64,63	575,90	376,63	272,31	202,84	110,20	61,37	37,73	27,50	23,16
2 +500	65,19	622,55	392,85	290,76	203,70	104,88	60,77	41,12	32,07	23,69
2 +600	64,95	431,20	329,24	261,89	199,01	114,32	65,64	39,15	27,53	20,01
2 +700	65,09	408,05	259,27	213,17	172,40	106,92	63,67	40,76	27,21	17,66
2 +800	65,90	270,05	188,65	135,72	90,96	40,53	18,06	9,51	8,07	5,67
2 +900	64,27	486,84	330,60	266,33	204,28	119,27	69,19	37,92	20,36	12,93
3 +000	65,19	280,09	202,09	145,88	101,09	47,76	23,59	11,51	7,00	4,60
3 +100	64,88	344,88	225,75	153,71	105,40	46,98	22,87	9,82	6,29	0,48
3 +200	65,24	516,97	343,41	257,94	193,34	111,52	66,43	42,59	35,19	25,77
3 +300	64,68	494,52	382,15	287,00	208,58	117,18	71,39	47,34	36,56	28,86
3 +400	65,00	410,57	286,51	239,96	191,39	119,60	80,15	49,43	40,79	30,14
3 +500	65,48	440,77	336,95	265,71	200,35	114,50	69,91	43,64	35,19	25,99
3 +600	65,65	637,02	475,71	350,51	256,73	141,24	80,13	51,69	40,26	25,85
3 +700	65,00	207,37	144,54	111,55	84,13	45,28	22,97	10,21	6,43	2,36
3 +800	65,09	338,59	233,56	177,38	130,68	67,86	32,36	15,56	11,48	5,41
3 +900	65,31	361,77	251,16	204,06	159,75	95,14	54,56	29,58	16,75	9,67
4 +000	65,51	498,38	305,45	228,70	167,94	88,79	47,09	24,84	16,18	13,87
4 +100	64,13	381,66	264,75	218,22	174,50	111,19	72,13	46,53	36,26	26,08
4 +200	65,12	440,03	284,22	215,63	155,96	78,56	38,17	16,95	8,43	4,65
4 +300	64,39	259,70	193,22	143,18	103,68	51,65	22,60	8,55	3,42	1,23
4 +400	65,05	349,49	255,55	207,15	162,86	102,24	67,01	40,67	31,12	18,23
4 +500	64,91	443,46	276,08	209,46	153,51	76,61	37,72	18,62	10,47	6,30
4 +600	64,92	631,89	437,88	336,54	247,84	129,94	64,12	32,01	21,87	14,25
4 +700	65,21	578,40	359,50	271,72	205,72	121,73	77,09	49,23	33,65	24,17
4 +800	64,89	425,98	298,98	234,51	175,61	97,34	57,21	34,96	25,53	19,27
4 +900	65,17	564,03	392,51	285,45	202,17	98,80	48,95	27,46	23,18	16,52

5 +000	64,75	480,36	315,59	249,30	191,35	106,94	60,97	35,31	23,34	15,69
5 +100	65,28	479,72	302,32	233,19	172,91	91,02	45,36	22,48	11,68	8,15
5 +200	65,16	590,85	355,06	277,39	211,46	120,84	66,03	38,17	25,21	16,02
5 +300	64,85	358,56	225,23	173,87	128,50	67,35	35,67	18,99	16,19	11,89
5 +400	65,17	247,38	182,88	138,71	100,68	52,17	28,95	16,89	12,45	9,58
5 +500	65,41	457,45	343,46	273,41	215,64	128,62	69,95	41,81	28,34	21,25
5 +600	65,21	355,22	249,04	191,93	145,06	88,25	54,82	35,42	26,57	18,41
5 +700	64,96	388,55	296,51	231,23	173,65	101,97	62,08	40,49	28,49	22,69
5 +800	65,21	541,76	324,25	269,83	216,40	132,22	78,49	47,63	33,85	25,86
5 +900	65,26	501,82	364,63	271,28	209,47	115,92	68,31	39,73	27,60	21,29
6 +000	65,05	668,97	464,24	369,52	286,75	176,20	110,36	71,51	47,41	38,05
6 +100	65,05	444,91	310,87	240,29	181,36	101,73	57,14	34,74	24,09	18,91
6 +200	64,98	654,63	395,50	316,36	244,78	150,23	91,02	53,71	37,61	27,79
6 +300	65,33	403,12	252,63	207,32	166,77	103,61	62,87	35,60	21,25	13,29
6 +400	64,43	373,53	286,60	227,22	178,72	106,92	64,19	38,30	25,41	16,07
6 +500	65,16	358,82	275,40	230,92	188,26	127,57	85,69	56,45	39,85	27,40

Anexo IV

- Caso de estudo 1

Método das somas acumuladas

Sentido 1		
PK (km)	Deflexão DF1	zi
0 +000	208,68	35,53
0 +100	213,56	75,95
0 +200	202,13	104,93
0 +300	247,29	179,07
0 +400	245,46	251,38
0 +500	199,22	277,46
0 +600	228,81	333,12
0 +700	198,68	358,66
0 +800	206,53	392,04
0 +900	186,53	405,42
1 +000	193,92	426,20
1 +100	197,37	450,42
1 +200	198,50	475,77
1 +300	250,49	553,12
1 +400	253,82	633,79
1 +500	203,62	664,27
1 +600	205,86	696,98
1 +700	188,56	712,39
1 +800	161,92	701,16
1 +900	188,55	716,57
2 +000	273,37	816,79
2 +100	234,72	878,36
2 +200	233,12	938,33
2 +300	266,63	1031,82
2 +400	208,31	1066,98
2 +500	183,82	1077,65
2 +600	247,57	1152,08
2 +700	170,04	1148,97
2 +800	151,37	1127,19
2 +900	192,34	1146,38
3 +000	131,80	1105,04
3 +100	146,22	1078,11
3 +200	116,77	1021,74
3 +300	137,45	986,04
3 +400	174,96	987,85
3 +500	162,15	976,86
3 +600	119,62	923,33
3 +700	143,03	893,21
3 +800	159,92	879,99
3 +900	167,37	874,21
4 +000	181,96	883,03
4 +100	175,43	885,31

4 +200	123,52	835,69
4 +300	172,23	834,77
4 +400	189,69	851,32
4 +500	164,58	842,75
4 +600	128,89	798,50
4 +700	183,41	808,76
4 +800	110,46	746,07
4 +900	233,62	806,55
5 +000	201,97	835,37
5 +100	194,79	857,02
5 +200	70,40	754,27
5 +300	156,46	737,58
5 +400	131,77	696,21
5 +500	119,36	642,42
5 +600	135,30	604,58
5 +700	173,11	604,54
5 +800	61,07	492,46
5 +900	206,76	526,08
6 +000	135,16	488,09
6 +100	120,09	435,04
6 +200	127,43	389,32
6 +300	118,25	334,42
6 +400	151,65	312,92
6 +500	143,70	283,47
6 +600	140,79	251,11
6 +700	154,07	232,03
6 +800	159,93	218,81
6 +900	170,08	215,75
7 +000	151,73	194,33
7 +100	161,55	182,73
7 +200	166,60	176,19
7 +300	174,71	177,75
7 +400	168,36	172,96
7 +500	223,59	223,40
7 +600	153,11	203,37
7 +700	186,91	217,13
7 +800	177,97	221,96
7 +900	187,45	236,26
8 +000	174,18	237,29
8 +100	172,28	236,42
8 +200	165,86	229,14
8 +300	116,44	172,43
8 +400	168,53	167,82
8 +500	140,48	135,15
8 +600	188,33	150,33
8 +700	187,94	165,12
8 +800	217,40	209,37
8 +900	229,48	265,70
9 +000	202,57	295,13
9 +100	176,04	298,02
9 +200	196,00	320,87
9 +300	174,74	322,47

9 +400	166,52	315,84
9 +500	162,27	304,97
9 +600	128,75	260,57
9 +700	141,14	228,56
9 +800	167,61	223,02
9 +900	168,54	218,42
10 +000	212,21	257,48
10 +100	167,95	252,28
10 +200	104,74	183,88
10 +300	150,86	161,59
10 +400	145,71	134,16
10 +500	126,93	87,94
10 +600	116,27	31,06
10 +700	154,40	12,31
10 +800	142,99	-17,85
10 +900	190,99	0,00

Média DF1	173,15
-----------	--------

Sentido 2		
PK (km)	DF1	zi
0 +000	210,67	32,26
0 +100	211,04	64,89
0 +200	217,73	104,20
0 +300	190,15	115,95
0 +400	164,14	101,68
0 +500	199,25	122,52
0 +600	196,07	140,18
0 +700	237,29	199,06
0 +800	200,36	221,02
0 +900	216,17	258,77
1 +000	218,93	299,30
1 +100	261,69	382,58
1 +200	218,96	423,12
1 +300	242,17	486,89
1 +400	232,12	540,60
1 +500	252,40	614,59
1 +600	244,25	680,44
1 +700	225,57	727,60
1 +800	225,13	774,33
1 +900	187,49	783,41
2 +000	283,71	888,71
2 +100	255,84	966,14
2 +200	303,41	1091,15
2 +300	306,34	1219,09
2 +400	257,57	1298,25
2 +500	272,60	1392,44
2 +600	294,13	1508,16

2 +700	162,67	1492,43
2 +800	165,51	1479,53
2 +900	195,19	1496,31
3 +000	163,22	1481,13
3 +100	149,38	1452,10
3 +200	159,61	1433,30
3 +300	179,48	1434,38
3 +400	159,50	1415,47
3 +500	158,63	1395,69
3 +600	138,02	1355,30
3 +700	198,50	1375,40
3 +800	135,41	1332,40
3 +900	172,98	1326,97
4 +000	204,59	1353,16
4 +100	190,55	1365,30
4 +200	145,03	1331,92
4 +300	218,75	1372,27
4 +400	180,36	1374,22
4 +500	152,81	1348,63
4 +600	143,88	1314,10
4 +700	201,95	1337,64
4 +800	211,86	1371,09
4 +900	176,94	1369,62
5 +000	197,76	1388,97
5 +100	177,24	1387,80
5 +200	155,12	1364,51
5 +300	167,39	1353,49
5 +400	147,81	1322,90
5 +500	175,19	1319,69
5 +600	164,07	1305,35
5 +700	161,30	1288,24
5 +800	132,67	1242,50
5 +900	212,65	1276,75
6 +000	127,10	1225,44
6 +100	149,29	1196,32
6 +200	159,55	1177,46
6 +300	157,50	1156,55
6 +400	189,36	1167,51
6 +500	150,53	1139,63
6 +600	159,50	1120,72
6 +700	175,79	1118,11
6 +800	184,76	1124,46
6 +900	187,61	1133,67
7 +000	204,24	1159,50
7 +100	141,49	1122,58
7 +200	168,92	1113,10
7 +300	183,14	1117,83
7 +400	120,20	1059,62
7 +500	159,59	1040,81
7 +600	136,16	998,56
7 +700	131,48	951,63
7 +800	144,15	917,37

7 +900	149,03	887,99
8 +000	140,71	850,30
8 +100	130,82	802,71
8 +200	148,28	772,58
8 +300	131,14	725,31
8 +400	148,81	695,72
8 +500	173,07	690,38
8 +600	169,95	681,92
8 +700	183,94	687,45
8 +800	178,70	687,74
8 +900	155,36	664,70
9 +000	141,98	628,27
9 +100	175,45	625,31
9 +200	142,70	589,60
9 +300	122,26	533,46
9 +400	144,64	499,69
9 +500	139,24	460,53
9 +600	143,52	425,64
9 +700	114,69	361,92
9 +800	118,00	301,51
9 +900	154,02	277,13
10 +000	118,22	216,94
10 +100	126,53	165,06
10 +200	127,04	113,69
10 +300	168,37	103,66
10 +400	133,42	58,67
10 +500	182,85	63,12
10 +600	166,73	51,44
10 +700	165,97	39,00
10 +800	169,92	30,51
10 +900	147,90	0,00

Média DF1	178,41
-----------	--------

Método das diferenças acumuladas

Sentido 1							
PK (km)	Deflexão DF1	\bar{D}	Δli	$\sum \Delta li$	A_i	$\sum A_i$	z_i
0 +000	208,68	-	-	-	-	-	0
0 +100	213,56	211,12	100,00	100,00	21 111,98	21 111,98	3 821,76
0 +200	202,13	207,85	100,00	200,00	20 784,68	41 896,66	7 316,22
0 +300	247,29	224,71	100,00	300,00	22 470,98	64 367,63	12 496,98
0 +400	245,46	246,38	100,00	400,00	24 637,52	89 005,15	19 844,28
0 +500	199,22	222,34	100,00	500,00	22 234,12	111 239,27	24 788,19
0 +600	228,81	214,02	100,00	600,00	21 401,60	132 640,87	28 899,57
0 +700	198,68	213,75	100,00	700,00	21 374,63	154 015,50	32 983,98
0 +800	206,53	202,61	100,00	800,00	20 260,69	174 276,19	35 954,46
0 +900	186,53	196,53	100,00	900,00	19 653,02	193 929,21	38 317,26
1 +000	193,92	190,22	100,00	1 000,00	19 022,45	212 951,66	40 049,49
1 +100	197,37	195,65	100,00	1 100,00	19 564,63	232 516,29	42 323,90
1 +200	198,50	197,94	100,00	1 200,00	19 793,55	252 309,83	44 827,23
1 +300	250,49	224,49	100,00	1 300,00	22 449,42	274 759,25	49 986,43
1 +400	253,82	252,16	100,00	1 400,00	25 215,68	299 974,93	57 911,90
1 +500	203,62	228,72	100,00	1 500,00	22 872,11	322 847,04	63 493,79
1 +600	205,86	204,74	100,00	1 600,00	20 473,87	343 320,91	66 677,44
1 +700	188,56	197,21	100,00	1 700,00	19 720,81	363 041,72	69 108,03
1 +800	161,92	175,24	100,00	1 800,00	17 524,04	380 565,76	69 341,85
1 +900	188,55	175,24	100,00	1 900,00	17 523,58	398 089,34	69 575,22
2 +000	273,37	230,96	100,00	2 000,00	23 096,09	421 185,43	75 381,09
2 +100	234,72	254,04	100,00	2 100,00	25 404,48	446 589,91	83 495,35
2 +200	233,12	233,92	100,00	2 200,00	23 391,87	469 981,77	89 597,00
2 +300	266,63	249,88	100,00	2 300,00	24 987,56	494 969,34	97 294,35

2 +400	208,31	237,47	100,00	2 400,00	23 746,86	518 716,20	103 750,99
2 +500	183,82	196,06	100,00	2 500,00	19 606,39	538 322,59	106 067,16
2 +600	247,57	215,70	100,00	2 600,00	21 569,62	559 892,21	110 346,57
2 +700	170,04	208,80	100,00	2 700,00	20 880,39	580 772,60	113 936,75
2 +800	151,37	160,70	100,00	2 800,00	16 070,47	596 843,07	112 717,00
2 +900	192,34	171,86	100,00	2 900,00	17 185,62	614 028,69	112 612,40
3 +000	131,80	162,07	100,00	3 000,00	16 206,90	630 235,59	111 529,08
3 +100	146,22	139,01	100,00	3 100,00	13 901,02	644 136,61	108 139,88
3 +200	116,77	131,50	100,00	3 200,00	13 149,68	657 286,29	103 999,35
3 +300	137,45	127,11	100,00	3 300,00	12 711,16	669 997,45	99 420,29
3 +400	174,96	156,21	100,00	3 400,00	15 620,66	685 618,11	97 750,73
3 +500	162,15	168,56	100,00	3 500,00	16 855,59	702 473,69	97 316,10
3 +600	119,62	140,88	100,00	3 600,00	14 088,33	716 562,02	94 114,21
3 +700	143,03	131,32	100,00	3 700,00	13 132,49	729 694,50	89 956,48
3 +800	159,92	151,48	100,00	3 800,00	15 147,76	744 842,26	87 814,02
3 +900	167,37	163,64	100,00	3 900,00	16 364,48	761 206,74	86 888,28
4 +000	181,96	174,67	100,00	4 000,00	17 466,62	778 673,36	87 064,68
4 +100	175,43	178,70	100,00	4 100,00	17 869,95	796 543,31	87 644,42
4 +200	123,52	149,48	100,00	4 200,00	14 947,79	811 491,10	85 301,99
4 +300	172,23	147,87	100,00	4 300,00	14 787,46	826 278,56	82 799,23
4 +400	189,69	180,96	100,00	4 400,00	18 096,16	844 374,72	83 605,17
4 +500	164,58	177,14	100,00	4 500,00	17 713,93	862 088,64	84 028,88
4 +600	128,89	146,74	100,00	4 600,00	14 673,87	876 762,52	81 412,54
4 +700	183,41	156,15	100,00	4 700,00	15 615,23	892 377,75	79 737,55
4 +800	110,46	146,93	100,00	4 800,00	14 693,42	907 071,17	77 140,75
4 +900	233,62	172,04	100,00	4 900,00	17 203,89	924 275,06	77 054,43
5 +000	201,97	217,79	100,00	5 000,00	21 779,43	946 054,49	81 543,64
5 +100	194,79	198,38	100,00	5 100,00	19 838,11	965 892,60	84 091,54
5 +200	70,40	132,60	100,00	5 200,00	13 259,54	979 152,14	80 060,86
5 +300	156,46	113,43	100,00	5 300,00	11 343,08	990 495,22	74 113,72
5 +400	131,77	144,12	100,00	5 400,00	14 411,95	1 004 907,17	71 235,45
5 +500	119,36	125,57	100,00	5 500,00	12 556,67	1 017 463,84	66 501,90

5 +600	135,30	127,33	100,00	5 600,00	12 733,16	1 030 196,99	61 944,84
5 +700	173,11	154,21	100,00	5 700,00	15 420,53	1 045 617,52	60 075,16
5 +800	61,07	117,09	100,00	5 800,00	11 708,85	1 057 326,37	54 493,79
5 +900	206,76	133,91	100,00	5 900,00	13 391,47	1 070 717,84	50 595,04
6 +000	135,16	170,96	100,00	6 000,00	17 096,11	1 087 813,95	50 400,93
6 +100	120,09	127,63	100,00	6 100,00	12 762,89	1 100 576,84	45 873,61
6 +200	127,43	123,76	100,00	6 200,00	12 376,00	1 112 952,84	40 959,39
6 +300	118,25	122,84	100,00	6 300,00	12 283,54	1 125 236,38	35 952,72
6 +400	151,65	134,95	100,00	6 400,00	13 494,60	1 138 730,98	32 157,10
6 +500	143,70	147,67	100,00	6 500,00	14 767,38	1 153 498,37	29 634,27
6 +600	140,79	142,24	100,00	6 600,00	14 224,38	1 167 722,75	26 568,43
6 +700	154,07	147,43	100,00	6 700,00	14 742,74	1 182 465,49	24 020,96
6 +800	159,93	157,00	100,00	6 800,00	15 699,80	1 198 165,29	22 430,54
6 +900	170,08	165,00	100,00	6 900,00	16 500,46	1 214 665,74	21 640,77
7 +000	151,73	160,91	100,00	7 000,00	16 090,59	1 230 756,34	20 441,15
7 +100	161,55	156,64	100,00	7 100,00	15 664,13	1 246 420,47	18 815,07
7 +200	166,60	164,08	100,00	7 200,00	16 407,60	1 262 828,07	17 932,45
7 +300	174,71	170,65	100,00	7 300,00	17 065,38	1 279 893,45	17 707,61
7 +400	168,36	171,53	100,00	7 400,00	17 153,36	1 297 046,80	17 570,75
7 +500	223,59	195,98	100,00	7 500,00	19 597,54	1 316 644,35	19 878,08
7 +600	153,11	188,35	100,00	7 600,00	18 835,09	1 335 479,44	21 422,95
7 +700	186,91	170,01	100,00	7 700,00	17 001,16	1 352 480,59	21 133,89
7 +800	177,97	182,44	100,00	7 800,00	18 244,14	1 370 724,73	22 087,81
7 +900	187,45	182,71	100,00	7 900,00	18 270,82	1 388 995,54	23 068,41
8 +000	174,18	180,81	100,00	8 000,00	18 081,29	1 407 076,84	23 859,48
8 +100	172,28	173,23	100,00	8 100,00	17 323,14	1 424 399,98	23 892,41
8 +200	165,86	169,07	100,00	8 200,00	16 907,05	1 441 307,03	23 509,24
8 +300	116,44	141,15	100,00	8 300,00	14 115,13	1 455 422,16	20 334,16
8 +400	168,53	142,49	100,00	8 400,00	14 248,72	1 469 670,88	17 292,66
8 +500	140,48	154,50	100,00	8 500,00	15 450,39	1 485 121,27	15 452,83
8 +600	188,33	164,40	100,00	8 600,00	16 440,26	1 501 561,52	14 602,87
8 +700	187,94	188,13	100,00	8 700,00	18 813,35	1 520 374,87	16 126,00

8 +800	217,40	202,67	100,00	8 800,00	20 266,94	1 540 641,81	19 102,72
8 +900	229,48	223,44	100,00	8 900,00	22 343,77	1 562 985,58	24 156,27
9 +000	202,57	216,03	100,00	9 000,00	21 602,52	1 584 588,09	28 468,57
9 +100	176,04	189,31	100,00	9 100,00	18 930,68	1 603 518,77	30 109,03
9 +200	196,00	186,02	100,00	9 200,00	18 601,98	1 622 120,75	31 420,79
9 +300	174,74	185,37	100,00	9 300,00	18 537,10	1 640 657,85	32 667,67
9 +400	166,52	170,63	100,00	9 400,00	17 063,13	1 657 720,98	32 440,59
9 +500	162,27	164,40	100,00	9 500,00	16 439,76	1 674 160,74	31 590,14
9 +600	128,75	145,51	100,00	9 600,00	14 551,00	1 688 711,74	28 850,92
9 +700	141,14	134,94	100,00	9 700,00	13 494,41	1 702 206,16	25 055,12
9 +800	167,61	154,37	100,00	9 800,00	15 437,49	1 717 643,65	23 202,39
9 +900	168,54	168,07	100,00	9 900,00	16 807,38	1 734 451,03	22 719,55
10 +000	212,21	190,37	100,00	10 000,00	19 037,45	1 753 488,48	24 466,78
10 +100	167,95	190,08	100,00	10 100,00	19 008,00	1 772 496,47	26 184,56
10 +200	104,74	136,35	100,00	10 200,00	13 634,53	1 786 131,00	22 528,87
10 +300	150,86	127,80	100,00	10 300,00	12 780,15	1 798 911,15	18 018,81
10 +400	145,71	148,29	100,00	10 400,00	14 828,89	1 813 740,04	15 557,48
10 +500	126,93	136,32	100,00	10 500,00	13 632,16	1 827 372,20	11 899,43
10 +600	116,27	121,60	100,00	10 600,00	12 159,90	1 839 532,10	6 769,11
10 +700	154,40	135,33	100,00	10 700,00	13 533,17	1 853 065,27	3 012,06
10 +800	142,99	148,69	100,00	10 800,00	14 869,25	1 867 934,52	591,09
10 +900	190,99	166,99	100	10900	16699,1237	1 884 633,65	-

10 900,00

1 884 633,65

Sentido 2							
PK (km)	Deflexão DF1	\bar{D}	Δli	$\sum \Delta li$	A_i	$\sum A_i$	z_i
0 +000	210,67	0,00	0	0	0	-	0
0 +100	211,04	210,85	100	100	21 085,04	21 085,04	3 245,10
0 +200	217,73	214,38	100	200	21 438,06	42 523,10	6 843,23
0 +300	190,15	203,94	100	300	20 393,97	62 917,06	9 397,27
0 +400	164,14	177,15	100	400	17 714,68	80 631,74	9 272,01
0 +500	199,25	181,69	100	500	18 169,28	98 801,02	9 601,36
0 +600	196,07	197,66	100	600	19 765,59	118 566,61	11 527,02
0 +700	237,29	216,68	100	700	21 667,77	140 234,39	15 354,86
0 +800	200,36	218,82	100	800	21 882,46	162 116,84	19 397,39
0 +900	216,17	208,26	100	900	20 826,31	182 943,15	22 383,77
1 +000	218,93	217,55	100	1000	21 754,73	204 697,88	26 298,56
1 +100	261,69	240,31	100	1100	24 030,84	228 728,72	32 489,47
1 +200	218,96	240,32	100	1200	24 032,20	252 760,92	38 681,74
1 +300	242,17	230,56	100	1300	23 056,32	275 817,24	43 898,13
1 +400	232,12	237,15	100	1400	23 714,60	299 531,84	49 772,80
1 +500	252,40	242,26	100	1500	24 226,07	323 757,91	56 158,94
1 +600	244,25	248,33	100	1600	24 832,58	348 590,49	63 151,58
1 +700	225,57	234,91	100	1700	23 491,14	372 081,63	68 802,79
1 +800	225,13	225,35	100	1800	22 535,07	394 616,70	73 497,93
1 +900	187,49	206,31	100	1900	20 630,94	415 247,64	76 288,94
2 +000	283,71	235,60	100	2000	23 559,73	438 807,37	82 008,74
2 +100	255,84	269,78	100	2100	26 977,54	465 784,91	91 146,35
2 +200	303,41	279,63	100	2200	27 962,93	493 747,84	101 269,35
2 +300	306,34	304,88	100	2300	30 487,93	524 235,77	113 917,34
2 +400	257,57	281,96	100	2400	28 195,54	552 431,31	124 272,95
2 +500	272,60	265,08	100	2500	26 508,47	578 939,78	132 941,49
2 +600	294,13	283,36	100	2600	28 336,47	607 276,25	143 438,03
2 +700	162,67	228,40	100	2700	22 840,05	630 116,30	148 438,15

2 +800	165,51	164,09	100	2800	16 409,16	646 525,45	147 007,37
2 +900	195,19	180,35	100	2900	18 035,03	664 560,48	147 202,46
3 +000	163,22	179,21	100	3000	17 920,75	682 481,23	147 283,28
3 +100	149,38	156,30	100	3100	15 629,93	698 111,17	145 073,29
3 +200	159,61	154,49	100	3200	15 449,32	713 560,49	142 682,68
3 +300	179,48	169,55	100	3300	16 954,71	730 515,20	141 797,46
3 +400	159,50	169,49	100	3400	16 949,18	747 464,38	140 906,71
3 +500	158,63	159,06	100	3500	15 906,43	763 370,81	138 973,21
3 +600	138,02	148,32	100	3600	14 832,42	778 203,23	135 965,69
3 +700	198,50	168,26	100	3700	16 825,99	795 029,22	134 951,75
3 +800	135,41	166,96	100	3800	16 695,63	811 724,85	133 807,45
3 +900	172,98	154,19	100	3900	15 419,38	827 144,22	131 386,89
4 +000	204,59	188,78	100	4000	18 878,49	846 022,71	132 425,45
4 +100	190,55	197,57	100	4100	19 757,26	865 779,97	134 342,77
4 +200	145,03	167,79	100	4200	16 779,13	882 559,10	133 281,98
4 +300	218,75	181,89	100	4300	18 189,26	900 748,36	133 631,30
4 +400	180,36	199,56	100	4400	19 955,71	920 704,07	135 747,08
4 +500	152,81	166,59	100	4500	16 658,64	937 362,71	134 565,79
4 +600	143,88	148,34	100	4600	14 834,43	952 197,15	131 560,29
4 +700	201,95	172,91	100	4700	17 291,23	969 488,38	131 011,59
4 +800	211,86	206,90	100	4800	20 690,30	990 178,68	133 861,97
4 +900	176,94	194,40	100	4900	19 439,79	1 009 618,47	135 461,82
5 +000	197,76	187,35	100	5000	18 734,89	1 028 353,36	136 356,78
5 +100	177,24	187,50	100	5100	18 749,86	1 047 103,22	137 266,71
5 +200	155,12	166,18	100	5200	16 617,73	1 063 720,95	136 044,51
5 +300	167,39	161,25	100	5300	16 125,22	1 079 846,18	134 329,80
5 +400	147,81	157,60	100	5400	15 759,98	1 095 606,16	132 249,86
5 +500	175,19	161,50	100	5500	16 150,42	1 111 756,58	130 560,34
5 +600	164,07	169,63	100	5600	16 963,24	1 128 719,82	129 683,65
5 +700	161,30	162,68	100	5700	16 268,46	1 144 988,28	128 112,18
5 +800	132,67	146,99	100	5800	14 698,53	1 159 686,81	124 970,78
5 +900	212,65	172,66	100	5900	17 266,04	1 176 952,85	124 396,89

6 +000	127,10	169,88	100	6000	16 987,58	1 193 940,43	123 544,54
6 +100	149,29	138,19	100	6100	13 819,37	1 207 759,80	119 523,97
6 +200	159,55	154,42	100	6200	15 441,71	1 223 201,51	117 125,76
6 +300	157,50	158,52	100	6300	15 852,47	1 239 053,99	115 138,30
6 +400	189,36	173,43	100	6400	17 343,05	1 256 397,03	114 641,41
6 +500	150,53	169,95	100	6500	16 994,50	1 273 391,54	113 795,98
6 +600	159,50	155,01	100	6600	15 501,47	1 288 893,01	111 457,52
6 +700	175,79	167,65	100	6700	16 764,75	1 305 657,76	110 382,34
6 +800	184,76	180,28	100	6800	18 027,85	1 323 685,61	110 570,26
6 +900	187,61	186,19	100	6900	18 618,77	1 342 304,38	111 349,10
7 +000	204,24	195,93	100	7000	19 592,53	1 361 896,91	113 101,69
7 +100	141,49	172,86	100	7100	17 286,35	1 379 183,26	112 548,11
7 +200	168,92	155,21	100	7200	15 520,51	1 394 703,77	110 228,69
7 +300	183,14	176,03	100	7300	17 602,86	1 412 306,63	109 991,62
7 +400	120,20	151,67	100	7400	15 167,05	1 427 473,68	107 318,74
7 +500	159,59	139,90	100	7500	13 989,94	1 441 463,62	103 468,75
7 +600	136,16	147,88	100	7600	14 787,50	1 456 251,12	100 416,32
7 +700	131,48	133,82	100	7700	13 381,59	1 469 632,71	95 957,98
7 +800	144,15	137,82	100	7800	13 781,54	1 483 414,25	91 899,58
7 +900	149,03	146,59	100	7900	14 659,09	1 498 073,34	88 718,74
8 +000	140,71	144,87	100	8000	14 486,99	1 512 560,32	85 365,80
8 +100	130,82	135,77	100	8100	13 576,72	1 526 137,05	81 102,59
8 +200	148,28	139,55	100	8200	13 954,95	1 540 091,99	77 217,60
8 +300	131,14	139,71	100	8300	13 970,64	1 554 062,64	73 348,32
8 +400	148,81	139,97	100	8400	13 997,46	1 568 060,10	69 505,84
8 +500	173,07	160,94	100	8500	16 094,00	1 584 154,10	67 759,91
8 +600	169,95	171,51	100	8600	17 150,96	1 601 305,06	67 070,94
8 +700	183,94	176,95	100	8700	17 694,59	1 618 999,65	66 925,60
8 +800	178,70	181,32	100	8800	18 131,84	1 637 131,49	67 217,51
8 +900	155,36	167,03	100	8900	16 702,91	1 653 834,40	66 080,49
9 +000	141,98	148,67	100	9000	14 866,84	1 668 701,24	63 107,40
9 +100	175,45	158,71	100	9100	15 871,49	1 684 572,73	61 138,96

9 +200	142,70	159,07	100	9200	15 907,46	1 700 480,19	59 206,48
9 +300	122,26	132,48	100	9300	13 247,88	1 713 728,07	54 614,43
9 +400	144,64	133,45	100	9400	13 345,34	1 727 073,41	50 119,84
9 +500	139,24	141,94	100	9500	14 194,37	1 741 267,78	46 474,28
9 +600	143,52	141,38	100	9600	14 137,99	1 755 405,77	42 772,33
9 +700	114,69	129,10	100	9700	12 910,27	1 768 316,03	37 842,67
9 +800	118,00	116,34	100	9800	11 634,42	1 779 950,45	31 637,15
9 +900	154,02	136,01	100	9900	13 601,07	1 793 551,51	27 398,29
10 +000	118,22	136,12	100	10000	13 611,97	1 807 163,48	23 170,32
10 +100	126,53	122,37	100	10100	12 237,32	1 819 400,80	17 567,71
10 +200	127,04	126,78	100	10200	12 678,48	1 832 079,28	12 406,26
10 +300	168,37	147,71	100	10300	14 770,71	1 846 849,99	9 337,04
10 +400	133,42	150,90	100	10400	15 089,85	1 861 939,84	6 586,96
10 +500	182,85	158,14	100	10500	15 813,69	1 877 753,54	4 560,72
10 +600	166,73	174,79	100	10600	17 479,03	1 895 232,57	4 199,82
10 +700	165,97	166,35	100	10700	16 634,84	1 911 867,41	2 994,73
10 +800	169,92	167,94	100	10800	16 794,34	1 928 661,74	1 949,13
10 +900	147,90	158,91	100	10900	15 890,80	1 944 552,54	-

10900

1944552,544

- Caso de estudo 2

Método das diferenças acumuladas

Sentido 1							
PK (km)	Deflexão DF1	\bar{D}	Δi	$\sum \Delta li$	A_i	$\sum A_i$	z_i
0 +000	603,11	-	-	-	-	-	0
0 +100	788,49	695,80	100,00	100,00	69 579,91	69 579,91	9 545,97
0 +200	799,85	794,17	100,00	200,00	79 416,92	148 996,82	28 928,95
0 +300	551,12	675,49	100,00	300,00	67 548,73	216 545,55	36 443,74
0 +400	342,01	446,57	100,00	400,00	44 656,62	261 202,17	21 066,42
0 +500	491,13	416,57	100,00	500,00	41 656,94	302 859,11	2 689,42
0 +600	429,55	460,34	100,00	600,00	46 033,82	348 892,93	- 11 310,69
0 +700	442,91	436,23	100,00	700,00	43 622,80	392 515,73	- 27 721,83
0 +800	486,01	464,46	100,00	800,00	46 445,80	438 961,53	- 41 309,96
0 +900	438,78	462,39	100,00	900,00	46 239,13	485 200,66	- 55 104,77
1 +000	453,16	445,97	100,00	1 000,00	44 596,96	529 797,62	- 70 541,74
1 +100	744,48	598,82	100,00	1 100,00	59 881,88	589 679,51	- 70 693,80
1 +200	783,70	764,09	100,00	1 200,00	76 409,01	666 088,52	- 54 318,72
1 +300	710,18	746,94	100,00	1 300,00	74 694,31	740 782,83	- 39 658,35
1 +400	975,23	842,71	100,00	1 400,00	84 270,78	825 053,61	- 15 421,51
1 +500	846,75	910,99	100,00	1 500,00	91 099,04	916 152,65	15 643,60
1 +600	841,55	844,15	100,00	1 600,00	84 414,99	1 000 567,64	40 024,65
1 +700	1134,25	987,90	100,00	1 700,00	98 790,37	1 099 358,00	78 781,08
1 +800	628,22	881,24	100,00	1 800,00	88 123,94	1 187 481,95	106 871,08
1 +900	459,25	543,74	100,00	1 900,00	54 373,52	1 241 855,47	101 210,67
2 +000	1094,11	776,68	100,00	2 000,00	77 667,78	1 319 523,25	118 844,51
2 +100	764,19	929,15	100,00	2 100,00	92 915,21	1 412 438,46	151 725,79
2 +200	864,61	814,40	100,00	2 200,00	81 440,21	1 493 878,67	173 132,06

2 +300	1041,03	952,82	100,00	2 300,00	95 281,80	1 589 160,46	208 379,92
2 +400	479,05	760,04	100,00	2 400,00	76 003,57	1 665 164,03	224 349,55
2 +500	669,15	574,10	100,00	2 500,00	57 409,87	1 722 573,90	221 725,48
2 +600	557,41	613,28	100,00	2 600,00	61 328,26	1 783 902,17	223 019,81
2 +700	602,66	580,03	100,00	2 700,00	58 003,40	1 841 905,56	220 989,27
2 +800	538,08	570,37	100,00	2 800,00	57 036,83	1 898 942,40	217 992,17
2 +900	321,37	429,73	100,00	2 900,00	42 972,72	1 941 915,11	200 930,95
3 +000	445,10	383,24	100,00	3 000,00	38 323,88	1 980 238,99	179 220,89
3 +100	572,46	508,78	100,00	3 100,00	50 878,44	2 031 117,43	170 065,39
3 +200	703,31	637,88	100,00	3 200,00	63 788,50	2 094 905,93	173 819,95
3 +300	714,66	708,98	100,00	3 300,00	70 898,13	2 165 804,06	184 684,15
3 +400	406,30	560,48	100,00	3 400,00	56 047,71	2 221 851,77	180 697,92
3 +500	590,33	498,31	100,00	3 500,00	49 831,29	2 271 683,06	170 495,27
3 +600	466,43	528,38	100,00	3 600,00	52 837,86	2 324 520,91	163 299,19
3 +700	548,82	507,62	100,00	3 700,00	50 762,38	2 375 283,29	154 027,63
3 +800	578,90	563,86	100,00	3 800,00	56 386,07	2 431 669,36	150 379,76
3 +900	367,60	473,25	100,00	3 900,00	47 325,24	2 478 994,60	137 671,06
4 +000	548,75	458,18	100,00	4 000,00	45 817,78	2 524 812,38	123 454,91
4 +100	433,99	491,37	100,00	4 100,00	49 136,98	2 573 949,36	112 557,95
4 +200	451,97	442,98	100,00	4 200,00	44 297,82	2 618 247,18	96 821,83
4 +300	457,73	454,85	100,00	4 300,00	45 484,84	2 663 732,01	82 272,73
4 +400	483,45	470,59	100,00	4 400,00	47 059,01	2 710 791,03	69 297,81
4 +500	490,98	487,22	100,00	4 500,00	48 721,85	2 759 512,88	57 985,73
4 +600	580,92	535,95	100,00	4 600,00	53 594,90	2 813 107,78	51 546,69
4 +700	643,00	611,96	100,00	4 700,00	61 195,58	2 874 303,36	52 708,33
4 +800	572,14	607,57	100,00	4 800,00	60 756,95	2 935 060,31	53 431,35
4 +900	527,53	549,83	100,00	4 900,00	54 983,38	2 990 043,69	48 380,79
5 +000	756,45	641,99	100,00	5 000,00	64 198,80	3 054 242,49	52 545,65
5 +100	476,90	616,68	100,00	5 100,00	61 667,79	3 115 910,28	54 179,51
5 +200	801,55	639,23	100,00	5 200,00	63 922,76	3 179 833,04	58 068,32
5 +300	720,20	760,87	100,00	5 300,00	76 087,39	3 255 920,43	74 121,78
5 +400	419,46	569,83	100,00	5 400,00	56 982,81	3 312 903,24	71 070,65

5 +500	593,55	506,50	100,00	5 500,00	50 650,46	3 363 553,70	61 687,18
5 +600	268,33	430,94	100,00	5 600,00	43 093,98	3 406 647,68	44 747,22
5 +700	494,88	381,61	100,00	5 700,00	38 160,57	3 444 808,25	22 873,85
5 +800	616,60	555,74	100,00	5 800,00	55 573,97	3 500 382,22	18 413,89
5 +900	712,99	664,80	100,00	5 900,00	66 479,58	3 566 861,79	24 859,53
6 +000	540,70	626,85	100,00	6 000,00	62 684,82	3 629 546,62	27 510,41
6 +100	530,82	535,76	100,00	6 100,00	53 575,94	3 683 122,55	21 052,41
6 +200	618,74	574,78	100,00	6 200,00	57 477,86	3 740 600,42	18 496,34
6 +300	558,80	588,77	100,00	6 300,00	58 877,08	3 799 477,50	17 339,49
6 +400	633,38	596,09	100,00	6 400,00	59 609,07	3 859 086,57	16 914,62
6 +500	229,01	431,19	100,00	6 500,00	43 119,31	3 902 205,89	0,00

Sentido 2							
PK (km)	DF1	\bar{D}	Δli	$\sum \Delta li$	A_i	$\sum A_i$	z_i
0 +000	722,26	0,00	0	0	0	-	0
0 +100	663,90	693,08	100	100	69 307,77	69 307,77	22 721,04
0 +200	296,05	479,97	100	200	47 997,26	117 305,03	24 131,57
0 +300	332,53	314,29	100	300	31 428,84	148 733,87	8 973,68
0 +400	334,84	333,68	100	400	33 368,45	182 102,32	- 4 244,59
0 +500	368,44	351,64	100	500	35 163,71	217 266,04	- 15 667,61
0 +600	397,81	383,12	100	600	38 312,15	255 578,18	- 23 942,19
0 +700	555,45	476,63	100	700	47 663,10	303 241,28	- 22 865,82
0 +800	347,68	451,57	100	800	45 156,59	348 397,87	- 24 295,96
0 +900	302,87	325,27	100	900	32 527,43	380 925,30	- 38 355,26
1 +000	491,13	397,00	100	1000	39 700,06	420 625,36	- 45 241,93
1 +100	688,85	589,99	100	1100	58 998,81	479 624,17	- 32 829,85
1 +200	575,84	632,34	100	1200	63 234,31	542 858,48	- 16 182,27
1 +300	590,94	583,39	100	1300	58 339,00	601 197,48	- 4 430,00

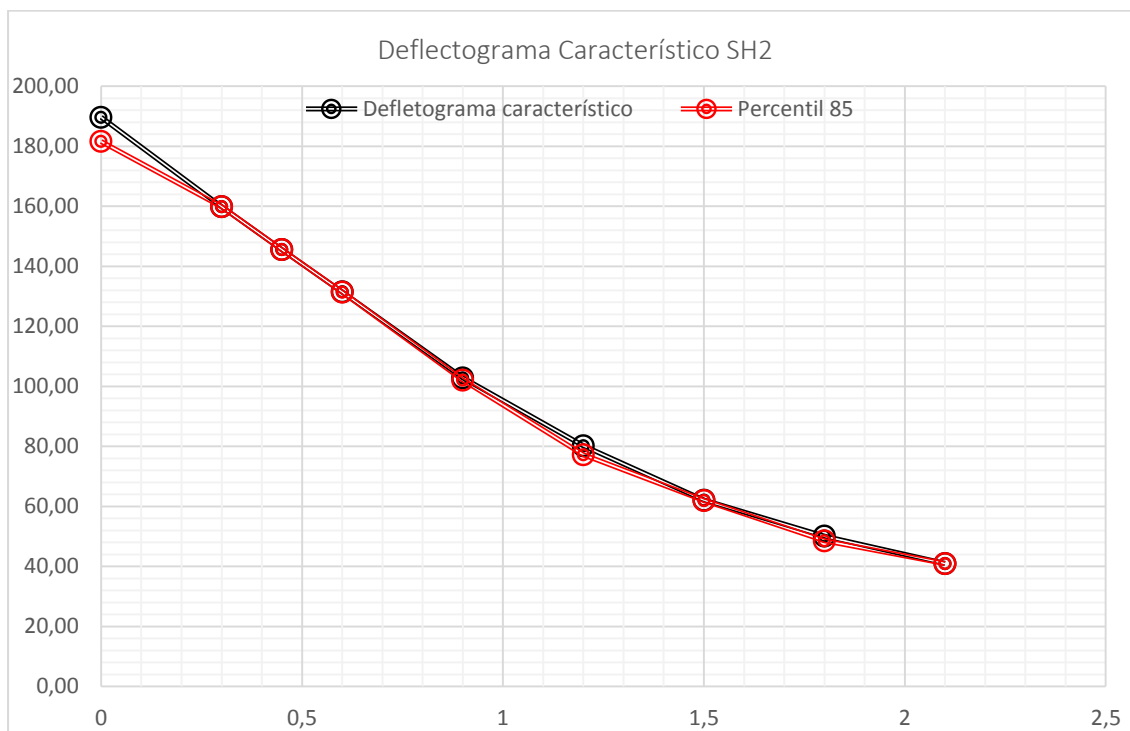
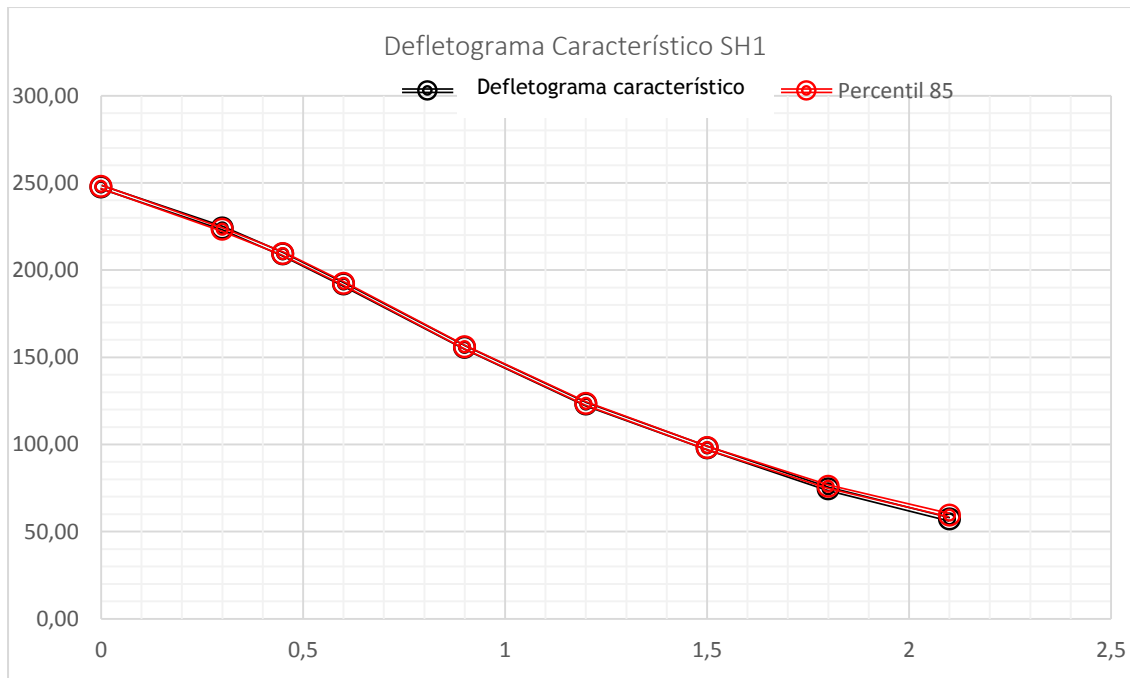
1 +400	575,39	583,17	100	1400	58 316,71	659 514,19	7 299,98
1 +500	601,03	588,21	100	1500	58 821,34	718 335,53	19 534,59
1 +600	574,96	588,00	100	1600	58 799,59	777 135,12	31 747,45
1 +700	670,80	622,88	100	1700	62 288,12	839 423,24	47 448,84
1 +800	305,86	488,33	100	1800	48 833,15	888 256,39	49 695,27
1 +900	617,36	461,61	100	1900	46 161,22	934 417,61	49 269,76
2 +000	584,03	600,70	100	2000	60 069,92	994 487,53	62 752,95
2 +100	570,52	577,28	100	2100	57 727,93	1 052 215,46	73 894,15
2 +200	545,71	558,12	100	2200	55 811,81	1 108 027,27	83 119,23
2 +300	401,85	473,78	100	2300	47 377,89	1 155 405,17	83 910,39
2 +400	575,90	488,87	100	2400	48 887,24	1 204 292,40	86 210,90
2 +500	622,55	599,22	100	2500	59 922,44	1 264 214,85	99 546,62
2 +600	431,20	526,88	100	2600	52 687,77	1 316 902,62	105 647,66
2 +700	408,05	419,63	100	2700	41 962,55	1 358 865,16	101 023,48
2 +800	270,05	339,05	100	2800	33 904,99	1 392 770,16	88 341,74
2 +900	486,84	378,45	100	2900	37 844,52	1 430 614,68	79 599,53
3 +000	280,09	383,47	100	3000	38 346,54	1 468 961,22	71 359,34
3 +100	344,88	312,49	100	3100	31 248,71	1 500 209,93	56 021,32
3 +200	516,97	430,93	100	3200	43 092,54	1 543 302,47	52 527,14
3 +300	494,52	505,74	100	3300	50 574,30	1 593 876,77	56 514,71
3 +400	410,57	452,54	100	3400	45 254,26	1 639 131,03	55 182,24
3 +500	440,77	425,67	100	3500	42 566,88	1 681 697,91	51 162,39
3 +600	637,02	538,89	100	3600	53 889,28	1 735 587,19	58 464,93
3 +700	207,37	422,19	100	3700	42 219,39	1 777 806,57	54 097,59
3 +800	338,59	272,98	100	3800	27 298,07	1 805 104,65	34 808,94
3 +900	361,77	350,18	100	3900	35 017,82	1 840 122,47	23 240,03
4 +000	498,38	430,07	100	4000	43 007,01	1 883 129,48	19 660,31
4 +100	381,66	440,02	100	4100	44 001,96	1 927 131,44	17 075,54
4 +200	440,03	410,84	100	4200	41 084,48	1 968 215,91	11 573,29
4 +300	259,70	349,86	100	4300	34 986,30	2 003 202,21	- 27,14
4 +400	349,49	304,60	100	4400	30 459,63	2 033 661,84	- 16 154,25
4 +500	443,46	396,48	100	4500	39 647,80	2 073 309,64	- 23 093,17

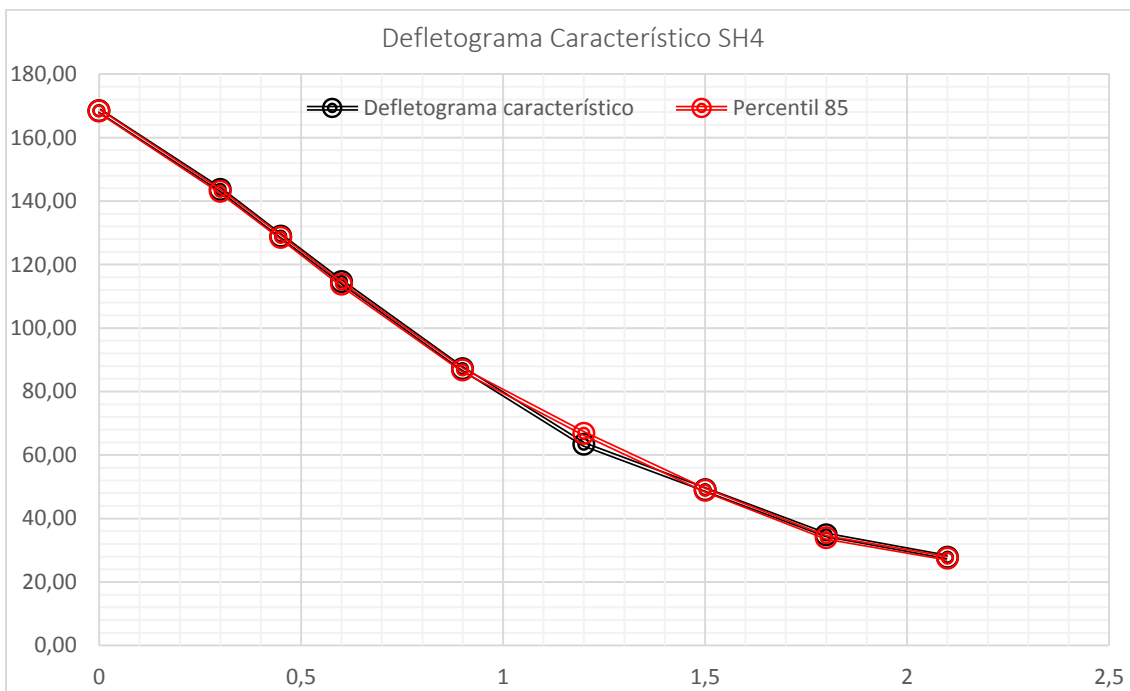
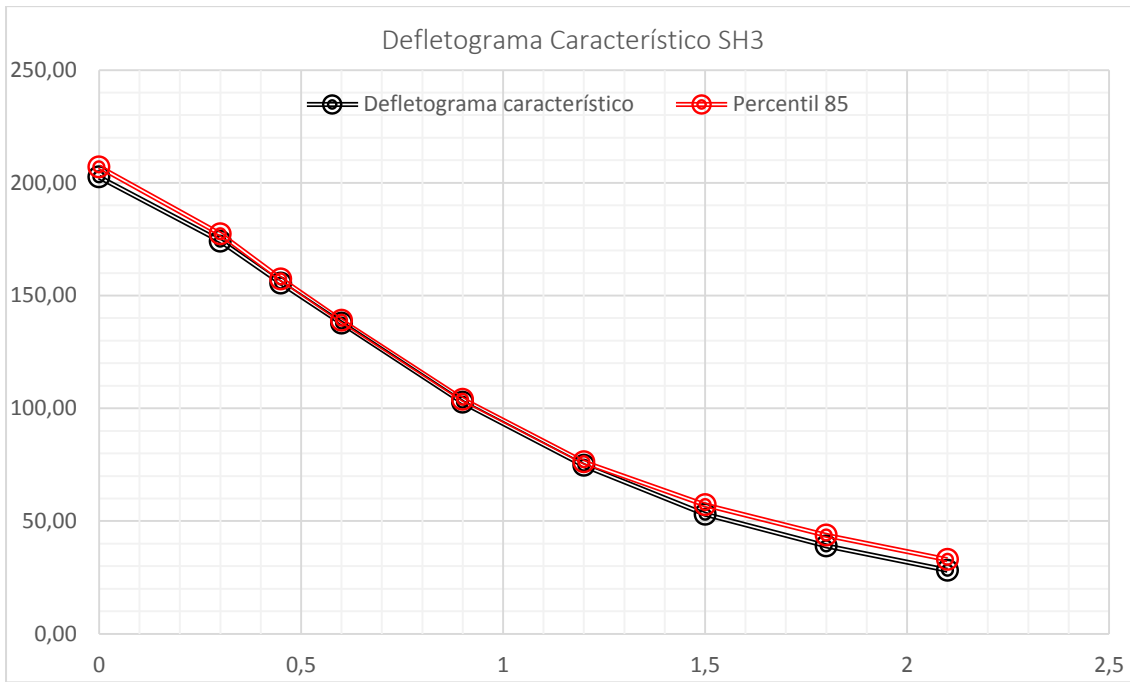
4 +600	631,89	537,68	100	4600	53 767,53	2 127 077,18	- 15 912,37
4 +700	578,40	605,14	100	4700	60 514,50	2 187 591,67	- 1 984,60
4 +800	425,98	502,19	100	4800	50 219,22	2 237 810,89	1 647,89
4 +900	564,03	495,01	100	4900	49 500,71	2 287 311,60	4 561,87
5 +000	480,36	522,20	100	5000	52 219,90	2 339 531,49	10 195,03
5 +100	479,72	480,04	100	5100	48 004,22	2 387 535,71	11 612,52
5 +200	590,85	535,28	100	5200	53 528,38	2 441 064,09	18 554,17
5 +300	358,56	474,70	100	5300	47 470,46	2 488 534,55	19 437,90
5 +400	247,38	302,97	100	5400	30 296,96	2 518 831,51	3 148,13
5 +500	457,45	352,42	100	5500	35 241,64	2 554 073,15	- 8 196,95
5 +600	355,22	406,34	100	5600	40 633,96	2 594 707,11	- 14 149,72
5 +700	388,55	371,88	100	5700	37 188,48	2 631 895,59	- 23 547,98
5 +800	541,76	465,15	100	5800	46 515,19	2 678 410,78	- 23 619,52
5 +900	501,82	521,79	100	5900	52 178,94	2 730 589,72	- 18 027,30
6 +000	668,97	585,40	100	6000	58 539,72	2 789 129,44	- 6 074,31
6 +100	444,91	556,94	100	6100	55 694,23	2 844 823,67	3 033,19
6 +200	654,63	549,77	100	6200	54 976,97	2 899 800,64	11 423,43
6 +300	403,12	528,87	100	6300	52 887,29	2 952 687,93	17 723,99
6 +400	373,53	388,32	100	6400	38 832,16	2 991 520,09	9 969,42
6 +500	358,82	366,17	100	6500	36 617,31	3 028 137,40	0,00

Anexo V

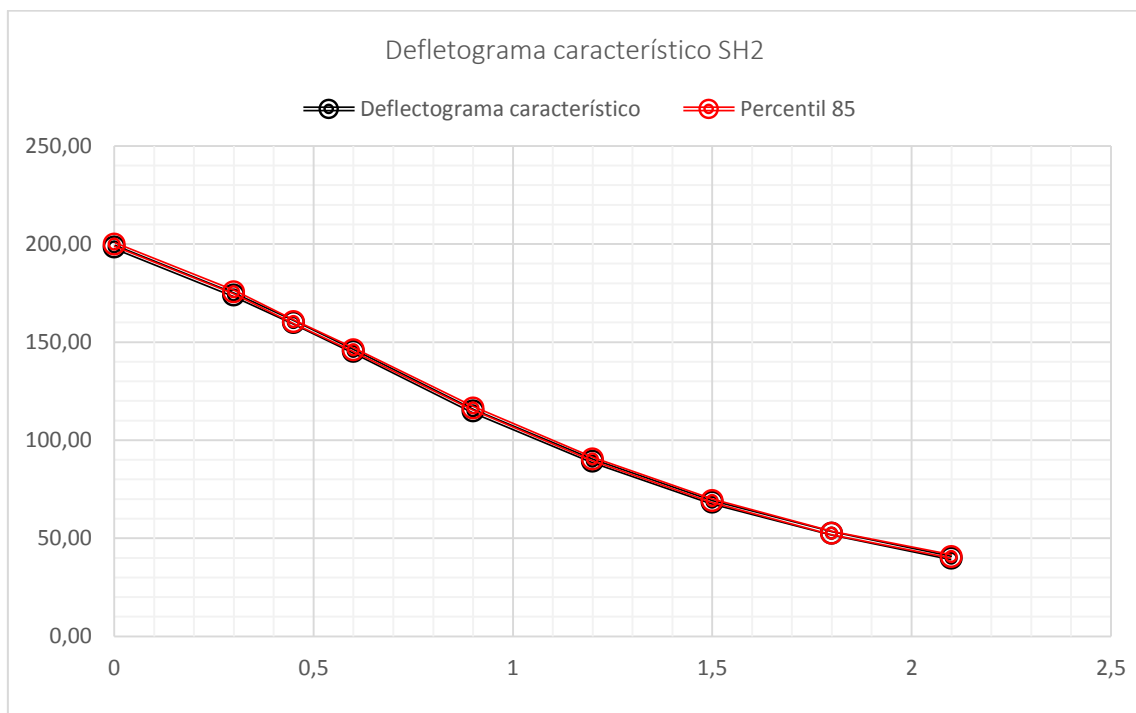
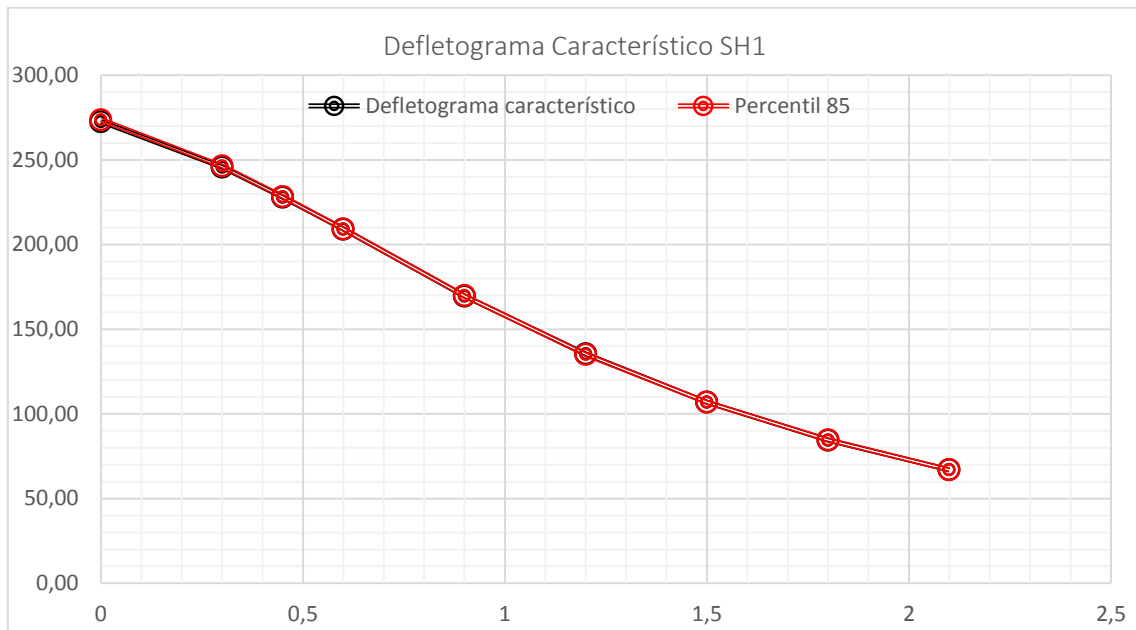
- Caso de estudio 1

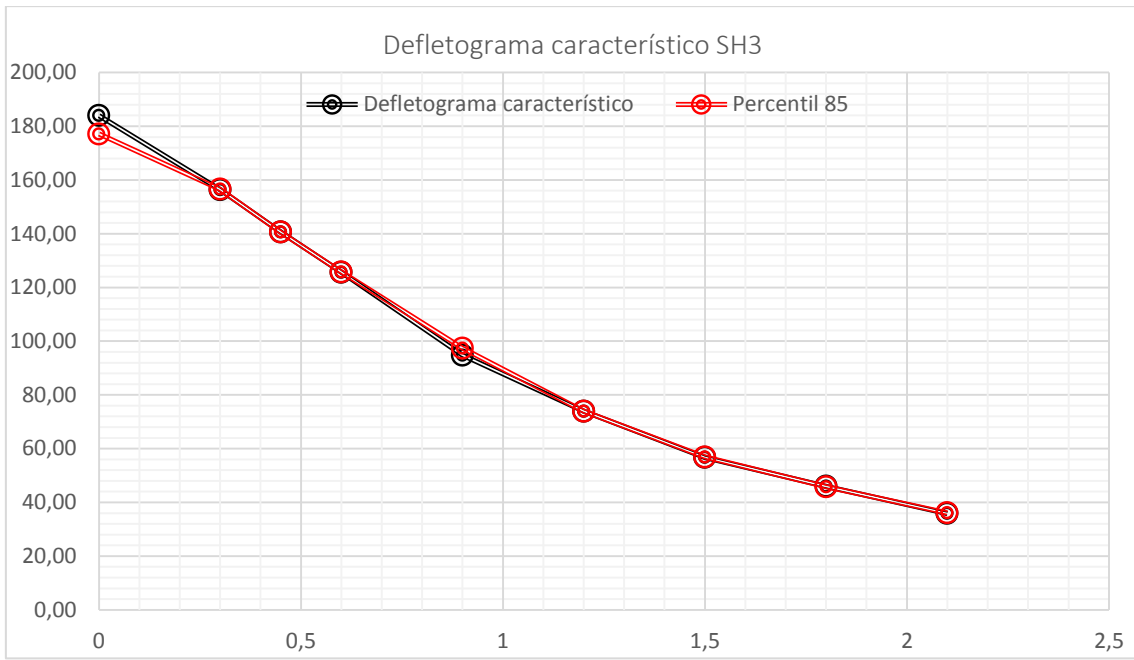
Sentido 1





Sentido 2





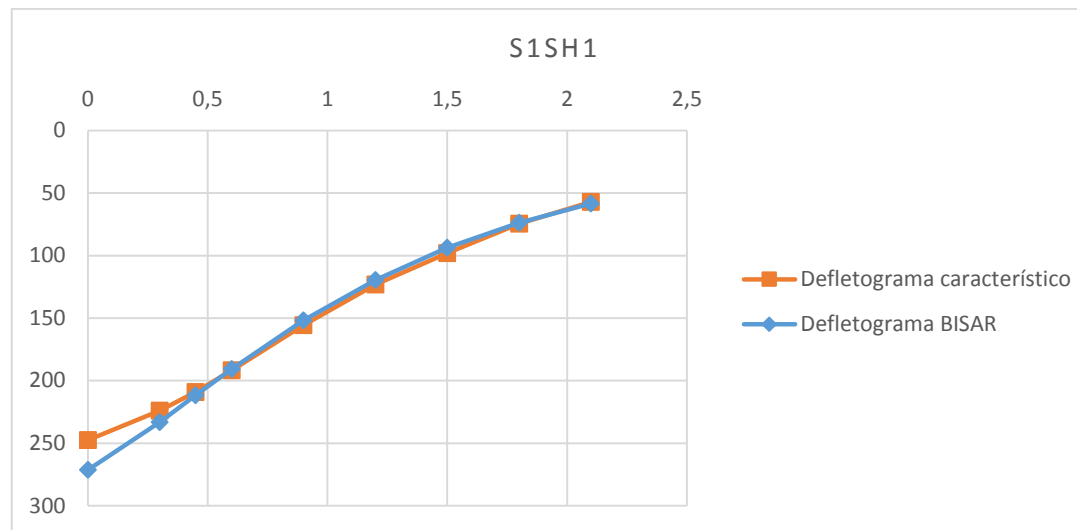
Anexo VI

- Caso de estudo 1: BISAR

Sentido 1

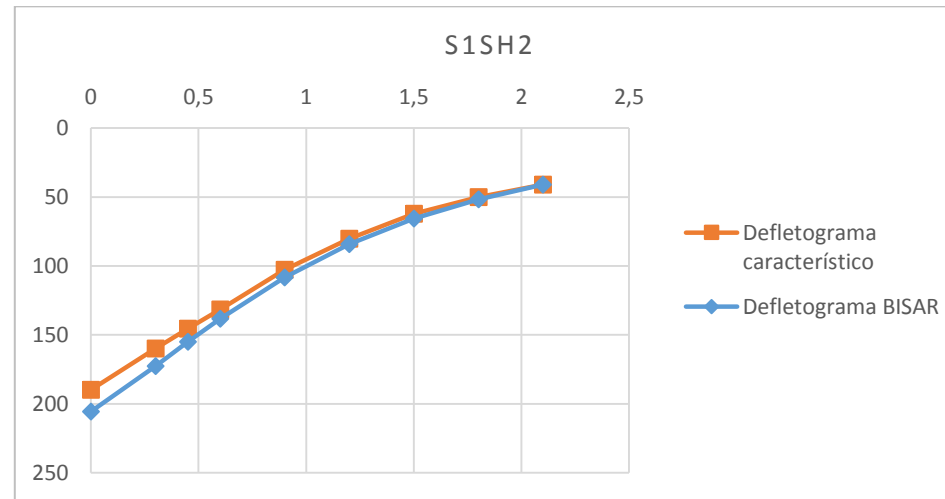
SH1

		G1 (0m)	G2 (0,3m)	G3 (0,45m)	G4 (0,6m)	G5 (0,9m)	G6 (1,2m)	G7 (1,5m)	G8 (1,8m)	G9 (2,1m)
Deflexão Característica		247,57	224,04	209,06	191,86	155,56	123,08	97,94	74,41	57,12
Linha de tendência	Equação 4º grau	$y = -13,153x^4 + 71,386x^3 - 111,6x^2 - 49,404x + 247,53$								
	R	$R^2 = 0,9999$								
	y=0	$x = 2,8m$								
Coeficiente de Poisson	BBD+BB (0,09m)	0,35								
	MB (0,15m)	0,35								
	ABGE (0,3m)	0,35								
	Fundação (2,5m)	0,4								
	Camada Rígida	0,4								
Módulos de deformabilidade	BBD+BB (0,09m)	10000								
	MB (0,15m)	12000								
	ABGE (0,3m)	260								
	Fundação (2,5m)	100								
	Camada Rígida	210								
Deflexões calculadas (BISAR)		271,3	233,2	211,8	190,6	151,8	119,5	93,72	73,74	58,5
RMS		4,1%								



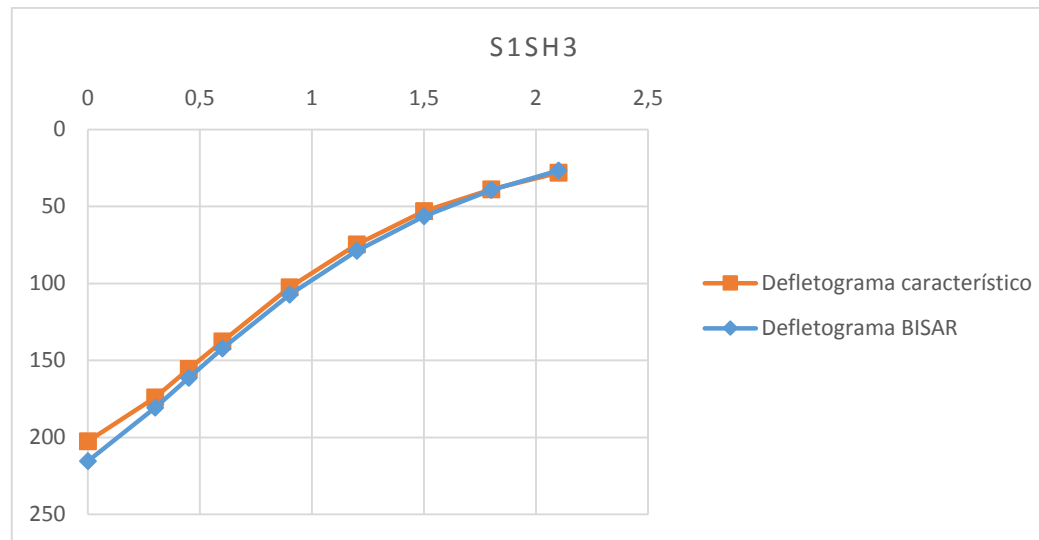
SH2

		G1 (0m)	G2 (0,3m)	G3 (0,45m)	G4 (0,6m)	G5 (0,9m)	G6 (1,2m)	G7 (1,5m)	G8 (1,8m)	G9 (2,1m)
Deflexão Característica		189,69	159,85	145,57	131,49	102,83	80,22	62,07	50,08	40,95
Linha de tendência	Equação 4º grau	$y = -5,6725x^4 + 29,621x^3 - 27,535x^2 - 90,979x + 189,53$								
	R	$R^2 = 0,9999$								
	y=0	$x=3,1m$								
Coeficiente de Poisson	BBD+BB (0,09m)	0,35								
	MB (0,15m)	0,35								
	ABGE (0,3m)	0,35								
	Fundação (3m)	0,4								
	Camada Rígida	0,4								
Módulos de deformabilidade	BBD+BB (0,09m)	11000								
	MB (0,15m)	13000								
	ABGE (0,3m)	390								
	Fundação (3m)	150								
	Camada Rígida	300								
Deflexões calculadas (BISAR)		205,6	172,6	155,1	138,2	108,3	84,26	65,7	51,65	41,11
RMS		5,8%								



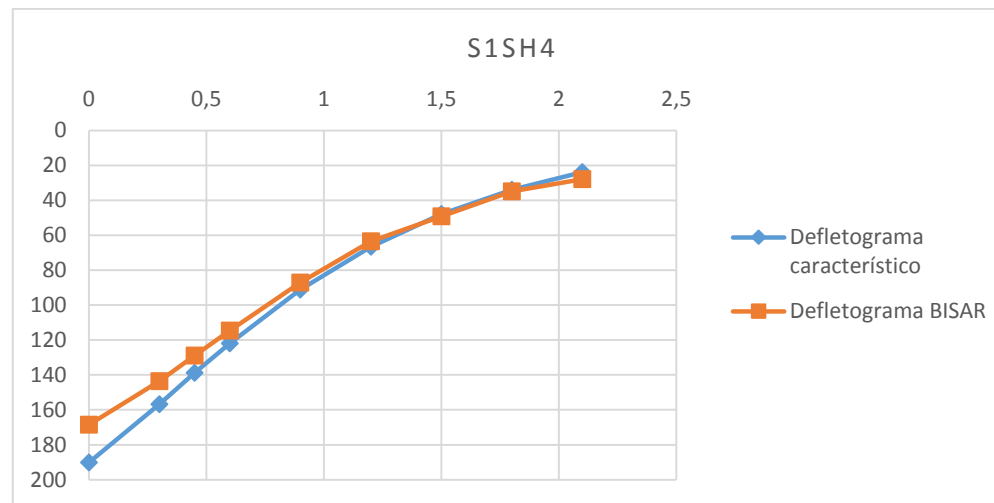
SH3

		G1 (0m)	G2 (0,3m)	G3 (0,45m)	G4 (0,6m)	G5 (0,9m)	G6 (1,2m)	G7 (1,5m)	G8 (1,8m)	G9 (2,1m)
Deflexão Característica		202,57	174,12	155,49	137,75	102,59	74,64	53,00	38,97	28,15
Linha de tendência	Equação 4º grau	$y = -14,973x^4 + 74,938x^3 - 95,285x^2 - 74,853x + 202,69$								
	R	$R^2 = 1$								
	y=0	$x=2,6m$								
Coeficiente de Poisson	BBD+BB (0,09m)	0,35								
	MB (0,15m)	0,35								
	ABGE (0,3m)	0,35								
	Fundação (2,5m)	0,4								
	Camada Rígida	0,4								
Módulos de deformabilidade	BBD+BB (0,09m)	11000								
	MB (0,15m)	13000								
	ABGE (0,3m)	287								
	Fundação (2,5m)	110								
	Camada Rígida	15000								
Deflexões calculadas (BISAR)		215,4	180,7	161,3	142,2	107,4	78,76	56,32	39,3	26,72
RMS		4,7%								



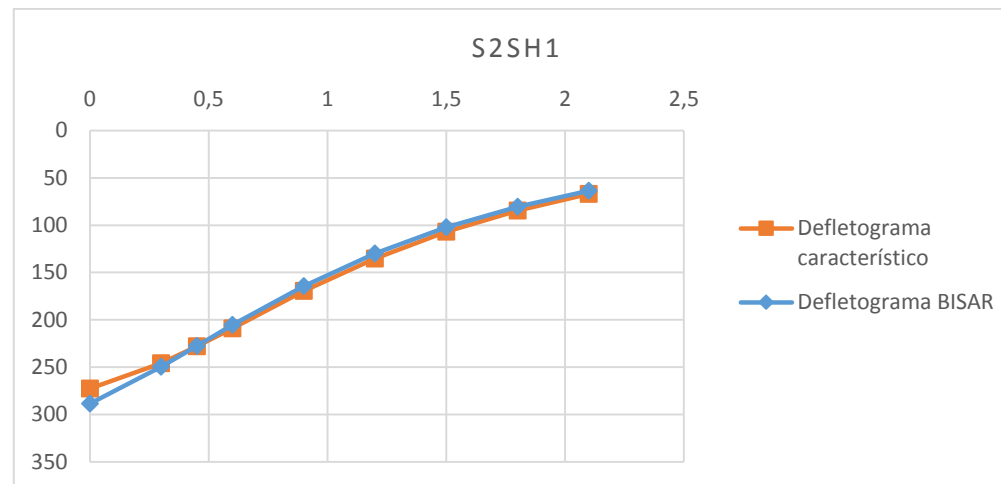
SH4

		G1 (0m)	G2 (0,3m)	G3 (0,45m)	G4 (0,6m)	G5 (0,9m)	G6 (1,2m)	G7 (1,5m)	G8 (1,8m)	G9 (2,1m)
Deflexão Característica		168,54	143,68	129,00	114,62	87,17	63,40	49,12	34,85	27,86
Linha de tendência	Equação 4º grau	$y = -9,4952x^4 + 48,154x^3 - 57,489x^2 - 70,861x + 168,63$								
	R	$R^2 = 0,9997$								
	y=0	$x=2,7m$								
Coeficiente de Poisson	BBD+BB (0,09m)	0,35								
	MB (0,15m)	0,35								
	ABGE (0,3m)	0,35								
	Fundação (2,5m)	0,4								
	Camada Rígida	0,4								
Módulos de deformabilidade	BBD+BB (0,09m)	11000								
	MB (0,15m)	13000								
	ABGE (0,3m)	365								
	Fundação (2,5m)	140								
	Camada Rígida	1000								
Deflexões calculadas (BISAR)		190,1	156,8	138,9	121,9	91,14	66,66	47,92	33,98	23,83
RMS		8,3%								



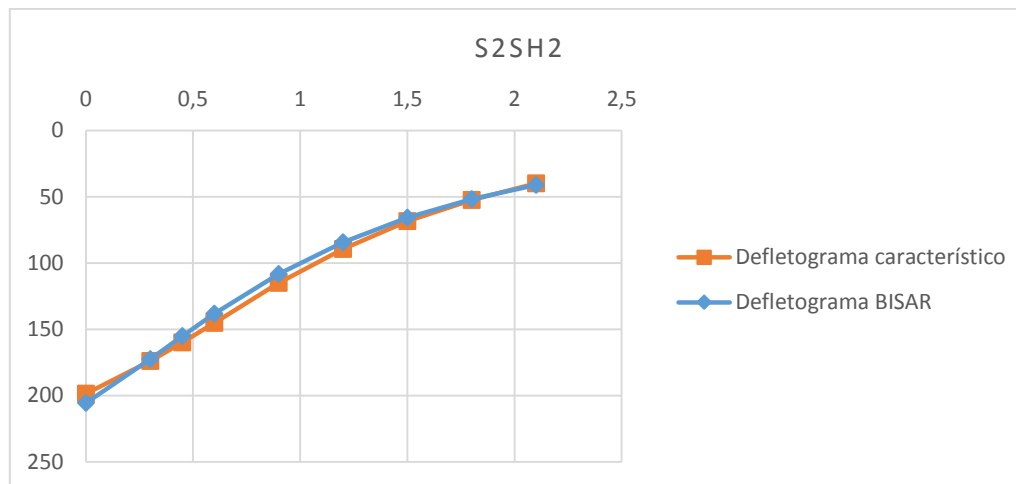
Sentido 2
SH1

		G1 (0m)	G2 (0,3m)	G3 (0,45m)	G4 (0,6m)	G5 (0,9m)	G6 (1,2m)	G7 (1,5m)	G8 (1,8m)	G9 (2,1m)
Deflexão Característica		272,60	245,78	227,93	209,09	169,60	135,40	106,89	84,55	67,00
Linha de tendência	Equação 4º grau	$y = -13,988x^4 + 76,028x^3 - 115,34x^2 - 61,477x + 272,63$								
	R	$R^2 = 1$								
	y=0	$x=2,8m$								
Coeficiente de Poisson	BBD+BB (0,09m)	0,35								
	MB (0,15m)	0,35								
	ABGE (0,3m)	0,35								
	Fundação (2,5m)	0,4								
	Camada Rígida	0,4								
Módulos de deformabilidade	BBD+BB (0,09m)	10000								
	MB (0,15m)	12000								
	ABGE (0,3m)	234								
	Fundação (2,5m)	90								
	Camada Rígida	200								
Deflexões calculadas (BISAR)		288,5	249,7	227,5	205,4	164,5	130	102,1	80,35	63,62
RMS		3,9%								



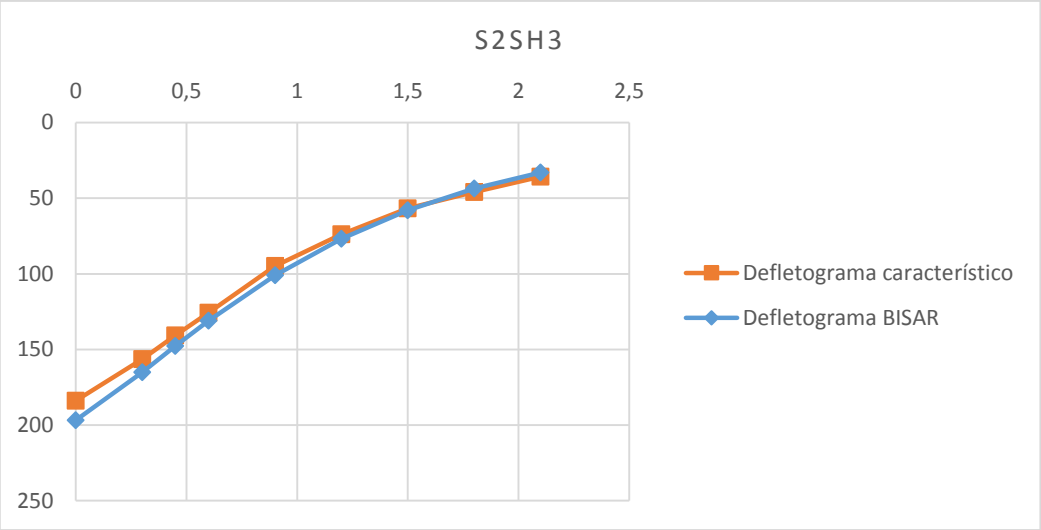
SH2

		G1 (0m)	G2 (0,3m)	G3 (0,45m)	G4 (0,6m)	G5 (0,9m)	G6 (1,2m)	G7 (1,5m)	G8 (1,8m)	G9 (2,1m)
Deflexão Característica		198,50	174,00	160,00	145,30	114,90	89,30	68,40	52,50	39,90
Linha de tendência	Equação 4º grau	$y = -9,3545x^4 + 49,87x^3 - 69,032x^2 - 63,821x + 198,43$								
	R	$R^2 = 1$								
	y=0	$x=2,9m$								
Coeficiente de Poisson	BBD+BB (0,09m)	0,35								
	MB (0,15m)	0,35								
	ABGE (0,3m)	0,35								
	Fundação (3m)	0,4								
	Camada Rígida	0,4								
Módulos de deformabilidade	BBD+BB (0,09m)	10000								
	MB (0,15m)	13000								
	ABGE (0,3m)	390								
	Fundação (3m)	150								
	Camada Rígida	300								
Deflexões calculadas (BISAR)		205,6	172,6	155,1	138,2	108,3	84,26	65,7	51,65	41,11
RMS		3,9%								



SH3

		G1 (0m)	G2 (0,3m)	G3 (0,45m)	G4 (0,6m)	G5 (0,9m)	G6 (1,2m)	G7 (1,5m)	G8 (1,8m)	G9 (2,1m)
Deflexão Característica		183,94	156,39	140,66	125,63	94,77	73,94	56,70	45,98	35,87
Linha de tendência	Equação 4º grau	$y = -14,032x^4 + 64,54x^3 - 71,147x^2 - 75,804x + 183,96$								
	R	$R^2 = 0,9999$								
	y=0	x=2,6m								
Coeficiente de Poisson	BBD+BB (0,09m)	0,35								
	MB (0,15m)	0,35								
	ABGE (0,3m)	0,35								
	Fundação (2,5m)	0,4								
	Camada Rígida	0,4								
Módulos de deformabilidade	BBD+BB (0,09m)	12000								
	MB (0,15m)	13500								
	ABGE (0,3m)	365								
	Fundação (2,5m)	140								
	Camada Rígida	450								
Deflexões calculadas (BISAR)		196,7	165	147,7	131	101	76,74	57,9	43,66	33,08
RMS		5,5%								



ELSYM5 (caso de estudo 1)

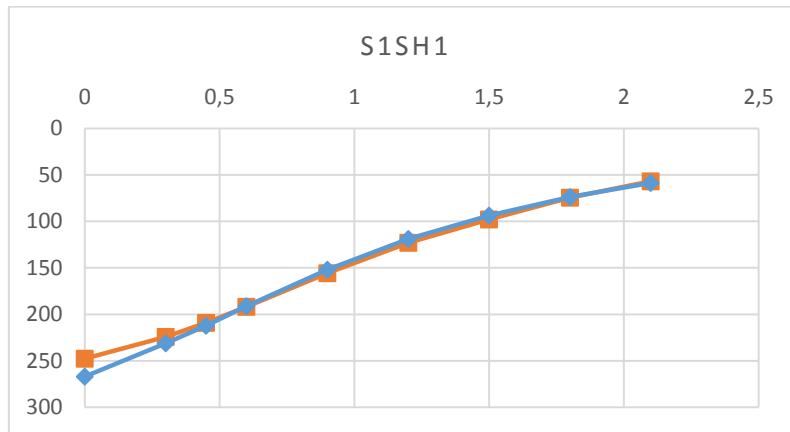
Sentido 1

SH1

X	Dmedida	Uz	Admitida coincidência se afastamento <0.02 mm
0	247,57	267	0,019
0,3	224,04	231	0,007
0,45	209,06	212	0,003
0,6	191,86	191	0,001
0,9	155,56	152	0,004
1,2	123,08	119	0,004
1,5	97,94	93,7	0,004
1,8	74,41	73,7	0,001
2,1	57,12	58,5	0,001

RMS

3,6%

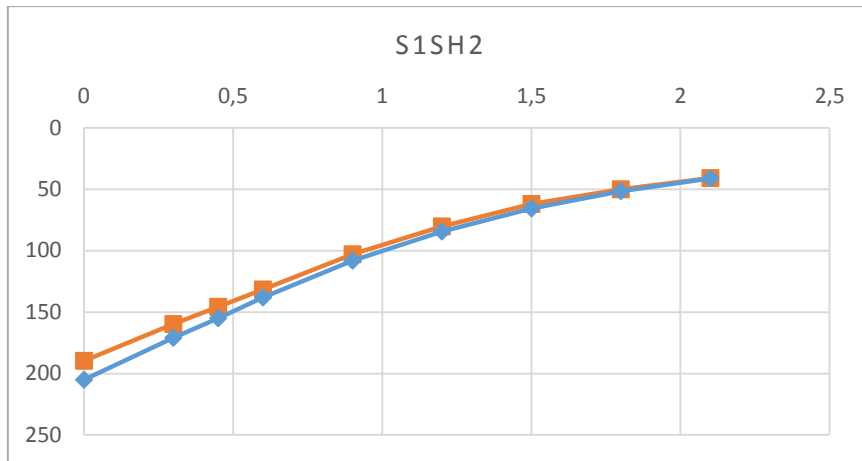


SH2

X	Dmedida	Uz	Admitida coincidência se afastamento <0.02 mm
0	189,69	205	0,015
0,3	159,85	171	0,011
0,45	145,57	155	0,009
0,6	131,49	138	0,007
0,9	102,83	108	0,005
1,2	80,22	84,3	0,004
1,5	62,07	65,7	0,004
1,8	50,08	51,6	0,002
2,1	40,95	41,1	0,000

RMS

5,5%

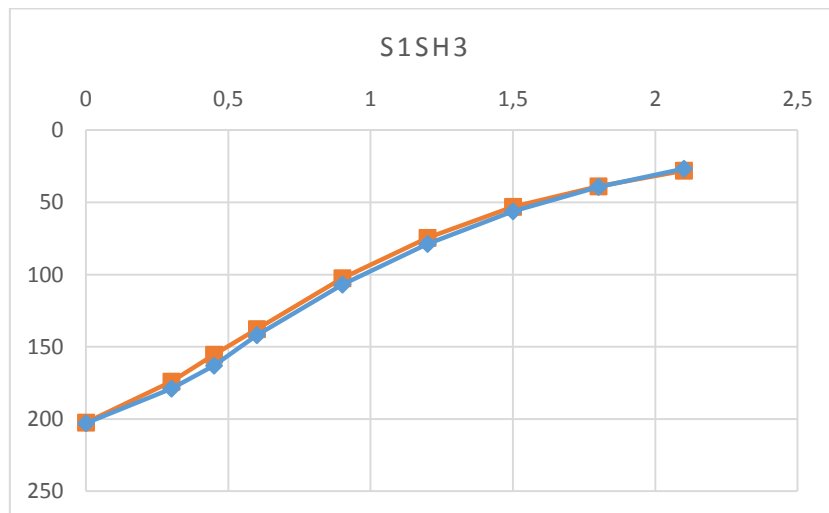


SH3

X	Dmedida	Uz	Admitida coincidência se afastamento <0.02 mm
0	202,57	203	0,000
0,3	174,12	179	0,005
0,45	155,49	163	0,008
0,6	137,75	142	0,004
0,9	102,59	107	0,004
1,2	74,64	78,8	0,004
1,5	53,00	56,3	0,003
1,8	38,97	39,3	0,000
2,1	28,15	26,7	0,001

RMS

4,2%

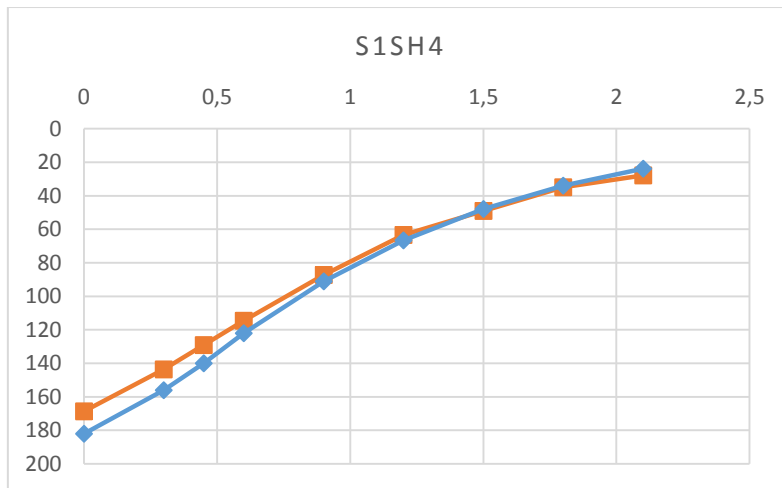


SH4

X	Dmedida	Uz	Admitida coincidência se afastamento <0.02 mm
0	168,54	182	0,013
0,3	143,68	156	0,012
0,45	129,00	140	0,011
0,6	114,62	122	0,007
0,9	87,17	91,1	0,004
1,2	63,40	66,7	0,003
1,5	49,12	47,9	0,001
1,8	34,85	34	0,001
2,1	27,86	23,8	0,004

RMS

7,6%



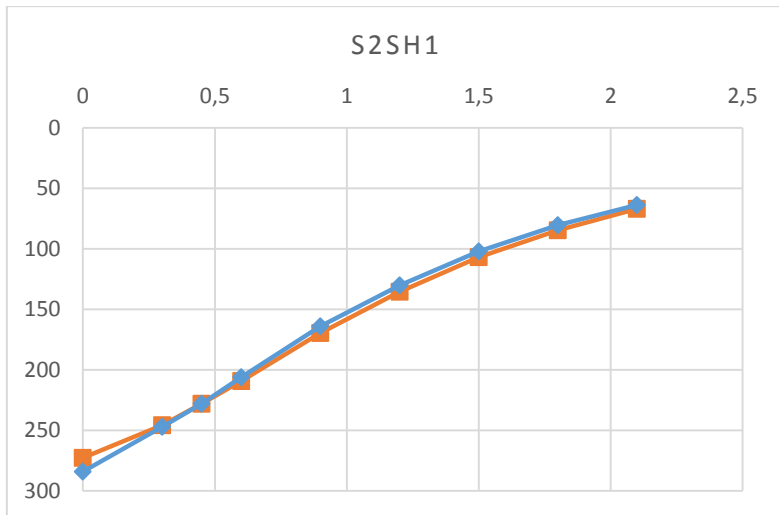
Sentido 2

SH1

X	Dmedida	Uz	Admitida coincidência se afastamento <0.02 mm
0	272,60	284	0,011
0,3	245,78	247	0,001
0,45	227,93	228	0,000
0,6	209,09	206	0,003
0,9	169,60	164	0,006
1,2	135,40	130	0,005
1,5	106,89	102	0,005
1,8	84,55	80,3	0,004
2,1	67,00	63,6	0,003

RMS

3,6%

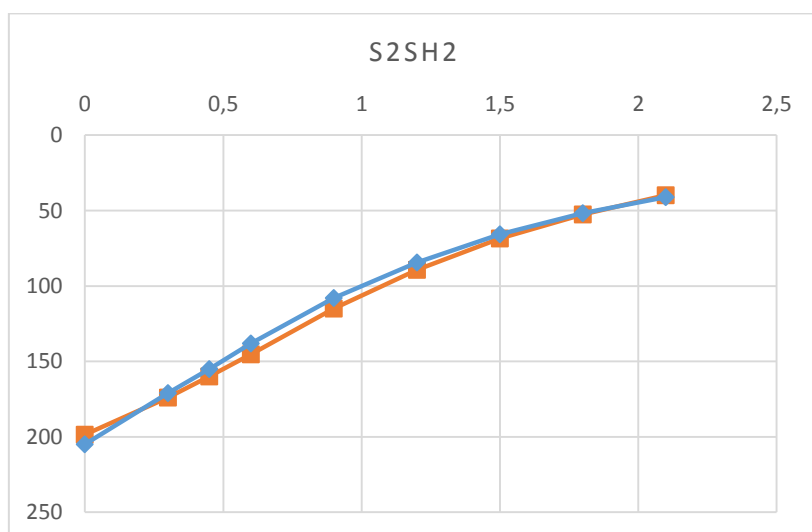


SH2

X	Dmedida	Uz	Admitida coincidência se afastamento <0.02 mm
0	198,50	205	0,007
0,3	174,00	171	0,003
0,45	160,00	155	0,005
0,6	145,30	138	0,007
0,9	114,90	108	0,007
1,2	89,30	84,3	0,005
1,5	68,40	65,7	0,003
1,8	52,50	51,6	0,001
2,1	39,90	41,1	0,001

RMS

3,996%

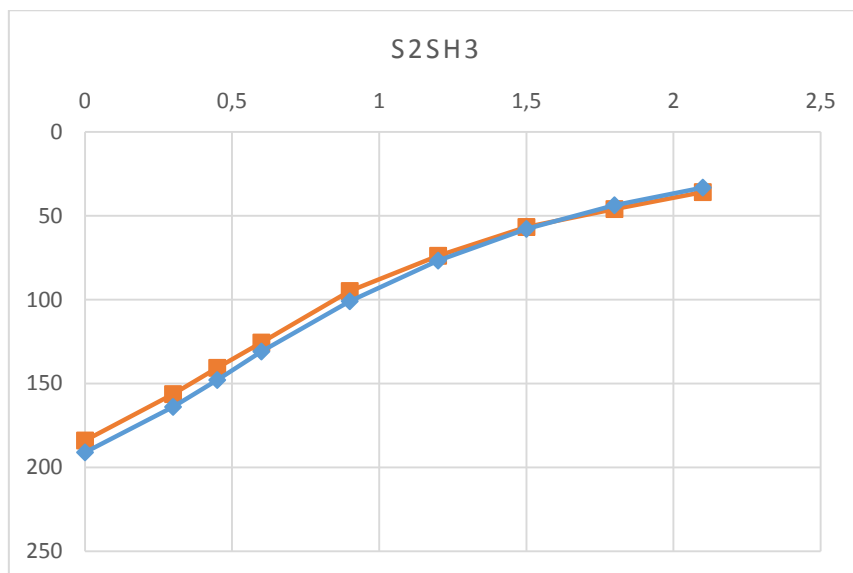


SH3

X	Dmedida	Uz	Admitida coincidência se afastamento <0.02 mm
0	183,94	191	0,007
0,3	156,39	164	0,008
0,45	140,66	148	0,007
0,6	125,63	131	0,005
0,9	94,77	101	0,006
1,2	73,94	76,7	0,003
1,5	56,70	57,9	0,001
1,8	45,98	43,7	0,002
2,1	35,87	33,1	0,003

RMS

5,1%

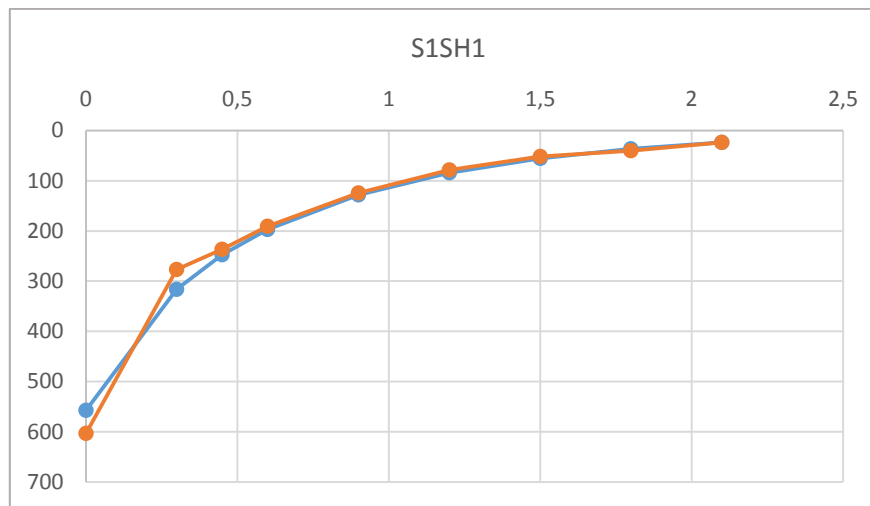


- Caso de estudo 2: BISAR

Sentido 1

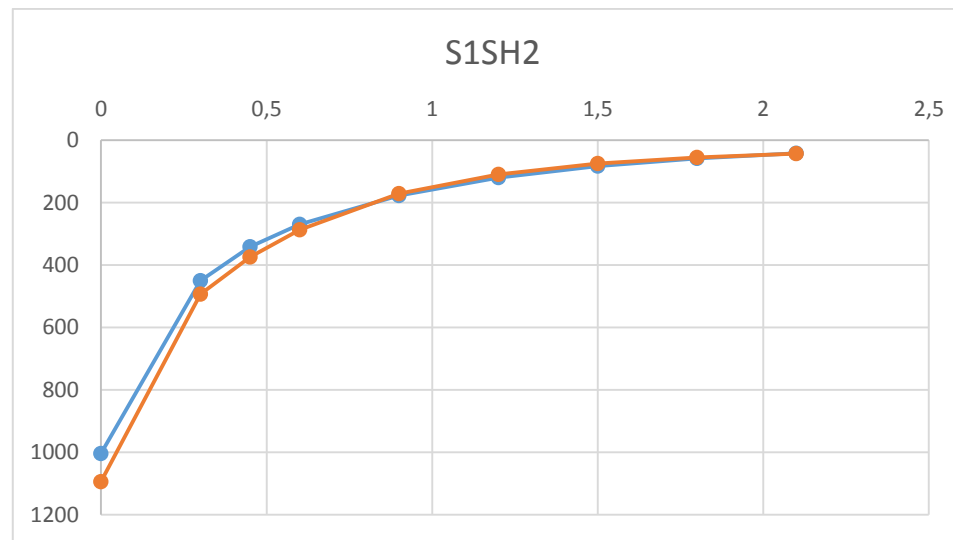
SH1

		G1 (0m)	G2 (0,3m)	G3(0,45m)	G4 (0,6m)	G5 (0,9m)	G6 (1,2m)	G7 (1,5m)	G8 (1,8m)	G9 (2,1m)
Deflexão Característica		603,11	276,67	236,61	190,88	124,18	78,64	51,81	40,15	23,70
Linha de tendência	Equação 4º grau	$y = -166,75x^3 + 721,41x^2 - 1050,4x + 581,22$								
	R	$R^2 = 0,9831$								
	y=0	$x = 2,2m$								
Coeficiente de Poisson	BBD+BB (0,09m)	0,35								
	MB (0,15m)	0,35								
	ABGE (0,3m)	0,3								
	Fundação (2,5m)	0,35								
	Camada Rígida	0,35								
Módulos de deformabilidade	BBD+BB (0,09m)	1200								
	MB (0,15m)	900								
	ABGE (0,3m)	260								
	Fundação (2,5m)	100								
	Camada Rígida	3000								
Deflexões calculadas (BISAR)		557,3	316	247,2	197	128,2	84,44	55,77	36,67	23,85
RMS		7,4%								



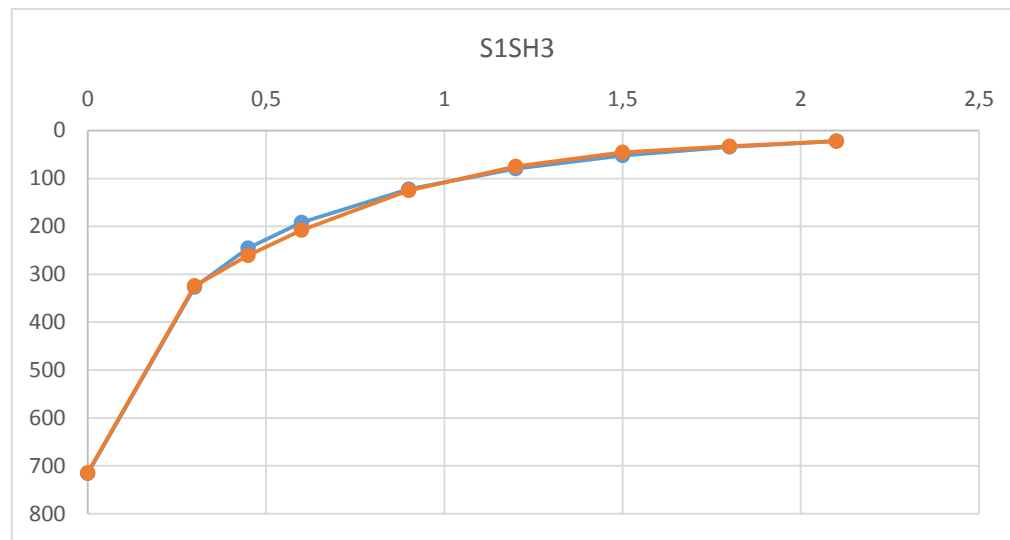
SH2

		G1 (0m)	G2 (0,3m)	G3(0,45m)	G4 (0,6m)	G5 (0,9m)	G6 (1,2m)	G7 (1,5m)	G8 (1,8m)	G9 (2,1m)
Deflexão Característica		1094,11	493,13	374,14	286,79	170,77	109,31	74,12	54,56	42,86
Linha de tendência	Equação 4º grau	$y = -337,41x^3 + 1462,6x^2 - 2078,7x + 1060,5$								
	R	$R^2 = 0,9883$								
	y=0	x= 2,1m								
Coeficiente de Poisson	BBD+BB (0,09m)	0,35								
	MB (0,15m)	0,35								
	ABGE (0,3m)	0,3								
	Fundação (2,5m)	0,35								
	Camada Rígida	0,35								
Módulos de deformabilidade	BBD+BB (0,09m)	400								
	MB (0,15m)	350								
	ABGE (0,3m)	208								
	Fundação (2,5m)	80								
	Camada Rígida	450								
Deflexões calculadas (BISAR)		1004	450,3	340,8	269,5	177	119,9	82,89	58,38	41,88
RMS		7,9%								



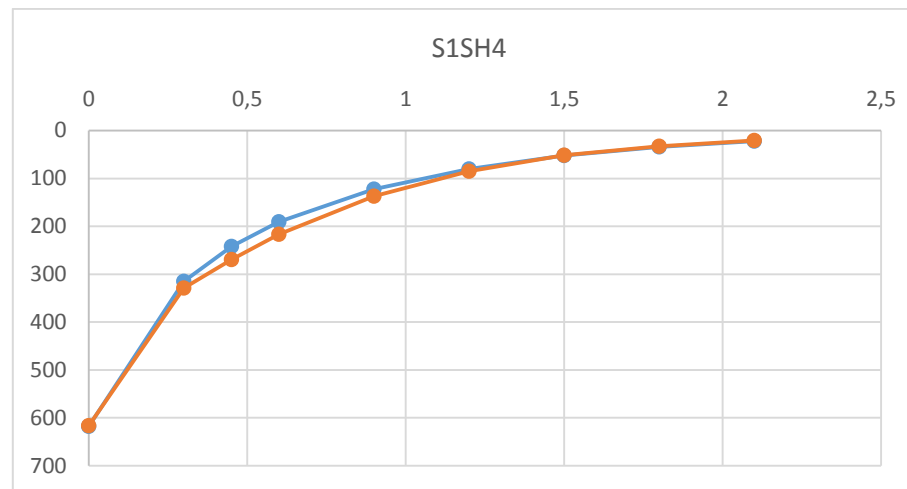
SH3

Deflexão Característica		G1 (0m)	G2 (0,3m)	G3(0,45m)	G4 (0,6m)	G5 (0,9m)	G6 (1,2m)	G7 (1,5m)	G8 (1,8m)	G9 (2,1m)
		714,66	323,98	260,70	207,78	124,92	74,82	45,45	32,95	21,90
Linha de tendência	Equação 4º grau	$y = -202,52x^3 + 886,92x^2 - 1294,3x + 690,24$								
	R	$R^2 = 0,9858$								
	y=0	$x = 2,1m$								
Coeficiente de Poisson	BBD+BB (0,09m)	0,35								
	MB (0,15m)	0,35								
	ABGE (0,3m)	0,3								
	Fundação (2,5m)	0,35								
	Camada Rígida	0,35								
Módulos de deformabilidade	BBD+BB (0,09m)	600								
	MB (0,15m)	500								
	ABGE (0,3m)	273								
	Fundação (2,5m)	105								
	Camada Rígida	3000								
Deflexões calculadas (BISAR)		715,6	326,8	245,6	192,1	122,5	79,58	51,93	33,79	21,77
RMS		6,2%								



SH4

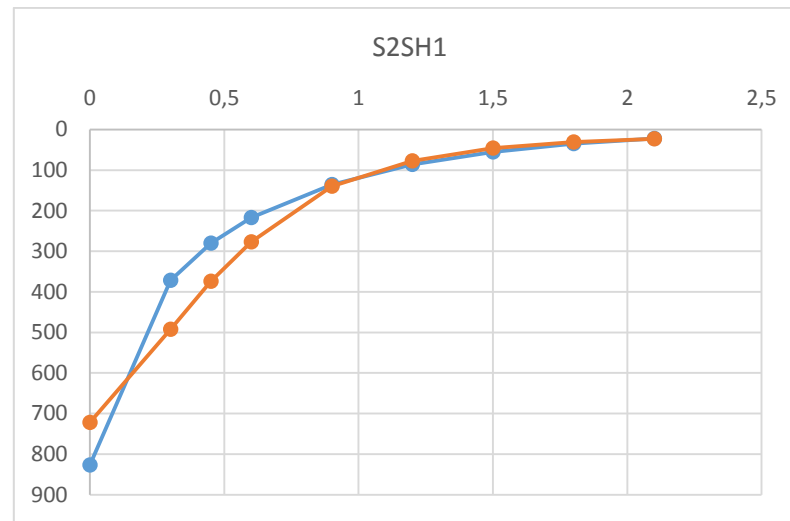
		G1 (0m)	G2 (0,3m)	G3(0,45m)	G4 (0,6m)	G5 (0,9m)	G6 (1,2m)	G7 (1,5m)	G8 (1,8m)	G9 (2,1m)
Deflexão Característica		616,60	328,72	269,44	216,92	136,99	84,76	51,46	32,63	21,05
Linha de tendência	Equação 4º grau	$y = -131,32x^3 + 606,55x^2 - 975,33x + 601,86$								
	R	$R^2 = 0,9932$								
	y=0	$x = 2,2m$								
Coeficiente de Poisson	BBD+BB (0,09m)	0,35								
	MB (0,15m)	0,35								
	ABGE (0,3m)	0,3								
	Fundação (2,5m)	0,35								
	Camada Rígida	0,35								
Módulos de deformabilidade	BBD+BB (0,09m)	800								
	MB (0,15m)	700								
	ABGE (0,3m)	273								
	Fundação (2,5m)	105								
	Camada Rígida	3000								
Deflexões calculadas (BISAR)		618	315,2	241,9	190,7	122,5	80,03	52,49	34,31	22,21
RMS		7,2%								



Sentido 2

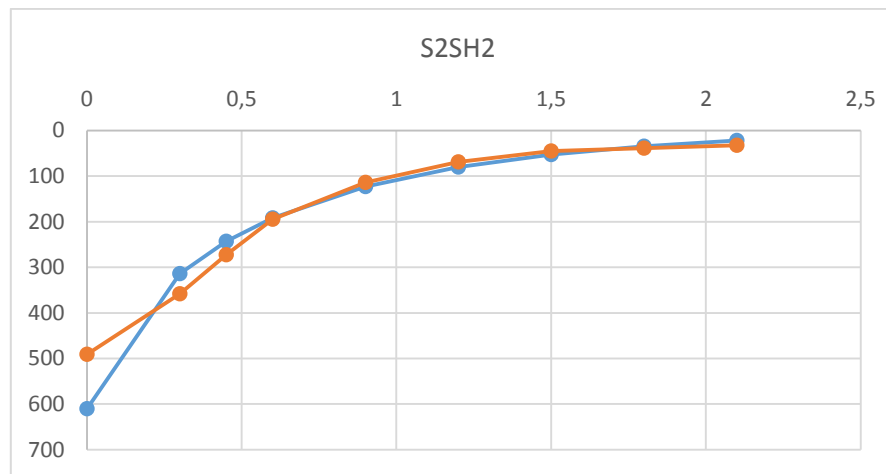
SH1

		G1 (0m)	G2 (0,3m)	G3(0,45m)	G4 (0,6m)	G5 (0,9m)	G6 (1,2m)	G7 (1,5m)	G8 (1,8m)	G9 (2,1m)
Deflexão Característica		722,26	492,13	374,12	276,74	139,90	77,40	46,06	30,87	23,03
Linha de tendência	Equação 4º grau	$y = -67,773x^4 + 210,12x^3 + 108,27x^2 - 861,93x + 725,24$								
	R	$R^2 = 0,9993$								
	y=0	$x = 2,2m$								
Coeficiente de Poisson	BBD+BB (0,09m)	0,35								
	MB (0,15m)	0,35								
	ABGE (0,3m)	0,3								
	Fundação (2,5m)	0,35								
	Camada Rígida	0,35								
Módulos de deformabilidade	BBD+BB (0,09m)	400								
	MB (0,15m)	500								
	ABGE (0,3m)	234								
	Fundação (2m)	90								
	Camada Rígida	1000								
Deflexões calculadas (BISAR)		826,6	371,5	279,8	217,3	135,8	86,27	55,01	35,07	22,33
RMS		17,0%								



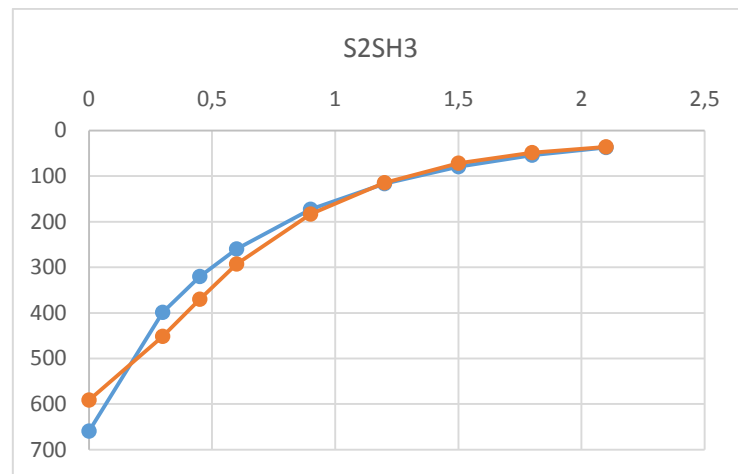
SH2

		G1 (0m)	G2 (0,3m)	G3(0,45m)	G4 (0,6m)	G5 (0,9m)	G6 (1,2m)	G7 (1,5m)	G8 (1,8m)	G9 (2,1m)
Deflexão Característica		491,1	358,2	272,5	194,5	114,0	68,9	44,8	38,5	32,0
Linha de tendência	Equação 4º grau	$y = -65,516x^4 + 234,27x^3 - 68,667x^2 - 503,68x + 495,01$								
	R	$R^2 = 0,9973$								
	y=0	x= 2,3m								
Coeficiente de Poisson	BBD+BB (0,09m)	0,35								
	MB (0,15m)	0,35								
	ABGE (0,3m)	0,3								
	Fundação (2,5m)	0,35								
	Camada Rígida	0,35								
Módulos de deformabilidade	BBD+BB (0,09m)	700								
	MB (0,15m)	800								
	ABGE (0,3m)	273								
	Fundação (2,5m)	105								
	Camada Rígida	3000								
Deflexões calculadas (BISAR)		609,9	314,2	242,7	191,6	122,9	80,12	52,45	34,23	22,12
RMS		17,0%								



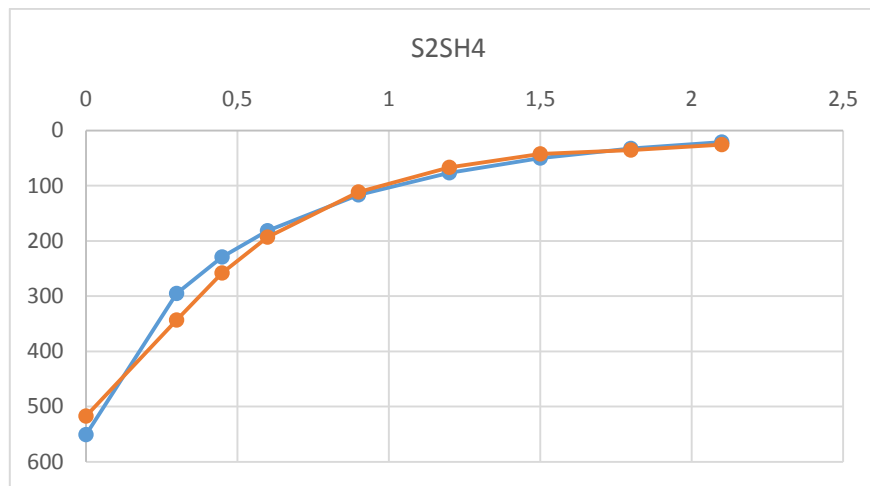
SH3

		G1 (0m)	G2 (0,3m)	G3(0,45m)	G4 (0,6m)	G5 (0,9m)	G6 (1,2m)	G7 (1,5m)	G8 (1,8m)	G9 (2,1m)
Deflexão Característica		590,9	451,3	369,8	292,7	183,3	114,4	71,4	48,5	35,8
Linha de tendência	Equação 4º grau	$y = -61,503x^4 + 247,56x^3 - 149,7x^2 - 473,95x + 593,13$								
	R	$R^2 = 0,9994$								
	y=0	x= 3,3m								
Coeficiente de Poisson	BBD+BB (0,09m)	0,35								
	MB (0,15m)	0,35								
	ABGE (0,3m)	0,3								
	Fundação (2,5m)	0,35								
	Camada Rígida	0,35								
Módulos de deformabilidade	BBD+BB (0,09m)	1100								
	MB (0,15m)	1000								
	ABGE (0,3m)	208								
	Fundação (3m)	80								
	Camada Rígida	3000								
Deflexões calculadas (BISAR)		659,3	398,6	320,5	259,5	172,7	116,6	79,35	54,22	37,03
RMS		9,9%								



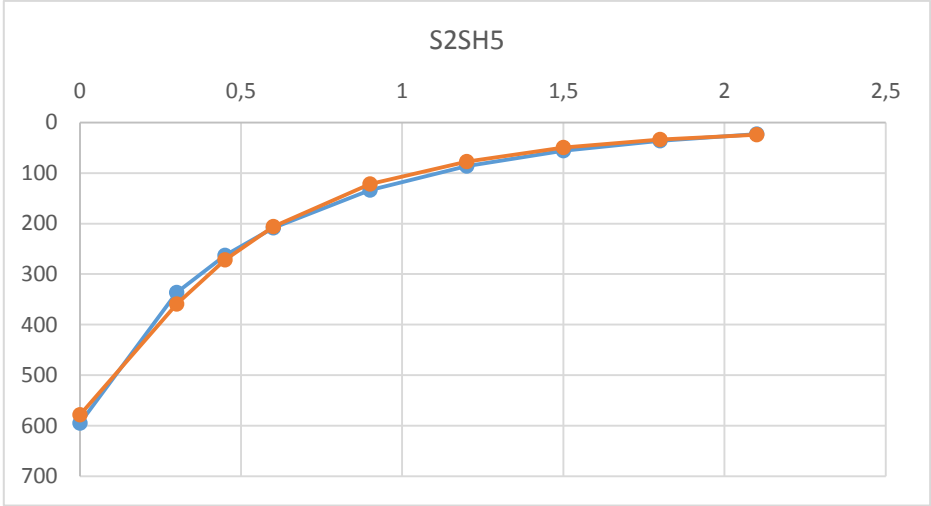
S2SH4

		G1 (0m)	G2 (0,3m)	G3(0,45m)	G4 (0,6m)	G5 (0,9m)	G6 (1,2m)	G7 (1,5m)	G8 (1,8m)	G9 (2,1m)
Deflexão Característica		517,0	343,4	257,9	193,3	111,5	66,4	42,6	35,2	25,8
Linha de tendência	Equação 4º grau	$y = -23,132x^4 + 28,951x^3 + 259,35x^2 - 693,33x + 518,93$								
	R	$R^2 = 0,9999$								
	y=0	$x = 2,6m$								
Coeficiente de Poisson	BBD+BB (0,09m)	0,35								
	MB (0,15m)	0,35								
	ABGE (0,3m)	0,3								
	Fundação (2,5m)	0,35								
	Camada Rígida	0,35								
Módulos de deformabilidade	BBD+BB (0,09m)	900								
	MB (0,15m)	900								
	ABGE (0,3m)	287								
	Fundação (2,5m)	110								
	Camada Rígida	3500								
Deflexões calculadas (BISAR)		551,1	294,9	228,9	181,3	116,8	76,36	50,06	32,69	21,1
RMS		12,0%								



SH5

		G1 (0m)	G2 (0,3m)	G3(0,45m)	G4 (0,6m)	G5 (0,9m)	G6 (1,2m)	G7 (1,5m)	G8 (1,8m)	G9 (2,1m)
Deflexão Característica		578,40	359,50	271,72	205,72	121,73	77,09	49,23	33,65	24,17
Linha de tendência	Equação 4º grau	$y = -97,61x^3 + 496,38x^2 - 876,78x + 577,88$								
	R	$R^2 = 0,9999$								
	y=0	x= 2,3m								
Coeficiente de Poisson	BBD+BB (0,09m)	0,35								
	MB (0,15m)	0,35								
	ABGE (0,3m)	0,3								
	Fundação (2,5m)	0,35								
	Camada Rígida	0,35								
Módulos de deformabilidade	BBD+BB (0,09m)	1000								
	MB (0,15m)	900								
	ABGE (0,3m)	247								
	Fundação (2,5m)	95								
	Camada Rígida	1500								
Deflexões calculadas (BISAR)		595,1	336,3	262,7	208,4	133,6	86,47	55,89	35,82	22,58
RMS		8,0%								



Anexo VII

pen25 - penetração a 25°C	15
Tab -temperatura de amolecimento (°C) determinada pelo método so anel e bola)	68
vt- velocidade média da corrente do tráfego de pesados (Km/h)	50
tc - tempo de carregamento (s)	0,02
pen25r	9,75
Tabr	73,1
IPen - índice de penetração do betume;	0,003
Temperatura de serviço (°C)	22,2
Sb- rigidez do betume (MPa);	165,83

γ_a -peso específico do agregado (KN/m ³)	26
γ_b - peso específico do betume (KN/m ³)	10,4
tb- percentagem de betume	5
n- porosidade (%)	5
Vb	10,56%
Va	84,44%
Sm108	10,16
Sm3109	10,60
S68	0,64
S89	0,34

A	10,229
E	16 962 MPa